

**ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ**

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ**

**ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**Επιβλέπων: ΠΕΤΡΟΣ Γ. ΒΕΡΝΑΔΟΣ, Καθηγητής**

**ΚΑΛΥΨΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΟΡΕΙΝΟΥ ΚΑΤΑΦΥΓΙΟΥ ΜΕ  
ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**



**Πτυχιακή Εργασία:**  
**ΠΡΟΚΟΠΑΚΗΣ Γ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ (Α.Μ. 35280)**  
**ΧΑΛΚΙΟΠΟΥΛΟΣ Α. ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ (Α.Μ. 32257)**

**ΑΙΓΑΛΕΩ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2012**

.....  
**Copyright** © Αλέξανδρος Γ. Προκοπάκης, Ευάγγελος Α. Χαλκιάπουλος 2012  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανώτατου Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

*Άντρας! κι ή μοίρα ό,τι κι ά θέλει άς γράφει*

*Χ.Ε*

*Κι ας ρίχνει απόψε τη βροχή κι ας έχει καταιγίδα,  
σε μια γωνιά του ουρανού θα βγαίνει ηλιαχτίδα.*

*Π. Α*

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια ο τομέας των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) αρχίζει και κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος στην καθημερινότητα του ανθρώπου. Η σωρεία προβλημάτων που συνεπάγεται η χρήση τους όπως η διαφαινόμενη εξάντληση των αποθεμάτων τους, τα τεράστια οικολογικά προβλήματα, η διαθεσιμότητα τους καθώς και τα αλλοπρόσαλλα σκαμπανεβάσματα της τιμής των συμβατικών μορφών ενέργειας ωθούν την παγκόσμια κοινότητα στην πεποίθηση ότι οι ΑΠΕ αποτελούν την μοναδική αυτή τη στιγμή λύση στο τομέα της ενέργειας.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στις δύο πιο διαδεδομένες μορφές ΑΠΕ: την ηλιακή και την αιολική. Πιο συγκεκριμένα η εργασία πραγματεύεται την μελέτη και σχεδίαση ενός συστήματος που συνδυάζει τις δύο τεχνολογίες δηλαδή ένα υβριδικό σύστημα ανεμογεννήτριας-φωτοβολταϊκών, με πηγή εφεδρείας μια ντιζελογεννήτρια. Το σύστημα αυτό προορίζεται να εξυπηρετεί τις ενεργειακές ανάγκες το ορειβατικού καταφυγίου Φλαμπούρι Πάρνηθας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Για το λόγο αυτό έγινε μια ενδελεχής έρευνα πάνω στο ορειβατικό καταφύγιο και τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει όπως το δυσπρόσιτο της περιοχής και οι ακραίες κλιματολογικές συνθήκες. Επίσης μελετήθηκαν οι ΑΠΕ που θα χρησιμοποιηθούν κατά πόσο μπορούν να ανταπεξέλθουν στην τροφοδότηση του με ηλεκτρική ενέργεια κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες, όπως επίσης και η διαστασιολόγηση τους για το εν λόγω σύστημα.

Αναλυτικότερα η πτυχιακή διαρθρώνεται ως εξής: Το **κεφάλαιο 1** αποτελεί την εισαγωγή όπου αναλύονται περιληπτικά οι συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Τα **κεφάλαια 2,3,4,5,6 και 7** αποτελούν τη θεωρητική διερεύνηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Περιγράφεται η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών στην πάροδο του χρόνου, η ηλιακή ακτινοβολία και ζητήματα που έχουν να κάνουν με τη φύση του φωτός και του ήλιου, γίνεται ανάλυση του φωτοβολταϊκού φαινομένου και των διαφόρων τύπων φωτοβολταϊκών συλλεκτών, και τέλος αναφέρονται οι κατηγορίες των φωτοβολταϊκών συστημάτων και οι βασικοί υπολογισμοί μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Στα **κεφάλαια 8,9,10,11,12 και 13** αναλύεται η αιολική ενέργεια. Η ιστορική εξέλιξη των αιολικών συστημάτων, το αιολικό δυναμικό, οι τύποι και τα υποσυστήματα των ανεμοκινητήρων περιγράφονται διεξοδικά. Ακόμη γίνεται αναφορά στο μαθηματικό υπόβαθρο που συνοδεύει τα φαινόμενα του ανέμου και των ανεμοκινητήρων.

Στο **κεφάλαιο 14** περιγράφονται οι βασικές αρχές του κινητήρα Diesel και στο **15** παρουσιάζεται το ορειβατικό καταφύγιο της μελέτης μας.

Το κύριο μέρος της εργασίας ολοκληρώνεται με τα **κεφάλαια 16,17 και 18**. Εδώ παρουσιάζεται η μελέτη που πραγματοποιήθηκε και ο σχεδιασμός του υβριδικού συστήματος. Γίνεται διαστασιολόγηση του φωτοβολταϊκού συστήματος και της ανεμογεννήτριας και περιγράφεται ολοκληρωμένο το υβριδικό σύστημα και ο τρόπος λειτουργίας του.

Η πτυχιακή εργασία ολοκληρώνεται με τα **παραρτήματα** τα οποία περιέχουν τους πίνακες των μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν.

## Abstract

In recent years the field of Renewable Energy Sources (RES) is gaining increasing ground in the everyday life of man. The many problems associated with their use such as the looming depletion of reserves, huge ecological problems, the availability and the price swings erratically conventional energy urge the world community on the belief that renewables are the only solution at this time in the energy sector.

This thesis refers to the two most prevalent forms of renewable energy: solar and wind. Specifically, this work deals with the study and design a system that combines the two technologies that is a hybrid photovoltaic-wind turbine system with a source of backup diesel generator. The system is intended to serve the energy needs of the Parnitha mountain refuges Flampouri throughout the year.

For this reason there was a thorough research on the mountain lodge and unusual features such as the region inaccessible and extreme climatic conditions. We also studied the RES will be used whether they can cope with the supply of electricity under the specific conditions, as well as the sizing for this system.

Specifically, the thesis is structured as follows: Chapter 1 is an introduction which analyzes summarized the conventional and renewable energy.

Chapters 2,3,4,5,6 and 7 are the theoretical investigation of photovoltaic systems. Describes the evolution of PV over time, solar radiation and issues having to do with the nature of light and sun, an analysis of the photovoltaic effect and the different types of solar collectors, and finally listed the categories of photovoltaic systems and the basic calculations of a PV system.

In Chapters 8,9,10,11,12 and 13 analyzes the wind. The historical development of wind systems, wind power, types and subsystems of wind turbines are fully described. Also refers to the mathematical background accompanying phenomena of wind and wind turbines.

Chapter 14 describes the basic principles of Diesel Engine and 15 shows the mountain refuge of our study.

The main part of the work concludes with chapters 16,17 and 18. Here we present the study conducted and the design of the hybrid system. Is sizing the photovoltaic system and wind turbine and described the complete hybrid system and method of operation.

The thesis concludes with annexes which contain tables of sizes used.

## Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα της πτυχιακής εργασίας κ. Πέτρο Βερνάδο για την ευκαιρία που μας προσέφερε να ασχοληθούμε με την παρούσα πτυχιακή εργασία, και να την δημιουργήσουμε «εκ του μη όντος». Η συνεργασία μας σε όλα τα στάδια της συγγραφής ήταν άψογη, οι συμβουλές του υπερπολύτιμες, και η πόρτα του γραφείου του πάντα ανοικτή για οποιαδήποτε απορία μας. Θα θέλαμε επίσης να ευχαριστήσουμε την κ. Εριέττα Ζουντουρίδου για την βοήθειά της πάνω στα υβριδικά συστήματα, και όλους εκείνους που λιγότερο ή περισσότερο βοήθησαν στην ολοκλήρωση αυτού του βιβλίου.

## Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1</b> .....	<b>8</b>
<b>Εισαγωγή</b> .....	<b>8</b>
1.1 Οι συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	9
1.2 Οι πηγές ενέργειας σήμερα .....	9
1.2.1 Το κάρβουνο.....	10
1.2.2 Το πετρέλαιο .....	10
1.2.3 Η πυρηνική ενέργεια .....	11
1.3 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας .....	11
1.3.1 Υδατόπτωση .....	12
1.3.2 Ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκών κινήσεων και θαλάσσιων ρευμάτων .....	13
1.3.3 Βιομάζα.....	14
1.3.4 Γεωθερμική ενέργεια .....	15
1.3.5 Αιολική ενέργεια .....	15
1.3.6 Φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια .....	18
<b>Κεφάλαιο 2</b> .....	<b>20</b>
<b>Η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών</b> .....	<b>20</b>
2.1 Ιστορική Αναδρομή.....	22
2.2 Εξέλιξη απόδοσης και κόστους των φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	26
2.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ελλάδα.....	28
2.4 Ηλιακή Ενέργεια .....	30
2.5 Παθητικά ηλιακά συστήματα.....	31
2.7 Φωτοβολταϊκά συστήματα .....	34
<b>Κεφάλαιο 3</b> .....	<b>36</b>
<b>Ηλιακή Ακτινοβολία</b> .....	<b>36</b>
3.1 Ηλιακή ακτινοβολία και η Ένταση της .....	37
3.2 Η δομή του Ήλιου .....	37
3.3 Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας .....	39
3.4 Διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	41
3.5 Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας.....	43
3.6 Ηλιακή γεωμετρία .....	44
3.7 Προσανατολισμός του συλλέκτη.....	46
3.8 Βέλτιστη κλίση του συλλέκτη .....	48



3.9 Προσανατολισμός του συλλέκτη ως προς τον αληθή νότο .....	49
3.10 Όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας .....	49
3.11 Ηλιακή ακτινοβολία στη χώρα μας .....	52
<b>Κεφάλαιο 4 .....</b>	<b>54</b>
<b>Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο .....</b>	<b>54</b>
4.1 Ημιαγωγοί.....	55
4.2 Ημιαγωγοί πρόσμειξης.....	58
4.3 Επαφή ημιαγωγών τύπου p-n .....	59
4.4 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο .....	60
4.5 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ΦΒ στοιχείου.....	62
4.6 Τάση ανοικτού κυκλώματος – ρεύμα βραχυκύκλωσης .....	64
4.7 Ηλεκτρική συμπεριφορά φωτιζόμενου ΦΒ στοιχείου .....	65
4.8 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	66
4.9 Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος.....	68
4.10 Καμπύλη φόρτου .....	68
4.11 Πρότυπες συνθήκες ελέγχου – ισχύς αιχμής φωτο-βολταϊκού στοιχείου .....	70
4.12 Παράγων πλήρωσης FF φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	71
4.13 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	71
<b>Κεφάλαιο 5 .....</b>	<b>75</b>
<b>Φωτοβολταϊκοί Συλλέκτες .....</b>	<b>75</b>
5.1 Φωτοβολταϊκός συλλέκτης πυριτίου (πλαίσιο) .....	76
5.2 Ονομαστική ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου .....	78
5.3 Απόδοση ΦΒ πλαισίου και παράγοντες που την επηρεάζουν .....	79
5.4 Σημείο λειτουργίας ΦΒ πλαισίου κάτω από διαφορετικές πυκνότητες ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας .....	81
5.5 Διάκριση φωτοβολταϊκών πλαισίων .....	82
5.6 Τρόποι σύνδεσης φωτοβολταϊκών πλαισίων .....	83
5.7 Πλεονεκτήματα φωτοβολταϊκών συλλεκτών.....	87
<b>Κεφάλαιο 6 .....</b>	<b>89</b>
<b>Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Συστημάτων .....</b>	<b>89</b>
6.1 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα .....	90
6.2 Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα (με δυνατότητα κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας).....	92
6.3 Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα (η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται εξολοκλή-ρου στο κεντρικό δίκτυο).....	93

6.4 Υβριδικό σύστημα αυτόνομο .....	95
6.5 Υβριδικό σύστημα διασυνδεδεμένο .....	97
6.6 Ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες).....	97
6.7 Συσσωρευτές μολύβδου ( $P_b - H_2SO_4$ ) .....	98
6.8 Συνδεσμολογία συσσωρευτών.....	101
6.9 Ελεγκτής φόρτισης-εκφόρτισης .....	104
6.10 Τύποι ελεγκτών φόρτισης-εκφόρτισης .....	105
6.11 Μετατροπείς (converters).....	107
6.12 Μετατροπέας DC – DC.....	108
6.13 Μετατροπέας DC-AC (inverter) .....	108
6.14 Μετατροπείς DC-AC δικτύου.....	109
<b>Κεφάλαιο 7 .....</b>	<b>115</b>
<b>Υπολογισμοί Φωτοβολταϊκής Εγκατάστασης .....</b>	<b>115</b>
7.1 Μελέτη φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.....	116
7.2 Εκτίμηση του μεγέθους των ενεργειακών αναγκών .....	117
7.3 Εκτίμηση του συνολικού βαθμού απόδοσης του Φ/Β συστήματος.....	119
<b>Κεφάλαιο 8 .....</b>	<b>121</b>
<b>Αιολική Ενέργεια .....</b>	<b>121</b>
8.1 Ιστορική αναδρομή .....	123
8.2 Οι Αιολικές μηχανές στην Ελλάδα.....	129
8.3 Μειονεκτήματα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας .....	132
8.4 Πλεονεκτήματα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας .....	134
8.5 Εφαρμογές των ανεμοκινητήρων σήμερα .....	137
8.5.1 Εφαρμογές άντλησης .....	138
8.5.2 Εφαρμογές θερμότητας .....	138
8.5.3 Εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρισμού .....	138
8.6 Προοπτικές εφαρμογής ανεμοκινητήρων στην Ελλάδα .....	139
8.7 Κινητικότητα στον διεθνή και ελληνικό χώρο.....	141
<b>Κεφάλαιο 9 .....</b>	<b>150</b>
<b>Το Αιολικό Δυναμικό .....</b>	<b>150</b>
9.1 Γενικά για την ατμόσφαιρα .....	151
9.2 Ο Άνεμος.....	153
9.3 Χαρακτηριστικές παράμετροι του ανέμου .....	159
9.4 Γενικά για το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα.....	163

9.5 Ένταση του ανέμου .....	169
9.6 Μέτρηση έντασης ανέμου .....	172
9.7 Διεύθυνση του ανέμου .....	174
9.8 Καθορισμός της διεύθυνσης του ανέμου .....	175
9.9 Στροβιλισμός και αναταράξεις του αέρα .....	177
9.10 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος .....	179
9.11 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο .....	181
9.12 Η τύρβη του ανέμου .....	182
9.12.1 Φάσμα τύρβης .....	184
9.12.2 Ριπές ανέμου .....	185
9.13 Χωρική μεταβολή της έντασης του ανέμου .....	186
9.14 Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους .....	188
9.15 Επίδραση επιφανειακών εμποδίων .....	189
9.16 Επίδραση του τοπογραφικού ανάγλυφου της περιοχής .....	192
9.17 Επεξεργασία των ανεμολογικών δεδομένων .....	194
9.17.1 Ετήσια καμπύλη διάρκειας .....	194
9.17.2 Ετήσια καμπύλη συχνότητας .....	194
9.17.3 Καμπύλες διαστημάτων νηνεμίας .....	195
9.18 Θεωρητικός υπολογισμός κατανομής συχνοτήτων ταχύτητας ανέμου .....	195
9.18.1 Μέθοδος υπολογισμού των παραμέτρων $k$ και $c$ .....	196
9.18.2 Ενέργεια και ισχύς ανέμου .....	199
9.18.3 Διανομή Rayleigh .....	199
9.19 Εκτίμηση του αιολικού δυναμικού της Ελλάδας .....	200
9.19.1 Μεθοδολογία .....	200
9.19.2 Χάραξη καμπυλών ισοταχυτήτων ανέμου .....	200
9.19.3 Εκτίμηση του αριθμού των ανεμογεννητριών .....	203
<b>Κεφάλαιο 10 .....</b>	<b>209</b>
<b>Τύποι και Υποσυστήματα Ανεμοκινητήρων .....</b>	<b>209</b>
10.1 Κατάταξη αιολικών μηχανών .....	210
10.2 Μηχανές κατακόρυφου άξονα .....	214
10.3 Βασικά μέρη αιολικών μηχανών κατακόρυφου άξονα .....	215
10.3.1 Ανεμοκινητήρας τύπου Darrieus .....	215
10.3.2 Ανεμοκινητήρας τύπου Savonius .....	218
10.4 Μηχανές οριζόντιου άξονα .....	219

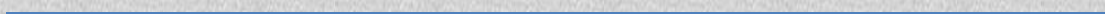
10.5 Περιγραφή μηχανής οριζόντιου άξονα.....	223
10.6 Χαρακτηριστικά ανεμοκινητήρων οριζόντιου άξονα.....	228
10.6.1 Δρομέας.....	228
10.6.2 Σύστημα αύξησης στροφών (Σ.Α.Σ).....	232
10.6.3 Σύστημα πέδησης άξονα δρομέα.....	233
10.6.4 Ελαστικοί σύνδεσμοι.....	235
10.6.5 Σύστημα προσανατολισμού .....	235
10.6.6 Κύριος άξονας.....	237
10.6.7 Σύστημα γείωσης Α/Γ .....	237
10.6.8 Αντικεραυνική προστασία της Α/Γ .....	237
10.6.9 Πύργος.....	238
10.6.10 Έδρανα κύλισης .....	239
10.6.11 Ηλεκτρικός ηλεκτρονικός πίνακας .....	240
10.6.12 Βάση στήριξης (θεμελίωση) .....	240
10.7 Θεμελίωση – τοποθέτηση – στήριξη Α/Γ .....	241
<b>Κεφάλαιο 11.....</b>	<b>245</b>
<b>Ηλεκτρικό σύστημα – Τύποι γεννητριών .....</b>	<b>245</b>
11.1 Ηλεκτρικό σύστημα – Τύποι γεννητριών .....	246
11.2 Τύποι γεννητριών .....	247
11.2.1 Ασύγχρονες γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού .....	247
11.2.2 Ασύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα .....	248
11.2.3 Σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα .....	251
11.2.4 Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών .....	251
<b>Κεφάλαιο 12.....</b>	<b>253</b>
<b>Συστήματα Ανεμογεννητριών .....</b>	<b>253</b>
12.1 Καθορισμός της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ.....	254
12.2 Καθορισμός της ταχύτητας στην οποία η Α/Γ αρχίζει να λειτουργεί .....	255
12.3 Καθορισμός της ταχύτητας διακοπής λειτουργίας της Α/Γ .....	255
12.4 Ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος.....	256
12.5 Βασικές προϋποθέσεις για την εγκατάσταση αιολικού συστήματος μικρής ισχύος .....	257
12.6 Αιολικά συστήματα ανεμογεννητριών μικρής ισχύος .....	258
12.6.1 Αυτόνομα αιολικά συστήματα .....	258
12.6.2 Διασυνδεδεμένα αιολικά συστήματα .....	259

12.6.3 Διασυνδεδεμένα αιολικά συστήματα με δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.....	259
12.6.4 Υβριδικά συστήματα με ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος .....	260
12.6.5 Κατάταξη ανεμογεννητριών μικρής ισχύος .....	261
12.7 Ανεμογεννήτριες μέσης και μεγάλης ισχύος .....	262
12.8 Βασικές προϋποθέσεις για την εγκατάσταση αιολικού συστήματος με Α/Γ μέσης ή μεγάλης ισχύος.....	265
12.9 Διάταξη Α/Γ αιολικού πάρκου.....	271
12.10 Μετρήσεις θορύβου στην ανεμογεννήτρια .....	272
12.11 Μετρήσεις θορύβου από Α/Γ στη θέση του αποδέκτη.....	273
<b>Κεφάλαιο 13.....</b>	<b>274</b>
<b>Επιλογή θέσης εγκατάστασης ανεμογεννήτριας .....</b>	<b>274</b>
13.1 Οικονομική αξία .....	275
13.2 Επιδράσεις στο περιβάλλον .....	275
13.3 Οπτικοαισθητική επίδραση.....	276
13.4 Επιδράσεις στα πουλιά .....	276
13.5 Ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση .....	276
13.6 Γενικοί κανονισμοί και περιορισμοί στη χρησιμοποίηση της γης .....	276
13.7 Μετεωρολογικά προβλήματα .....	276
13.8 Παγετός .....	276
13.9 Υπερβολικά ισχυροί άνεμοι .....	277
13.10 Τύρβη.....	277
13.11 Υλικά μεταφερόμενα από τον αέρα.....	277
13.12 Η σταθερότητα των ανέμων.....	278
13.13 Αξιοπιστία αιολικών δεδομένων – διάρκεια παρατηρήσεων .....	278
13.14 Αποδοχή από τη πλευρά του κοινού .....	278
13.15 Υπολογισμός της Μέσης Ετησίως Παραγόμενης Ενέργειας .....	279
13.16 Διάρκεια ζωής ανεμογεννήτριας.....	280
<b>Κεφάλαιο 14.....</b>	<b>281</b>
<b>Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος .....</b>	<b>281</b>
14.1 Ιστορική αναδρομή .....	282
14.2 Υπάρχουσες Τεχνολογίες.....	283
14.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά.....	284
<b>Κεφάλαιο 15.....</b>	<b>287</b>

<b>Το Ορειβατικό Καταφύγιο Φλαμπούρι .....</b>	<b>287</b>
15.1 Γενικά περί Καταφυγίων .....	288
15.2 Το ορειβατικό καταφύγιο Φλαμπούρι.....	290
<b>Κεφάλαιο 16.....</b>	<b>294</b>
<b>Υπολογισμός Φωτοβολταϊκού Συστήματος .....</b>	<b>294</b>
16.1 Εισαγωγή .....	295
16.2 Ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης κατοικίας .....	296
16.3 Υπολογισμός Φωτοβολταϊκού Συστήματος .....	302
16.4 Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών συλλεκτών με βέλτιστη κλίση 55°, για όλο το χρόνο. .....	310
16.5 Υπολογισμός χωρητικότητας συσσωρευτών .....	314
16.6 Επιλογή Ρυθμιστή Φόρτισης .....	317
16.7 Επιλογή μετατροπέα τάσης (Inverter) .....	320
16.8 Υπολογισμός διατομής καλωδίων.....	322
<b>Κεφάλαιο 17.....</b>	<b>324</b>
<b>Υπολογισμός Ονομαστικής Ισχύος Ανεμογεννήτριας .....</b>	<b>324</b>
17.1 Διαστασιολόγηση Ανεμογεννήτριας .....	325
17.2 Μεθοδολογία καθορισμού της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας.....	328
17.3 Διαδοχικά βήματα προσδιορισμού της ονομαστικής ισχύος ΑΓ για πλήρη κάλυψη φορτίου. ....	338
<b>Κεφάλαιο 18.....</b>	<b>348</b>
<b>Υβριδικό Σύστημα .....</b>	<b>348</b>
18.1 Επιλογή Ηλεκτροπαραγωγού Ζεύγους (H/Z) .....	349
18.2 Τελικό Υβριδικό Σύστημα .....	351
18.3 Λειτουργία του συστήματος .....	352
<b>Παράρτημα 1.....</b>	<b>353</b>
<b>Στοιχεία Μηνιαίας Ακτινοβολίας .....</b>	<b>353</b>
<b>Παράρτημα 2.....</b>	<b>369</b>
<b>Κλιματολογικά δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Πάρνηθας .....</b>	<b>369</b>
<b>Παράρτημα 3.....</b>	<b>382</b>
<b>Νομοθεσία ΑΠΕ .....</b>	<b>382</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>386</b>

Κεφάλαιο 1

# Εισαγωγή



## 1.1 Οι συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι πρόγονοι μας στα πρώτα χρόνια της ζωής τους, στη γη, δε γνώριζαν πολλά πράγματα για τη χρήση της ενέργειας. Χρησιμοποιούσαν μόνο τη μυϊκή τους δύναμη και αργότερα τη μυϊκή δύναμη των ζώων. Στην πορεία του χρόνου διαπίστωσαν ότι ο άνεμος, η φωτιά και το νερό είχαν ενέργεια που μπορούσαν να την εκμεταλλευτούν. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε τους ανθρώπους στο σχεδιασμό και την δημιουργία εργαλείων και μηχανών με τα οποία μείωσαν τον προσωπικό τους μόχθο (ανεμόμυλοι, υδραυλικοί τροχοί κ.α.). Αρκετά αργότερα εμφανίστηκαν οι θερμικές μηχανές και μετά η ατμομηχανή. Στη συνέχεια η τεχνολογική εξέλιξη ήταν ραγδαία.

Στα νεότερα χρόνια, το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας παράγεται από τη χρήση καύσιμων υλών, προερχόμενων από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ιδιαίτερα το αργό πετρέλαιο και τα προϊόντα του αποτελούν μία από τις βασικότερες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σγαθών σε όλο τον κόσμο. Η αλόγιστη όμως χρήση τέτοιων πηγών ενέργειας έχει προκαλέσει αρνητικά αποτελέσματα στην ατμόσφαιρα και γενικότερα στο περιβάλλον.

Τα τελευταία χρόνια οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες (βιομηχανίες, αυτοκίνητα κ.α.), έχουν αυξήσει σημαντικά τις συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου με αποτέλεσμα την αύξηση της απορροφούμενης ακτινοβολίας και την επακόλουθη θερμοκρασιακή μεταβολή. Υπολογίζεται ότι η μέση θερμοκρασία της Γης έχει αυξηθεί κατά 0,5 με 0,6 °C από το 1880, λόγω της έξαρσης του φαινομένου του θερμοκηπίου και μέχρι το έτος 2100, εάν δεν ληφθούν μέτρα, η αύξηση της θερμοκρασίας θα είναι από 1,5 έως 4,5 °C.

Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε διάσκεψη στο Ρίο, το καλοκαίρι του 1992. Εκεί προσδιορίστηκε το πρόβλημα στις πραγματικές του διαστάσεις, προδιαγράφοντας άμεσες ενέργειες και επεμβάσεις. Τα επιστημονικά στοιχεία για τη σχέση της βιομηχανικής δραστηριότητας με τις αρνητικές κλιματικές αλλαγές, την οικολογική υποβάθμιση και το δυσοίωνο μέλλον του πλανήτη μας, ήταν συντριπτικά. Παρά ταύτα, οι τρόποι αντιμετώπισης και ο έλεγχος εφαρμογής τους δεν βρήκαν όλες τις κυβερνήσεις σύμφωνες. Αιτία; Οι επαγόμενες συνέπειες από τον περιορισμό της δράσης της βιομηχανίας των αναπτυγμένων χωρών. Στην επόμενη διάσκεψη στο Κιότο της Ιαπωνίας το Δεκέμβριο του 1997, υπεγράφη η πρώτη συμφωνία σε παγκόσμιο επίπεδο (Πρωτόκολλο του Κιότο) και τέθηκε τελικά σε ισχύ στις 16 φεβρουαρίου του 2005. Δυστυχώς, η εφαρμογή του δεν βρίσκει όλα τα κράτη πρόθυμα να ανταποκριθούν στις δεσμεύσεις που προβλέπει. Ο στόχος να μειωθούν οι εκπομπές ρυπογόνων αερίων μέχρι το 2012, κατά 5,2%, σε σχέση με το 1990, δεν φαίνεται, με τα σημερινά δεδομένα, εφικτός.

## 1.2 Οι πηγές ενέργειας σήμερα

Το σύνολο των πηγών ενέργειας, που ο άνθρωπος έχει στη διάθεση του διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες. Στις πηγές εκείνες που βασίζονται σε υπάρχοντα αποθέματα μέσα στο στερεό φλοιό της Γης, με συγκεκριμένη διάρκεια ζωής και σ' αυτές που καθημερινά που καθημερινά και αέναα μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης.

Στις πρώτες ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβου-



νο), αναφερόμενα και ως συμβατικά καύσιμα και η χαρακτηριστικά μη ήπια μορφή ενέργειας, η πυρινική ενέργεια.

Οι δευτερες έχουν βασική τους προέλευση από τον Ήλιο. Η ακτινοβολούμενη από τον Ήλιο ενέργεια, που φτάνει στη Γη, εκτός από τη γενικότερη συμβολή της στη δημιουργία, ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας, δίδει ακατάπαυστα ενέργεια, με διάφορες μορφές αξιοποίησης. Άμεσα θερμαίνει, εξατμίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού και συντηρεί τον γνωστό φυσικό κύκλο, δημιουργώντας τις λίμνες και τα ποτάμια, που αποτελούν πρόσθετη πηγή ενέργειας (υδατοπτώσεις). Θέτει σε κίνηση τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας (αιολική ενέργεια), δημιουργεί τα κύματα (ενέργεια κυμάτων) και συμβάλλει στη δημιουργία των θαλασσιών ρευμάτων. Απορροφούμενη αυτή η ενέργεια του Ήλιου από συνδυασμένα υλικά, παράγει ηλεκτρισμό (φωτοβολταϊκό φαινόμενο). Συμβάλλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας, η καύση δε των φυτικών προϊόντων παράγει ενέργεια (βιομάζα).

Οι κύριες πηγές ενέργειας, που χρησιμοποιούνται σήμερα, είναι:

### 1.2.1 Το κάρβουνο

Αποτέλεσε για πολλά χρόνια μέχρι σήμερα, την κύρια καύσιμη ύλη. Σ' αυτό βασίστηκε κατά κύριο λόγο, η βιομηχανική επανάσταση. Μεγάλο μέρος της σημερινής παγκόσμιας βιομηχανικής παραγωγής βασίζεται στην ενέργεια από την καύση του ορυκτού άνθρακα.

### 1.2.2 Το πετρέλαιο

Ήταν γνωστό από την αρχαιότητα, στους Εβραίους και τους Αιγύπτιους. Στη Δύση, γινόταν περιορισμένη χρήση του σε φωτισμό και την ιατρική, μέχρι το τέλος του 15<sup>ου</sup> αιώνα, οπότε άρχισε η βιομηχανική του εκμετάλλευση. Η παγκόσμια παραγωγή του εντατικοποιήθηκε από τα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα, ενώ από τα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα, οι ρυθμοί εκμετάλλευσης πήραν εκρηκτικές διαστάσεις. Σήμερα, μετά από δύο πε-τρελαϊκές κρίσεις (1973 και 1979) και τη διαπίστωση ορατών πλέον επιπτώσεων στο περιβάλλον μας, συνειδητοποιούμε την ανάγκη αλλαγής του τρόπου ζωής μας και αναζήτησης λύσεων από το χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παράλληλα, αποκτά ιδιαίτερο νόημα η εφαρμογή αυστηρότερης πολιτικής στον τομέα της ορθολογικής χρήσης και εξοικονόμησης ενέργειας.

Τα συμβατικά καύσιμα καλύπτουν το 85% της καταναλισκόμενης ενέργειας στις αναπτυγμένες χώρες και το 55%, στις υπό ανάπτυξη. Στις τελευταίες, το ποσοστό χρήσης πετρελαίου, ως ενεργειακής πηγής, συνεχίζει να αυξάνει, ενώ στις αναπτυγμένες χώρες παρατηρείται τάση μείωσης του, με σταδιακή διεύδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εκτιμάται ότι τα υπάρχοντα αποθέματα των πηγών αυτών θα επαρκέσουν ακόμα για περίπου 200 χρόνια για το κάρβουνο, 60 χρόνια για το φυσικό αέριο και 50 χρόνια για το πετρέλαιο.

Η καύση του άνθρακα, του πετρελαίου και των παραγώγων του δίδει, ως άμεσα προϊόντα, το CO<sub>2</sub>, τα οξείδια του αζώτου και του θείου. Οι αυξημένες ποσότητες των αερίων αυτών, που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, αποτελούν πια

μόνιμη απειλή για το μέλλον μας, προκαλώντας ισχυρές κλιματικές αλλαγές και επιβαρυντική απόκλιση από τις κανονικές συνθήκες ισορροπίας του φαινομένου του θερμοκηπίου.

### 1.2.3 Η πυρηνική ενέργεια

Από το 1945 και μετά, προστέθηκε στις μεγάλης ισχύος πηγές ενέργειας, η πυρηνική. Η πυρηνική ενέργεια προορίζεται, στο βαθμό που έχει αναπτυχθεί σήμερα, κυρίως για παραγωγή ηλεκτρισμού βάσης, δηλαδή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σταθερής ισχύος χωρίς δυνατότητα κάλυψης των διακυμάνσεων ζήτησης. Καλύπτει το 6,5% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης και το 17% της παγκόσμιας παραγόμενης ηλ-εκτρικής ενέργειας. Η παραγόμενη παγκοσμίως ηλεκτρική ισχύς σε πυρηνικά εργ-οστάσια ανέρχεται σε ~375 GW, μέχρι και το 2011. Στην Ευρώπη ξεπερνά τα 195 GW, με τη Γαλλία στα 63,5 GW.

Στην πυρηνική ενέργεια αρχικά βασίστηκαν πολλές ελπίδες. Η Γαλλία είναι από τις χώρες που έδωσαν μεγάλη έμφαση στην ανάπτυξη της, χρησιμοποιώντας, κατά την περίοδο της δεκαετίας του 70, το μη πειστικό πια επιχείρημα της παραγωγής καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα αντιλαμβανόμαστε με απόγνωση, την αδυναμία μας να λύσουμε το πρόβλημα της ανεξέλεγκτης διασποράς των πυρηνικών όπλων ή της διασφαλισμένης αποθήκευσης των πυρηνικών αποβλήτων και αισθανόμαστε τρόμο για το ολοένα και πιο πιθανά πυρηνικά ατυχήματα. Από τα πιο σημαντικά εκείνο στον πυρηνικό σταθμό του Three Mile Island της Πενσυλβάνιας (Η.Π.Α), τον Απρίλιο του 1979, εκείνο στο Τσέρνομπιλ της Σοβιετικής Ένωσης, τον Απρίλιο του 1986, αλλά και το πιο πρόσφατο ατύχημα στην Φουκοσίμα της Ιαπωνίας στις 11 Μαρτίου του 2011. Τα ατυχήματα αυτά ανέδειξαν μία συνεχής απειλή, για το κόσμο μία φρίκη ανικανότητας να αντιμετωπίσει έναν ύπουλο και αόρατο εχθρό, που μόνιμα τον απειλεί με αφανισμό.

Το περιορισμένο των κοιτασμάτων του βασικού υλικού (ουράνιο 235), τα πυρηνικά απόβλητα και η απειλητική πιθανότητα ολοσχερούς καταστροφής του κόσμου μας, είτε από την υποτιθέμενη υπό έλεγχο πυρηνική αντίδραση είτε από την ανεξέλεγκτη διασπορά των πυρηνικών όπλων, βάζουν φρένο στην χρήση της.

Το σίγουρο είναι ότι οι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργούν ένα ρίσκο και είναι δεδομένο πια ότι πάντα θα υπάρχει μία πιθανή περίπτωση ατυχήματος με δραματικές συνέπειες για το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

## 1.3 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), έχουν κύρια γενεσιουργό αιτία την ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση εκείνη που αφορά στην ενέργεια των παλιπροϊκών κινήσεων που οφείλονται στη βαρυντική δράση, κυρίως της Σελήνης, πάνω στους υδάτινους όγκους που καλύπτουν την επιφάνεια της γης, καθώς και τη γεωθερμική,

όπου η ηλιακή ακτινοβολία παίζει δευτερεύοντα ρόλο.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναπληρώνονται μέσω των φυσικών κύκλων και θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες. Ο ήλιος, ο άνεμος, η γεωθερμία, τα ποτάμια, οι οργανικές ύλες, όπως το ξύλο και ακόμη τα απορρίμματα οικιακής και γεωργικής προέλευσης, είναι πηγές ενέργειας που η προσφορά τους δεν εξαντλείται ποτέ. Εξάλλου, η αξιοποίηση τους για την παραγωγή ενέργειας δεν επιβαρύνει το περιβάλλον. Η Ελλάδα διαθέτει αξιόλογο δυναμικό ΑΠΕ, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν μια πραγματική εναλλακτική λύση για την κάλυψη μέρους των ενεργειακών μας αναγκών, συνεισφέροντας στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικά καύσιμα, στην ελάττωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και στην ανάπτυξη αποκεντρωμένων περιοχών.

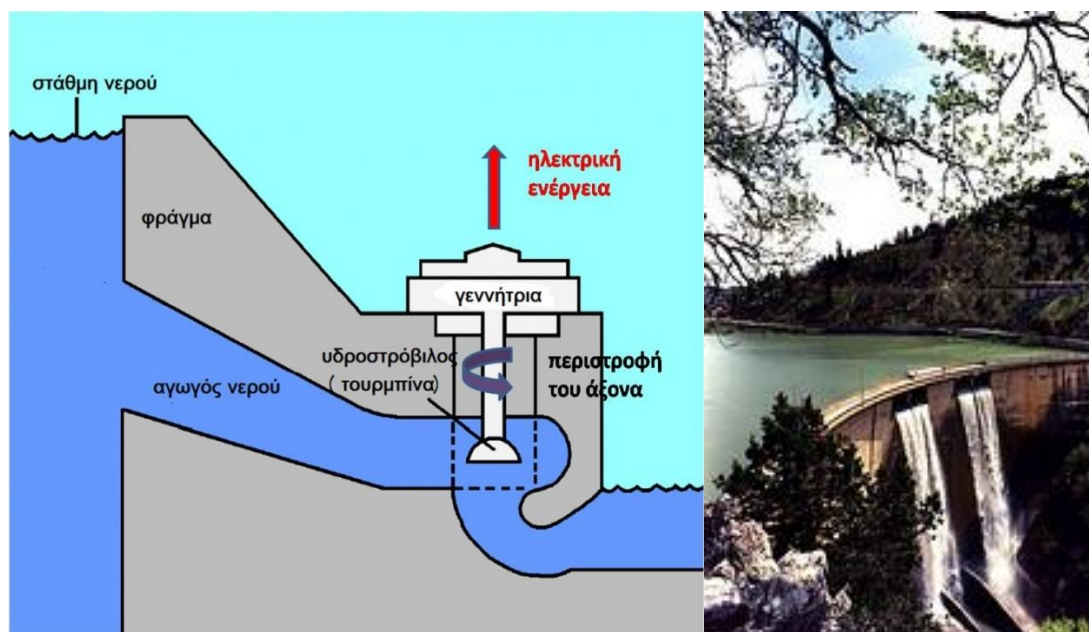
Οι μορφές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι:

### 1.3.1 Υδατόπτωση

Αποτελεί έναν από τους πιο φυσικούς τρόπους παραγωγής μεγάλης ισχύος, οικο-λογικά καθαρής, ηλεκτρικής ενέργειας, με ανανεώσιμη συμπεριφορά. Εκμεταλλευόμεστε την ύπαρξη φυσικών λεκανών συλλογής των ομβρίων υδάτων σε συγκεκριμένες περιοχές, με κατάλληλη εδαφική διαμόρφωση, κατασκευάζοντας φράγματα. Η υδατόπτωση κινεί υδροστρόβιλους, που με τη σειρά τους θέτουν σε κίνηση ηλεκτρογεννήτριες. Η δημιουργία τεχνητών λιμνών με φράγματα έχει περιορισμένη εφαρμογή λόγω των απαιτούμενων ειδικών εδαφικών χαρακτηριστικών. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις η κατασκευή ενός φράγματος, παρότι η περιοχή καλύπτει τα τεχνικά κριτήρια, μπορεί να προκαλέσει σημαντική οικολογική καταστροφή και ενδεχομένως μετακίνηση πληθυσμού, λόγω της κατάκλισης με νερό εκτεταμένων εύφορων και με ιδιαίτερη φυσική ομορφιά περιοχών. Η υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας καλύπτει, περίπου, το 7% της παγκόσμιας ενεργειακής παραγωγής.

Ανάλογα με το μέγεθος και την παραγόμενη ισχύ, τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια διακρίνονται σε:

- Μικρής κλίμακας: Είναι εγκαταστάσεις που, όπως υποδηλώνει το όνομα τους, παράγουν από 1 KW έως 1 MW ισχύος. Η βασική τους χρήση είναι η ηλεκτροδότηση μικρών οικισμών, (χωριών, κωμοπόλεων) ή μικρών εργοστασίων δευτερογενούς παραγωγής.
- Μεσαίας κλίμακας: Παράγουν μέχρι 20 MW ισχύος, είναι σχετικά χαμηλού κόστους κατασκευής ενώ είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα κατά την λειτουργία τους. Χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση είτε αστικών περιοχών είτε για τη λειτουργία μεγάλων παραγωγικών μονάδων με πολλές ενεργειακές απαιτήσεις.
- Μεγάλης κλίμακας: Παράγουν περισσότερα από 20 MW ισχύος και απαιτούν την κατασκευή μεγάλων φραγμάτων. Ένα από τα μεγαλύτερα εργοστάσια αυτού του τύπου είναι στο φράγμα Χούβερ στο Κολοράντο των ΗΠΑ, το οποίο έχει ισχύ 2.000 MW.

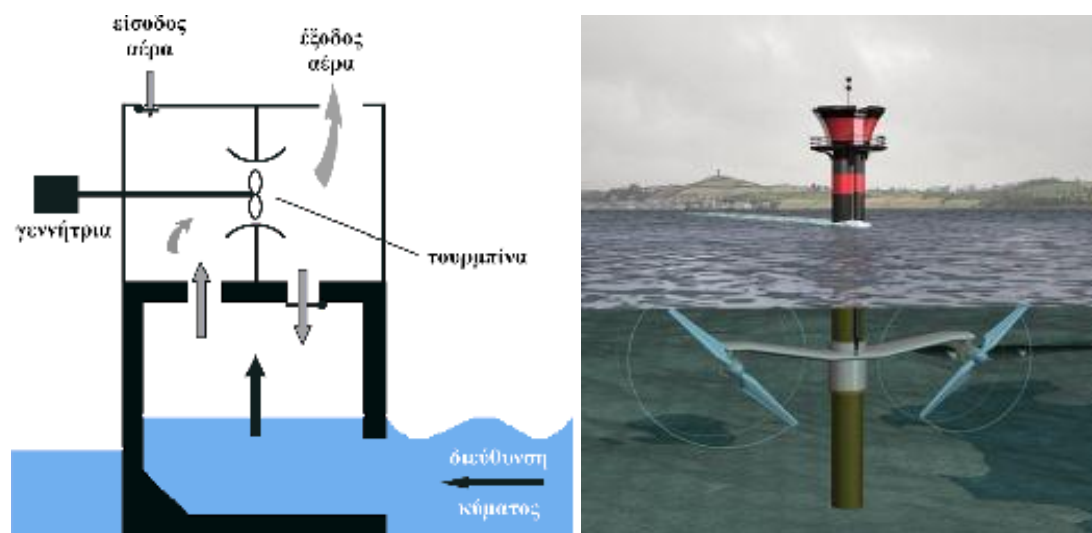


*Σχήμα 1.1* Πάνω αριστερά η γενική μορφή ενός υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Πάνω δεξιά ο υδροηλεκτρικός σταθμός Πλαστήρα με εγκαταστημένη ισχύ 130 MW, χαλύβδινου αγωγού πτώσης. Η υψομετρική διαφορά από το σημείο υδροληψίας στη λίμνη Πλαστήρα είναι 577 μέτρα.

### 1.3.2 Ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκών κινήσεων και θαλάσσιων ρευμάτων

Η παραγωγή ενέργειας από τα κύματα ή τις παλιρροϊκές κινήσεις, έχει αξιοποιηθεί σε συγκεκριμένες θέσεις, όπου το ύψος των κυμάτων και η διάρκεια κυματισμού καθώς και η ταχύτητα των θαλάσσιων ρευμάτων επιτρέπουν την ενεργειακή αξιοποίησή τους. Στη Βρετανία της Γαλλίας λειτουργεί από το 1966 σταθμός παραγωγής ηλ-εκτρικής ενέργειας ισχύος 240 MW. Εντυπωσιακό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυματισμό είναι η διάταξη με το όνομα Pelamis (είδος θαλάσσιου φιδιού). Η διάταξη που δείχνεται στη φωτογραφία του σχήματος 1.3, αποτελείται από τέσσερις κυλίνδρους, με δυνατότητα αρθρωτής κίνησης μεταξύ τους, σε κατακόρυφο επίπεδο. Υπό την επίδραση του κυματισμού αλλάζει η γωνία μεταξύ τους με αποτέλεσμα την άσκηση δυνάμεων σε έμβολα τοποθετημένα άνω και κάτω, στις πλευρές που συνδέονται μεταξύ τους. Έχει δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ισχύ 750 kW. Σε προχωρημένο πειραματικό στάδιο βρίσκεται επίσης η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με υποθαλάσσιες ηλεκτρογεννήτριες, όπως φαίνεται στη σχηματική παράσταση 1.2. Η μεγάλη πυκνότητα του νερού σε σχέση με την πυκνότητα του αέρα, καθιστά τις υποθαλάσσιες ηλεκτρογεννήτριες αποδοτικές, παρότι η ταχύτητα των θαλάσσιων ρευμάτων είναι αρκετά μικρότερη της τυπικής ταχύτητας των ανέμων. Η εφαρμογή τους, πάντως, πρόκειται να είναι περιορισμένη, σε θέσεις που υπάρχουν ισχυρά θαλάσσια ρεύματα (σχήμα 1.2). Μία άλλη ενδιαφέρουσα ιδέα που μελετάται, αφορά στην αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων σε ειδικές κατασκευές, στις οποίες

ενσωματώνεται ανεμογεννήτρια και μέρος των οποίων είναι βυθισμένο στη θάλασσα (σχήμα 1.2). Κατά τον κυματισμό, ο εισερχόμενος όγκος νερού συμπιέζει τον περιεχόμενο αέρα, ο οποίος, ρέοντας μέσω της κεντρικής χοάνης, θέτει σε περιστροφή τη φτερωτή της ανεμογεννήτριας. Η διάταξη των βαλβίδων εισόδου – εξόδου του αέρα, είναι τέτοια ώστε η ανεμογεννήτρια να περιστρέφεται κατά την ίδια φορά, ανεξάρτητα από τη φάση συμπίεσης ή εκτόνωσης του εσωτερικού αέρα, κατά τον κυματισμό.



**Σχήμα 1.2** Πάνω αριστερά σχηματική παράσταση συστήματος κίνησης ανεμογεννήτριας με συμπίεση του εσωτερικού αέρα στη διάταξη, με αξιοποίηση του κυματισμού. Πάνω δεξιά σχηματική παράσταση υποθαλάσσιας ηλεκτρογεννήτριας.



**Σχήμα 1.3** Το Pelamis σε λειτουργία. Το πρωτότυπο είναι τοποθετημένο στο European Marine Energy Center, στο Orkney της Σκωτίας.

### 1.3.3 Βιομάζα

Βιομάζα, ονομάζουμε οποιαδήποτε σχετικά νέα οργανική ύλη που προέρχεται από φυτά ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης. Η ενέργεια από βιομάζα αντλείται από φυτικό και ζωικό υλικό, όπως ξύλο από τα δάση,

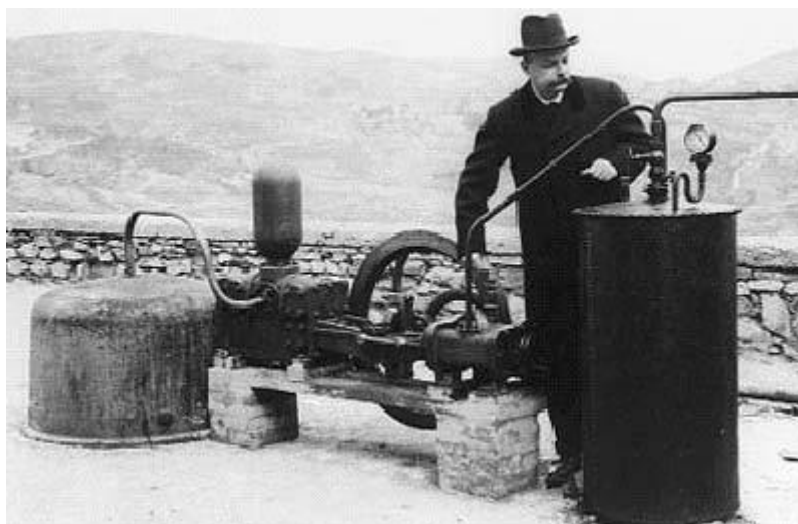
υπολείμματα από γεωργικές ή δασικές διαδικασίες και βιομηχανικά, ανθρώπινα ή ζωικά απόβλητα. Αντιθέτως, βιομάζα δεν είναι τα ορυκτά οργανικά υλικά (όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο). Η βιομάζα είναι φρέσκια οργανική ύλη. Είναι επίσης και το βιολογικής προέλευσης μέρος των αστικών λυμάτων και σκουπιδιών.

Η βιομάζα καλύπτει σήμερα το 14% της παγκόσμιας απαιτούμενης ενέργειας. Η καύση αποτελεί, ουσιαστικά, ουδέτερη διαδικασία από την άποψη του φαινομένου του θερμοκηπίου, αρκεί να μη διαταράσσεται η λεπτή ισορροπία στο φυσικό περιβάλλον.

#### 1.3.4 Γεωθερμική ενέργεια

Αφορά στην ενέργεια των θερμών νερών (ή ατμών του νερού), που αναβλύζουν μέσα από ηφαιστειακές διόδους ή ρήγματα του υπεδάφους. Σύμφωνα με την επικρατέστερη θεωρία, η θέρμανση των γεωθερμικών ρευστών αποδίδεται κυρίως, στην εκλυόμενη ενέργεια κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών ισotόπων στο στερεό φλοιό της γης. Όταν η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών είναι χαμηλή, η ενέργεια τους χρησιμοποιείται κυρίως για θέρμανση κτιρίων, θερμοκηπίων, κτηνοτροφικών μο-νάδων, ιχθυοκαλλιεργειών, κ.α., ενώ στις περιπτώσεις που η θερμοκρασία των ατμών είναι υψηλή (>150 °C), μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το γεωθερμικό δυναμικό που αφορά αποκλειστικά σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ανερχόταν παγκοσμίως σε ~11 GW, το 2010. Στη χώρα μας, η γεωθερμική ενέργεια, αξιοποιείται κυρίως σε θερμοκηπιακές μονάδες, σε περιοχές της Βόρειας Ελλάδας και σε νησιά του βορειοανατολικού και κεντρικού Αιγαίου.



*Σχήμα 1.4 Η πρώτη γεωθερμική μηχανή, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, (1913) στο Larderello της Ιταλίας συνολικής ισχύος 205 kW.*

#### 1.3.5 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί την

μετακίνηση μεγάλων μαζών του αέρα από τη μία περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας έτσι τους ανέμους.

Η εγκατάσταση αιολικών συστημάτων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, με χρήση ανεμογεννητριών οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα πτερυγίων, βρίσκεται σήμερα σε εντυπωσιακή εξέλιξη. Η παγκοσμίως εγκαταστημένη ονομαστική ισχύς ανεμογεννητριών, από 7,6 GW το 1997, έφτασε τα 159 GW το 2009 και αντίστοιχα στην Ευρώπη, τα 76 GW. Στον πίνακα 1.5 αναφέρονται οι χώρες με τη μεγαλύτερη εγκαταστημένη ισχύ ανεμογεννητριών.

Χώρα	Εγκαταστημένη Ισχύς (2009)	
	Αιολικά (GW)	Φωτοβολταϊκά (MW <sub>p</sub> )
<b>Ευρώπη</b>		
<b>Γερμανία</b>	25,8	9.830,3
<b>Ισπανία</b>	19,1	3.520,1
<b>Δανία</b>	3,5	4,6
<b>Ιταλία</b>	4,9	1032,0
<b>Ολλανδία</b>	2,2	63,3
<b>Ηνωμένο Βασίλειο</b>	4,1	32,6
<b>Ελλάδα</b>	1,1	55,0
<b>Σύνολο Ευρώπης</b>	<b>76,1</b>	<b>15.861,2</b>
<b>Παγκοσμίως</b>		
<b>Ινδία</b>	25,8	1566,0
<b>Ιαπωνία</b>	2,1	2654,0
<b>Κίνα</b>	25,8	240
<b>ΗΠΑ</b>	35,1	1.650,0
<b>Σύνολο Παγκοσμίως</b>	<b>159</b>	<b>22.100,0</b>

*Σχήμα 1.5 Εγκαταστημένη ισχύς Αιολικών και Φωτοβολταϊκών συστημάτων σε διάφορες χώρες και παγκοσμίως.*

Στη χώρα μας λειτουργούν αρκετά αιολικά πάρκα με ισχύ από μερικές εκατοντάδες kW έως μερικές δεκάδες MW, κυρίως διασυνδεδεμένα με το δίκτυο της ΔΕΗ. Η συνολική εγκαταστημένη ισχύς έφτασε 1626,5 MW το 2011. Η ΔΕΗ έχει εγκαταστήσει στον Ελλαδικό χώρο, 24 MW κι απ' αυτά αρκετά στα νησιά (Κύθνος 5x10 kW, Μύκονος 100 kW, Κάρπαθος 175 kW κ.α.). Τα υπόλοιπα έχουν εγκατασταθεί από άλλους φορείς, κυρίως από την τοπική αυτοδιοίκηση και ιδιώτες. Στην Κρήτη, όπου η ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των μονάδων της ΔΕΗ, φθάνει τα 700 MW, λειτουργούν, ήδη, σε αρκετές περιοχές του νησιού μερικά μεγάλα αιολικά πάρκα, συνολικής ισχύος ~152 MW (Λασιθί: Μονή Τοπλού 6,6 MW, Μιτάτο 10,2 MW, περιοχή Αχλάδια ~30 MW, Χαντράς 9,9 MW, Ξερολίμνη 10,2 MW, Χώνος ~20 MW, κ.α. μικρότερα. Ηράκλειο: Μεγάλη βρύση ~5 MW, Πρινιάς 3,4 MW).

Το αιολικό δυναμικό, δηλαδή η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου, σε πολλά σημεία της χώρας μας βρίσκεται σε εξαιρετικά υψηλά επίπεδα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στα νησιά του Αιγαίου το αιολικό δυναμικό παρουσιάζει μία μέση ετησίως τιμή, από 7 έως 11 m/s, το οποίο υπερκαλύπτει την αποδοτική για τις ανεμογεννήτριες, περιοχή ταχυτήτων ανέμου και κατ' επέκταση τις απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια των νησιών αυτών. Συνεπώς ο νησιωτικός χώρος αποτελεί ιδανικό πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας των αιολικών συστημάτων.



**Σχήμα 1.6** Αιολικό πάρκο Μονής Τοπλού στην Σητεία της Κρήτης συνολικής ισχύος 6,6 MW.

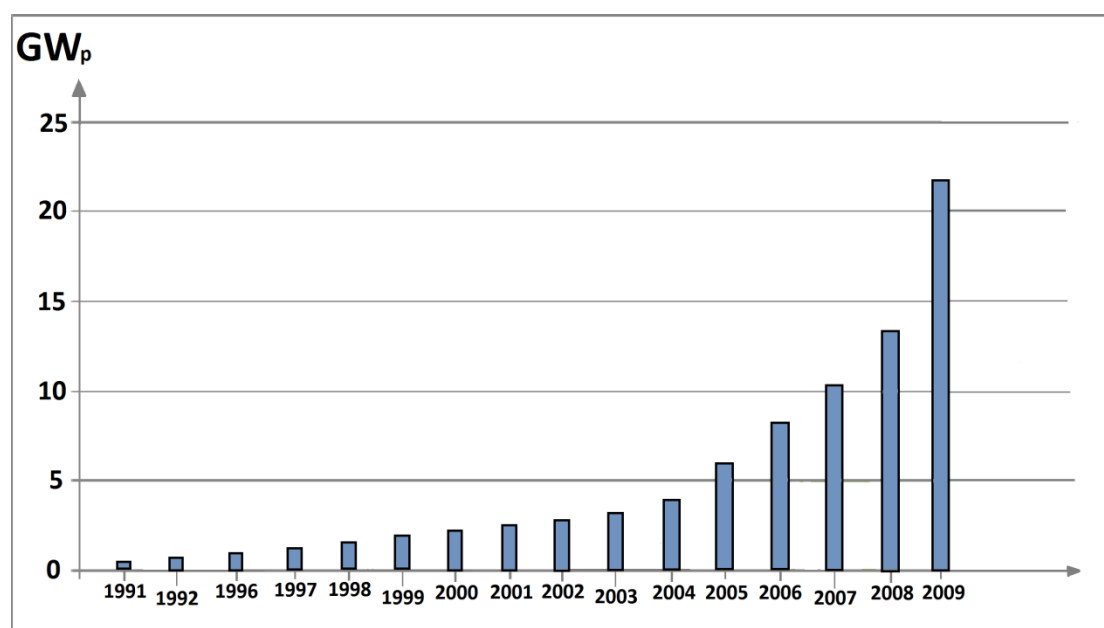


### 1.3.6 Φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια

Μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων, μετατρέπουμε την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι, γενικά, ένα σύστημα δύο υλικών σε επαφή, το οποίο όταν φωτίζεται εμφανίζει στα άκρα του συνεχή ηλεκτρική τάση. Σήμερα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία των οποίων η βιομηχανική παραγωγή έχει προωθηθεί, είναι αυτά που βασίζονται στη δημιουργία δύο ημιαγωγικών στρωμάτων σε επαφή.

Συνήθως, τα δύο στρώματα αποτελούνται από το ίδιο κύριο υλικό, το ένα στρώμα ημιαγωγός τύπου n και το άλλο τύπου p. Εξωτερικά τοποθετούνται κατάλληλα ηλεκτρόδια. Η κατασκευή έχει τη μορφή μιας σχεδόν τετράγωνης πλάκας, ώστε η εσωτερική επαφή των ημιαγωγών να καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια του πλακιδίου. Η παγκόσμια εγκαταστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων, από 313,5 MW<sub>p</sub> το 1991, έφτασε τα 22 GW<sub>p</sub>, στο τέλος του 2009 (Πίνακας 1.7). Απ' αυτά, περίπου 16 GW<sub>p</sub> αφορούν σε εγκατεστημένη ισχύ στην Ευρώπη ~1,7 GW<sub>p</sub> στις ΗΠΑ και ~2,7 GW<sub>p</sub> στην Ιαπωνία. Όπως προκύπτει από το σχήμα 1.7, η ποσοστιαία ετήσια μεταβολή της εγκατεστημένης ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο, κατά τη χρονική αυτή περίοδο, παρουσίασε ραγδαία αύξηση, από 18,5% το 1992, σε 29,3% το 2002 και έφτασε το 47% το 2009. Μεγάλοι ΦΒ σταθμοί έχουν εγκατασταθεί στην Ισπανία (Puertollano 47 MW<sub>p</sub>, Olmedilla 60 MW<sub>p</sub>), Γερμανία (Waldpolenz 40 MW<sub>p</sub>, Fisterwalde 70 MW<sub>p</sub>), Πορτογαλία (Septra 11 MW<sub>p</sub>) Ιταλία (Montalto di Castro 84,2 MW<sub>p</sub>), Καναδάς (Sanria 97 MW<sub>p</sub>).

Στην Ελλάδα η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων μέχρι και τον Μάρτιο του 2011, ανερχόταν σε 274,2 MW<sub>p</sub>. Στο νησιωτικό χώρο εξελίσσεται σχέδιο εγκατάστασης 200 MW<sub>p</sub>, εκ των οποίων τα 52,5 MW<sub>p</sub> στην Κρήτη.



*Σχήμα 1.7 Χρονική εξέλιξη της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος αιχμής ΦΒ συστημάτων, στο χρονικό διάστημα 1991-2009.*

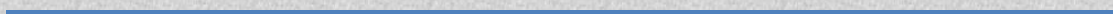




*Σχήμα 1.8* Αεροφωτογραφία Φωτοβολταϊκού πάρκου, 8,3 MW<sub>p</sub>, στην δημοτική ενότητα Καλυβίων του δήμου Τρικάλων.

## Κεφάλαιο 1

# Εισαγωγή



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Στις μέρες μας είναι επιτακτική η ανάγκη για εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αυτό γιατί (1<sup>ο</sup>) πέρα από την ενέργεια που αντλούμε και θα αντλούμε για δισεκατομμύρια χρόνια ακόμα αφού έχουμε να κάνουμε με ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και μάλιστα σε μία περίοδο που όπως όλα δείχνουν ότι οι συμβατικές πηγές ενέργειας πλησιάζουν στο τέλος τους, (2<sup>ο</sup>) προστάτευουμε το φυσικό μας περιβάλλον, αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό αν σκεφτεί κανείς ότι για κάθε κιλοβατώρα ηλεκτρισμού που λαμβάνουμε από το δίκτυο της ΔΕΗ και παράγεται από ορυκτά καύσιμα, επιβαρύνεται η ατμόσφαιρα με ένα τουλάχιστον κιλό διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης με την χρήση της ήλιακης ενέργειας συνεπάγεται λιγότερες εκπομπές άλλων επικίνδυνων ρύπων όπως τα καρκινογόνα μικροσωματίδια, τα οξείδια του αζώτου, οι ενώσεις του θείου. Οι ρύποι αυτοί επιφέρουν σοβαρές βλάβες στην υγεία μας, και το περιβάλλον.

Οι προοπτικές για την ηλιακή ενέργεια είναι τεράστιες, καθώς η καθημερινή πρόσληψη ηλιακής ενέργειας από την Γη είναι περίπου 200.000 φορές μεγαλύτερη από το παγκόσμιο ημερήσιο δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής.

Το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια εντάθηκε όταν χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, διαπιστώθηκε η πρακτική δυνατότητα της εύκολης, άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια, με την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων (ονομάζονται επίσης φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγών σχεδόν τετραγωνικής μορφής ώστε η εσωτερική επαφή των ημιαγωγών να καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια του πλακιδίου. (παλαιότερα τα συναντάμε και σε κυκλική μορφή δίσκου). Τα στοιχεία αυτά βασίζονται στην δημιουργία δύο ημιαγωγικών στρώματων σε επαφή. Συνήθως, τα δύο στρώματα αποτελούνται από το ίδιο κύριο υλικό, το ένα στρώμα είναι ημιαγωγός τύπου n και το άλλο τυπου p.

Όταν το φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται στην επιφάνεια του την ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνεται μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη του. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής του και την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται, ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μπορεί να δώσει τάση από 0,5 μέχρι και 0,8 Volts και πυκνότητα ρεύματος από 10 μέχρι 40 mA/cm<sup>2</sup> της επιφάνειας του.



*Σχήμα 2.1 .Τυπική μορφή φωτοβολταϊκού στοιχείου*

Πολλά ΦΒ στοιχεία (33-36) συνδέονται σε σειρά, ώστε, όταν η διάταξη αυτή φωτίζεται, να προκύπτει συνολική τάση ανοικτού κυκλώματος (Open circuit) 17-22 Volts. Το πλήθος των ΦΒ στοιχείων επιλέγεται έτσι ώστε να ταιριάζει με την απαιτούμενη τάση φόρτισης ενός κοινού ηλεκτρικού συσσωρευτή μολύβδου-θεικού οξέως (Pb/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), ονομαστικής τάσης 12V. Η ολοκληρωμένη αυτή φωτοβολταϊκή διάταξη ονομάζεται Φωτοβολταϊκό πλαίσιο (module). Χρησιμοποιείται επίσης, σπανιότερα, η ορολογία, φωτοβολταϊκή γεννήτρια (Photovoltaic generator). Στο εμπόριο διατίθενται ΦΒ πλαίσια σε ευρεία περιοχή τιμών ισχύος αιχμής. Μικρές κατασκευές ΦΒ στοιχείων, μερικών W<sub>p</sub>, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που δεν απαιτούν υψηλή ηλεκτρική ισχύ, όπως λ.χ. οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές «τσέπης». Σε εφαρμογές αυτόνομων ή συνδεδεμένων με το δίκτυο της ΔΕΗ, ΦΒ συστημάτων, χρησιμοποιούνται συνήθως, ΦΒ πλαίσια ισχύος αιχμής από 30 έως ~300W<sub>p</sub>.



*Σχήμα 2.2* Τυπική μορφή φωτοβολταϊκού πλαισίου

## 2.1 Ιστορική Αναδρομή

Γύρω στο 1891, είχε αρχίσει να γίνεται αισθητή η μόλυνση του περιβάλλοντος στις μεγάλες βιομηχανικές πόλεις, μάλιστα εκείνη την εποχή το κυριότερο καύσιμο ήταν το κάρβουνο, ενώ δεν είχε αρχίσει ακόμα η μαζική χρήση του πετρελαίου. Η μεγάλη ώθηση για πρακτικές εφαρμογές της φωτοβολταϊκής μετατροπής δόθηκε με την πραγματοποίηση ορισμένων κρίσιμων τεχνολογικών προόδων, όπως η εξήγηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου από τον Albert Einstein (1904), η παρασκευή

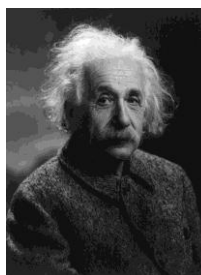
καθαρού πυριτίου με τη μέθοδο της τηγμένης ζώνης (1952), ο σχηματισμός διόδων πυριτίου με διάχυση προσμίξεων (1953), που οδήγησαν τελικά στην κατασκευή ηλιακών στοιχείων σημαντικής απόδοσης 6% (1954) και ακόμα μεγαλύτερης 14% (1972). Συγκεκριμένα οι κυριότεροι σταθμοί στην εξέλιξη της φωτοβολταϊκής μετατροπής είναι:

**1839** Παρατήρηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε μεταλλικά ηλεκτρόδια (Pt, Ag) βυθισμένα σε ηλεκτρολύτες από τον Γάλλο Φυσικό επιστήμονα Edmund Becquerel.



*Edmund Becquerel (1820- 1891)*

**1904** Ο Γερμανοεβραϊκής καταγωγής φυσικός Albert Einstein δημοσίευσε εργασία με την οποία έδωσε την εξήγηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Για αυτή του την προσπάθεια τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ το 1921.



*Albert Einstein (1879- 1955)*

**1937** Κατασκευή ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου από Pb S από τους Fisher και Godden.

**1939** Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από Se με απόδοση 1% από τον Αμερικανό μηχανικό Russell Shoemaker Ohl.



*Russell Ohl (1898- 1987)*

**1941** Κατασκευή του πρώτου ηλιακού στοιχείου από Πυρίτιο Si, πάλι από τον Russell Ohl.



*Ο Russell Ohl αρκετά νεότερος  
στο εργαστήριο του.*

**1952**

Ανακάλυψη σταθμός στην εξέλιξη της φωτοβολταϊκής μετατροπής υπήρξε η μέθοδος της τηγμένης ζώνης για την κατασκευή στερεών πολύ μεγάλης καθαρότητας από τον ηλεκτροχημικό William Gardner Pfann γεννημένος στο Brooklyn της Νεας Υόρκης.



*William G. Pfann (1917- 1982)*

**1953** Μία εξήσου συμαντική

ανακάλυψη υπήρξε η μέθοδος σχηματισμού ενώσεων p-n με διάχυση προσμίξεων από τον Αμερικανό Φυσικοχημικό Calvin Souther Fuller.



*Calvin*

*S. Fuller (1902- 1994)*

**1954** Ανακοινώθηκε η πρώτη

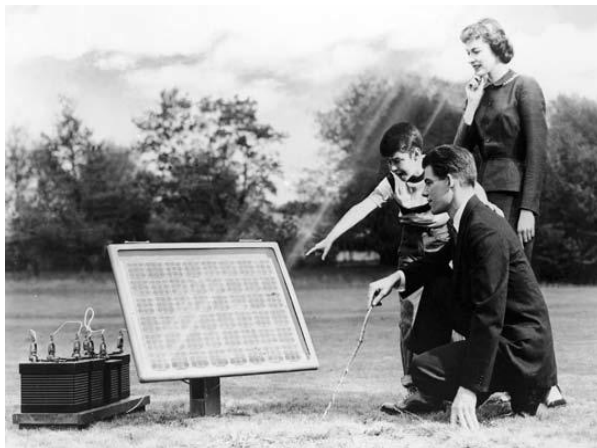
κατασκευή ηλιακού στοιχείου Πυριτίου Si, με σχηματισμό επαφής p-n , με διάχυση προσμίξεων και με απόδοση 6% από τους Fuller, Pearson και Chapin στα εργαστήρια AT&T Bell Laboratories του New Jersey των ΗΠΑ.



Σχήμα 2.3 Fuller, Pearson και Chapin στα Bell Laboratories των ΗΠΑ.

1956

Εμπορική παραγωγή ηλιακών στοιχείων Πυριτίου Si από την εταιρία Hoffman.

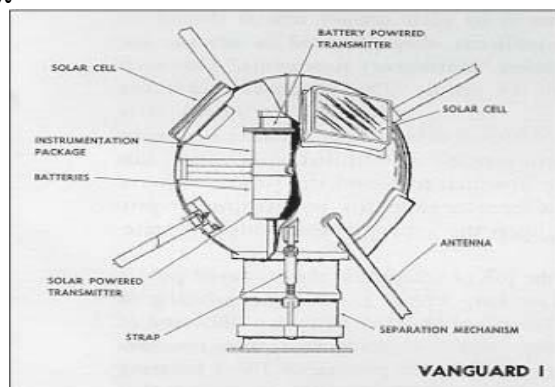
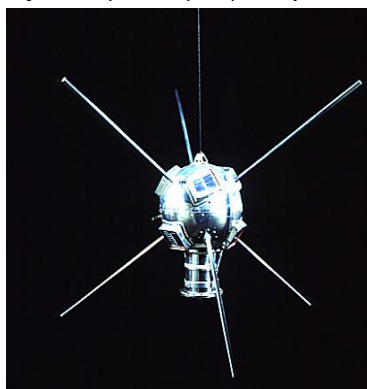


Σχήμα

2.4

Φωτογραφία από το Αμερικανικό περιοδικό Look Magazine 1956. Από τις πρώτες διαφήμισεις Φωτοβολταϊκής γεννήτριας της εποχής.

**1958** Εκτόξευση του Αμερικανικού τεχνητού δορυφόρου Vanguard 1, εξοπλισμένου με έξι μικρά στοιχεία Si, ισχύος 5 mW, ως βοηθητική ενεργειακή πηγή. Ο δορυφόρος όχι μόνο έβγαλε εις πέρας την προβλεπόμενη λιγότερη διάρκεια του προγράμματος, αλλά εξακολούθησε να λειτουργεί χωρίς πρόβλημα επί έξι συνολικά χρόνια. Έτσι από το 1969 και μετά όλοι οι τεχνητοί δορυφόροι είναι εξοπλισμένοι με φωτοβολταϊκά στοιχεία.





*Σχήμα 2.5 Πάνω αριστερά ο δορυφόρος και πάνω δεξιά αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά του.*

**1958** Εκτόξευση Σοβιετικού τεχνητού δορυφόρου με αποκλειστική τροφοδότηση από ηλιακά στοιχεία.

**1959**

Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από CdS, με απόδοση 5% από τον Hammond.

**1972**

Κατασκευή «αώδους» ηλιακού στοιχείου από Si, με απόδοση 14% από Lindmayer και Allison.

**1976**

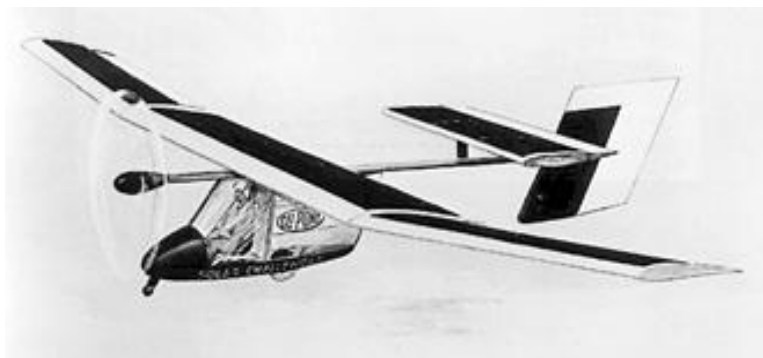
Κατασκευή ηλιακού στοιχείου άμορφου πυρίτιου, με απόδοση 0,01% από Carlson και Wronski.

**1977**

Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από GaAs, με απόδοση 16% από τον Kameth.

**1981**

Πτήση πάνω από τη Μάγνη του αεροπλάνου Solar Challenger, εξοπλισμένου με 16128 ηλιακά στοιχεία Πυριτίου Si, ισχύος 2,7 kW. Η πτήση ήταν 163 μίλια και διήρκησε 5 ώρες και 23 λεπτά.



*Σχήμα 2.6*

*7 Ιουλίου του 1981 το Solar Challenger πέταξε πάνω από τη Μάγνη.*

**1983**

Έναρξη

εμπορικής λειτουργίας του φωτοβολταϊκού σταθμού της Βικτροβίλ, ισχύος 1MW.

**1984**

Έναρξη

βιομηχανικής παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων στην Ιαπωνία από άμορφο πυρίτιο με απόδοση 5%.

## 2.2 Εξέλιξη απόδοσης και κόστους των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Ως **απόδοση (η)** ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του. Η απόδοση των ηλιακών στοιχείων δεν είναι πάντα σταθερή αλλά όπως θα δούμε στο κεφ 5.3 μεταβάλλεται σημαντικά από διάφορους παράγοντες.

Για την εκτίμηση του **κόστους** των ηλιακών στοιχείων χρησιμοποιείται

συμβατικά ο όρος Watt αιχμής ( $W_p$ , peak Watt) που είναι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που μπορεί να αποδώσει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC,  $P_{p=p_m,STC}$ ). (η έννοια αυτή, STC, πρότυπες συνθήκες ελέγχου ορίζεται στο κεφ 4.11).

Αρχικά, το 1956 οι πρώτες εμπορικές κατασκευές Φωτοβολταϊκών στοιχείων, κυρίως διαστημικές, ήταν πολύ υψηλού κόστους ( $1000\$/W_p$  ή σε ευρώ  $759\€/W_p$ ) με σχετικά μικρή απόδοση 5-10%, το δε υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν κυρίως το κρυσταλλικό Πυρίτιο (c-Si) όπως και στις μέρες μας. Στην συνέχεια όμως, από το 1956 και μετά με την αύξηση της παραγωγής και τη βελτίωση της τεχνολογίας, πραγματοποιήθηκε ραγδαία μείωση του κόστους όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα E.1. Αμέσως εκτός από τις διαστημικές εφαρμογές άρχισαν σταδιακά και οι επίγειες εφαρμογές της φωτοβολταϊκής μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι στις μέρες μας το κόστος των Φωτοβολταϊκών στοιχείων κυμαίνεται περί τα  $1,9\$/W_p$  ή σε ευρώ  $1,5\ €/W_p$ . Η δε απόδοση έχει αυξηθεί στο 22% σε ΦΒ στοιχεία για διαστημικές εφαρμογές και στο 14-18% σε ΦΒ στοιχεία για βιομηχανική-οικιακή χρήση.

Έτος	Κόστος ανά $W_p$ (σε \$)
1956	1000
1960	400
1970	100
1975	40
1980	10
1985	6
2012	1,9

Σχήμα 2.7. Εξέλιξη του κόστους των ηλιακών στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου.

Κατά την δεκαετία του 1980, η τάση μείωσης του κόστους βιομηχανικής παραγωγής των ΦΒ στοιχείων, οδήγησε στη χρησιμοποίηση οικονομικότερων μεθόδων παρασκευής του βασικού φωτοαγωγίμου υλικού. Έτσι έχουμε την εμφάνιση κατηγορίας ΦΒ στοιχείων από **άμορφο Πυρίτιο** (a-Si), αυτά χαρακτηρίζονται από τη δημιουργία πολύ λεπτών στρωμάτων ή υμενίων υλικού (films), κυρίως πυριτίου, σε επιμελημένα καθαρισμένη επιφάνεια, που επιτρέπει την πρόσφυση του αποτιθέμενου υλικού. Επίσης οι προσπάθειες μείωσης του κόστους κατασκευής ενός ΦΒ στοιχείου οδήγησαν τελικά σε νέες διαφορετικές μεθόδους εναπόθεσης, με πολύ καλά αποτελέσματα, έτσι παρασκευάστηκαν ΦΒ στοιχεία με σχηματισμό ταινιών υλικού, από λειωμένη φάση, με εργαστηριακή απόδοση ~15%. Η επιφάνεια τους εμφανίζει μονοκρυσταλλικότητα κατά περιοχές, το δε υλικό ονομάζεται **πολύκρυσταλλικό Πυρίτιο** (mc-Si). Το πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο, χρησιμοποιείται για την παρασκευή

ΦΒ στοιχείων, που μπορούν να καλύψουν μεγάλη επιφάνεια, με βιομηχανική απόδοση 12%-13%, πολύ κοντά στην βιομηχανική απόδοση ΦΒ στοιχείων μονοκρυσταλλικού Πυριτίου.

## 2.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ελλάδα

Στην χώρα μας, η συνολική εγκαταστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων διασυνδεδεμένων στο δίκτυο μέχρι και το Μάρτιο του 2011, ανερχόταν σε 274,2 MW<sub>p</sub>, η δε συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων περιλαμβανομένων των αυτόνομων, ανερχόταν σε 281,1 MW<sub>p</sub>. Στο νησιωτικό χώρο εξελίσσεται σχέδιο εγκατάστασης 200 MW<sub>p</sub>, εκ των οποίων 52,5 MW<sub>p</sub> στην Κρήτη. Μερικά από τα εγκατεστημένα συστήματα αποτελούνται από μικρούς ΦΒ σταθμούς σε συνεργασία με αιολικά συστήματα και ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, όπως π.χ. στη νήσο Κύθνο (100 kW<sub>p</sub>), στη νήσο Γαύδο (30kW<sub>p</sub>) καθώς και ΦΒ αντλητικά συστήματα σε διάφορα νησιά. Μέχρι το 1991, οπότε και άρχισε η σταδιακή απόσυρση των εγκαταστάσεων του, βρισκόταν σε λειτουργία στην Αγία Ρουμέλη, κοντά στα Σφακιά (Νοτιοδυτική Κρήτη), ο πρώτος στην Ευρώπη (1982), πιλοτικός ΦΒ σταθμός με ισχύ 50 kW<sub>p</sub>, υπό την ευθύνη της ΔΕΗ. Μικρής ισχύος ΦΒ συστήματα βρίσκουν εφαρμογή σε φάρους αυτόνομης λειτουργίας. Στις αρχές του 2011 ανακοινώθηκε η δημιουργία Φωτοβολταϊκού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στην Κοζάνη, ονομαστικής ισχύος 200 MW. Ενδιαφέρουσες εφαρμογές αποτελούν τα ΦΒ ψυγεία πρόψυξης γάλακτος, σε κτηνοτροφικές περιοχές (Πρασές Χανίων Κρήτης, 8 kW<sub>p</sub>).

α/α	Ιδιοκτήτης	Νομός - Θέση - Χρήση	Ισχύς αιχμής (kW <sub>p</sub> )	Έτος έναρξης λειτ/γίας
1	ΔΕΗ	Χανιά, Αγία Ρουμέλη	50	1982
2	ΔΕΗ	Κύνθος	100	1983
3	ΔΕΗ	Αντικύθηρα	27,6	1987
4	ΔΕΗ	Γαύδος	30	1987
5	ΔΕΗ	Αρκοί	37,5	1988
6	ΔΕΗ	24 μικρά νησιά στο Αιγαίο	53	1990-1993
7	ΟΤΕ	Αντικύθηρα	33,4	1987
8	ΕΤΒΑ	Μενετές, Κάρπαθος, άντληση νερού	10	1986
9	Υπηρεσία Φάρων (Π.Ν.)	Διάφοροι φάροι	26,7	1989-1995
10	ΚΑΠΕ	Πικέρμι	4,3	1990
11	Ιερά μονή Σίμωνος Πέτρα	Άγιο Όρος	45	1994

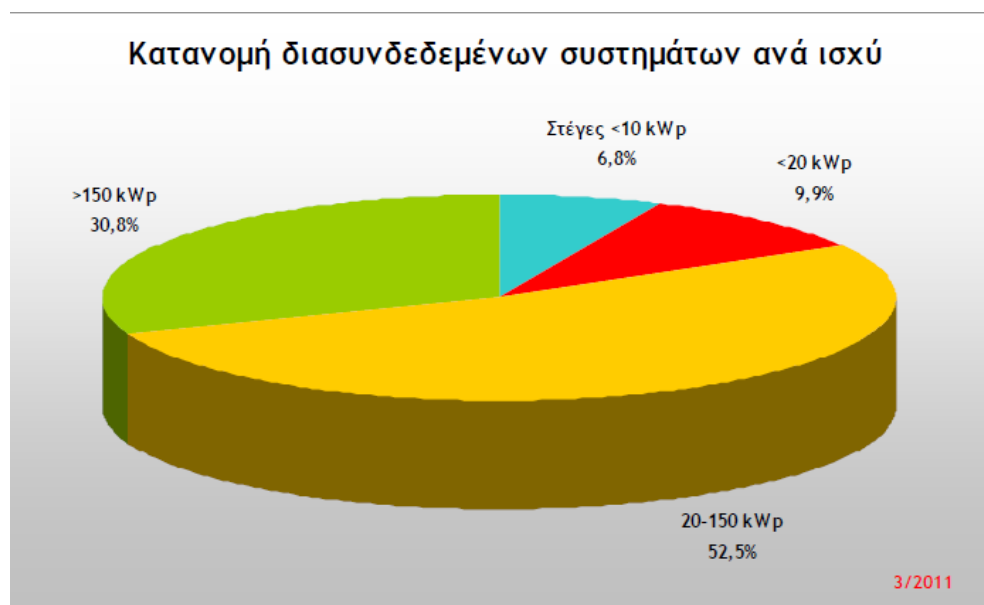
α/α	Ιδιοκτήτης	Νομός - Θέση - Χρήση	Ισχύς αιχμής (kW <sub>p</sub> )	Έτος έναρξης λειτ/γίας
12	Κέντρο γεωργικής έρευνας Κρήτη	Κοινότητα Πρασές (Χανιά), ψυγείο κτηνοτροφικών προϊόντων	8	1995
13	ΤΕΙ Κρήτης	Φωτοβολταϊκό Πάρκο, Ερευνητικό εργαστήριο	7	1992
14	ΤΕΙ Πάτρας	Ερύμανθος Αχαΐας, Ψυγείο κτηνοτροφικών προϊόντων	3	1995
15	INTRACOM	19 συστ. τηλεπικοινωνιών, Άγιο Όρος	12,5	1995
16	-	Νήσος Δονούσα	18	1995
17	ΙΤΕ-Π.Κ.	Αστεροσκοπείο Σκίνακα, Ψηλορείτης Ρέθυμνο	9	2000
18	Ρόκας Αιολική ΑΒΕΕ	Πλακοκερατιά Μιτάτου, Ιτάνου, Λασιθί	171,6	2001
19	Γερμανός ΑΒΕΕ	Μεσοχωριό, Αστερουσίων Ηράκλειο Κρήτης	170	2001
20	Λευκοσιδηρουργεία Κρήτης ΑΒΕΕ - CRETE CUN	ΒΙΠΕ, Ηράκλειο Κρήτης	130	2001
21	Αρτοποιία Κλαπάκη ΟΕ	Πλατάνια Χανίων	60	2001
22	Δρίνιας ΑΕ	ΒΙΠΕ Κιλκίς	200	2002
23	Αγγελάκης Ι.	Καρτερός-Καλιθέα, Ηράκλειο Κρήτης	140	2002
24	Κάμιнос ΑΕ	Λιθάρια Ν. Ιωνίας Αττικής	160	2003
25	ΕΜΠ (Κτήριο Χημ. Μηχαν.)	Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου	50	2002
26	Δήμος Τάυρου	Τάυρος	11,9	2002
27	Χαρμή ΑΕ hotel	Πάρος	10	2002
28	ΗΛΠΡΑ	Θεσσαλονίκη	6,5	2002
29	Μη καταγραμμένα ΦΒ συστήματα (εκτίμηση)	Μικρά ΦΒ συστήματα σε κατοικίες, αγροικίες, καταστήματα, αντλιακά συστήματα, γήπεδα, δρόμους, εκπαιδευτικά ιδρύματα, κα.	~200	

Σχήμα 2.8 Αρχικές εγκαταστάσεις ΦΒ Συστημάτων στην Ελλάδα.

Μέχρι τέλους του 2009, είχαν υποβληθεί για έγκριση στη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), περισσότερες από 7900 αιτήσεις εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών, συνολικής ισχύος ~3700 MW<sub>p</sub>. Έχουν εγκριθεί αδειοδοτήσεις, συνολικά για ~200

MW<sub>p</sub> και έχουν εγκατασταθεί 55 MW<sub>p</sub>.

Μέχρι και τον Μάρτιο του 2011 στην Ελλάδα, η συνολική εγκαταστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων διασυνδεδεμένων στο δίκτυο ανερχόταν σε 274,2 MW<sub>p</sub>, εκ των οποίων όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα ποσοστό 6,8% αντιστοιχεί σε διασυνδεδεμένα συστήματα μέχρι 10 kW<sub>p</sub> (στέγες), το 9,9% σε διασυνδεδεμένα συστήματα από 10 έως 20 kW<sub>p</sub>, ποσοστό 52,5% σε συστήματα από 20 έως 150 kW<sub>p</sub>, και τέλος ποσοστό 30,8% αφορά διασυνδεδεμένα συστήματα ισχύς μεγαλύτερης των 150 kW<sub>p</sub>.

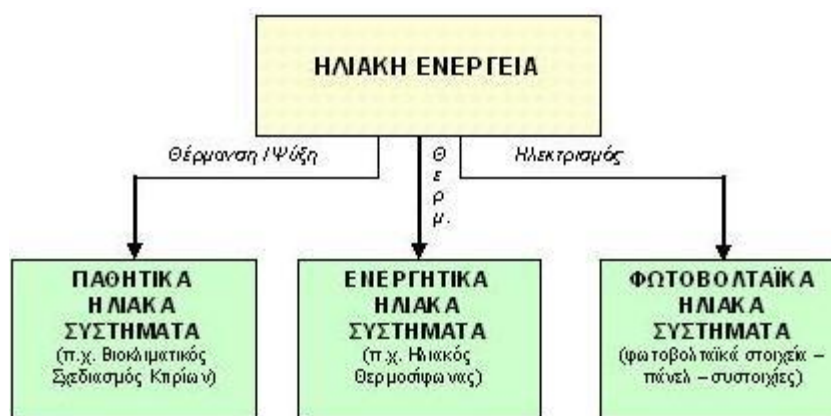


(Πηγές: ΔΕΣΜΗΕ, ΔΕΗ)

## 2.4 Ηλιακή Ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι η φωτεινή ενέργεια (φως), η θερμική ενέργεια (θερμότητα) καθώς και η ενέργεια ακτινοβολίας. Η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται στο σύμπαν, κυρίως με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλλά και με σωματιδιακή μορφή. Στο σύνολο της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο και πρόκειται για Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας. Ο Ήλιος είναι εξαιρετικά ισχυρή ενεργειακή πηγή, και το ηλιακό φως με μεγάλη διαφορά η πλουσιότερη πηγή ενέργειας που προσλαμβάνεται από τη Γη, αλλά η ένταση της στην επιφάνεια της Γης είναι στην πραγματικότητα πολύ χαμηλή. Αυτό οφείλεται κυρίως στην τεράστια αξονική διασπορά ακτινοβολίας από τον μακρινό Ήλιο. Μία σχετικώς ελάσσων πρόσθετη απώλεια οφείλεται στην ατμόσφαιρα της Γης και στα σύννεφα, τα οποία απορροφούν ή σκεδάζουν μέχρι και 54% του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός. Παρ' όλα αυτά η συνολική ποσότητα της προσπίπτουσας στη Γη ηλιακής ενέργειας υπερβαίνει κατά πολύ τις τρέχουσες και προβλεπόμενες παγκόσμιες ενεργειακές

ανάγκες. Οι προοπτικές για την ηλιακή ενέργεια είναι τεράστιες, καθώς η καθημερινή πρόσληψη ηλιακής ενέργειας από την Γη είναι περίπου 200.000 φορές μεγαλύτερη από το παγκόσμιο ημερήσιο δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής. Αν τιθασευτεί καταλλήλως, αυτή η εξαιρετικά διάχυτη πηγή διαθέτει το δυναμικό κάλυψης όλων των μελλοντικών ενεργειακών αναγκών. Κατά τον 21ο αιώνα η ηλιακή ενέργεια αναμένεται να καταστεί όλο και περισσότερο ελκυστική ως ενεργειακή πηγή λόγω της ανεξάντλητης παροχής της και του μη ρυπαντικού της χαρακτήρα, σε έντονη αντίθεση προς τα πεπερασμένα ορυκτά καύσιμα άνθρακα, πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Την ηλιακή ενέργεια την εκμεταλλευόμαστε όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, μέσω **παθητικών** ηλιακών συστημάτων, **ενεργητικών** ηλιακών συστημάτων και **φωτοβολταϊκών** ηλιακών συστημάτων.



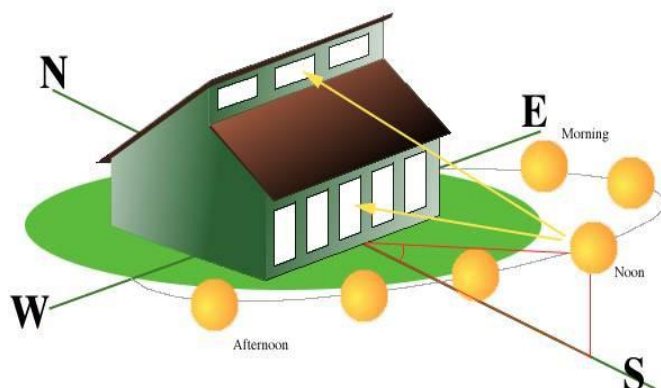
## 2.5 Παθητικά ηλιακά συστήματα

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από δομικά στοιχεία του κτηρίου. Αφορά την παθητική εκμετάλευση των θερμοσωρευτικών ιδιοτήτων των κοινών αρχιτεκτονικών στοιχείων της οικοδομής (κουφωμάτων, στεγών τοίχων, δαπέδων). Αναγκαία προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία των παθητικών ηλιακών συστημάτων ώστε να αξιοποιήσουν όσο το δυνατό περισσότερο την ηλιακή ενέργεια, είναι ένας κατάλληλος σχεδιασμός του κτηρίου. Αυτό σημαίνει ότι το κέλυφος πρέπει να επιτυγχάνει τη μέγιστη **ηλιακή συλλογή**, τη μέγιστη **θερμοχωρητικότητα**, τις ελάχιστες **θερμικές απώλειες**. Η λειτουργία των παθητικών συστημάτων βασίζεται σε 3 μηχανισμούς, (α) στη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και διατήρησης της στο εσωτερικό του κτηρίου για την θέρμανση των χώρων (φαινόμενο του θερμοκηπίου), (β) στη θερμική υστέρηση των υλικών (θερμοχωρητικότητα), (γ) στην ιδιότητα της θερμότητας να μεταφέρεται από το θερμό στο κρύο αντικείμενο (αρχές μετάδοσης της θερμότητας).

Έχουμε είδη παθητικών συστημάτων για θέρμανση Άμεσου κέρδους, Έμμεσου κέρδους και Απομονωμένου κέρδους.

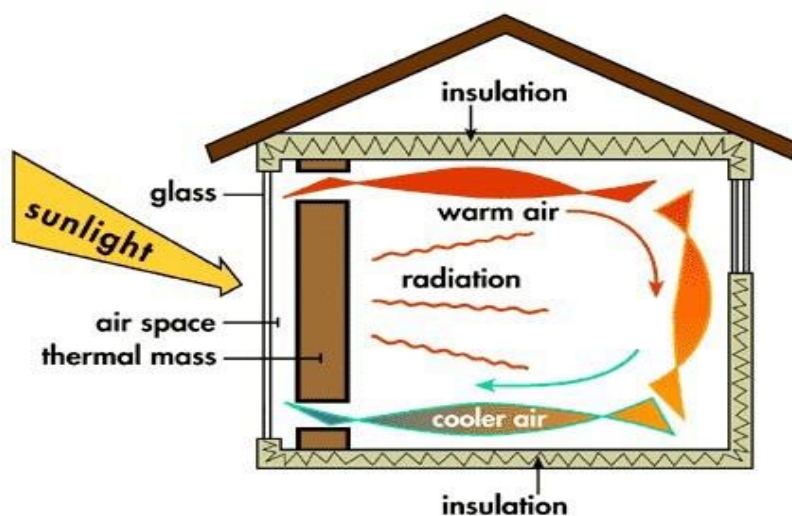
Θέρμανση μέσω συστημάτων άμεσου κέρδους,

έχουμε με την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας για θέρμανση του κτιρίου μέσω των νότια προσανατολισμένων ανοιγμάτων. Η αποτελεσματικότητα ενός τέτοιου συστήματος επηρεάζεται από τον προσανατολισμό, την θέση και το μέγεθος των ανοιγμάτων.



Σχήμα 2.9 Νότιος προσανατολισμός ανοιγμάτων.

Τα συστήματα έμμεσου κέρδους, αξιοποιούν έμμεσα τα ηλιακά οφέλη για θέρμανση του κτηρίου. Αυτά τα συστήματα απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κέλυφος και ύστερα επιτρέπουν στη θερμότητα να διεισδύσει στους χώρους διαβίωσης. Ο θερμικός τοίχος (Trombe, ή τοίχος νερού), το δάμα θερμικής αποθήκευσης, είναι οι κυριότερες εφαρμογές των μηχανισμών έμμεσου κέρδους.



Σχήμα 2.10 Μηχανισμοί έμμεσου κέρδους

Στα συστήματα απομονωμένου κέρδους, η επιφάνεια ηλιοσυλλογής δεν βρίσκεται σε επαφή με τον χώρο που επιθυμούμε να θερμάνουμε. Μεταξύ αυτής της επιφάνειας και το χώρο διαβίωσης υπάρχει ένας μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας όπως για παράδειγμα ένας ανεμιστήρας. Στα πραγματικά παθητικά ηλιακά συστήματα η μετάδοση της θερμότητας γίνεται με μη μηχανικά μέσα και βασίζεται κυρίως στην άνοση, μεταγωγή και ακτινοβολία της θερμότητας. Παράδειγμα απομονωμένου κέρδους είναι το θερμοσιφωνικό πανέλο.

## 2.6 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα

Ενεργητικά ηλιακά συστήματα ονομάζονται τα συστήματα που συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και στη συνέχεια την μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας, σε νερό, αέρα, ή σε κάποιο άλλο ρευστό. Η τεχνολογία που εφαρμόζεται είναι αρκετά απλή και υπάρχουν πολλές δυνατότητες εφαρμογής της σε θερμικές χρήσεις χαμηλών θερμοκρασιών.

Το ηλιακό φως που φτάνει στο έδαφος αποτελείται από σχεδόν 50% ορατό φως, 45% υπέρυθη ακτινοβολία και μικρότερες ποσότητες υπεριώδους και άλλων μορφών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αυτή η ακτινοβολία μπορεί να μετατραπεί είτε σε θερμική ενέργεια είτε σε ηλεκτρική. Δύο είναι οι τύποι συσκευών που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας και τη μετατροπή της σε θερμική ενέργεια: επίπεδοι συλλέκτες και συγκεντρωτικοί συλλέκτες.

Οι πιο διαδεδομένοι επίπεδοι συλλέκτες αποτελούνται από αμαυρωμένο μεταλλικό έλασμα, καλυμμένο με ένα ή δύο φύλλα γυαλιού, το οποίο θερμαίνεται από την πρόσπτωση του ηλιακού φωτός. Αυτή η θερμότητα μεταφέρεται σε αέρα ή νερό, αποκαλούμενα θερμιδοφόρα ρευστά, που ρέουν πίσω από το αμαυρωμένο έλασμα. Η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιείται απ' ευθείας ή να μεταφέρεται σε άλλο μέσο προς αποθήκευση. Οι επίπεδοι συλλέκτες θερμαίνουν τυπικά τα θερμιδοφόρα ρευστά σε θερμοκρασίες μεταξύ 66 και 93 °C. Ο βαθμός απόδοσης αυτών των συλλεκτών (δηλαδή, το ποσοστό της προσλαμβανόμενης ενέργειας που μπορούν να μετατρέψουν σε ωφέλιμη ενέργεια) κυμαίνεται μεταξύ 20 και 80%, αναλόγως της διαμόρφωσης του συλλέκτη.

Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από δύο βασικά μέρη. Το πρώτο είναι το τμήμα συλλογής με τους ηλιακούς συλλέκτες και την επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ το δεύτερο είναι το τμήμα αποθήκευσης με τη δεξαμενή αποθήκευσης νερού, που συνήθως διαθέτει και ηλεκτρική αντίσταση με θερμοστάτη ώστε να μπορεί να παράγει ζεστό νερό ακόμη και σε περιόδους μικρής ή μηδενικής ηλιοφάνειας. Διαχωρισμός υπάρχει, επίσης, με βάση το κύκλωμα κυκλοφορίας του θερμαινόμενου μέσου, και έτσι έχουμε αφενός τα ανοιχτού κύκλωματος στα οποία γίνεται απ' ευθείας η θέρμανση του νερού χρήσης, καθώς το θερμαινόμενο μέσο είναι το ίδιο το νερό που θα χρησιμοποιήσουμε, και αφετέρου τα κλειστού κύκλωματος, όπου η θέρμανση του νερού χρήσης είναι έμμεση, με το θερμαινόμενο μέσο να κυκλοφορεί σε ξεχωριστό κύκλωμα, το οποίο θερμαίνει το νερό που θα χρησιμοποιήσουμε μέσω εναλλάκτη θερμότητας, χωρίς να γίνεται ανάμιξη τους. Για να πετύχουμε μεγαλύτερη απόδοση της απορρόφησης υπάρχουν δύο βασικές παράμετροι τις οποίες μπορούμε να ρυθμίσουμε:

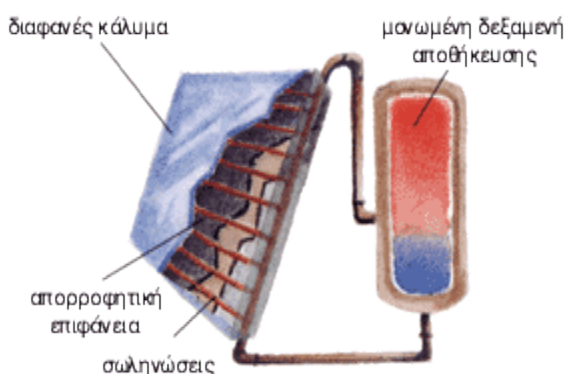
Πρώτη είναι, λοιπόν, να επιλέξουμε τον προσανατολισμό του συλλέκτη, με βέλτιστο προσανατολισμό το νότιο ( $\gamma=0^\circ$ ) για το βόρειο ημισφαίριο και το βόρειο ( $\gamma=180^\circ$ ) για το νότιο ημισφαίριο, δηλαδή πάντοτε ο συλλέκτης πρέπει να είναι στραμμένος προς τον ισημερινό. Να σημειώσουμε εδώ ότι αποκλίσεις μέχρι και  $20^\circ$



προκαλούν μικρές μειώσεις της προσπίπτουσας ενέργειας. Μια επόμενη παράμετρος είναι η κλίση που θα πρέπει να έχει ο συλλέκτης σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο (γωνία κλίσης  $\beta$ ), δηλαδή:

- Για μέγιστη ετήσια ενέργεια απαιτείται κλίση συλλέκτη ίση με το γεωγραφικό πλάτος, ( $\beta=\varphi$ ).
- Για μέγιστη ενέργεια θέρους απαιτείται κλίση συλλέκτη κατά  $15^\circ$  μικρότερη του γεωγραφικού πλάτους, ( $\beta=\varphi-15^\circ$ ).
- Για μέγιστη ενέργεια χειμónος απαιτείται κλίση συλλέκτη κατά  $15^\circ$  μεγαλύτερη του γεωγραφικού πλάτους, ( $\beta=\varphi+15^\circ$ ).

Το πιο απλό και διαδεδομένο ηλιακό ενεργητικό σύστημα είναι ο ηλιακός θερμοσίφοντας. Η αρχή λειτουργίας του είναι απλή και βασίζεται στο γεγονός ότι το νερό θερμαίνεται στο συλλέκτη διαστέλλεται και γίνεται ελαφρύτερο από το χαμηλότερης θερμοκρασίας νερό της δεξαμενής. Αυτή η διαφορά πυκνότητας του νερού έχει ως αποτέλεσμα τη φυσική κυκλοφορία του μέσου του συλλέκτη και τη μεταφορά του θερμού νερού στην αποθηκευτική δεξαμενή. Την ίδια στιγμή το κρύο νερό της δεξαμενής ωθείται προς το συλλέκτη. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη φυσική ροή του νερού είναι η τοποθέτηση της δεξαμενής σε σημείο ψηλότερο από τους συλλέκτες.



Σχήμα 2.11 Ηλιακός θερμοσίφοντας.

## 2.7 Φωτοβολταϊκά συστήματα

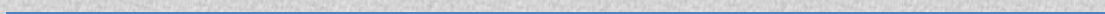
Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί απ' ευθείας σε ηλεκτρισμό μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων όπως αναφερθήκαμε και παραπάνω. Αυτά γενικά αποτελούνται από ένα σύστημα δύο υλικών σε επαφή, το οποίο όταν φωτίζεται εμφανίζει στα άκρα του συνεχή ηλεκτρική τάση. Σήμερα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία των οποίων η βιομηχανική παραγωγή έχει προωθηθεί, είναι αυτά που βασίζονται στη δημιουργία δύο ημιαγωγικών στρωμάτων σε επαφή. Συνήθως, τα δύο στρώματα αποτελούνται από το ίδιο κύριο υλικό, το ένα στρώμα ημιαγωγός τύπου  $n$  και το άλλο τύπου  $p$ . Εξωτερικά τοποθετούνται κατάλληλα ηλεκτρόδια. Η παραγόμενη ηλεκτρική

ισχύς από ένα μοναδικό φωτοβολταϊκό κύτταρο ανέρχεται τυπικά σε μόλις περίπου 2,5 W. Η δε συνεχής ηλεκτρική τάση ανοιχτού κυκλώματος, βρίσκεται στην περιοχή 0,5-0,6 Volts, ενώ το αντίστοιχο ηλεκτρικό ρεύμα στην περιοχή των 10-40 mA/cm<sup>2</sup>, για πυκνότητα ισχύος ηλιακού φωτός 1 kW/m<sup>2</sup>. Ωστόσο, διά της συνένωσης μεγάλου αριθμού ΦΒ κυττάρων (μεταξύ τους ηλεκτρική σύνδεση σε σειρά) μπορούν να παράγονται εκατοντάδες βαττ, και διά της συνένωσης των ΦΒ πλαισίων μπορούν να παράγονται χιλιάδες κιλοβάτ ηλεκτρικής ισχύος. Με τα ΦΒ στοιχεία θα ασχοληθούμε εκτενέστερα σε παρακάτω κεφάλαια.



Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

### 3.1 Ηλιακή ακτινοβολία και η Ένταση της

Η ηλιακή ακτινοβολία, (solar radiation), είναι ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκπεμπόμενη από τον ήλιο, στην οποία συμπεριλαμβάνονται ακτίνες X, υπεριώδης, ορατή και υπέρυθρη φωτεινή ακτινοβολία καθώς επίσης και εκπομπές ραδιοκυμάτων. Από την ενέργεια των  $3,8 \cdot 10^{33}$  εργίων, τα οποία εκπέμπονται ανά δευτερόλεπτο από τον Ήλιο, οι γειτονικοί του πλανήτες και δορυφόροι τους δέχονται μόνο ένα εξαιρετικά μικρό μέρος. Το μικρό τμήμα αυτής της ενέργειας που αναλογεί στην γη, (1 κιλοβάτ περίπου ανά τετραγωνικό μέτρο) είναι καθοριστικής σημασίας για τη διατήρηση των πάσης φύσεως διεργασιών στην επιφάνεια του πλανήτη μας.

Η τροχιά της γης, κατά την κίνηση της γύρω απ' τον ήλιο, είναι έλλειψη, με τον ήλιο στη μία των εστιών της, με μήκος μεγάλου ημιάξονα,  $a=149,6 \cdot 10^6$  km και εκκεντρότητα,  $e \sim 0,01673$ . Η απόσταση Γης-Ήλιου μεταβάλλεται περιοδικά, κατά τη διάρκεια του έτους, μεταξύ της μέγιστης τιμής της ( $\sim 4$  Ιουλίου), που ονομάζεται αφήλιο ( $\sim 152,1 \cdot 10^6$  km) και ελαχίστης ( $\sim 3$  Ιανουαρίου), που ονομάζεται περίλιο ( $147,1 \cdot 10^6$  km). Το μήκος του μεγάλου ημιάξονα,  $a$ , προσεγγιστικά  $150.000.000$  km, λαμβάνεται ως μονάδα μήκους σε διαστημικές αποστάσεις, ονομάζεται Αστρονομική Μονάδα και συμβολίζεται ως 1AU (Astronomical Unit). Για να διανύσει την απόσταση αυτή το φως, με την ταχύτητα των  $\sim 300.000$  km/s, απαιτούνται  $\sim 8,5$  min. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία απομακρύνεται ακτινικά από τον αστέρα προς το διάστημα και άρα η πυκνότητα ισχύος  $E$ , της ακτινοβολίας του, μεταβάλλεται αντιστρόφως αναλόγως με το τετράγωνο της απόστασης:

$$E = \frac{P}{4\pi d^2}$$

Όπου  $P$  η ολική, σ' όλα τα μήκη κύματος, εκπεμπόμενη απ' όλη την επιφάνεια του, ισχύς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και  $d$  η απόσταση από τον Ήλιο, στην οποία μετράται η ένταση της ακτινοβολίας.

### 3.2 Η δομή του Ήλιου

Ο ήλιος είναι ένα τυπικό αστέρι, με μάζα  $2 \cdot 10^{30}$  kg, ακτίνα  $700.000$  km, ηλικία  $5 \cdot 10^9$  χρόνια και υπολογίζεται ότι έχει μπροστά του άλλα 5 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια ζωής. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η δομή του Ήλιου στην οποία ξεχωρίζουν τα εξής τμήματα:

**Πυρήνας:** Βρίσκεται στο κέντρο και εκτείνεται σε διάμετρο 400.000 km με θερμοκρασίες που φτάνουν τους 15.000.000 K.

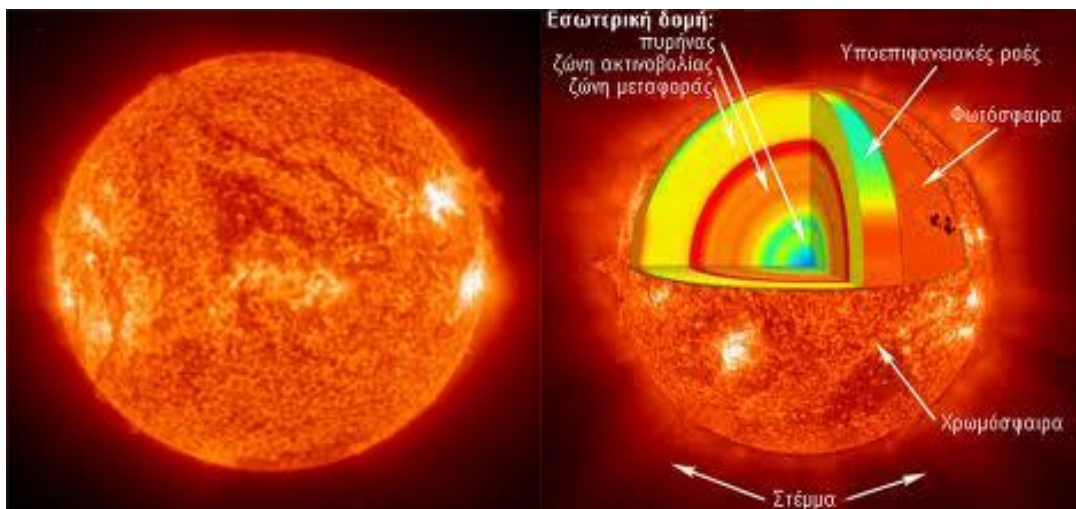
**Ζώνη ακτινοβολίας:** Καταλαμβάνει το 55% της ακτίνας του Ήλιου. Σε αυτή τη ζώνη η ενέργεια από τον πυρήνα μεταφέρεται προς τα έξω από τα φωτόνια.

**Ζώνη μεταφοράς:** Εδώ υπάρχει σχετικά ψυχρό και αραιό αέριο και κυριαρχεί η μεταφορά ενέργειας με συναγωγή.

**Φωτόσφαιρα:** Αποτελεί τον ορατό δίσκο του ηλίου πάχους 500 km.

**Χρωμόσφαιρα:** Είναι διαφανής στο φως γιατί έχει πυκνότητα 1000 φορές μικρότερη από την φωτόσφαιρα.

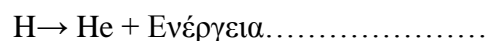
**Στέμμα:** Εκτείνεται προς το μεσοπλανητικό χώρο σχηματίζοντας την ηλιόσφαιρα.



*Σχήμα 3.1 Πάνω αριστερά ο ήλιος και πάνω δεξιά η δομή του ηλίου.*

Ο ήλιος αποτελείται ως επί το πλείστον από υδρογόνο κατά 70%, ήλιον κατά 28% και το υπόλοιπο 2% από βαρέα στοιχεία. Η επιφανειακή θερμοκρασία του είναι ~5800 K, ενώ η εσωτερική, περίπου, 15.000.000 K. Σε αυτήν την θερμοκρασία και σε πίεση 250 δισεκατομμύρια ατμόσφαιρες στον πυρήνα του ήλιου, ο οποίος έχει διάμετρο 400.000 km, πραγματοποιείται πυρηνική σύντηξη παράγοντας ενέργεια ως εξής. Δύο πυρήνες ελαφρών στοιχείων ευρισκόμενοι σε μια συνεχή κατάσταση διέγερσης συγκρούονται σε μεγάλες ταχύτητες, κάτω από συνθήκες πολύ υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, συγκροτώντας έτσι ένα νέο πυρήνα βαρύτερου στοιχείου.

Από την ένωση αυτή προκύπτει, όμως, ένα έλλειμα μάζας, καθώς η μάζα του νέου ατόμου δεν είναι ακριβώς ίση με το άθροισμα των δύο αρχικών. Το μικροσκοπικό αυτό κομμάτι της μαζικής απώλειας, πολλαπλασιαζόμενο με το τετράγωνο της ταχύτητας του φωτός μας δίνει την ενέργεια που παράγεται από τη σχάση. Έτσι έχουμε την μετατροπή του υδρογόνου σε ήλιο:



Η παραπάνω πυρηνική αντίδραση δικαιολογεί με το έλλειμμα μάζας, την εκλυόμενη ενέργεια σύμφωνα με τη γνωστή σχέση  $E=\Delta m \cdot c^2$ , από την ειδική θεωρία της σχετικότητας του Einstein. Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο υδρογόνου, που μετατρέπεται σε He, εκλύεται ενέργεια ίση με  $1,67 \cdot 10^5$  kWh. Η ενέργεια που εκπέμπεται από τον ήλιο χαρακτηρίζεται από ένα μέγιστο σε μήκος κύματος 0,47 μικρών, ενώ η ισχύς της ακτινοβολίας του γύρω στα 8 κιλοβάτ, ανά τετραγωνικό εκατοστόμετρο της επιφάνειας του.

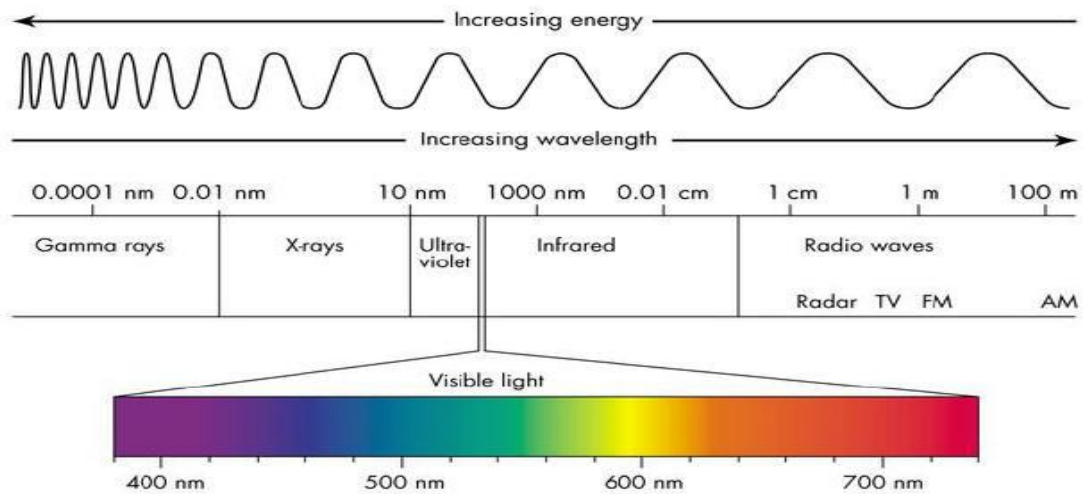
*Σχήμα 3.2 Στοιχεία για τον ήλιο*

<b>Απόσταση</b>	<b>149.600.000 km</b>
<b>Διάμετρος</b>	1.392.000 km (109,3 φορές η διάμετρος της Γης)
<b>Επιφάνεια</b>	$6,087 \times 10^{12}$ km <sup>2</sup> (12.000 φορές η επιφάνεια της Γης)
<b>Όγκος</b>	$1,412 \times 10^{18}$ km <sup>3</sup> (1.306.000 φορές ο όγκος της γης)
<b>Μάζα</b>	$1,99 \times 10^{30}$ kg <sup>3</sup> (333.400 φορές η μάζα της Γης)
<b>Ταχύτητα διαφυγής από την επιφάνεια του ήλιου</b>	618 km/s
<b>Ενεργός θερμοκρασία</b>	5.740 K
<b>Ολική παραγωγή ενέργειας</b>	$3,86 \times 10^{33}$ erg/s
<b>Ακτινοβολία απο την επιφάνεια του ήλιου</b>	$6,35 \times 10^{10}$ erg/cm <sup>2</sup> .s
<b>Λαμπρότητα του κέντρου του δίσκου</b>	$8,23 \times 10^5$ lambert
<b>Ροή φώτος (μέσος φωτισμός από τον ήλιο στο ζενίθ)</b>	141.400 lux-στη μέση απόσταση της γης 103.000 lux-έξω από την ατμόσφαιρα της
<b>Πυκνότητα</b>	150 g/cm <sup>3</sup>
<b>Θερμοκρασία</b>	15.000.000 K*
<b>Πίεση</b>	$4 \times 10^{17}$ dyn/cm <sup>2</sup> ( $4 \times 10^{11}$ atm)

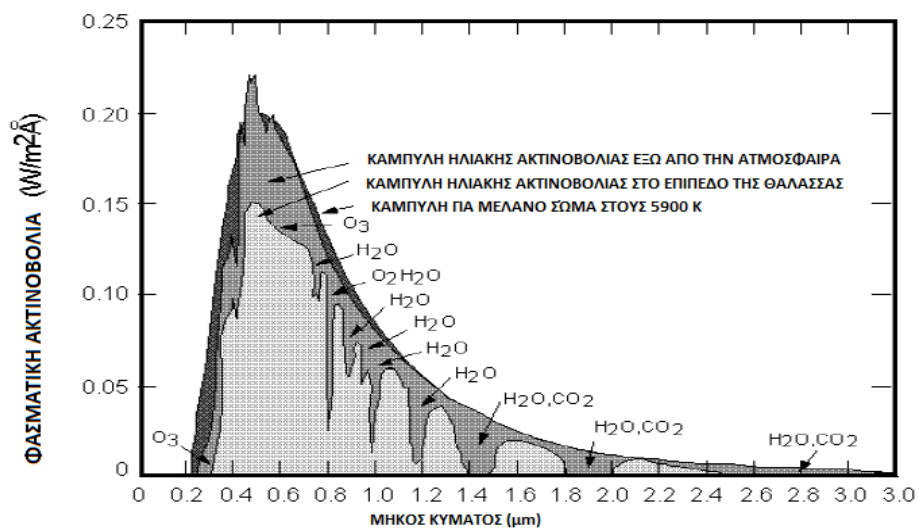
\*Διαφορετικοί υπολογισμοί δίνουν αποτελέσματα από 13.000.000 K έως 25.000.000 K

### 3.3 Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας

Το φάσμα του ηλιακού φωτός, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, εκτείνεται πρακτικά, στα όρια της ατμόσφαιρας της Γης, από 0,1 μm (ακτίνες X) μέχρι 100 m (μακρά ραδιοκύματα).



Το φάσμα αυτό, έξω από την ατμόσφαιρα της γης, προσεγγίζεται με το φάσμα μέλανος σώματος θερμοκρασίας  $T_H \sim 5900 \text{ K}$ , με μέγιστο στο μήκος κύματος  $\lambda_{\text{μεγ}} \sim 480 \text{ nm}$ . Στο αριστερό μέρος των φασμάτων (στα όρια της ατμόσφαιρας της γης, αλλά και στο επίπεδο της θάλασσας) διακρίνονται γραμμές απορρόφησης, που οφείλονται σε χαμηλής θερμοκρασίας αέρια στοιχεία (Fe, Mg, Ca), της χρωμόσφαιρας του ήλιου. Οι απορροφήσεις στο δεξιό τμήμα των φασμάτων προέρχονται από τα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας της γης (υδρατμοί,  $\text{CO}_2$ , οξείδια του αζώτου κ.α.). Το όζον ελαττώνει ισχυρά την πυκνότητα ισχύος της διερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή 0,3-0.4 μm.



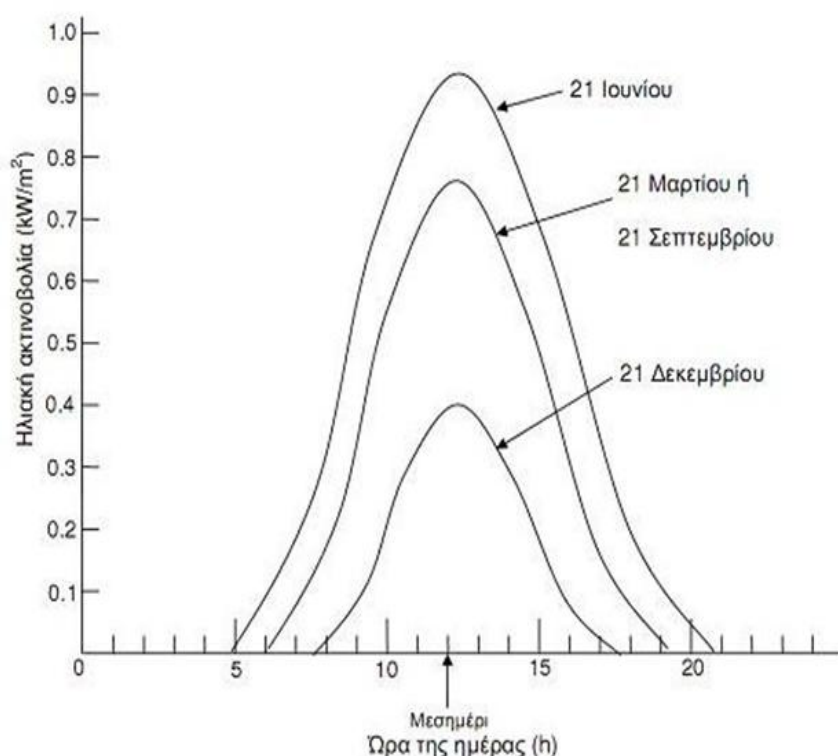
**Σχήμα 3.3** Φάσμα μέλανος σώματος θερμοκρασίας  $T=5900 \text{ K}$ , φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα, φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο της θάλασσας.

Το τμήμα του, που αφορά την ανάπτυξη της ζωής και τις πρακτικές εφαρμογές στη Γη, περιορίζεται στο διάστημα 0,3- 5 μm, μικρό μέρος του οποίου αποτελεί η περιοχή του ορατού φάσματος (0,38- 0,75 μm). Η απορρόφηση σ' αυτή τη

φασματική περιοχή, είναι μειωμένη, επιτρέποντας τη δίοδο προς τη γη, στο μέρος εκείνο του ηλιακού φάσματος γύρω από το μέγιστο, που είναι πολύ σημαντικό για τη ζωή στον πλανήτη.

### 3.4 Διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Στο σχήμα 3.4 δείχνονται παραδείγματα της ομαλής μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας για 3 ενδεικτικές ημερομηνίες (καλοκαίρι, άνοιξη και φθινόπωρο-χειμώνα) σε συνθήκες ιδανικά καθαρού ουρανού.

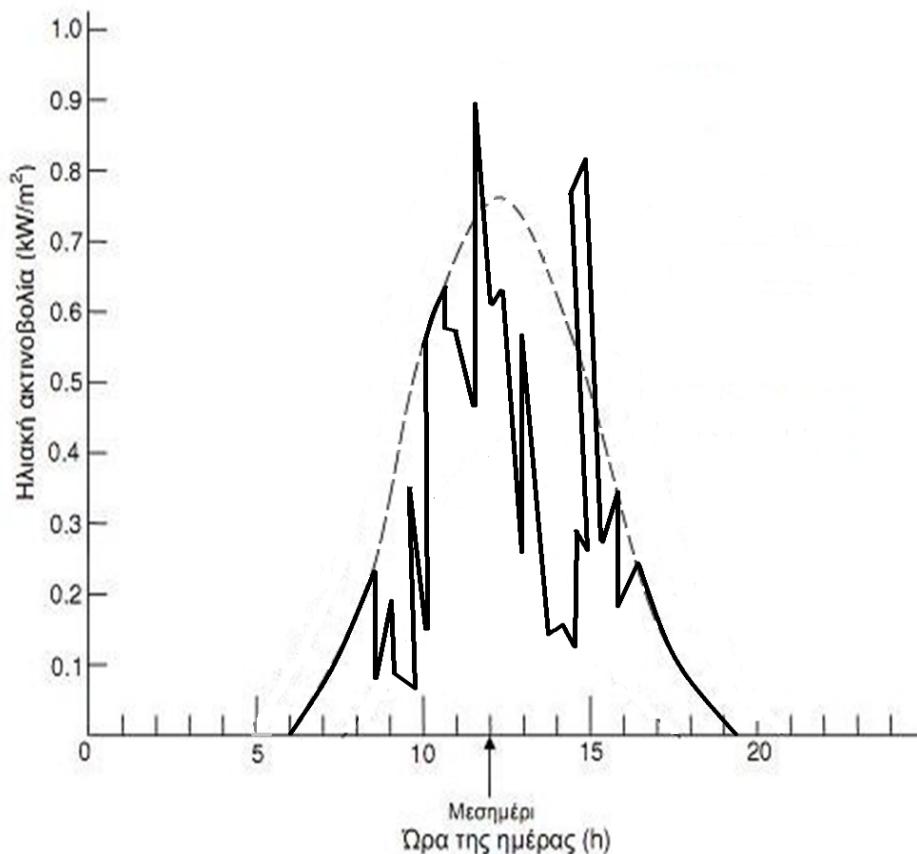


**Σχήμα 3.4** Παράδειγμα της διακύμανσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια στη διάρκεια των φωτεινών ωρών τριών χαρακτηριστικών ημερομηνιών, με εντελώς καθαρό ουρανό. Οι ώρες είναι σε ηλιακές τιμές.

Χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η τιμή της μέγιστης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (ένταση αιχμής), που μετράται στο ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος του ορίζοντα, το οποίο δεν είναι αναγκαστικό να συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι. π.χ. στην Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολόι δείχνει 12:25' τον χειμώνα, και 13:25' το καλοκαίρι, όταν ισχύει η θερινή ώρα.

Όταν ο ουρανός έχει σύννεφα, η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης γίνεται ανώμαλη, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.





**Σχήμα 3.5** Παράδειγμα της διακύμανσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια των φωτεινών ωρών μιας ημέρας με μερική νέφωση. Η ασυνεχής καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη διακύμανση με εντελώς καθαρό ουρανό.

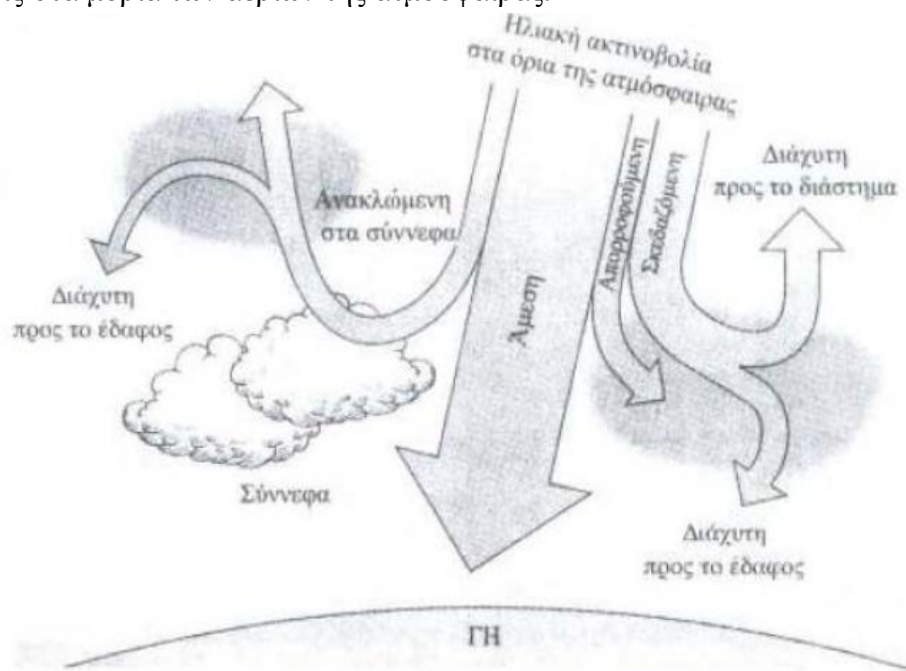
Οι παρατηρούμενες απότομες πτώσεις της έντασης οφείλονται στην παρεμβολή ενός νέφους που μετακινεί ο άνεμος. Επίσης το γρήγορο πέρασμα ενός σμήνους πουλιών ή ενός αεροπλάνου μέσα από τη δέσμη του ηλιακού φωτός που δέχεται ο συλλέκτης, καταγράφεται σαν μια πολύ οξεία στιγμιαία πτώση της έντασης της ακτινοβολίας. Παρατηρούμε, ακόμη εξάρσεις που ξεπερνούν τις κανονικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Προφανώς στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα θα συμβαίνει αθροιστική επίδραση της άμεσης ακτινοβολίας από τον ήλιο, μέσα από ένα άνοιγμα των νεφών, και της ανακλώμενης από τα σύννεφα.

Στη διάρκεια του έτους, στο βόρειο ημισφαίριο, ο αριθμός των φωτεινών ωρών της ημέρας, η μέγιστη ισχύς καθώς και η συνολική ημερήσια ενέργεια που δέχεται μία οριζόντια επιφάνεια, φτάνουν στις μέγιστες τιμές τους στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο) και πέφτουν στις αντίστοιχες ελάχιστες τιμές τους στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Στις επιφάνειες, όμως, π.χ. που βρίσκονται σε κλίση ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου, η μέγιστη τιμή της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι στα ηλιακά μεσημέρια των ισημεριών (21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου), διότι τότε δέχονται κάθετα τις ακτίνες του ήλιου.

### 3.5 Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

Κατά την εισχώρηση των ηλιακών ακτίνων, στην γήινη ατμόσφαιρα, η ένταση τους ελαττώνεται, καθώς τα φωτόνια σκεδάζονται αφενός στα μόρια της ατμόσφαιρας και στα πολύ μικρής διαμέτρου  $d$ , σωματίδια ( $d \leq \lambda$ , σκέδαση Rayleigh), αφετέρου, στα μεγαλύτερης διαμέτρου αιωρήματα της, δηλαδή, τους υδρατμούς, τη σκόνη και τον καπνό (σκέδαση Mie ή Tyndall). Ένα άλλο μέρος της ακτινοβολίας, απορροφάται από ορισμένα συστατικά της ατμόσφαιρας. Παραδείγματος χάριν, η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται από τα μόρια του όζοντος, στα ανώτερα στρώματα της κύριας μάζας της ατμόσφαιρας, έτσι ώστε η ένταση των ακτίνων αυτών, στην επιφάνεια της γης, να είναι εξαιρετικά μειωμένη και η καρκινογόνος δράση της αρκετά περιορισμένη. Ομοίως απορροφούν οι υδρατμοί το  $\text{CO}_2$ , τα οξείδια του αζώτου κ.α., σε άλλες περιοχές του φάσματος. Τέλος, μέρος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας φτάνει στην επιφάνεια της γης.

Συνεπώς σε κάθε τόπο της επιφάνειας της γης, φτάνουν όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα δύο συνιστώσες του ηλιακού φωτός: Η άμεση ή απευθείας, (Beam) που αφορά τις ακτίνες που φτάνουν απ'ευθείας από τον ήλιο και η διάχυτη (Diffuse), που αφορά τις ακτίνες που φτάνουν στην επιφάνεια αφού υποστούν πολλαπλές σκεδάσεις στα μόρια των αερίων της ατμόσφαιρας.



Σχήμα 3.6 Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

Η διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, προέρχεται από όλο τον ουράνιο θόλο (πάνω από το φυσικό ορίζοντα) και σε πρώτη εκτίμηση, μπορεί να θεωρηθεί ισότροπη. Γενικά λοιπόν η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα συλλέκτη ή ένα αισθητήρα, αποτελείται από την απευθείας, τη διάχυτη και την διάχυτα “ανακλώμενη” από το έδαφος.

Η διάχυτα ανακλώμενη εξαρτάται από τη μορφολογία και το χρώμα του

εδάφους ή της επικάλυψης του (γρασίδι ή χιόνι) και την πυκνότητα των νεφών, ενώ η ολική, απευθείας και διάχυτη, εξαρτώνται, σε γενικές γραμμές από τους εξής παράγοντες:

α) τη σύσταση- κατάσταση της ατμόσφαιρας, τη δεδομένη χρονική στιγμή (υγρασία και γενικά, τα αιωρήματα της ατμόσφαιρας)

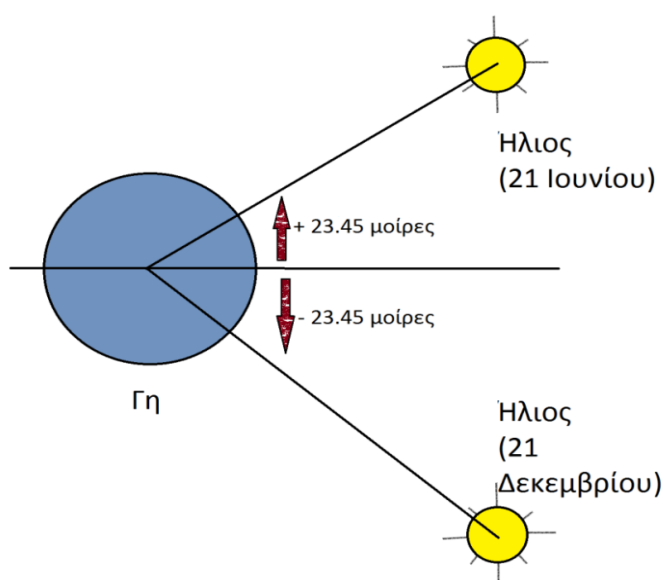
β) την ημέρα κατά τη διάρκεια του έτους.

γ) τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στη συλλεκτική επιφάνεια, η οποία μεταβάλλεται καθώς αλλάζει το ύψος του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας.

### 3.6 Ηλιακή γεωμετρία

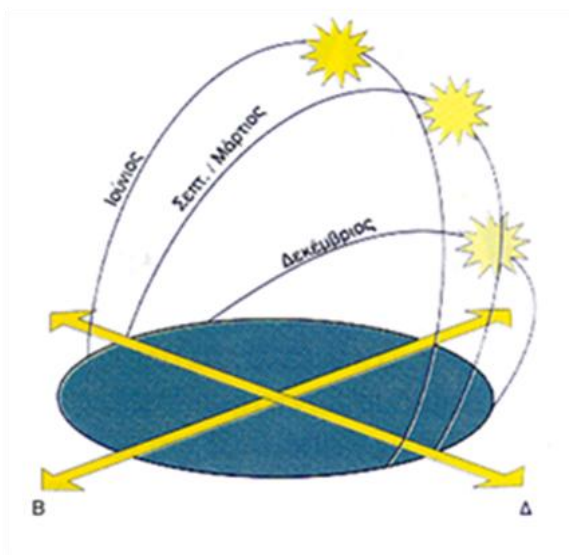
Όπως αναφερθήκαμε παραπάνω, η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας και η φωτονική της σύσταση παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ανάλογα με την ώρα, την εποχή, τις κλιματολογικές συνθήκες και την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία, σε αιωρούμενα σωματίδια και σε άλλα συστατικά. Επίσης, επηρεάζονται σε αξιόλογο βαθμό από άλλους προβλεπόμενους ή απρόβλεπτους παράγοντες, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, το πέρασμα σμήνους πουλιών ή αεροπλάνου κλπ.

Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία. Κατά την διάρκεια μιας χρονιάς, η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές, σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της απόκλισης ( $\delta$ ), δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου, και στο επίπεδο του ισημερινού (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7 Η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το θερινό και το χειμερινό ηλιοστάσιο

Οι τιμές της απόκλισης του ήλιου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο ημισφαίριο. Οι ακραίες της τιμές είναι  $+23.45^\circ$  στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο) και  $-23.45$  στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Άμεση συνέπεια των διαφορετικών τιμών της απόκλισης του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους είναι οι κυκλικές τροχές του διαγράφονται βορειότερα στον ουρανό το καλοκαίρι, με νωρίτερη ανατολή και αργότερη δύση στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ τον χειμώνα συμβαίνει το αντίθετο .



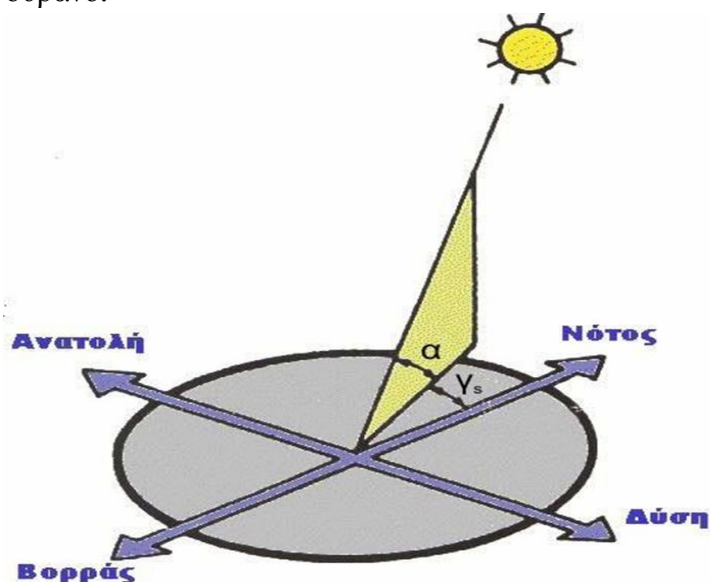
**Σχήμα 3.8** Παράδειγμα των αντίστοιχων τροχιών που διαγράφει ο ήλιος στον ουρανό στη διάρκεια της ημέρας, κατά τα ηλιοστάσια καθώς και τις ισημερίες (21 Ιουνίου, 21 Σεπτεμβρίου και 21 Μαρτίου, 21 Δεκεμβρίου).

Παράλληλα, διαμορφώνονται οι αντίστοιχες μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στις διάφορες εποχές του έτους. Ιδιαίτερα χρήσιμα μεγέθη για τη γενική εκτίμηση της καθημερινής και της εποχιακής διακύμανσης της ακτινοβολίας σε έναν τόπο, είναι η θεωρητική **ηλιοφάνεια**, δηλαδή το χρονικό διάστημα από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου. Ενδεικτικά έχουμε μετεωρολογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά για την Αθήνα. (πίνακας 3.9)

Ημερομηνία	Ύψος του ήλιου το μεσημέρι ( $^\circ$ )	Θεωρητική ηλιοφάνεια (h)	Μέση θερμοκρασία ( $^\circ\text{C}$ )
21 Μαρτίου (εαρινή ισημερία)	51,08	11,9	13
21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο)	75,25	14,8	25
21 Σεπτεμβρίου (Φθινοπωρινή ισημερία)	51,08	11,9	23
21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο)	28,35	9,5	11

**Σχήμα 3.9** Ύψος του ήλιου, θεωρητική ηλιοφάνεια, και μέση θερμοκρασία του αέρα στις φωτεινές ώρες της ημέρας.

Η θέση του ήλιου στον ουρανό ενός τόπου περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες: το ύψος και το αζιμούθιο (Σχήμα 3.10). Το **ύψος** του ήλιου ( $\alpha$ ), είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στον ορίζοντα. Αντί για ύψος, χρησιμοποιείται επίσης συχνά η συμπληρωματική της γωνία, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, αυτή, ονομάζεται ζενιθιακή απόσταση (ή ζενιθιακή γωνία) του ήλιου. Ζενίθ είναι το σημείο του ουρανού που συναντά η κατακόρυφος ενός τόπου, και ο όρος προέρχεται από την αραβική λέξη *senit* που σημαίνει ευθεία οδός. Η δεύτερη χαρακτηριστική γωνία του ήλιου, είναι το ηλιακό **αζιμούθιο** ( $Y_s$ ), είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Ο όρος προέρχεται από την αραβική έκφραση *as summut*, που σημαίνει κατεύθυνση. Προς τα δεξιά από το νότο το ηλιακό αζιμούθιο παίρνει θετικές τιμές, ενώ προς τα αριστερά, αρνητικές. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το ύψος του ήλιου και το αζιμούθιο μεταβάλλονται συνεχώς, καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό.



**Σχήμα 3.10** Οι γωνίες του ύψους ( $\alpha$ ) και του αζιμούθιου ( $Y_s$ ), που περιγράφουν κάθε στιγμή τη θέση του ήλιου στον ουρανό.

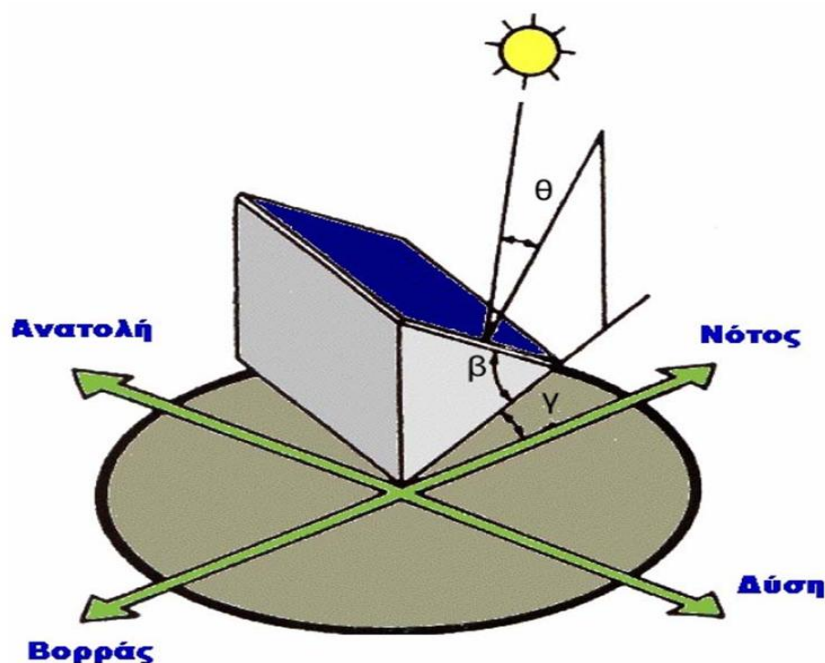
### 3.7 Προσανατολισμός του συλλέκτη

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Βασικά στοιχεία καθορισμού του προσανατολισμού ενός συλλέκτη είναι η κλίση και η αζιμούθια γωνία του, μετρούμενο ως προς την κατεύθυνση του νότου. Η κατεύθυνση αυτή χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη

τιμή της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ημέρας.

Η **κλίση** του συλλέκτη ( $\beta$ ) είναι η διέδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα. Δείχνει πόσο γέρνει ο συλλέκτης και μπορεί να πάρει τιμές από  $0^\circ$  μέχρι  $180^\circ$ . Για γωνίες  $\beta > 90^\circ$  το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω. (Σχήμα 3.11)

Η **αζιμούθια γωνία** του συλλέκτη ( $\gamma$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακορύφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από  $-180^\circ$  μέχρι  $+180^\circ$ . Η γωνία  $-180^\circ$  (που συμπίπτει με τη  $+180^\circ$ ) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς το βορρά, η γωνία  $-90^\circ$  προς την ανατολή, η γωνία  $0^\circ$  προς το νότο και η γωνία  $+90^\circ$  προς τη δύση (Σχήμα 3.11).



**Σχήμα 3.11** Η κλίση ( $\beta$ ) και η αζιμούθια γωνία ( $\gamma$ ) που χαρακτηρίζουν τον προσανατολισμό ενός ηλιακού συλλέκτη στην επιφάνεια της γης.

Προφανώς, η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε έναν επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  είναι  $0^\circ$ . Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Υπάρχουν μηχανικές διατάξεις που επαναπροσανατολίζουν συνεχώς τον συλλέκτη (π.χ. με τη βοήθεια φωτοκυττάρων ή σύγχρονου αυτοματισμού, PLC) ώστε η επιφάνεια του να αντικρύζει συνεχώς κάθετα τις ακτίνες του ήλιου. Οι διατάξεις αυτές είναι πολυσύνθετες και πολύ πιο δαπανηρές από αυτές του σταθερού τύπου καθώς απαιτείται επιπλέον ηλ. κινητήρας για την στρέψη των πλαισίων, επιπλέον σύστημα παρακολούθησης του ήλιου με προγραμματισμό PLC επεξεργαστή, βραχίονες και υδραυλικές μπουκάλες, καθώς και ηλ. πίνακας για την ασφάλεια του όλου συστήματος. Η διάταξη (πάνω σε δύο άξονες) παρακολούθησης του ήλιου μπορεί να συλλέξει μέχρι και 25% περισσότερη ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός έτους,

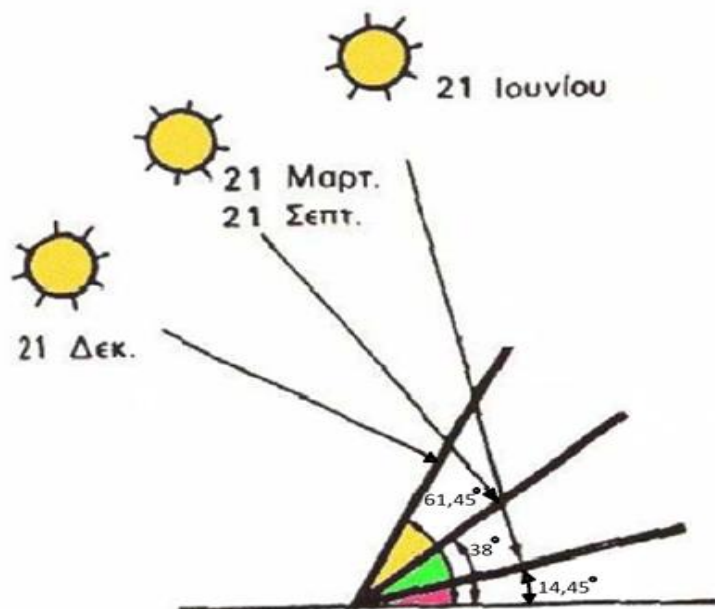
σε σύγκριση με την εγκατάσταση σταθερής κλίσης. Έχει διαπιστωθεί όμως ότι αν ο προσανατολισμός μπορεί να ρυθμίζεται χειροκίνητα, σε κλίματα με ηλιοφάνεια, τότε μια διάταξη επίπεδης κινούμενης πλάκας σταθερού τύπου που έχει κατάλληλη ρύθμιση ώστε να στρέφεται προς τον ήλιο δύο φορές την ημέρα και να παίρνει κατάλληλη κλίση τέσσερις φορές το χρόνο, μπορεί και συλλαμβάνει το 95% της ενέργειας, που συλλέγετε από ένα σύστημα παρακολούθησης δύο αξόνων.

### 3.8 Βέλτιστη κλίση του συλλέκτη

Στις συνηθισμένες περιπτώσεις οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, κατά τη διάρκεια του έτους. Η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας συνδέεται με τις άλλες γωνίες της ηλιακής γεωμετρίας, που αναφέρθηκαν παραπάνω, με τη σχέση:

$$\text{συν}\theta = \text{συν}\beta_{\alpha} \cdot \eta\mu\beta \cdot \text{συν}(\gamma - \gamma_{\alpha}) + \eta\mu\beta_{\alpha} \cdot \text{συν}\beta$$

Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, είναι ίση με την γεωγραφική παράλληλο του τόπου, και η αζιμούθια γωνία είναι 0° (προς το νότο). Αλλά λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή (Σχήμα 3.12).



**Σχήμα 3.12** Η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη στο θερινό (21 Ιουνίου) και το χειμερινό (21 Δεκεμβρίου) ηλιοστάσιο και στην εαρινή (21 μαρτίου) και στη φθινοπωρινή (21 Σεπτεμβρίου) ισημερία, σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος 38° όπως η Αθήνα. Τα ύψη του ήλιου που εικονίζονται αφορούν στα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια.

Έτσι, αν επιδιώκεται να παράγει το σύστημα όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου  $10^\circ$  ως  $15^\circ$  μικρότερη από την παράλληλο του τόπου, ενώ για το χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου  $10^\circ$  με  $15^\circ$  μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου.

### 3.9 Προσανατολισμός του συλλέκτη ως προς τον αληθή νότο

Ο προσδιορισμός της αληθούς διεύθυνσης βορρά – νότου μπορεί να γίνει είτε με τη βοήθεια σχετικών οργάνων, όπως είναι η μαγνητική και η γυροσκοπική πυξίδα είτε με το προσδιορισμό της χρονικής στιγμής του ηλιακού μεσημεριού. Η χρησιμοποίηση της πυξίδας προϋποθέτει τη γνώση της μαγνητικής απόκλισης για τον δεδομένο τόπο, με βάση στοιχεία από σχετικούς πίνακες ή χάρτες. Για τον ακριβή προσδιορισμό των γωνιών χρησιμοποιούνται γωνιομετρικά όργανα ακριβείας, όπως ο θεοδόλιχος ή το ταχύμετρο, σε συνδιασμό με την πυξίδα.

Η μέθοδος προσδιορισμού της κατεύθυνσης του αληθούς νότου σ' ένα τόπο, με βάση το ηλιακό μεσημέρι βασίζεται στον προσδιορισμό της διεύθυνσης της σκιάς που δημιουργεί μια κατακόρυφη, λεπτή ράβδος, σε οριζόντιο επίπεδο, τη στιγμή που ο ήλιος βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο της φαινομένης ημερήσιας τροχιάς του. Ο καθορισμός της κατάστασης αυτής απαιτεί γνώση, της αντίστοιχης χρονικής στιγμής, με βάση τον τοπικό χρόνο, όπως τον δείχνει ένα ρολόι (Επίσημος ή Πολιτικός χρόνος). Για να προσδιοριστεί η χρονική στιγμή του ηλιακού μεσημεριού, με βάση τον επίσημο χρόνο απαιτούνται:

- α) η ζώνη πολιτικού χρόνου και το γεωγραφικό μήκος του τόπου.
- β) η χρονική διόρθωση με βάση την εξίσωση του χρόνου, για τη συγκεκριμένη ημέρα του έτους.

### 3.10 Όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας

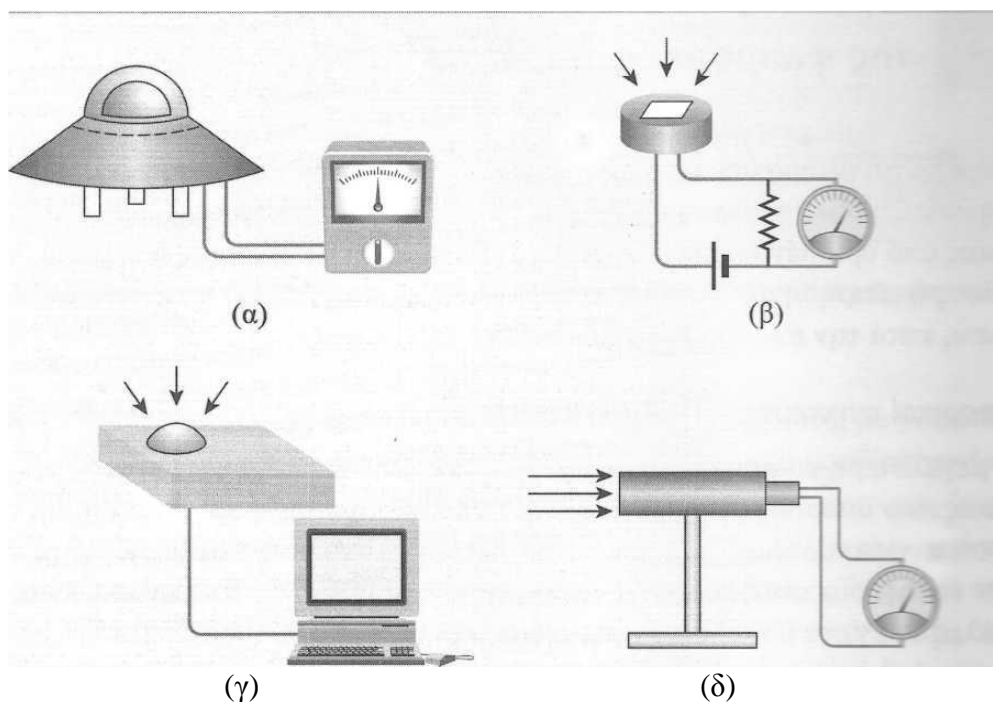
Τα όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στους θερμικούς αισθητήρες, των οποίων η ένδειξη οφείλεται στη θέρμανση της φωτιζόμενης (μαύρης) επιφάνειας, μιας πλάκας από ορισμένο υλικό και στους αισθητήρες ηλεκτρονικής διέγερσης, στους οποίους η μέτρηση οφείλεται στις ενεργειακές μεταβάσεις των ηλεκτρονίων του υλικού, κατά την απορρόφηση φωτονίων.

**I. Θερμικοί ανιχνευτές (Thermal detectors):** Για μεγαλύτερη ευαισθησία των θερμικών αισθητήρων, φροντίζουμε η μάζα της πλάκας που απορροφά την ακτινοβολία να είναι μικρή, ώστε μικρά ποσά απορροφούμενης ενέργειας να προκαλούν μεγάλη μεταβολή στη θερμοκρασία της. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν α)



το πυρανόμετρο β) ο πυροηλεκτρικός κρύσταλλος γ) τα βολόμετρα, μεταξύ των οποίων και το thermistor.

- Πυρανόμετρο: Η αρχή λειτουργίας του (Σχήμα 3.13α), βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Η ακτινοβολία που προσπίπτει, στην ενεργό επιφάνεια (μαύρη), απορροφούμενη θαρμαίνει την πλάκα αυτή. Έτσι δημιουργείται διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ της εκτεθειμένης στο φως και μιας άλλης στο εσωτερικό, η οποία παραμένει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



**Σχήμα 3.13** (α) Πυρανόμετρο, (β) Φωτοдиодος, (γ) Φασματοραδιόμετρο, (δ) Πυροηλεκτρικός κρύσταλλος

- Πυροηλεκτρικός κρύσταλλος: Η αρχή λειτουργίας του (Σχήμα 3.13δ), βασίζεται στην τροποποίηση της διπολικής ηλεκτρικής ροπής διηλεκτρικών υλικών, που ονομάζονται πυροηλεκτρικά (πυροηλεκτρικό φαινόμενο). Η αύξηση της θερμοκρασίας του πυροηλεκτρικού υλικού οδηγεί σε εμφάνιση ηλεκτρισμού, δηλαδή, πόλωσης του υλικού λόγω θέρμανσης του. Χαρακτηρίζεται από σταθερή απόκριση (Ampere/Watt), σε ευρεία περιοχή μηκών κύματος, δηλαδή, απόκριση ανεξάρτητη του μήκους κύματος, λ κι αυτό τον καθιστά ιδανικό για καταγραφή φασμάτων στην περιοχή ευαισθησίας του.
- Βολόμετρα: Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός υλικού, με την θερμοκρασία του, λόγω απορρόφησης της ενέργειας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για αυξημένη απόκριση του αισθητήρα, το υλικό του πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή απορροφητικότητα της ακτινοβολίας, σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων και μικρή θερμοχωρητικότητα. Κατασκευάζονται από ποικιλία υλικών, τόσο σε στοιχειακή (π.χ. Si, Ge, Bi, Au) όσο και σε σύνθετη μορφή (Bi σε συνδυασμό

με ίνες από Nylon, Ge με προσμίξεις και ίνες nylon). Μια πολύ σημαντική κατηγορία βολομέτρων είναι τα μεταλλικά (π.χ. λευκόχρυσου ή πλατίνας Pt).

- **Thermistor:** Είναι ένα βολόμετρο, του οποίου το βασικό υλικό αποτελείται από μεταλλικά οξειδία (οξειδία μαγνησίου, νικελίου κοβαλτίου, χαλκού, σιδήρου και τιτανίου). Η χρήση τους περιορίζεται σε θερμοκρασίες κάτω των 300 °C, επειδή πάνω απ' τη θερμοκρασία αυτή μειώνεται η σταθερότητα της δομής τους. Μπορούν να κατασκευαστούν με διάφορες μορφές (με τη μορφή δίσκου, λεπτής φέτας, ράβδου) και σε μικρό μέγεθος, για καλή απόκριση στις μετρήσεις. Χαρακτηρίζονται από υψηλή διακριτική ικανότητα και δέκα (10) φορές πιο μεγάλη ευαισθησία από τα μεταλλικά βολόμετρα.

**II. Αισθητήρες ηλεκτρονικής διέγερσης (Quantum detectors):** Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται είτε στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή την εκπομπή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια ενός μετάλλου, είτε στη διέγερση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, στην περίπτωση των ημιαγωγών. Στην κατηγορία αισθητήρων που βασίζονται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ανήκουν, οι φωτοδιόδοι κενού ή φωτοκύτταρα και οι φωτοπολλαπλασιαστές, ενώ στην κατηγορία αισθητήρων που βασίζονται στη φωτοαγωγιμότητα του υλικού ανήκουν οι φωτοαγωγοί ή φωτοαντιστάσεις, η φωτοδιόδος ημιαγωγών, η φωτοβολταϊκή κυψελίδα ή φωτοβολταϊκό στοιχείο.

- **Φωτοαγωγοί ή φωτοαντιστάσεις:** Είναι ημιαγωγοί, ενδογενείς ή προσμύξεων, οι οποίοι εμφανίζουν έντονη φωτοαγωγιμότητα. Δηλαδή, η απορρόφηση φωτός στο ημιαγωγικό υλικό διεγείρει ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, αυξάνοντας την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ημιαγωγού.
- **Φωτοδιόδος ημιαγωγών:** Είναι μία διόδος επαφής ημιαγωγών, (Σχήμα 3.13β) που όταν φωτίζεται στο εσωτερικό της παράγονται επιπλέον ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής, τα οποία διαχωριζόμενα από το πεδίο επαφής, συμβάλλουν στη δημιουργία αυξημένου ηλεκτρικού ρεύματος. Στο κύκλωμα περιλαμβάνονται η ηλεκτρική πηγή, η διόδος, και μία αντίσταση.
- **Φωτοβολταϊκή κυψελίδα ή φωτοβολταϊκό στοιχείο:** συγκεκριμένα διαφέρει από την φωτοδιόδο, καθώς η επιφάνεια της διόδου είναι πολύ μικρή. Αντίθετα το ΦΒ στοιχείο χαρακτηρίζεται από όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια και ο λόγος είναι ότι προορίζεται για πηγή ηλεκτρικής ενέργειας κι όχι αισθητήρας.
- **Φασματογράφος:** Διάταξη με την οποία αναλύεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μιας πηγής (ηλεκτρομαγνητικό φάσμα). Η ανάλυση βασίζεται στη χρήση είτε πρίσματος είτε οπτικών φραγμάτων (ανάκλασης ή διέλευσης).
- **Φασματοραδιόμετρο:** Είναι ένα φασματοσκόπιο εφοδιασμένο με μηχανισμούς κίνησης (Σχήμα 3.13γ) ώστε το φάσμα να σαρώνεται σ' όλο το λειτουργικό εύρος μηκών κύματος και να καταγράφεται σε ηλεκτρονική «μνήμη». Ο χρόνος καταγραφής του ηλιακού φάσματος είναι 1-2 min. Στο σημείο εισόδου του φασματογράφου τοποθετείται μια «σφαίρα ολοκλήρωσης», προκειμένου

η προσπίπτουσα ακτινοβολία να καταγράφεται ανεξάρτητα από τη γωνία πρόσπτωσης.

### 3.11 Ηλιακή ακτινοβολία στη χώρα μας

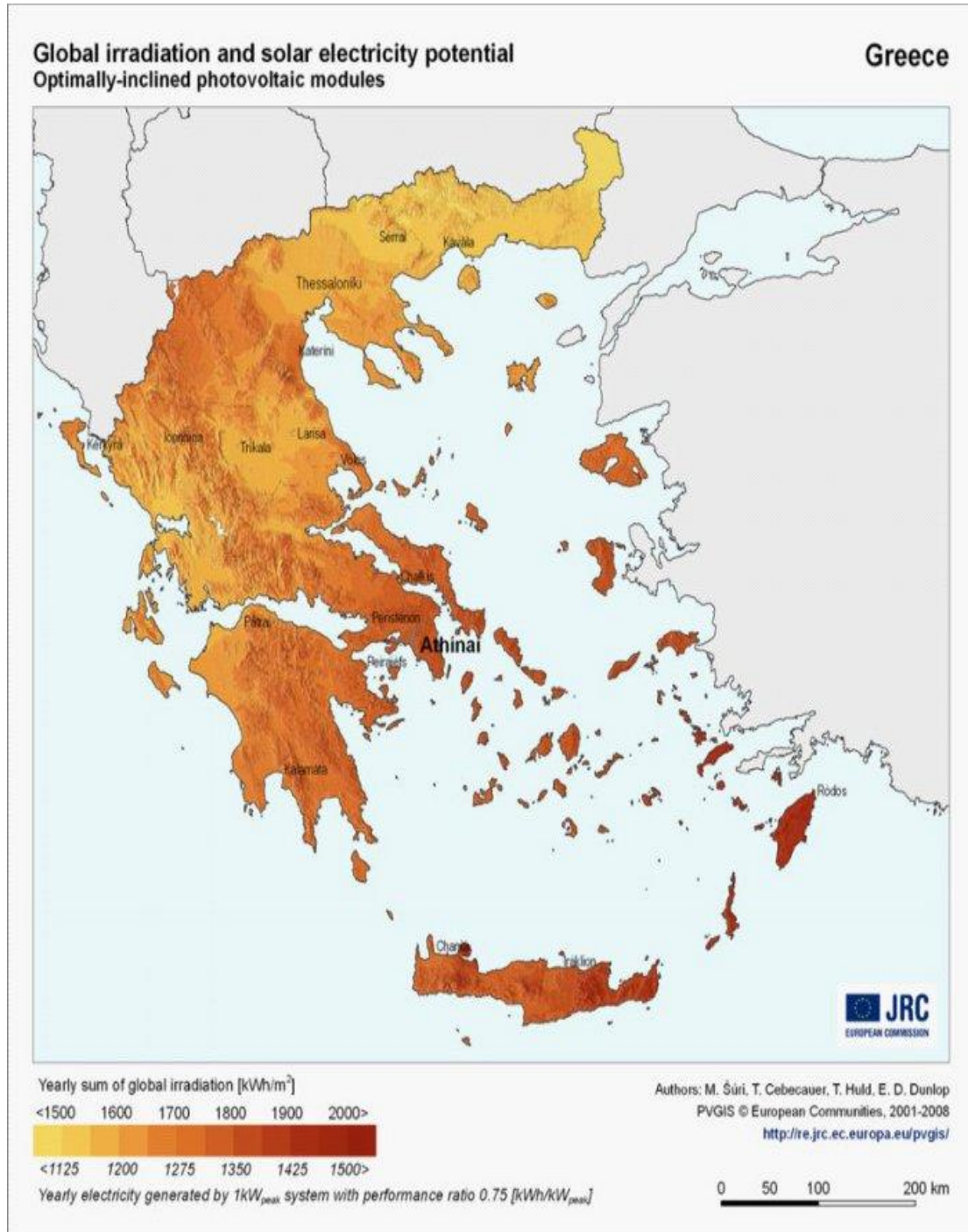
Όπως αναφερθήκαμε και παραπάνω η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί μία ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία στην χώρα μας κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα τόσο κατά την καλοκαιρινή όσο και κατά την χειμερινή περίοδο. Η μέση μηνιαία διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία σε μερικές αντιπροσωπευτικές περιοχές παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Μήνας	Μέση μηνιαία διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία Αθήνα (kWh/m <sup>2</sup> )	Μέση μηνιαία διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία Θεσσαλονίκη (kWh/m <sup>2</sup> )	Μέση μηνιαία διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία Κρήτη (kWh/m <sup>2</sup> )	Μέση μηνιαία διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία Ρόδος (kWh/m <sup>2</sup> )
Ιανουάριος	91,99	85,16	92,59	91,53
Φεβρουάριος	103,74	94,49	107,72	105,99
Μάρτιος	138,94	128,34	146,85	144,58
Απρίλιος	156,97	144,38	171,17	168,03
Μάιος	179,01	166,69	197,67	194,27
Ιούνιος	176,60	166,03	195,51	192,45
Ιούλιος	184,75	176,44	200,81	198,52
Αύγουστος	184,19	176,86	195,57	193,84
Σεπτέμβριος	166,22	157,38	173,61	171,81
Οκτώβριος	139,06	131,02	141,68	140,32
Νοέμβριος	107,64	95,92	111,38	109,30
Δεκέμβριος	88,51	80,42	89,71	88,40
<b>Μέση ετήσια</b>	<b>143,13</b>	<b>133,59</b>	<b>152,02</b>	<b>149,92</b>

*Σχήμα 3.14 Μέση μηνιαία και μέση ετήσια διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m<sup>2</sup>) σε Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Κρήτη και Ρόδο.*

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η κατανομή ετησίων τιμών ενεργειακής απολαβής (kWh/m<sup>2</sup>·y) ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια νότια προσανατο-

λισμένου συλλέκτη, σε βέλτιστη γωνία κλίσης και αντίστοιχης ενεργειακής αποδοτικότητας ( $\text{kWh/kW}_p \cdot \text{y}$ ) ΦΒ συστοιχιών, στην Ελλάδα.

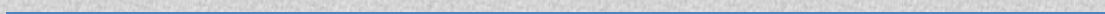


*Κι έχουμε στο κατάρτι μας βιγλάτορα παντοτινό τον Ήλιο τον Ηλιάτορα.*

**Οδυσσέας Ελύτης**

Κεφάλαιο 1

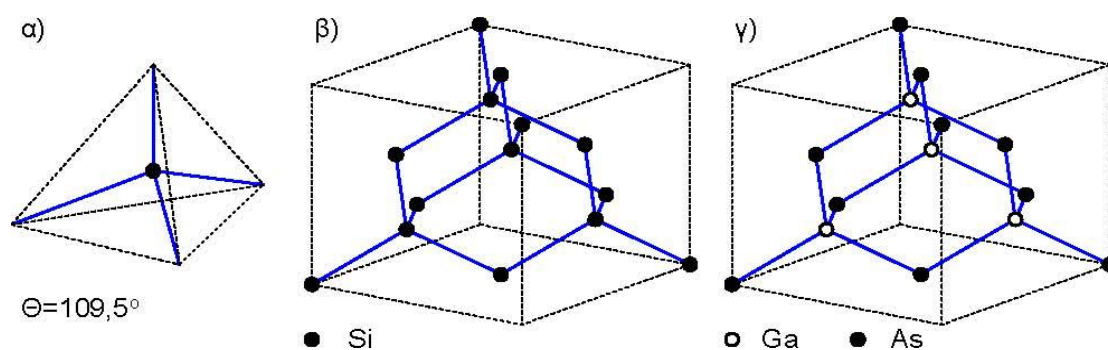
*Εισαγωγή*



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

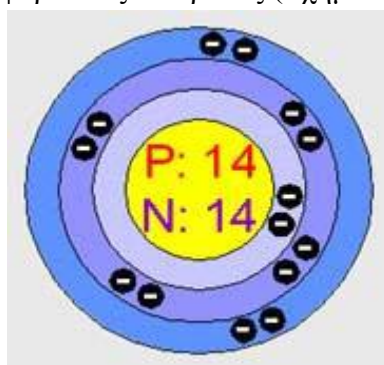
### 4.1 Ημιαγωγοί

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς, που είναι σώματα με ενδιάμεση ηλεκτρική αγωγιμότητα, ανάμεσα στους αγωγούς (δηλαδή στα μέταλλα) και στους μονωτές (π.χ. τα πολυμερή και τα κεραμικά υλικά). Οι κυριότεροι ημιαγωγοί είναι τετρασθενή στοιχεία όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο, ή χημικές ενώσεις όπως το αρσενικούχο γάλλιο και το θείουχο κάδμιο, με τετραεδρική κρυσταλλική δομή, δηλαδή τα γειτονικά άτομα βρίσκονται σε θέσεις του κρυσταλλικού πλέγματος που αντιστοιχούν στο κέντρο και στις κορυφές ενός κανονικού τετραέδρου και κάθε άτομο είναι ενωμένο με χημικούς δεσμούς με τέσσερα γειτονικά άτομα (σχήμα 4.1).



**Σχήμα 4.1** α) Η κρυσταλλική δομή των κυριότερων ημιαγωγών είναι τετραεδρική. β) Στους στοιχειακούς ημιαγωγούς (π.χ. στο πυρίτιο) όλα τα άτομα του πλέγματος είναι ίδια. γ) Στις ημιαγωγικές χημικές ενώσεις (π.χ. στο αρσενικούχο γάλλιο) τα άτομα που βρίσκονται στις γειτονικές θέσεις είναι διαφορετικά.

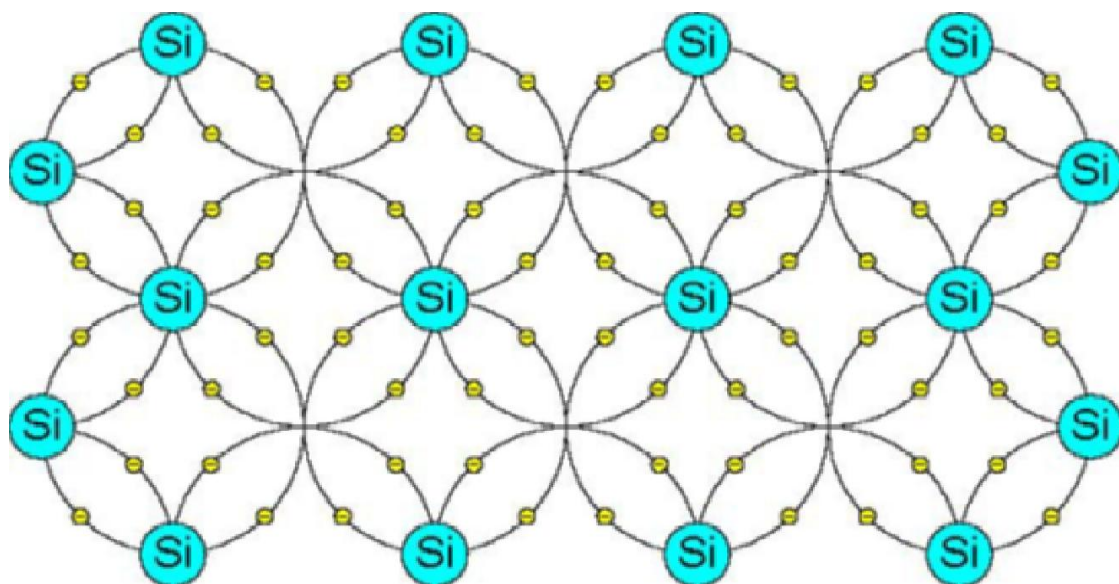
Ο ημιαγωγός με την μεγαλύτερη χρήση όχι μόνο για τα ηλιακά στοιχεία αλλά και για πλήθος ηλεκτρονικών εφαρμογών, είναι το πυρίτιο. Το πυρίτιο έχει κάποιες ιδιαίτερες χημικές ιδιότητες στην κρυσταλλική του δομή. Έχει 14 ηλεκτρόνια κατανεμημένα σε τρεις διαφορετικές στιβάδες (Σχήμα 4.2).



**Σχήμα 4.2** Άτομο πυρίτιου.

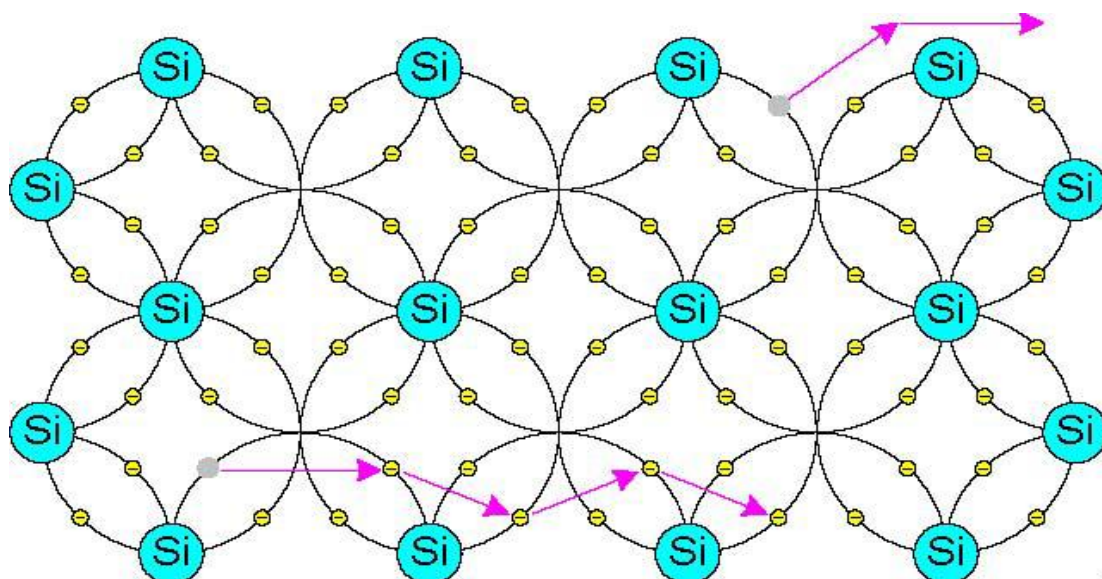
Οι πρώτες δύο, εσωτερικές στιβάδες του ατόμου, είναι συμπληρωμένες με 2 και 8 ηλεκτρόνια αντίστοιχα, είναι λιγότερο ενεργές και δεν συμμετέχουν σε μηχανισμούς αγωγιμότητας. Η εξωτερική στιβάδα όμως δεν είναι συμπληρωμένη, σε

αυτή βρίσκονται τα ηλεκτρόνια σθένους (4 ηλεκτρόνια) του ατόμου που σχηματίζουν τους δεσμούς και τα οποία μπορούν να μετακινηθούν μόνο προς τις οπές γειτονικών δεσμών ή να ανταλλάξουν θέσεις με άλλα ηλεκτρόνια σθένους γειτονικών δεσμών. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, κάθε άτομο πυριτίου είναι ενωμένο με 4 γειτονικά άτομα και ο κάθε χημικός δεσμός αποτελείται από 2 ηλεκτρόνια. Επομένως όλα τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων είναι απασχολημένα στους δεσμούς, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ελεύθεροι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος και το σώμα να μη διαθέτει ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η εικόνα όμως αυτή ισχύει μόνο στην υποθετική περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή είναι εντελώς υποβαθμισμένος ενεργειακά, π.χ. σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, κοντά στο απόλυτο μηδέν, πράγματι οι ημιαγωγοί μετατρέπονται σε μονωτές.



*Σχήμα 4.3* Απλοποιημένη απεικόνιση, σε δύο διαστάσεις, του πλέγματος του πυριτίου, με τα ηλεκτρόνια σθένους εντοπισμένα στους δεσμούς. Στην πραγματικότητα, τα ηλεκτρόνια εναλλάσσουν συνεχώς θέσεις μεταξύ τους, στους γειτονικούς δεσμούς του στερεού.

Όταν όμως οι ημιαγωγοί απορροφήσουν κάποια αξιόλογη ενέργεια, π.χ. με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας, πραγματοποιείται μια ριζική μεταβολή. Έτσι στη συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η θερμική ενέργεια που παρέχεται στο σώμα και κατανέμεται στα άτομα του, προκαλεί την ελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Δηλαδή, καθώς η θερμική ενέργεια ανακατανέμεται συνεχώς από το ένα άτομο στο άλλο, μπορεί να επαρκέσει στιγμιαία σε μερικές τυχαίες θέσεις για να διεγείρει και να ελευθερώσει από ένα ηλεκτρόνιο σθένους σε μερικούς από τους δεσμούς του σώματος. Τα ελευθερωμένα αυτά ηλεκτρόνια απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους, χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν από τη θερμότητα και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα (σχήμα 4.4).



**Σχήμα 4.4** Επίδραση της θερμικής διέγερσης στο πυρίτιο. Πάνω δεξιά: ελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου από ένα δεσμό. Κάτω: από δεξιά προς αριστερά έχουμε την διαδοχική μετατόπιση μιας οπής, σαν αποτέλεσμα μιας σειράς αντίθετων μετακινήσεων ηλεκτρονίων σθένους προς την εκάστοτε κενή θέση σε ένα γειτονικό δεσμό.

Η απομάκρυνση ηλεκτρονίων από μερικούς δεσμούς του σώματος και η αποδυνάμωση, έτσι, ενός σχετικά μικρού πλήθους δεσμών στα σώματα που μελετάμε, δεν συνεπάγεται την απώλεια της συνοχής των ατόμων τους και την κατάρρευση του κρυσταλλικού τους πλέγματος. Όπως είδαμε στο σχήμα 4.4 τα άτομα που συνδέει ένας από τους δεσμούς από τους οποίους ελευθερώθηκαν ηλεκτρόνια, εξακολουθούν να συνδέονται με τα γειτονικά τους άτομα με τρεις άθικτους δεσμούς καθώς και με έναν ατελή δεσμό ενός ηλεκτρονίου (θα μπορούσαμε να πούμε, συνολικά με «τρισήμιση» δεσμούς). Οι δεσμοί αυτοί επαρκούν για τη συγκράτηση των ατόμων στις θέσεις τους. Άλλωστε το πλήθος των ελεύθερων ηλεκτρονίων και επομένως και των διασπασμένων δεσμών των σωμάτων που μελετάμε, είναι ένα μικρό ποσοστό του συνόλου των δεσμών των ατόμων τους, π.χ. για το πυρίτιο στη συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η αναλογία είναι της τάξης του  $1:10^{13}$ !

Κατά τη μελέτη ηλεκτρικής συμπεριφοράς των ημιαγωγών και της εμφάνισης του φωτοβολταϊκού φαινομένου σ' αυτούς, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ροή ηλεκτρονίων φορέων, λόγω της **διάχυσης** τους. Διάχυση λοιπόν είναι η διαδικασία διασποράς των μελών (μορίων, ιόντων ή ηλεκτρονίων) ενός συστήματος A, μέσα σ' ένα άλλο σύστημα B, λόγω διάφορων της συγκέντρωσης της ουσίας A, στις δύο θέσεις. Η διάχυση συνεχίζεται μέχρις ότου η συγκέντρωση του σώματος A, ισοκατανεμηθεί μέσα στη μάζα του σώματος B. Η τάση διάχυσης ενός συστατικού μέσα σ' ένα σύνθετο σύστημα, καθορίζεται με το χημικό δυναμικό,  $\mu$ , το οποίο εκφράζει το ποσό της ελεύθερης ενέργειας,  $F$ , που απαιτείται για να μεταβληθούν κατά ένα, τα μέλη του συστατικού αυτού, χωρίς να αλλάξει η θερμοκρασία, ο όγκος και το πλήθος των μελών των υπολοίπων συστατικών του συνολικού συστήματος. Συνήθως, μετρείται σε eV/μέλος του δεδομένου συστατικού.

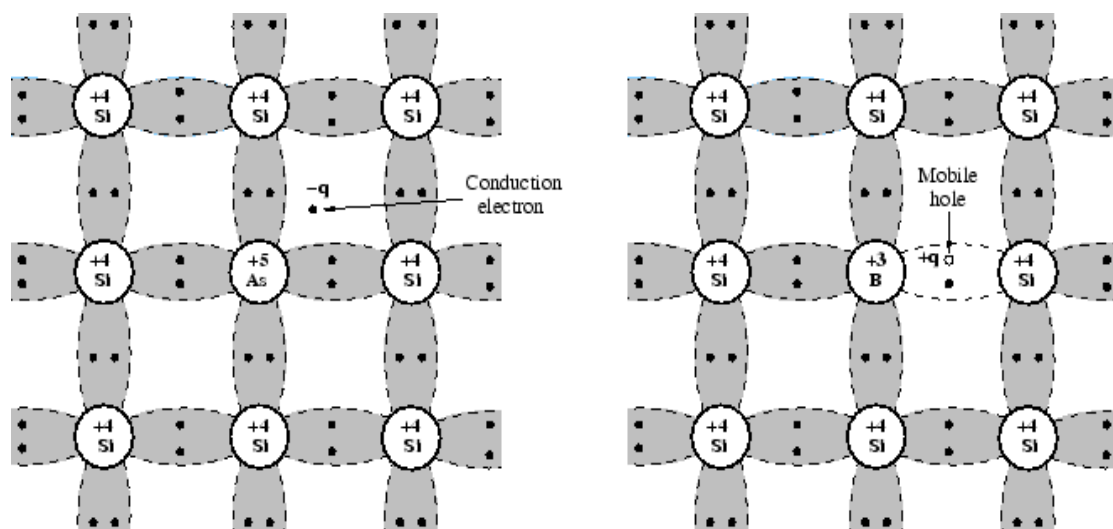


## 4.2 Ημιαγωγοί πρόσμειξης

Μεταξύ των ημιαγωγών, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι λεγόμενοι ημιαγωγοί πρόσμειξης (Extrinsic semiconductors), που μέσα στο κρυσταλλικό τους πλέγμα περιέχουν διασπαρμένα άτομα από επιλεγμένο διαφορετικό υλικό. Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων ημιαγωγών: **τύπου n** και **τύπου p**.

**Ο ημιαγωγός τύπου n**, προκύπτει από τον αντίστοιχο ενδογενή ημιαγωγό, αν αντικατασταθούν μερικά από τα άτομα του, με άτομα άλλου υλικού, με μεγαλύτερο σθένος. Παραδείγματος χάριν, αν μερικά άτομα του κρυσταλλικού πυριτίου Si, τα οποία χαρακτηρίζονται από σθένος 4, αντικατασταθούν, με άτομα αρσενικού As, με σθένος 5 (σχήμα 4.5), τότε δημιουργείται ο ημιαγωγός τύπου n του πυριτίου. Η αντικατάσταση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα να μένει ένα ηλεκτρόνιο ανά άτομο πρόσμειξης, μη συμμετέχον σε δεσμό και το οποίο στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, εγκαταλείπει το άτομο As και γίνεται ελεύθερο. Έτσι ο ημιαγωγός τύπου n, περιέχει περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια σε σχέση με τον ενδογενή (ενδογενής: καθαρός ημιαγωγός που η αγωγιμότητα του δεν οφείλεται σε ξένους παράγοντες αλλά προέρχεται από την ενδογενή διέγερση ηλεκτρονίων σθένους προς την ζώνη αγωγιμότητας). Τα άτομα της 5σθενούς πρόσμειξης ονομάζονται δότες.

Οι ηλεκτρονικές στάθμες των ατόμων των δοτών βρίσκονται λίγο κάτω από τον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας, κατά το ποσό των  $\sim 50$  meV, αφού με αυτό το ποσό ενέργειας, τα ηλεκτρόνια των σταθμών αυτών γίνονται «ελεύθερα» στο εσωτερικό του υλικού. Παριστάνονται με μικρές διακριτές γραμμές, για να τονιστεί ότι πρόκειται για μεμονομένα άτομα μέσα στο σύνολο των ατόμων του κυρίως υλικού, σ' όλη την έκταση του ημιαγωγού αυτού.



**Σχήμα. 4.5** Πάνω αριστερά βλέπουμε ένα άτομο πυριτίου Si να έχει αντικατασταθεί από άτομο αρσενικού As, δημιουργείται έτσι ο ημιαγωγός τύπου n του πυριτίου. Πάνω δεξιά βλέπουμε ένα άτομο πυριτίου Si να έχει αντικατασταθεί από άτομο βορίου B, δημιουργείται έτσι ο ημιαγωγός τύπου p του πυριτίου.

Ο ημιαγωγός τύπου **p**, δημιουργείται αν μερικά από τα άτομα του κυρίου υλικού αντικατασταθούν με άτομα μικρότερου σθένους (π.χ. βορίου B, αλουμινίου Al, γαλλίου Ga, ινδίου In). Έτσι με την αντικατάσταση ενός ατόμου πυριτίου Si με ένα άτομο βορίου B, το οποίο έχει σθένος 3, δημιουργείται υλικό, στο οποίο υπάρχουν άτομα που μπορούν να δεχθούν ένα ηλεκτρόνιο, προκειμένου να συμπληρωθεί ο ελεύθερος δεσμός (σχήμα 4.5). Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι δημιουργείται μια οπή (hole).

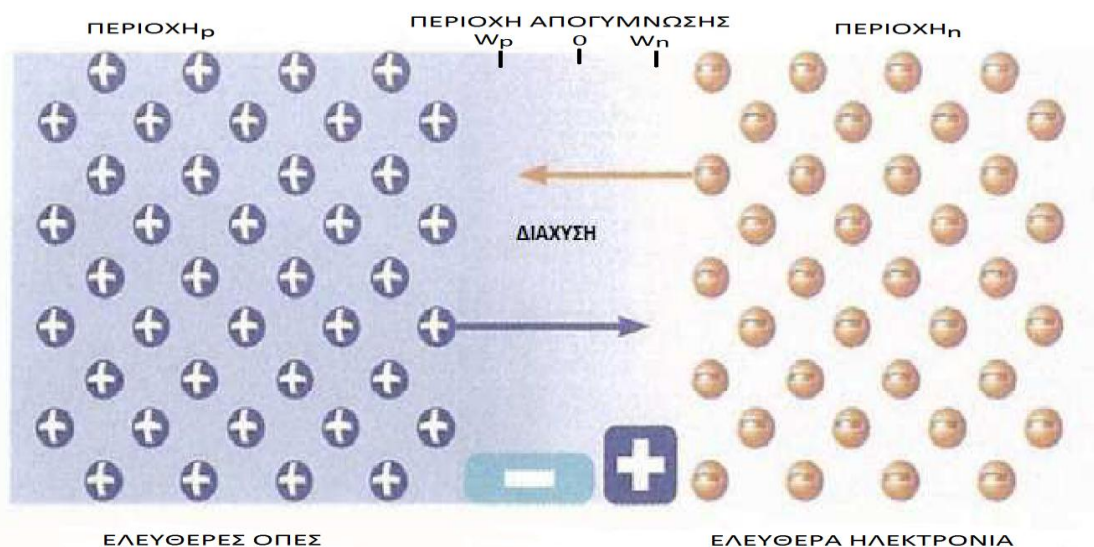
Από τα γειτονικά άτομα Si, στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, αποσπάται κάποιο απ' τα ηλεκτρόνια σθένους και αποδίδοντας, όπως στην περίπτωση των δοτών, αντίστοιχα μικρή ενέργεια, μεταβαίνει για κάλυψη του δεσμού στο βόριο. Στη συνέχεια η κάλυψη του δημιουργούμενου κενού του ατόμου Si, γίνεται με μεταπήδηση ενός ηλεκτρονίου «σθένους», από άλλο άτομο Si. Άρα η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου, θέτει μερικά από τα ηλεκτρόνια σθένους σε κίνηση, η οποία ισοδυναμεί με κίνηση της οπής προς την αντίθετη κατεύθυνση (στην πραγματικότητα δεν υπάρχει μετακίνηση των οπών, αλλά μόνο μετακίνηση των ηλεκτρονίων, οστόσο με την μετακίνηση αυτή φαίνεται σαν να μετακινούνται και οι οπές). Έτσι, είναι πιο βολικό, αντί να αναφερόμαστε στην κίνηση των ηλεκτρονίων σθένους, από άτομο σε άτομο, να χρησιμοποιούμε την ισοδύναμη και πολύ πιο πρακτική εικόνα της οπής.

Τα άτομα των προσμείξεων αυτών ονομάζονται αποδέκτες. Οι ηλεκτρονικές στάθμες των αποδεκτών βρίσκονται αμέσως πάνω από την ζώνη σθένους.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, λοιπόν, οι ηλεκτρικοί φορείς ενός ημιαγωγού, που μπορούν να συμβάλλουν σε ρεύμα είναι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας και οι οπές της ζώνης σθένους.

### 4.3 Επαφή ημιαγωγών τύπου p-n

Όταν δημιουργηθεί επαφή μεταξύ δύο ημιαγωγών τύπου p και n αντίστοιχα, του ίδιου κυρίως, υλικού π.χ. Si, τότε, ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό τύπου n του πυριτίου, μεταβαίνουν, με διάχυση (diffusion) στον ημιαγωγό p του πυριτίου. Αυτό σημαίνει ότι, στο τμήμα n-Si κι εκεί απ' όπου έφυγαν τα ηλεκτρόνια, παραμένουν θετικά φορτισμένα ιόντα. Ομοίως, οπές του χώρου p-Si, περνούν, με διάχυση, στην απέναντι μεριά αφήνοντας ακάλυπτα τα αντίστοιχα αρνητικά ιόντα του χώρου τους. Η μετακίνηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να παραμείνουν ιόντα στις γειτονικές περιοχές, δεξιά και αριστερά της μεταλλουργικής επαφής (σχήμα 4.6 επίπεδο στη θέση 0). Αρνητικά ιόντα σε μέρος της περιοχής του ημιαγωγού τύπου p και θετικά, σε μέρος της περιοχής του ημιαγωγού τύπου n. Έτσι, δημιουργείται η **περιοχή απογύμνωσης** (depletion region)(σχήμα 4.6), δηλαδή, περιοχή απογυμνωμένη από ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές.



**Σχήμα 4.6** Επαφή δύο ημιαγωγών τύπου p και n. Διακρίνεται επίσης η περιοχή απογύμνωσης, δεξιά και αριστερά της μεταλλουργικής επαφής.

Το μήκος απογύμνωσης μέσα στην περιοχή p, συμβολίζεται όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα με  $w_p$  και αντίστοιχα, το μήκος απογύμνωσης μέσα στην περιοχή n με  $w_n$ . Η συνολική περιοχή  $w = w_p + w_n$ , έχει έκταση από κλάσμα του  $\mu\text{m}$ , μέχρι αρκετές δεκάδες  $\mu\text{m}$  (π.χ. 0,1- 10  $\mu\text{m}$ , για το Si), εξαρτώμενη, από το υλικό, τις πυκνότητες των προσμείξεων και την εφαρμοζόμενη τάση.

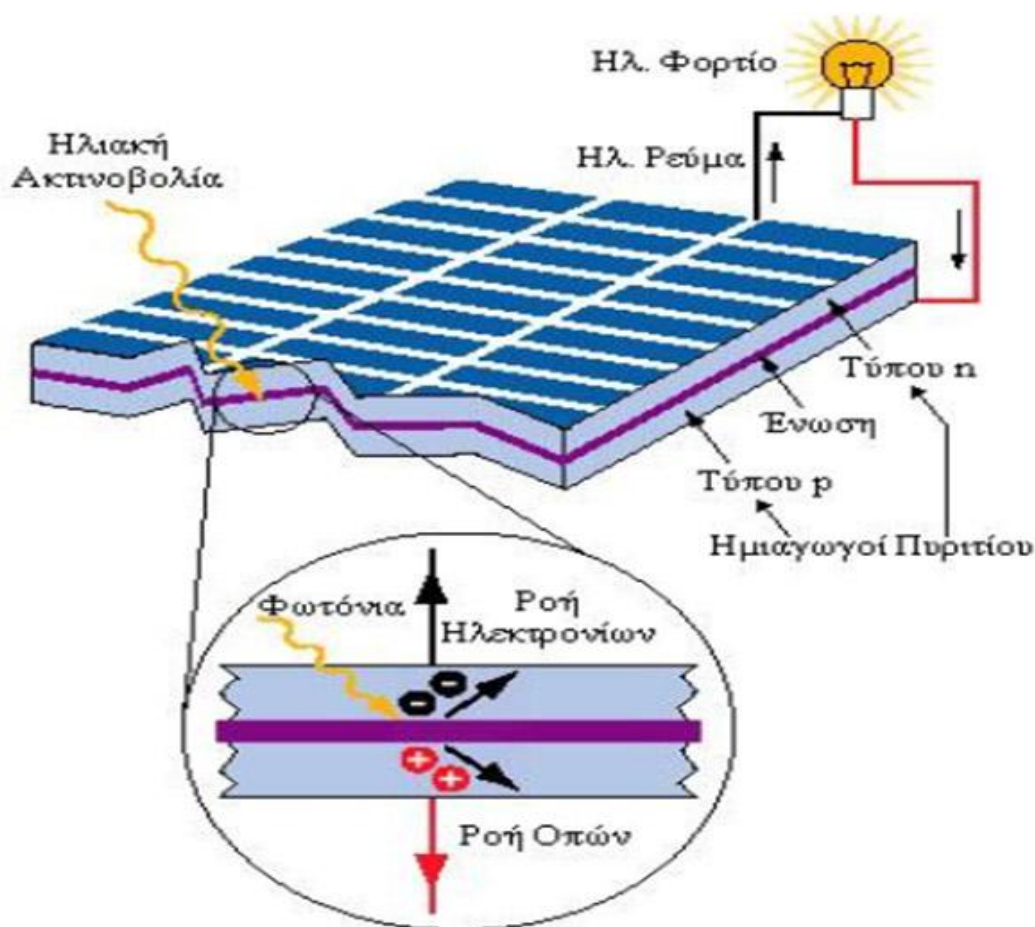
#### 4.4 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Στην περιοχή της ημιαγωγικής επαφής, δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών σ' όλο το χώρο των ημιαγωγών που είναι σε επαφή, με δύο βασικούς τρόπους:

- α) Θερμικά (εξαιτίας του ότι η διάταξη βρίσκεται σε ορισμένη θερμοκρασία).
- β) Με τη δράση εξωτερικού φωτισμού, (φωτονίων) κατάλληλου μήκους κύματος.

Διακρίνουμε τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, που δημιουργούνται μέσα στην περιοχή επαφής, λόγω του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου (περιοχή απογύμνωσης), αλλά και έξω από αυτήν, πολύ κοντά στα σύνορα των περιοχών τύπου p και n αντίστοιχα. Πολλοί από τους φορείς αυτούς έχουν πολύ μεγάλη πιθανότητα να φτάσουν στις περιοχές όπου υπερτερούν οι όμοιοι προς αυτούς τους φορείς (φορείς πλειονότητας), και να παραμείνουν ως «ελεύθεροι» ηλεκτρικοί φορείς, αφού η πιθανότητα να συναντήσουν φορέα μειονότητας και να επανασυνδεθούν, είναι πολύ μικρή. Οι υπόλοιποι που θα συναντήσουν αντίθετο φορέα, με τον οποίο θα επανασυνδεθούν, δεν θα συμβάλουν στη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος, μέσα στην ημιαγωγική διάταξη.

Όπως είδαμε και στην παραπάνω παράγραφο, η περιοχή τύπου  $n$  έχει ως φορείς πλειονότητας τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αντίστοιχα, η περιοχή τύπου  $p$ , τις οπές. Οι πρόσθετοι φορείς, φορτίζουν τους χώρους στους οποίους φτάνουν, με πλεονάζοντα φορτία. Το δυναμικό στο χώρο  $p$ , λόγω των επιπλέον οπών, γίνεται θετικότερο, ως προς το αντίστοιχο του χώρου  $n$ , όπου έχουν καταλήξει τα ηλεκτρόνια που δημιουργήθηκαν στην επαφή. Η συνεχής κίνηση των φωτοδημιουργούμενων φορέων, με την επίδραση του ισχυρού πεδίου, αποτελεί ρεύμα, με φορά αυτή του ενδογενούς πεδίου, δηλαδή, από τον ημιαγωγό τύπου  $n$  στον ημιαγωγό τύπου  $p$ . Το φωτοδημιουργούμενο ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται **φωτόρευμα  $I_L$** .



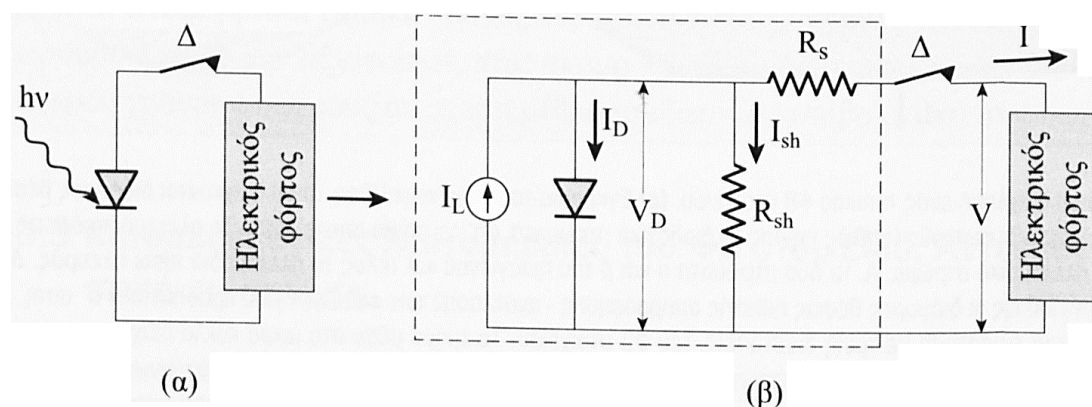
**Σχήμα 4.7** Ο μηχανισμός εκδήλωσης του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο. Τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας, που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός του όψη, τύπου  $n$ , παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές). Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στην ημιαγωγική πλάκα (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου) μπορεί να βρεθούν κοντά στην περιοχή της ένωσης  $p$ - $n$  και να δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου. Έτσι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς τα εμπρός (τμήμα τύπου  $n$ ) και οι οπές προς τα πίσω (τμήμα τύπου  $p$ ), με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του  $\Phi B$  στοιχείου.

Η τιμή του δημιουργούμενου φωτορεύματος  $I_L$  είναι ευθέως ανάλογη του πλήθους των απορροφούμενων φωτονίων, το οποίο είναι, επίσης ευθέως ανάλογο των προσπιπτόντων φωτονίων, των οποίων η συνολική ενέργεια, ανά μονάδα χρόνου και

επιφάνειας, αποτελεί την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Συνεπώς εξαρτάται από την πυκνότητα ισχύος  $E$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που προσπίπτει στην ημιαγωγική διάταξη, καθώς επίσης και του εμβαδού της επαφής των δύο ημιαγωγών.

#### 4.5 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ΦΒ στοιχείου

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα μέσα στο πλαίσιο της διακεκομμένης γραμμής. Περιλαμβάνει μια πηγή σταθερού ρεύματος ( $I_L$ ) σε συνδυασμό με μια ιδανική δίοδο. Στη συνέχεια τοποθετείται το μη ιδανικό τμήμα του ΦΒ στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει, αφενός, την αντίσταση απωλειών διαρροής του ρεύματος μεταξύ των άκρων του ΦΒ στοιχείου, η οποία τίθεται παράλληλα συνδεδεμένη, στα άκρα της διόδου αφετέρου, την αντίσταση απωλειών στο δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου, που αντιπροσωπεύεται από αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με τη δίοδο.



**Σχήμα 4.8** (α) Απλό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου. (β) Πλήρες ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου. Η εσωτερική αντίσταση διαρροής της επαφής είναι η  $R_{sh}$  και η εσωτερική αντίσταση σε σειρά, η  $R_s$ .

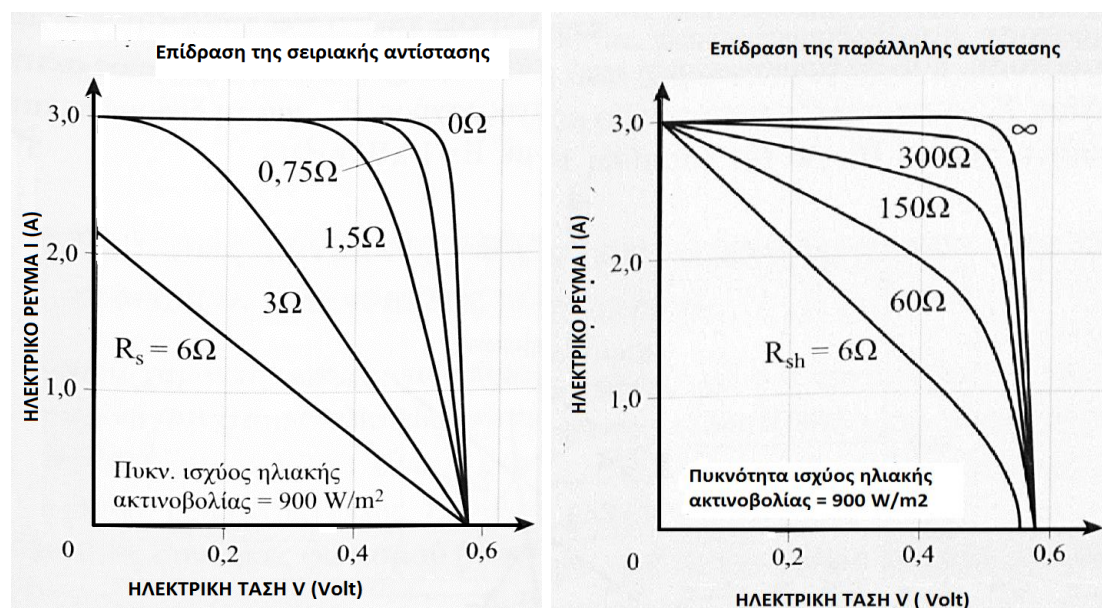
Η **παράλληλη αντίσταση  $R_{sh}$**  (Shunt resistance) συνδέεται με τη διαρροή ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n και αφορά διαδρομές ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n, μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε διαφορετικά δυναμικά ίση με την τάση στα άκρα της διόδου. Αναλυτικότερα, οι διαδρομές αυτές αφορούν ρεύματα:

1. Διαμέσου του σώματος της διάταξης επαφής
2. Δια των εξωτερικών επιφανειών της επαφής, παράλληλα προς το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής και
3. Διαμέσου ηλεκτρικής διάβασης που δημιουργούν οι προσμείξεις της επαφής

Η **σειριακή αντίσταση  $R_s$**  (Series resistance) αφορά στην αντίσταση που παρουσιάζει η επαφή:

1. Κατά τη δίοδο του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το σώμα της διόδου
2. Στις ωμικές αντιστάσεις των σημείων προσφυγής των ηλεκτροδίων της επαφής καθώς και κατά μήκος των μεταλλικών κλάδων τους

Στις παρακάτω χαρακτηριστικές I-V, φαίνεται η επίδραση της σειριακής αντίστασης,  $R_s$  και της παράλληλης αντίστασης διαρροής,  $R_{sh}$ .



**Σχήμα 4.9** Επίδραση της σε σειρά αντίστασης  $R_s$  και της παράλληλα εμφανιζόμενης  $R_{sh}$  σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Η τιμή της παράλληλης αντίστασης διαρροής  $R_{sh}$  σε πολύ καλής απόδοσης ΦΒ στοιχεία είναι μεγαλύτερη των  $10^3 \Omega$ . Τιμές χαμηλότερες των  $500 \Omega$ , προκαλούν έντονη κλίση του οριζόντιου τμήματος της χαρακτηριστικής I-V, δηλαδή έντονη ελάττωση του ρεύματος καθώς προχωρούμε προς την τάση ανοιχτού κυκλώματος,  $V_{oc}$ . Η ελάττωση είναι εντονότερη όσο η  $R_{sh}$  ελαττώνεται (σχήμα 4.9). Μικρή  $R_{sh}$  χαρακτηρίζει καμπύλη I-V με αντίστοιχα μικρό παραλληλόγραμμο  $I_m \cdot V_m$ , μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος,  $P_m$ , και άρα χαμηλότερη τιμή του παράγοντα πλήρωσης, FF.

Αύξηση της τιμής της σειριακής αντίστασης  $R_s$  περιορίζει την περιοχή τάσεων στην οποία αντιστοιχεί σταθερό ρεύμα βραχυκύκλωσης, ίσο με αυτό που αντιστοιχεί στην ιδανική περίπτωση (σχήμα 4.9). Άμεσο αποτέλεσμα της αύξησης της  $R_s$  είναι η δραστική ελάττωση της αντίστοιχης μέγιστης ισχύος που αποδίδει το στοιχείο. Τυπικές τιμές της  $R_s$ , για καλής ποιότητας ΦΒ στοιχεία είναι:  $0,1 \Omega$  έως  $0,3 \Omega$ .

### 4.6 Τάση ανοικτού κυκλώματος – ρεύμα βραχυκύκλωσης

Στην περίπτωση που το φωτοβολταϊκό στοιχείο βρίσκεται σε **ανοικτό κύκλωμα** και σε κατάσταση σταθερού φωτισμού, τα δύο ρεύματα που κυκλοφορούν μέσα στην επαφή, είναι αντίθετης φοράς και ίσα κατά απόλυτη τιμή  $I_{\delta} = -I_L$  (σχήμα 4.10α). Αυτή η ισότητα ρευμάτων, τα οποία επιβάλλονται αφενός από τη διάχυση, λόγω αύξησης των πυκνοτήτων των φορέων πλειονότητας, αφετέρου από την ηλεκτρική τάση του ενδογενούς ηλεκτρικού φραγμού, έχει σαν αποτέλεσμα η ηλεκτρική τάση στα άκρα της επαφής p-n, να προσεγγίζει το ύψος της τάσης  $V_{bi}$  (τάση διάχυσης: η τάση που διακόπτει το φαινόμενο της διάχυσης από το ένα τμήμα της επαφής στο άλλο) με φορά αντίθετη αυτής. Ονομάζεται τάση ανοικτού κυκλώματος,  $V_{oc}$  και ισχύει:

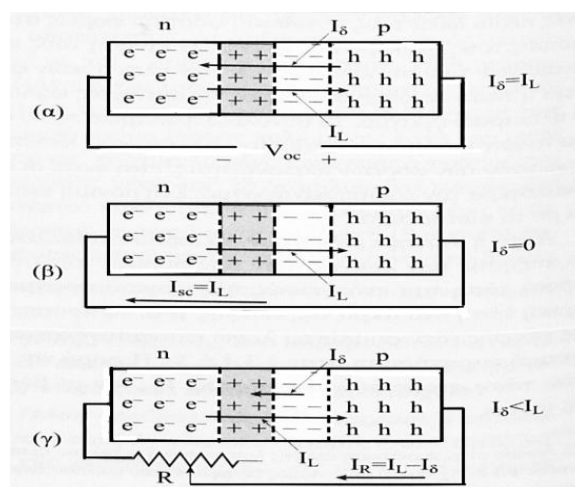
$$V_{oc} \leq V_{bi}$$

όπου η ισότητα αφορά στην ιδανική περίπτωση που δεν συμβαίνουν επανασυνδέσεις.

Περίπτωση όπου το φωτοβολταϊκό στοιχείο βρίσκεται σε **κλειστό κύκλωμα**, μπορεί να υπάρξει, με την βραχυκύκλωση των άκρων του (χάλκινο σύρμα) ή με σύνδεση αντίστασης R στα άκρα του.

Αν τα άκρα της επαφής p-n, που φωτίζεται όπως και πριν κάτω από σταθερές συνθήκες φωτισμού, είναι βραχυκυκλωμένα μεταξύ τους με ένα χάλκινο σύρμα μεγάλης διατομής και μηδενικής πρακτικά αντίστασης, τότε θα περάσει μέσα από το σύρμα ρεύμα ίσο με το  $I_L$  (σχήμα 4.10β). Οι αυξημένες πυκνότητες των φορέων πλειονότητας στα άκρα της επαφής, δημιουργούν έκχυση τους είτε μέσα από την επαφή, που παρουσιάζει φραγμό, είτε μέσα από το σύρμα, που δεν παρουσιάζει φραγμό ( $\Delta V=0$ ). Άρα κατά το βραχυκύκλωμα το φωτόρευμα  $I_L$ , διέρχεται από τον αγωγό βραχυκύκλωσης και κατά συνέπεια, το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , του φωτοβολταϊκού στοιχείου ισούται, ιδανικά, με  $I_L$ .

$$I_{sc} = I_L$$

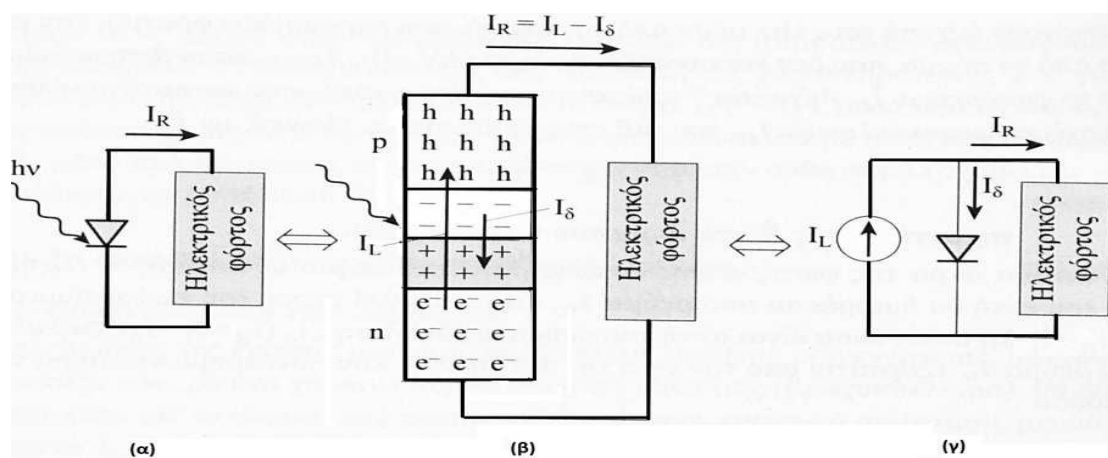


Σχήμα 4.10 α) Ανοικτό κύκλωμα, β) Επαφή βραχυκυκλωμένη, γ) Επαφή συνδεδεμένη με αντίσταση R.

Όταν στα άκρα της φωτιζόμενης επαφής συνδέσουμε μια αντίσταση  $R$  (σχήμα 4.10γ) τότε αυτή θα διαρρέεται από ρεύμα  $I_R$ , που αποτελεί τη διαφορά του φωτορεύματος  $I_L$  από τη συνιστώσα του ρεύματος διάχυσης  $I_\delta$  ( $I_R = I_L - I_\delta$ ). Δηλαδή, το ρεύμα  $I_R$  εξαρτάται από την τιμή της αντίστασης που συνδέουμε στα άκρα των επαφών p-n.

#### 4.7 Ηλεκτρική συμπεριφορά φωτιζόμενου ΦΒ στοιχείου

Σύμφωνα με τα όσα αναφέραμε παραπάνω, φως, δεδομένης πυκνότητας ισχύος και φάσματος, δημιουργεί μέσα στο σώμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου ηλεκτρικό ρεύμα  $I_L$ , του οποίου η ένταση μένει σταθερή καθώς αλλάζει η ωμική αντίσταση, που είναι συνδεδεμένη στα άκρα του. Έτσι η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι ισοδύναμη με εκείνη, που θα δημιουργούσε η σύνδεση μιας πηγής σταθερού ρεύματος στα άκρα της διόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11γ. Στο σχήμα 4.11α δίδεται η τυπική μορφή ηλεκτρικού κυκλώματος που περιλαμβάνει φωτοβολταϊκό στοιχείο και ωμικό καταναλωτή και στο σχήμα 4.11β φαίνεται η πραγματική κατάσταση των ρευμάτων μέσα στο φωτοβολταϊκό στοιχείο εξαιτίας της δράσης του φωτός.



**Σχήμα 4.11** α) Τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα που περιλαμβάνει φωτοβολταϊκό στοιχείο. β) Αναλυτική παρουσίαση των ρευμάτων στο κύκλωμα. γ) Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα.

Συμπερασματικά, το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι μια ηλεκτρική πηγή, η οποία, στην ιδανική της συμπεριφορά, έχει την ιδιότητα να διατηρεί σταθερή τιμή ρεύματος σε μια αντίσταση, ανεξάρτητα από την τιμή της. Σε κάθε περίπτωση, η πηγή αυτή προσαρμόζει την τάση της στα άκρα της αντίστασης, ώστε το ρεύμα να μένει, πρακτικά, σταθερό.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο συμπεριφέρεται, μέσα σε ορισμένα όρια τάσεων, ως πηγή σταθερού ρεύματος. Το παρεχόμενο ηλεκτρικό ρεύμα είναι περίπου σταθερό, σε ευρεία περιοχή τάσεων. Στη συνέχεια, και μέχρι την τάση ανοικτού κυκλώματος, το ρεύμα μειώνεται ραγδαία, προσεγγίζοντας, σε μια στενή περιοχή



τάσεων, τη συμπεριφορά πηγής σταθερής τάσης.

Στον αντίποδα βρίσκεται η ηλεκτρική πηγή σταθερής τάσης, π.χ. ο ηλεκτρικός συσσωρευτής. Η τάση του μένει, περίπου σταθερή, σε μεγάλο εύρος εντάσεων ρευμάτων, που δημιουργεί σε καταναλωτές-φορτία, που τροφοδοτεί. Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, υπό δεδομένη πυκνότητα ισχύος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, παράγει δεδομένο μέγιστο ρεύμα, ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αντίθετα, ένας συσσωρευτής μπορεί να δώσει πολύ μεγάλα ρεύματα. Στην περίπτωση βραχυκύκλωσης των άκρων του, δίδει εξαιρετικά μεγάλο ηλεκτρικό ρεύμα, περιορισμένο μόνο από την εσωτερική του αντίσταση.

Η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου μοιάζει με την αντίστοιχη ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή. Μπορούμε λοιπόν να διακρίνουμε ομοιότητες και διαφορές φωτοβολταϊκού στοιχείου και ηλεκτρικού συσσωρευτή καθώς και οι δύο διατάξεις μπορούν να δώσουν ηλεκτρική ενέργεια, αλλά η δυνατότητα παροχής ενέργειας, στις δύο περιπτώσεις, οφείλεται σε διαφορετικές αιτίες.

α) Στον ηλεκτρικό συσσωρευτή έχουμε χημικές δράσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων και του διαλύματος, με αποτέλεσμα την αποταμίευση ενέργειας στα αλλοιωμένα ηλεκτρόδια, ενώ στα φωτοβολταϊκά στοιχεία, το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής προκαλεί διαχωρισμό των πρόσθετων ηλεκτρικών φορτίων, που δημιουργεί το απορροφούμενο φως, χωρίς αποταμίευση ενέργειας.

β) Ο ηλεκτρικός συσσωρευτής αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια με, περίπου, σταθερή ηλεκτρική τάση και με δυνατότητα να δώσει στο φορτίο (ανάλογα με την αντίσταση του), από πολύ μικρά έως πολύ μεγάλα ηλεκτρικά ρεύματα. Αντίθετα, το μέγιστο ρεύμα (ρεύμα βραχυκύκλωσης) που μπορεί να δώσει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο εξαρτάται, κυρίως, από την πυκνότητα ισχύος  $1 \text{ kW/m}^2$  και φθάνει, σε εργαστηριακή μορφή, τα 30 έως 40  $\text{mA/cm}^2$ . Ο ηλεκτρικός συσσωρευτής χαρακτηρίζεται ως πηγή σταθερής ηλεκτρικής τάσης ενώ το φωτοβολταϊκό στοιχείο, κατά κύριο λόγο, ως πηγή σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος.

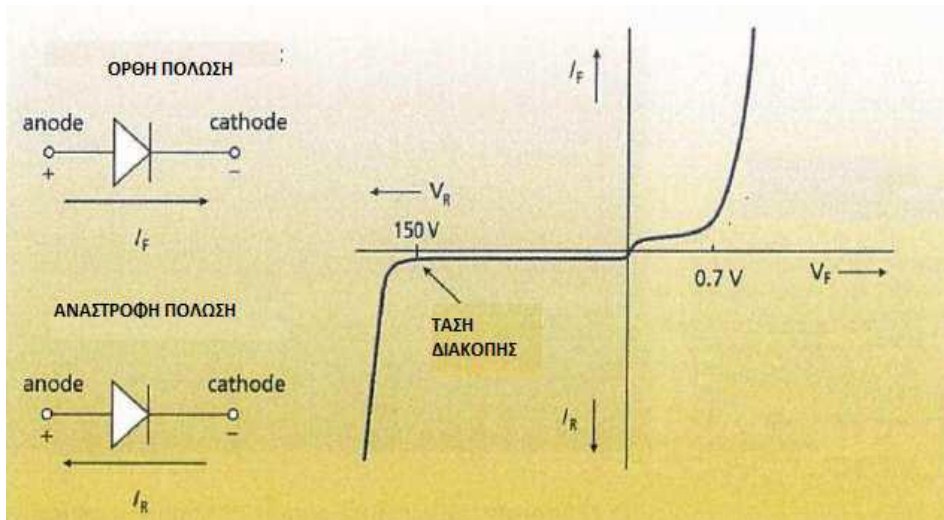
#### 4.8 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Σύμφωνα με προηγούμενη ανάλυση, το ρεύμα  $I_{\delta}$ , είναι σαν να προέρχεται από μια ορθή τάση  $V_F$ , επειδή οφείλεται στην αύξηση των πυκνοτήτων των φορέων πλειονότητας. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι οι τιμές του  $I_{\delta}$  ακολουθούν την καμπύλη I-V της διόδου (σχήμα 4.12).

Έτσι για να κατασκευάσουμε την καμπύλη I-V, της φωτιζόμενης διόδου, θα πρέπει να προσθέσουμε την καμπύλη I-V της μη φωτιζόμενης διόδου και την ευθεία  $I = -I_L$ , του φωτορεύματος, που αποτελεί την I-V της πηγής σταθερού ρεύματος. Το ρεύμα  $I_R$  όμως έχει αντίθετη φορά από το επιβαλλόμενο στη δίοδο από μια εξωτερική πηγή με ορθή πόλωση. Συνεπώς, στο διάγραμμα I-V, της μη φωτιζόμενης επαφής, θα τοποθετήσουμε τις τιμές  $I_R$ , στον αρνητικό ημιάξονα. Σε κάθε τιμή του  $I_{\delta}$ , προσθέτουμε το  $-I_L$  και θα βρίσκουμε το  $I_R$ , το οποίο το συμβολίζουμε πιο απλά ως I.

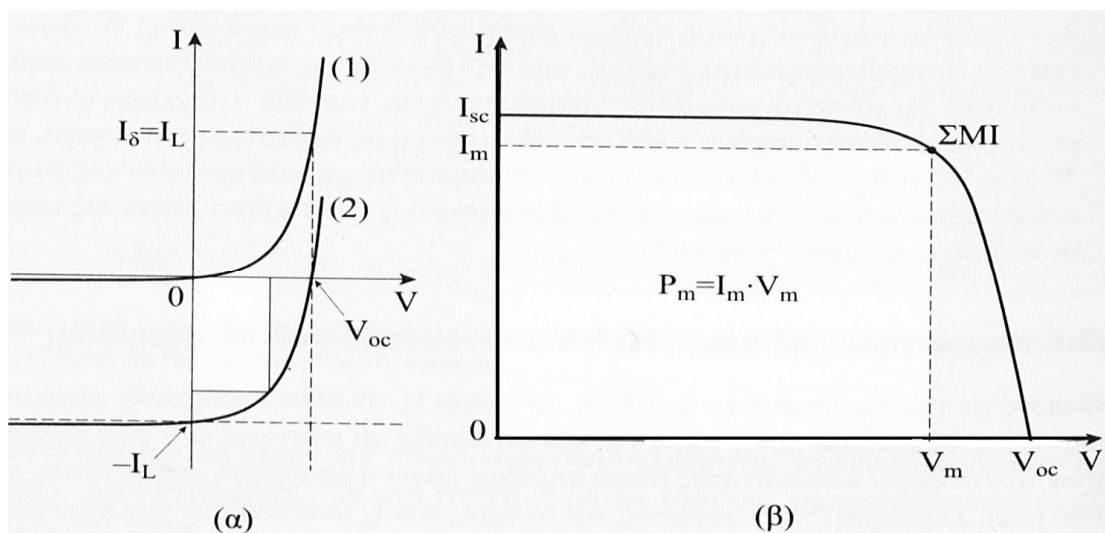
$$I = I_S \left\{ \exp \left( \frac{eV}{\eta_{i\delta} k_B T} \right) - 1 \right\} - I_L$$

(όπου  $\eta_{i\delta}$ , ο παράγων ιδανικότητας της διόδου)



Σχήμα 4.12 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V της διόδου, σε ορθή και ανάστροφη πόλωση

Στο παρακάτω σχήμα 4.13α φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη I-V, ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, στο σκοτάδι (1) και στο φως (2), ενώ στο σχήμα 4.13β δίδεται σε μεγέθυνση το τμήμα της καμπύλης που βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο ανεστραμμένο ως προς τις τιμές του ρεύματος, στο οποίο η επαφή p-n συμπεριφέρεται ως φωτοβολταϊκό στοιχείο. Σε αυτή την περιοχή η φωτοβολταϊκή κυψέλη συμπεριφέρεται ως πηγή ενέργειας και άρα παρέχει ενέργεια σε ένα καταναλωτή ( $P = V \cdot I < 0$ ).

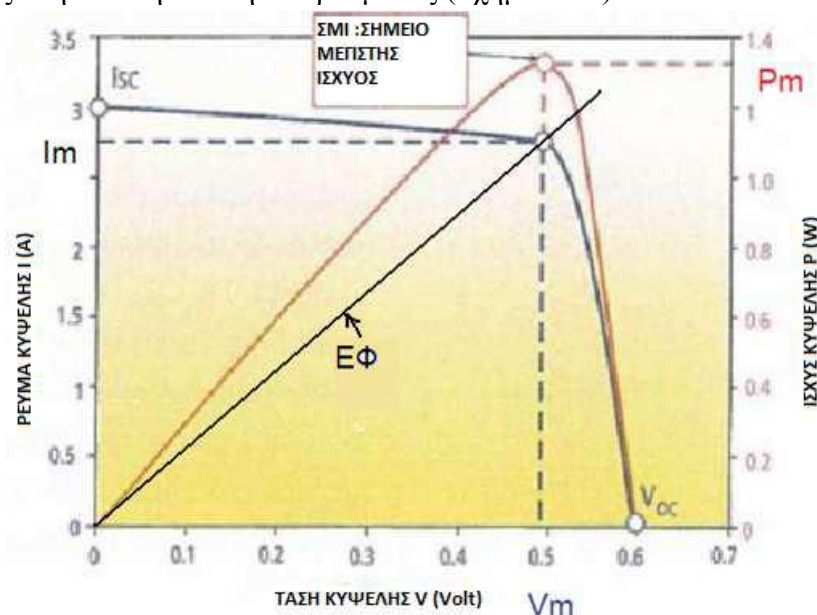


Σχήμα 4.13 α) Χαρακτηριστική καμπύλη I-V, ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, στο σκοτάδι (1) και στο φως (2). β) Μεγένθυση του τμήματος της καμπύλης που βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο.

## 4.9 Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος

Για την αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του φωτοβολταϊκού στοιχείου, πρέπει να προσαρμόσουμε την αντίσταση του καταναλωτή, που επιθυμούμε να συνδέσουμε στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ώστε η τάση και το ρεύμα σ' αυτόν να αντιστοιχούν στο σημείο μέγιστης ισχύος, ΣΜΙ (Maximum Power Point, Mpp).

Υπολογίζουμε την ισχύ που παρέχει το φωτοβολταϊκό στοιχείο, στην αντίσταση  $R$  σε συνάρτηση με την τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου και κατασκευάζουμε το γράφημα της σε συνάρτηση με την τάση  $V$ . Στις ακραίες τιμές τάσης, 0 και  $V_{oc}$  η παρεχόμενη ισχύς είναι μηδέν. Συνεπώς, είναι αναμενόμενο, η καμπύλη  $P=f(V)$  να εμφανίζει μέγιστο, το οποίο παρουσιάζεται κοντά στο σημείο όπου αρχίζει η έντονη πτώση του ρεύματος (σχήμα 4.14).



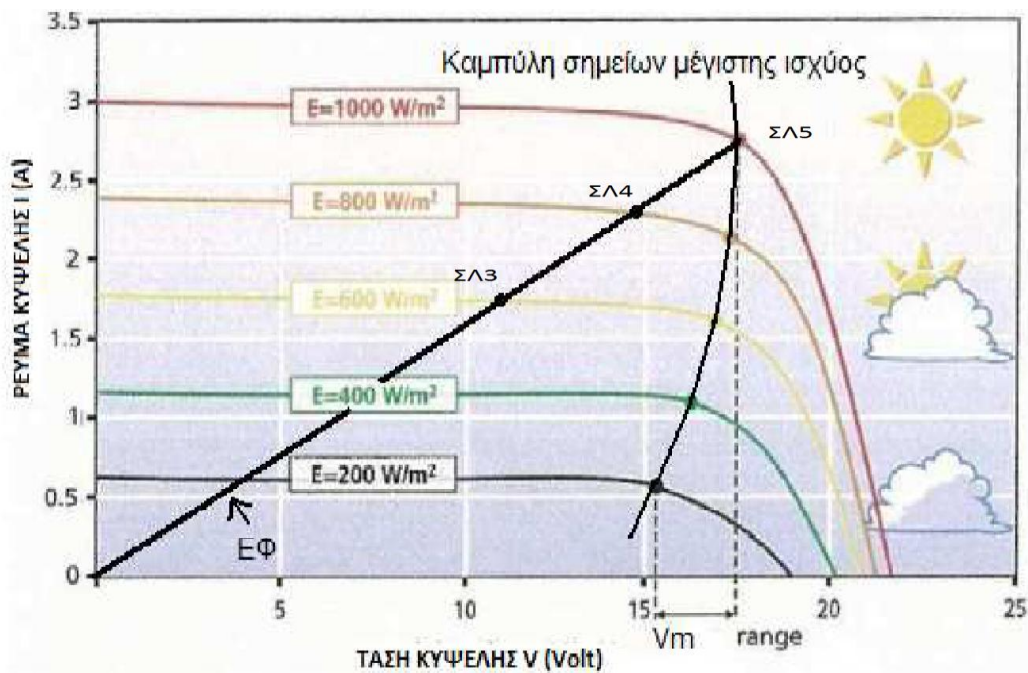
**Σχήμα 4.14** Ανεστραμμένη  $I$ - $V$  φωτοβολταϊκού στοιχείου, στο τεταρτημόριο που αυτό παρέχει ενέργεια, επίσης η καμπύλη ισχύος και η ευθεία φόρτου  $E\Phi$ , για ένα ωμικό καταναλωτή με αντίσταση  $R$  αντίστοιχη του ΣΜΙ ( $R=V_m/I_m$ ).

## 4.10 Καμπύλη φόρτου

Μία χρήσιμη γραφική παράσταση, η οποία ενσωματώνεται και συνδυάζεται με τα διαγράμματα  $I$ - $V$  της ηλεκτρικής πηγής που τροφοδοτεί μία διάταξη, η οποία αξιοποιεί την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, (π.χ. μία ωμική αντίσταση, ένα ηλεκτρικό συσσωρευτή, ένα ηλεκτρικό κινητήρα κ.α.) είναι η **καμπύλη φόρτου** της διάταξης. Είναι η καμπύλη που προκύπτει ως γραφική παράσταση, του ρεύματος  $I$  που διαρρέει τη διάταξη, σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη στην είσοδο της ηλεκτρική τάση  $V$ ,  $I=f(V)$ . Η καμπύλη φόρτου, τοποθετημένη στο διάγραμμα  $I$ - $V$

του φωτοβολταϊκού στοιχείου, τέμνει την χαρακτηριστική καμπύλη του, σ' ένα σημείο, που αποτελεί κοινή λύση για τις εξισώσεις που αντιστοιχούν στις δύο καμπύλες. Το σημείο αυτό καθορίζει το ρεύμα και την τάση στο φόρτο και ονομάζεται σημείο λειτουργίας του συστήματος. Στην περίπτωση που το φορτίο είναι ωμική αντίσταση, η σχέση  $I = f(V)$ , είναι αναλογική και η γραφική παράσταση της ευθεία γραμμή. Σε περίπτωση που μεταβληθεί η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, η καμπύλη  $I-V$  αλλάζει και για το δεδομένο φορτίο, το σημείο λειτουργίας δεν θα συμπίπτει πλέον με το σημείο μέγιστης ισχύος, ΣΜΙ.

Για τον έλεγχο της αποδοτικής λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αλλά και για τον σχεδιασμό των ηλεκτρονικών που συνδυάζονται μ' αυτό, προσδιορίζουμε τα σημεία μέγιστης ισχύος, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του στοιχείου. Επιδιώκουμε το σημείο λειτουργίας του σε κάθε διαφορετική κατάσταση, που θα προκύψει, (π.χ. από μεταβολή της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας,  $E$ ) να αποτελεί και το σημείο μέγιστης ισχύος,  $P_m$ , για τη δεδομένη κατάσταση. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.15, το σημείο λειτουργίας 5, (ΣΛ5), αποτελεί και το σημείο μέγιστης ισχύος  $P_m$ , για πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας,  $E = 1 \text{ kW/m}^2$ .



**Σχήμα. 4.15** Καμπύλη  $I-V$  φωτοβολταϊκού στοιχείου για πέντε διαφορετικές τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, επίσης η καμπύλη σημείων μέγιστης ισχύος, ΣΜΙ και η ευθεία φόρτου,  $E\Phi$ , για ωμική αντίσταση.

Σύμφωνα λοιπόν με το παραπάνω σχήμα 4.15, όταν αλλάζει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σ' ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, που τροφοδοτεί μια ηλεκτρική αντίσταση, το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται. Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς αποδίδεται στην αντίσταση, μόνο για ορισμένο επίπεδο ακτονοβολίας. Σε

διαφορετικές τιμές της έντασης, της ακτινοβολίας, αποδίδεται ισχύς μικρότερη από την αντίστοιχη μέγιστη ισχύ. Μόνο το ΣΛ5 συμπίπτει με το ΣΜΙ της I-V, στις υπόλοιπες καμπύλες I-V, τα δύο σημεία δεν συμπίπτουν. Για να συμβεί κάτι τέτοιο, πρέπει να αλλάξει η ωμική αντίσταση, έτσι ώστε η νέα ευθεία φόρτου, να περνά από το αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος της νέας καμπύλης I-V. Οι τιμές ρεύματος-τάσης, στο σημείο μέγιστης ισχύος, συμβολίζονται με  $I_m$  και  $V_m$ . Η μέγιστη ισχύς, που μπορεί να δώσει το φωτοβολταϊκό στοιχείο, υπό δεδομένη προσπίπτουσα πυκνότητα ακτινοβολίας E, ισούται με,  $P_m = I_m \cdot V_m$ .

#### 4.11 Πρότυπες συνθήκες ελέγχου - ισχύς αιχμής φωτο-βολταϊκού στοιχείου

Τα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία ελέγχονται σε ένα εργαστηριακά παρασκευασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο καθώς επίσης και στο τελικά διατιθέμενο βιομηχανικό προϊόν (ΦΒ πλαίσιο), είναι ο παράγων πλήρωσης FF, το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , και η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ , σε συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας του στοιχείου. Η γνώση των χαρακτηριστικών αυτών μεγεθών, επιτρέπει τον έλεγχο της αποδοτικότητας του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Για το σκοπό αυτό, καθορίστηκαν διεθνώς, οι ακόλουθες **πρότυπες συνθήκες ελέγχου** των χαρακτηριστικών ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πλαισίου (Standard Test Conditions, STC).

Πρότυπες συνθήκες ελέγχου:

- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δέσμης παράλληλων ακτίνων (Beam), πυκνότητας ισχύος  $E = 1 \text{ kW/m}^2$ , και φάσματος αντίστοιχου του ηλιακού με AM1,5.
- Κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας στην όψη του φωτοβολταϊκού στοιχείου.
- Θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου:  $\theta_{STC} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Στα ειδικά εργαστήρια ελέγχου και πιστοποίησης των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων, ο χώρος ελέγχου βρίσκεται στην προκαθορισμένη θερμοκρασία των  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Το φάσμα εκπομπής της χρησιμοποιούμενης πηγής φωτισμού, προσομοιάζει προς το ηλιακό. Η πηγή αυτή λειτουργεί στιγμιαία (Flash), ώστε η θερμοκρασία του υλικού του φωτοβολταϊκού στοιχείου να παραμένει στα προκαθορισμένα όρια των πρότυπων συνθηκών, επιπλέον, η ακτινοβολία από την τεχνητή πηγή, προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στην πραγματικότητα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, λειτουργούν κάτω από φυσικό ηλιακό φως, του οποίου τα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας καθ' όλο το έτος. Επιπλέον, η αποδιδόμενη ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και από τις ιδιαίτερες κλιματικές συνθήκες του τόπου εγκατάστασης.

Με βάση τις πρότυπες συνθήκες, εισάγεται η έννοια της **ισχύς αιχμής** (Peak power,  $P_p$ ), ως χαρακτηριστικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου, η δε μονάδα στο SI, γράφεται,  $W_p$ , (Peak Watt, Watt αιχμής)

Ισχύς αιχμής λοιπόν, ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, είναι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που μπορεί να αποδώσει, κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC,  $P_p=P_{m,STC}$ ).

Η έννοια αυτή χρησιμοποιείται ομοίως, για το χαρακτηρισμό ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ή μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Αποτελεί το χαρακτηριστικό στοιχείο με βάση το οποίο προσδιορίζεται το μέγεθος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.

#### 4.12 Παράγων πλήρωσης FF φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το διαγραμμισμένο "παραλληλόγραμμο" μέσα στην καμπύλη I-V, με πλευρές  $I_m$  και  $V_m$ , έχει "εμβαδόν" ίσο με τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ από το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Το πηλίκο του εμβαδού αυτού προς το εμβαδό ενός άλλου παραλληλογράμμου με πλευρές  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$ , που περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ως πηγή σταθερού ρεύματος, δίνει το μέτρο προσέγγισης αυτής της λειτουργίας της επαφής και λέγεται **παράγων πλήρωσης FF** (Fill Factor). Οι τιμές του, καθορίζονται από το υλικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου και τις συνθήκες, είναι δε μεταξύ 0 και 1. Η τιμή αναφοράς του δίδεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC) και όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές του FF, τόσο περισσότερο η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος, στην περιοχή τάσεων  $0-V_{oc}$ . Σ' αυτές τις περιπτώσεις η διάταξη χαρακτηρίζεται αφενός από μικρή ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά, αφετέρου από μεγάλη τιμή παράλληλης αντίστασης. Τυπικές τιμές 0,7 έως 0,9 χαρακτηρίζουν φωτοβολταϊκά στοιχεία με αποδεκτή έως πολύ κα-λή ενεργειακή απόδοση, αντίστοιχα.

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

#### 4.13 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το υλικό, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών κυψελίδων, είναι το πυρίτιο (Si). Ως στοιχείο, το πυρίτιο βρίσκεται ελεύθερο στη φύση σε αφθονία. Τα διάφορα ορυκτά και πετρώματα του πυριτίου αποτελούν το 87% του φλοιού της Γης, ενώ είναι το δεύτερο σε αφθονία χημικό στοιχείο στη Γη, μετά το οξυγόνο, με ποσοστό 28%. Στην άμμο το πυρίτιο περιέχεται με τη μορφή του

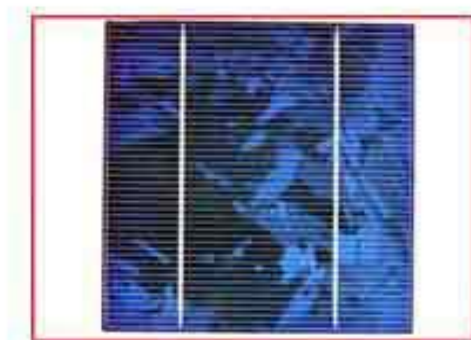
οξειδίου του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ). Το τελικό προϊόν χαρακτηρίζεται από υψηλή (99,99999%) έως και πολύ υψηλή καθαρότητα (99,9999999%). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τη δομή του βασικού υλικού ή τον ιδιαίτερο τρόπο παρασκευής. Οι διαφορετικοί τύποι είναι οι εξής:

**Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου** (single-crystal silicon): Το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (Wafer~300  $\mu\text{m}$ ). Η απόδοσή τους, με τη μορφή κυψελίδας, κυμαίνεται από ~21% έως ~24%. Χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής και έχουν χρώμα σκούρο μπλε.



*Σχήμα 4.16 Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου.*

**Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου** (multicrystalline silicon mc-Si): Έχουν δυνατότητα κατασκευής κατασκευής μεγάλων επιφανειών. Συνήθως κόβονται σε τετραγωνικής μορφής στοιχεία και αποτελούνται από λεπτά επιστρώματα, πάχους 10 έως 50  $\mu\text{m}$ .



*Σχήμα 4.17 Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου.*

Στην επιφάνεια της κυψελίδας, διακρίνονται οι διαφορετικές μονοκρυσταλλικές περιοχές. Τα όρια τους αποτελούν θέσεις παγίδευσης των φορέων και άρα όσο μικρότερο είναι το συνολικό μήκος των οριακών περιοχών μέσα στο δεδομένης διάστασης φωτοβολταϊκό στοιχείο, τόσο καλύτερη είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του. Γενικά, όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις των μονοκρυσταλλικών περιοχών του πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στοιχείου, τόσο υψηλότερη είναι η απόδοσή του, η οποία κυμαίνεται από 17% έως ~20% σε εργαστηριακή μορφή κυψελίδας. Χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλή χρονική σταθερότητα. Το δε κόστος παρασκευής

τους είναι χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το χρώμα τους είναι γαλάζιο.

**Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου** (amorphous ή thin film silicon): Διαθέτουν τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων ή υμενίων (films), έχουν θεωρητικά πολύ χαμηλό κόστος παραγωγής, εξαιτίας της μικρής χρησιμοποιούμενης μάζας υλικού. Το λεπτό επίστρωμα σχηματίζεται πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών αυτών στοιχείων, μειώνεται έντονα, στα αρχικά στάδια φωτισμού τους, στα επίπεδα του 6 με 8%. Σήμερα, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παρασκευή σύνθετων φωτοβολταϊκών στοιχείων, με διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα, με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος. Έτσι παρασκευάζονται φωτοβολταϊκά στοιχεία από κράμα πυριτίου με άνθρακα και γερμάνιο, τριών επαφών a-SiGe (~1,4 eV), a-SiC (1,85 eV), με σταθεροποιημένη απόδοση ~13%. Το ιδιαίτερο κατασκευαστικό χαρακτηριστικό τους είναι η δυνατότητα δημιουργίας διαδοχικών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε μεγάλες επιφάνειες φωτοβολταϊκών πλαισίων.



*Σχήμα 4.18 Φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου.*

Εκτός των φωτοβολταϊκών στοιχείων άμορφου πυριτίου (a-Si), τα οποία σήμερα αποτελούν τα περισσότερο διαδεδομένα στο κόσμο, για την κατηγορία αυτή, κατασκευάζονται φωτοβολταϊκά στοιχεία και από άλλα ημιαγώγιμα υλικά, κυρίως με συνδυασμό μεταξύ τους. Ο συνδυασμός επιλέγεται έτσι ώστε να προκύπτει διάταξη με καλύτερη αξιοποίηση του ηλιακού φάσματος. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, παρά τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματά τους σε σχέση με το πυρίτιο (φασματική απόκριση, σταθερότητα απόδοσης, χαμηλό θερμικό συντελεστή μέγιστης ισχύος κ.α.), εμφανίζουν ακόμα περιορισμένη χρήση, κυρίως λόγω των δυσκολιών που συνδέονται με την πολυπλοκότητα των μεθόδων που χρησιμοποιούνται. Πάντως, η συντελούμενη πρόοδος στον τομέα βελτίωσης των μεθόδων παρασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτών επιστρώσεων ενισχύει την πρόβλεψη για ισχυρή διεύρυνση τους στην αγορά, πιθανότατα μέχρι το 2020 και μάλιστα σε ανταγωνιστικό βαθμό σε σχέση με το κρυσταλλικό πυρίτιο. Ο επόμενος πίνακας 4.19 παρουσιάζει τα πιο σημαντικά απ' αυτά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, το καθένα με τα πλεονεκτήματά του και τα μειονεκτήματά του.

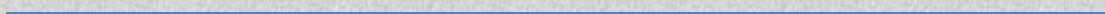


α/α	Βασικά υλικά ΦΒ στοιχείου	Χαρακτηριστικά	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1	Ετεροένωση $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$	Πολυκρυσταλλικό $E_g=1,2 \text{ eV}/2,3 \text{ eV}$ απόδοση $\sim 10\%$ .	Μικρό κόστος κατασκευής.	Μη σταθερής απόδοσης ΦΒ στοιχείο.
2	Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός $\text{CuInSe}_2$ ή CIS	Εργαστηριακή απόδοση 12-13%. Με προσθήκη Ga, βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά του και φτάνει απόδοση 17%. Η απόδοση βιομηχανικού πλαισίου είναι 8-11%.	Χαμηλό κόστος κατασκευής, σταθερότητα ισοδύναμη του c-Si. Υψηλή ετήσια ενεργειακή αποδοτικότητα.	Χαμηλή απόδοση βιομηχανικού προϊόντος.
3	Τελουριούχο κάδμιο $\text{CdTe}$	Ιδανικό ενεργειακό διάκενο.	Εξαιρετική εκμετάλλευση του ηλιακού φάσματος.	Μη επαναλήψιμες ιδιότητες. Δυσκολία δημιουργίας μεταλλικών επαφών.
4	Αρσενικούχο γάλλιο $\text{GaAs}$	Παρουσιάζει την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση $\sim 25,5\%$ . Χρήση σε διαστημικές εφαρμογές.	Υψηλή ενεργειακή απόδοση βιομηχανικού ΦΒ πλαισίου, 22%.	Υψηλό κόστος κατασκευής.

Σχήμα 4.19 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών επιστρωμάτων

## Κεφάλαιο 1

# Εισαγωγή



## ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

### 5.1 Φωτοβολταϊκός συλλέκτης πυριτίου (πλαίσιο)

Το πυρίτιο αποτελεί το πιο διαδεδομένο τύπο ημιαγωγού στοιχείου και η χρήση του έχει επικρατήσει σχεδόν στο σύνολο των ηλεκτρονικών και φωτοβολταϊκών εφαρμογών. Η ηλιακή ακτινοβολία (ηλιακό φως) μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων πυριτίου. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούνται από ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα, ανάλογα με το αποτέλεσμα που θέλουμε να έχουμε.

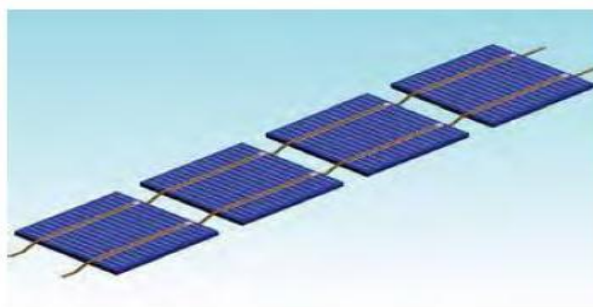
Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε ότι, σύνδεση σε σειρά  $N$ , καθ' όλα όμοιων φωτοβολταϊκών στοιχείων, οδηγεί σε σύστημα με ανάλογα πολλαπλάσια τάση ανοικτού κυκλώματος, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης ισούται με το αντίστοιχο του ενός ( $V_{\text{toc}} = NV_{\text{oc}}$  και  $I_{\text{sc}} = I_{\text{sc}}$ ). Η παράλληλη σύνδεση  $N$  όμοιων φωτοβολταϊκών στοιχείων, δίδει ένα σύνολο με την ίδια τάση ανοικτού κυκλώματος, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ισούται με  $N$  φορές το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ενός ( $V_{\text{toc}} = V_{\text{oc}}$  και  $I_{\text{sc}} = NI_{\text{sc}}$ ).

Ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης θα πρέπει να πληροί κάποια επιθυμητά ηλεκτρικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά. Τα βασικά κριτήρια των χαρακτηριστικών αυτών είναι:

1. Για τα μεν ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, η δυνατότητα συνδιασμού της μονάδας αυτής με συσσωρευτή τυπικής ονομαστικής τάσης 12V, για την αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

2. Για τα δε μορφολογικά χαρακτηριστικά, οι διαστάσεις της μονάδας, η ευκολία κατασκευής, μεταφοράς και ενσωμάτωσης τους σε σύνολα (συστοιχίες) καθώς και το μειωμένο κόστος αντικατάστασης του, στην περίπτωση βλάβης.

Στην πράξη ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά (σχήμα 5.1) βρίσκονται σφραγισμένα ερμητικά κλειστά, μέσα σε πλαστική ύλη για προστασία από τις καιρικές συνθήκες (π.χ. υγρασία), ενώ η μπροστινή όψη του πλαισίου προστατεύεται από ανθεκτικό γυαλί υψηλής διαφάνειας. Η κατασκευή αυτή, που έχει πάχος περίπου 5 χιλιοστά, τοποθετείται συνήθως σε πλαίσιο από αλουμίνιο.



Ηλεκτρική σύνδεση ηλιακών στοιχείων

**Σχήμα 5.1** Σύνδεση σε σειρά φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Συγκεκριμένα, σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου, ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, δίδει τάση  $\sim 0,6$  Volts σε θερμοκρασία  $\theta_c = 25$  °C, το δε σύνολο 36 τέτοιων στοιχείων σε σύνδεση σειράς, δίδει τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc} = 36 \cdot 0,6 \text{ V} = 21,6$  Volts, που είναι απαραίτητη, για την φόρτιση συσσωρευτή τυπικής ονομαστικής τάσης 12 Volts. Η τελική κατασκευή φωτοβολταϊκού πλαισίου πληροί ειδικές προδιαγραφές, ώστε να διαθέτει την απαραίτητη μηχανική αντοχή, τις κατάλληλες υποδοχές στήριξης και επιπλέον την αυξημένη στεγανότητα για προστασία από την υγρασία. Μια τέτοια κατασκευή χρειάζεται σχεδόν μηδενική συντήρηση και έχει διάρκεια ζωής που φτάνει τα τριάντα χρόνια.

Η διάταξη αυτή αποτελεί την τυπική βιομηχανική μονάδα (module) και ονομάζεται **φωτοβολταϊκό πλαίσιο** (photovoltaic module). Σπανιότερα, χρησιμοποιείται ο όρος **φωτοβολταϊκή γεννήτρια** (photovoltaic generator), ενώ αποτελεί τη βασική δομική μονάδα κάθε μεγαλύτερης εγκατάστασης παραγωγής φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (array). Στο εμπόριο υπάρχουν τυπικές τιμές ισχύος αιχμής από μερικά  $W_p$  έως τα 150  $W_p$ . Διατίθενται δε σε μεγαλύτερες διαστάσεις, με περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία, σε σειρά και παράλληλη εσωτερική σύνδεση, με τη μορφή σύνθετων διατάξεων, που χαρακτηρίζονται από υψηλή ισχύ αιχμής και συνήθως υψηλή τάση ανοικτού κυκλώματος, κατάλληλα για ειδικές εφαρμογές.

Η αρχική μορφή των φωτοβολταϊκών στοιχείων σ' ένα συλλέκτη, ήταν κυκλική, με αποτέλεσμα να μένει αρκετή μη ενεργός επιφάνεια του πλαισίου. Σήμερα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, έχουν τετραγωνικής μορφής σχήμα, ώστε να ελαχιστοποιείται η μη αξιοποιήσιμη επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Όσον αφορά την επιλογή του αριθμού των φωτοβολταϊκών στοιχείων απ' τα οποία θα κατασκευαστεί το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αναφέρθηκε προηγουμένως ότι, αυτό έχει άμεση σχέση με την ονομαστική ηλεκτρική τάση 12 V στους πόλους των ηλεκτρικών συσσωρευτών  $Pb/H_2SO_4$ , οι οποίοι κατέχουν την πρώτη θέση στην παγκόσμια αγορά. Έτσι για την φόρτιση ενός συσσωρευτή μολύβδου-θειικού οξέως ( $Pb/H_2SO_4$ ), ονομαστικής τάσης 12 V, απαιτείται τάση περίπου 14,2-14,4 Volts. Στο σύστημα αυτό είναι απαραίτητη η παρεμβολή μιας απλής ηλεκτρονικής διάταξης, για τον έλεγχο των ορίων τάσης φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή καθώς και μιας διόδου αντεπιστροφής, ώστε να αποτρέπεται η εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή διαμέσου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, όταν αυτή δεν φωτίζεται. Αυτά τα πρόσθετα ηλεκτρονικά και οι γραμμές μεταφοράς, απαιτούν μία επιπλέον τάση 1-2 V. Άρα το ΣΜΙ της πιο απλής φωτοβολταϊκής συστοιχίας, δηλαδή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον τάση, 15 με 17 Volts. ( $14,4V + 1$  έως 2 V).

Έτσι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων, οδηγούν στην επιλογή συγκεκριμένων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η τάση όπου επιθυμούμε να λειτουργεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, σε διάφορα επίπεδα φωτισμού, βρίσκεται στην περιοχή 14V-17V, ενώ η αντίστοιχη τάση

ανοικτού κυκλώματος είναι στην περιοχή 19V-22V.

Με στόχο τα φωτοβολταϊκά πλαίσια να προσαρμοστούν περισσότερο στην αρχιτεκτονική μορφή των κτηρίων, οι εταιρείες κατασκεύασαν πλαίσια που ταιριάζουν με τις απαιτήσεις της πρακτικότητας και της αισθητικής. Παραδείγματος χάριν, για τις στέγες των κτιρίων παραδοσιακής μορφής, προτείνεται η χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων, με τη μορφή κεραμιδιών (εικόνα 5.2).



*Σχήμα 5.2 Πάνω αριστερά η τοποθέτηση και πάνω δεξιά η ολοκλήρωση της εγκατάστασης, με τη χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων, με τη μορφή κεραμιδιών.*

Στις πλευρές του κτηρίου, μπορούν να τοποθετηθούν φωτοβολταϊκά πλαίσια – ζωγραφικοί πίνακες. Φωτοβολταϊκά πλαίσια ημιπερατά στο ηλιακό φως μπορούν να τοποθετηθούν σε διαδρόμους μεγάλων κτηριακών συγκροτημάτων, συνδυάζοντας τη δυνατότητα φυσικού ημερήσιου φωτισμού του διαδρόμου με τη δυνατότητα τεχνητού φωτισμού, από αποθηκευμένη φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια, κατά τη διάρκεια της νύκτας ή των συννεφιασμένων ημερών.

## 5.2 Ονομαστική ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

Το κυριότερο τυπικό ηλεκτρικό χαρακτηριστικό ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, βάση του οποίου θα το ψάξουμε στο εμπόριο, ώστε να καλύψει τις ανάγκες μιας συγκεκριμένης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης καθώς και η εμπορική του τιμή, καθορίζονται από την έννοια της **ισχύος αιχμής** (peak power), όπως αυτή ορίστηκε και για το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Ισχύς αιχμής,  $P_p$ , ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, είναι η μέγιστη ισχύς με την

οποία αυτό αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια, κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου. Έστω, π.χ. ότι η ισχύς αιχμής ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μονοκρυσταλλικού πυριτίου, είναι  $75 W_p$ , τότε αυτό σημαίνει ότι το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, όταν δέχεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πυκνότητας ισχύος,  $E=1 kW/m^2$ , φάσματος AM 1,5 και η θερμοκρασία του είναι  $25 ^\circ C$ , τότε θα παράγει ηλεκτρική ενέργεια με ισχύ  $75 W$ . Είναι προφανές ότι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, το οποίο βρίσκεται στην ύπαιθρο, δεν λειτουργεί πάντα σε αυτές τις ιδανικές συνθήκες.

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά ενός μονοκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού πλαισίου ισχύς αιχμής  $P_p= 80W$ . Είναι τα βασικά χαρακτηριστικά όπου θα πρέπει να ερευνησουμε για την αγορά του φωτοβολταϊκού μας πλαισίου, τέτοια είναι η ισχύς  $P_p$ , η ένταση του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ , επίσης, αναγράφεται και η θερμοκρασία NOCT, την οποία αποκτά το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ευρισκόμενο σε καθορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος, που προσεγγίζουν μία μέση πραγματική κατάσταση. Συνεπώς, όσο μικρότερη η τιμή της για ένα πλαίσιο, τόσο μικρότερη η μείωση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύς, σε σχέση με άλλο ίδιας ισχύος αιχμής, του οποίου όμως, η θερμοκρασία NOCT είναι μεγαλύτερη.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΗ
Τυπική ισχύς αιχμής, $P_p$ (Peak power)	80 W
Εγγύηση για ελάχιστο της ισχύος αιχμής	76 W
Ηλεκτρική τάση στο σημείο ισχύος αιχμής ( $V_m,STC$ )	16,9 V
Ηλεκτρικό ρεύμα στο σημείο ισχύος αιχμής ( $I_m,STC$ )	4,73 A
Τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{oc,STC}$ )	21,5 V
Ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc,STC}$ )	4,97 A
Θερμικός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης	0,05%/K
Θερμικός συντελεστής τάσης ανοικτού κυκλώματος	-0,5%/K
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	49 $^\circ C$
Διαστάσεις (μήκος · πλάτος · πάχος) σε mm	1425 · 652 · 36
Βάρος, kg	11,9

Πίνακας 5.3 Τυπικά χαρακτηριστικά μονοκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού πλαισίου, ισχύς αιχμής 80W.

### 5.3 Απόδοση ΦΒ πλαισίου και παράγοντες που την επηρεάζουν

Ο στιγμιαίος συντελεστής απόδοσης ( $\eta_m$ ) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, εμβαδού  $S$ , προσδιορίζεται από το πηλίκο της αποδιδόμενης μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος,  $P_m$ , προς την προσπίπτουσα στο πλαίσιο, ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας  $E \cdot S$ ,

όπου  $E$ , η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου :

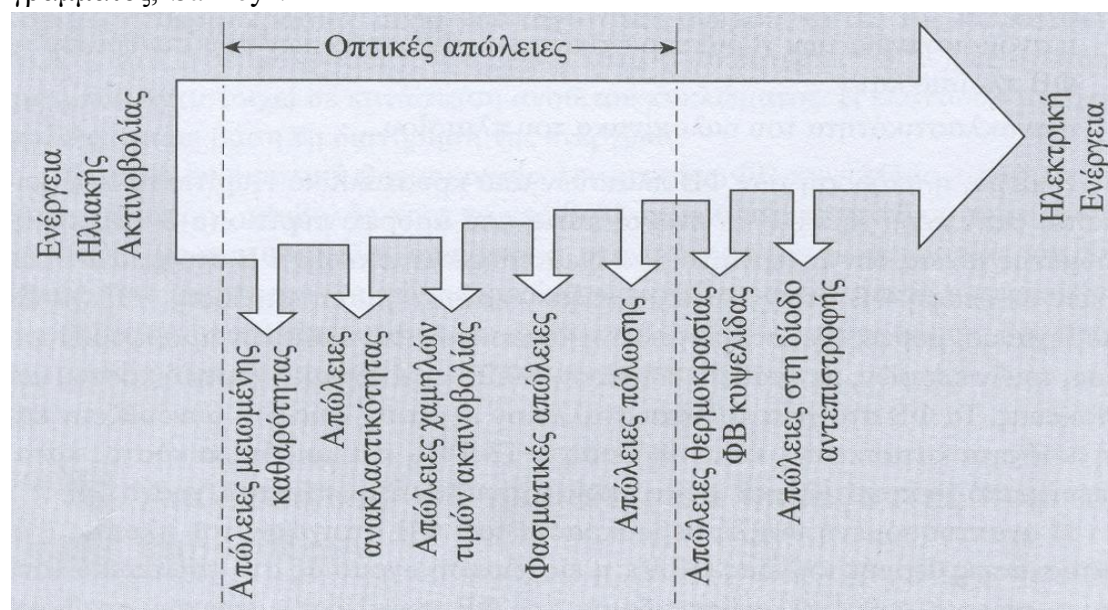
$$\eta_m = \frac{P_m}{E \cdot S}$$

Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες των υλικών παρασκευής του, τη θερμοκρασία των κυψελίδων και την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η τιμή αναφοράς του καθορίζεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC). Σε συνθήκες διαφορετικές από τις πρότυπες, η τιμή του καθορίζεται από τη διαφορά  $\theta_c - \theta_{STC}$ , των θερμοκρασιών της κυψελίδας στη δεδομένη κατάσταση φωτισμού και στην κατάσταση STC (25 °C), αντίστοιχα, καθώς και από την πυκνότητα ισχύος  $E$ , της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η τιμή του στιγμιαίου συντελεστή απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου, ( $\eta_m$ ), καθορίζεται από τις αποκλίσεις που υφίσταται από την τιμή  $\eta_{m, STC}$ , που προσδιορίζεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC). Οι απώλειες αυτές αφορούν:

- Τη γήρανση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, δηλαδή στη μείωση της απόδοσης του λόγω αλλοίωσης των υλικών κατασκευής των κυψελίδων του φωτοβολταϊκού πλαισίου.
- Στις απώλειες οπτικού δρόμου και θερμοκρασίας κυψελίδας, που προκύπτουν λόγω της διαφοροποίησης των χαρακτηριστικών της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντα αέρα, των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε σχέση με αυτά των πρότυπων συνθηκών.
- Στις απώλειες στη δίοδο αντεπιστροφής του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Οι ενεργειακές απώλειες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα, με τη μορφή διαγράμματος, "Sankey".



Σχήμα 5.4 Διάγραμμα Sankey για τη ροή ενέργειας σε φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι μικρότερη της αντίστοιχης του φωτοβολταϊκού στοιχείου εργαστηριακής παρασκευής. Οι βασικότεροι λόγοι είναι:

- Η μη πλήρης κάλυψη της γεωμετρικής επιφάνειας του, από την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η οποία καθορίζεται από τον παράγοντα κάλυψης, (Ο παράγων κάλυψης φωτοβολταϊκού πλαισίου ισούται με το πηλίκο της πραγματικής επιφάνειας των φωτοβολταϊκών στοιχείων που αποτελούν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, προς την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου).
- Η ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων, που συνθέτουν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.
- Η ανακλαστικότητα του υαλοπίνακα του πλαισίου.

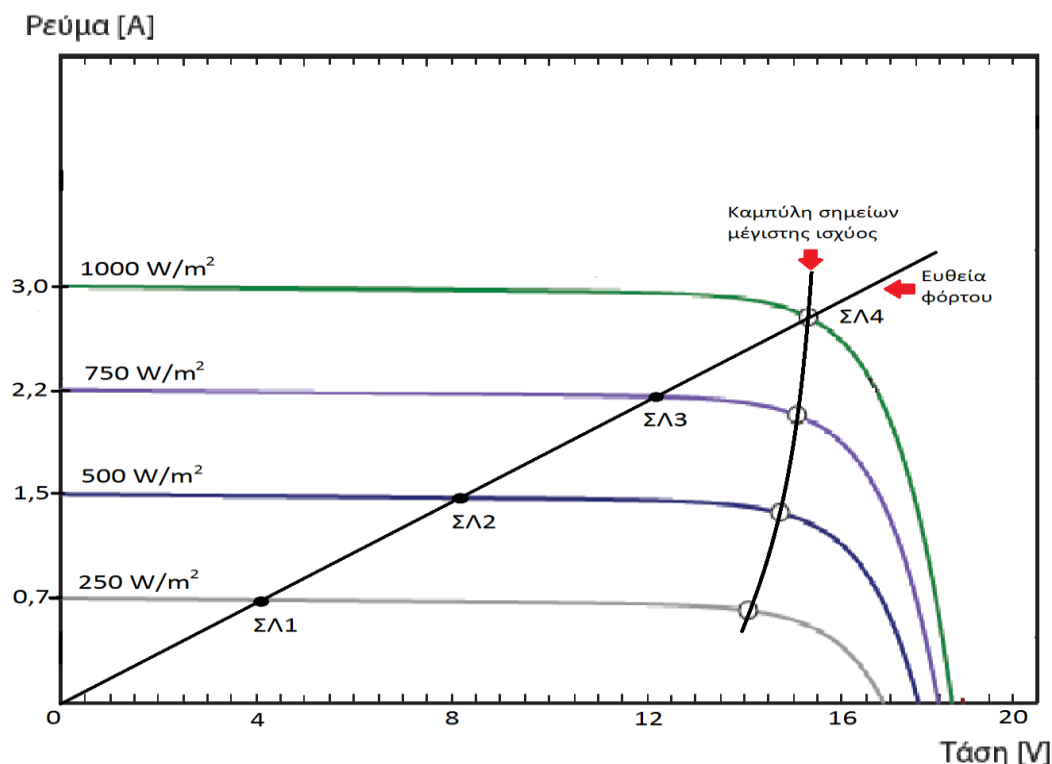
Σήμερα, η απόδοση για φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι περίπου 15%, ενώ πολυκρυσταλλικού πυριτίου πλαίσια ~12%. Για άμορφου πυριτίου φωτοβολταϊκά πλαίσια συναντάμε απόδοση γύρω στο 10%.

Παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά, και προκαλούν μείωση της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, είναι, η αναπτυσσόμενη υψηλή θερμοκρασία κάτω από την οποία μπορεί να λειτουργούν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του πλαισίου, η εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό τους και οι συνακόλουθες αλλοιώσεις δομής της φωτοβολταϊκής κυψελίδας. Επίσης, σκόνες και άλλα σώματα που προσκολλούν στην επιφάνεια όψης των πλαισίων, μειώνουν την ενεργειακή τους απόδοση. Το μέγεθος της επίδρασης εξαρτάται, από το υλικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου, τον τύπο του και την διαχρονική του αξιοπιστία της μηχανικής κατασκευής και των ηλεκτρολογικών και μονωτικών υλικών.

#### 5.4 Σημείο λειτουργίας ΦΒ πλαισίου κάτω από διαφορετικές πυκνότητες ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας

Στο παρακάτω σχήμα 5.5 αποδίδονται μερικές χαρακτηριστικές καμπύλες I-V, σε διαφορετικές πυκνότητες ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Στο ίδιο σχήμα φαίνονται τα διαφορετικά σημεία λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, που τροφοδοτεί μια σταθερή αντίσταση, σε διαφορετικές πυκνότητες ισχύος προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Παρατηρούμε ότι στα σημεία μέγιστης ισχύος, σε διαφορετικά επίπεδα πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, ορίζουν μια περιοχή ηλεκτρικών τάσεων, μέσα στην οποία κυμαίνεται η τάση στα άκρα της αντίστασης φόρτου. Η περιοχή αυτή εκτείνεται, συνήθως, μεταξύ 14 V και 17 V και, όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο .....1, η περιοχή αυτή καλύπτει τις απαιτήσεις φόρτισης ενός τυπικού ηλεκτρικού συσσωρευτή ονομαστικής τάσης 12 V.





**Σχήμα 5.5** Για δεδομένο ωμικό φορτίο, τα σημεία λειτουργίας ΣΛ (1,2,3), που αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού του φωτοβολταϊκού πλαισίου, δεν συμπίπτουν με τα αντίστοιχα σημεία μέγιστης ισχύος, με εξαίρεση, στη συγκεκριμένη περίπτωση, το ΣΛ4, αντίστοιχο της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας 1kW/m<sup>2</sup>.

Το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου, που τροφοδοτεί ένα καταναλωτή διαφορετικό από ωμική αντίσταση, προσδιορίζεται με όμοιο τρόπο. Στο διάγραμμα, που περιέχει την καμπύλη I-V του φωτοβολταϊκού πλαισίου, σχεδιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη φόρτου του καταναλωτή. Το σημείο τομής των δύο καμπυλών αποτελεί το σημείο λειτουργίας του συστήματος.

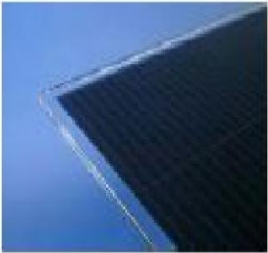


Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση συστήματος στο οποίο το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι συνδεδεμένο σε ηλεκτρικό συσσωρευτή. Η καμπύλη φόρτου, πάνω στην οποία βρίσκονται τα σημεία λειτουργίας του συστήματος, στην περίπτωση αυτή, βρίσκεται πολύ κοντά στην καμπύλη των σημείων μέγιστης ισχύος του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Συνεπώς, με την παρουσία του συσσωρευτή, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, παρέχει στο φόρτο ενέργεια με ισχύ πολύ κοντά στη μέγιστη τιμή, σε αντιστοιχία με την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.

## 5.5 Διάκριση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διακρίνονται, όπως και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- **Φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου**, τα οποία έχουν πολύ καλή απόδοση (15% περίπου). Χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής και έχουν χρώμα σκούρο μπλε.
- **Φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου**, τα οποία έχουν καλή απόδοση (12% περίπου). Το κόστος παρασκευής τους είναι χαμηλότερο από αυτό του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Έχουν χρώμα γαλάζιο που είναι περισσότερο αποδεκτό από τους αρχιτέκτονες για ενσωμάτωση στις κατοικίες.
- **Φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου**, όπου έχουν σχετικά καλή απόδοση (10% περίπου). Το κόστος παρασκευής τους είναι χαμηλό. Χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα δημιουργίας φωτοβολταϊκών στοιχείων συνεχούς κάλυψης μεγάλων επιφανειών (τεχνολογία λεπτών υμενίων - films).

Στον παρακάτω πίνακα 5.6 αποτυπώνεται η διάκριση αυτή των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

ΤΥΠΟΣ	'Λεπτού υμενίου' ή 'Thin Film'	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Εμφάνιση			
Απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας	~10%	~12%	~15%
Επιφάνεια ανά kWp	9-25 m <sup>2</sup>	7-9 m <sup>2</sup>	5,5-9 m <sup>2</sup>

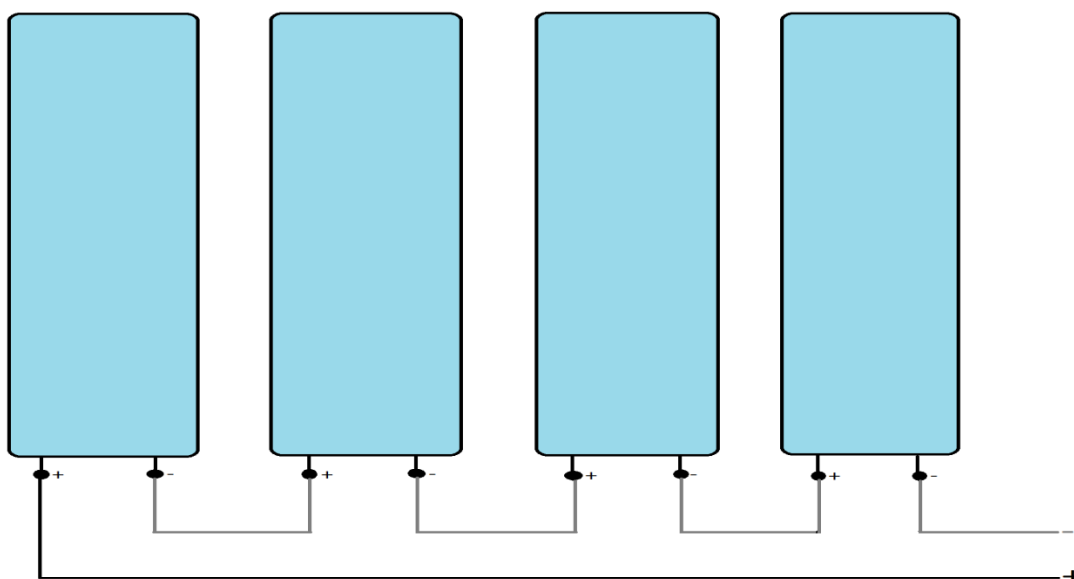
Πίνακας 5.6

## 5.6 Τρόποι σύνδεσης φωτοβολταϊκών πλαισίων

Ανάλογα με τις απαιτήσεις που έχουμε, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να συνδεθούν σε σειρά, παράλληλα ή σε μεικτή σύνδεση.

Η σύνδεση σε σειρά δύο ή και περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων

αυξάνει την τάση στους τελικούς ακροδέκτες του συγκροτήματος, που ονομάζεται στην περίπτωση αυτή **φωτοβολταϊκό panel** (σύνθετο), (σχήμα 5.7). Το φωτοβολταϊκό panel αποτελείται από φωτοβολταϊκά πλαίσια συναρμολογημένα σε ένα μεταλλικό πλαίσιο (συνήθως από αλουμίνιο), με καλωδιώσεις που απολήγουν σε ηλεκτρολογικό κιβώτιο, ως ενιαία κατασκευή, έτοιμη για εγκατάσταση, με δυνατότητα, λόγω μικρού βάρους, εύκολης αφαίρεσης, μεταφοράς ή επέμβασης στα επί μέρους φωτοβολταϊκά πλαίσια, ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες όμοιες μονάδες. Συγκεκριμένα, συνδέοντας σε σειρά  $n$  όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια, έχουμε ένα σύστημα με ανάλογα πολ-λαπλάσια τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{toc} = n \cdot V_{oc}$ ). Το ρεύμα του συστήματος (μέγιστο ή βραχυκύκλωσης) είναι ίσο με αυτό του ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ( $I_{tsc} = I_{sc}$ ).



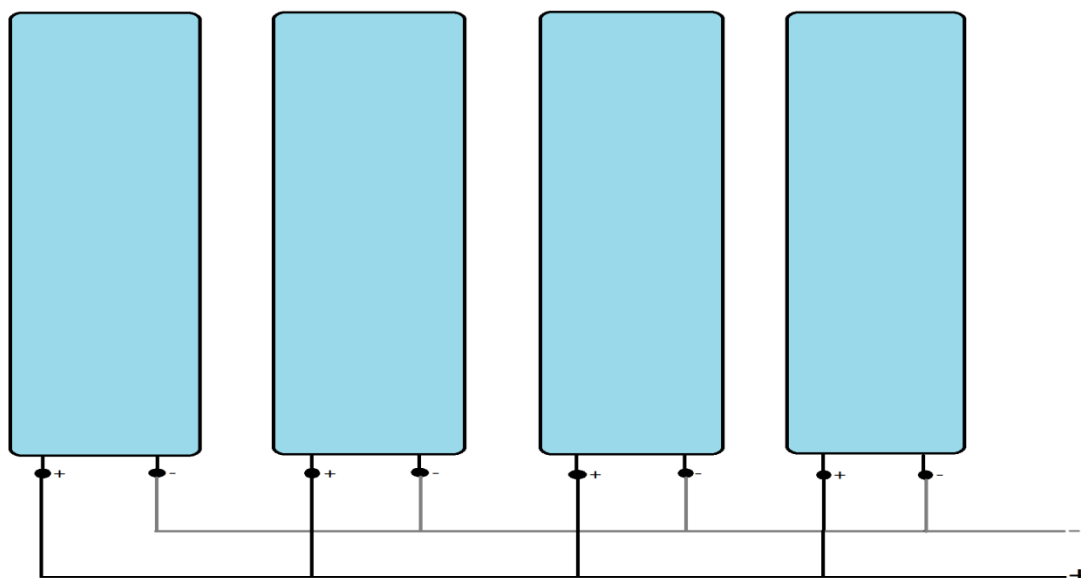
*Σχήμα 5.7* Σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά.

Συνδέοντας σε σειρά δύο και περισσότερων καθ' όλα όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων, δημιουργούμε έναν κλάδο σύνδεσης. Η σύνδεση δε σε σειρά πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων ή panel, σε μία επίπεδη συνήθως επιφάνεια αυξάνει πολύ την τάση στους τελικούς ακροδέκτες του συγκροτήματος, που ονομάζεται στην περίπτωση αυτή **φωτοβολταϊκή συστοιχία** (array).

Η σύνδεση παράλληλα δύο ή και περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων αυξάνει την ένταση στους τελικούς ακροδέκτες του συγκροτήματος, που ονομάζεται στην περίπτωση αυτή φωτοβολταϊκό panel. Συγκεκριμένα, συνδέοντας παράλληλα  $n$  όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια, έχουμε ένα σύστημα με ρεύμα (βραχυκύκλωσης ή μέγιστο) που ισούται με  $n$  φορές το ρεύμα (βραχυκύκλωσης ή μέγιστο) του ενός πλαισίου ( $I_{tsc} = n \cdot I_{sc}$ ). Η τάση του συστήματος είναι ίδια με την τάση του ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ( $V_{toc} = V_{oc}$ ), (σχήμα 5.8).

Η παράλληλη σύνδεση πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων ή panel, σε μία επίπεδη συνήθως επιφάνεια αυξάνει πολύ την ένταση στους τελικούς ακροδέκτες του συγκροτήματος, που ονομάζεται στην περίπτωση αυτή φωτοβολταϊκή συστοιχία

(array). Πάντως, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε μία συστοιχία, συνδιάζονται (μεικτή σύνδεση) έτσι ώστε η μεταφορά της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας να γίνεται με τις μικρότερες δυνατές απώλειες στη γραμμή μεταφοράς, δηλαδή, με χαμηλό ρεύμα και αντίστοιχα μεγάλη ηλεκτρική τάση, μέσα στα επιτρεπτά όρια.

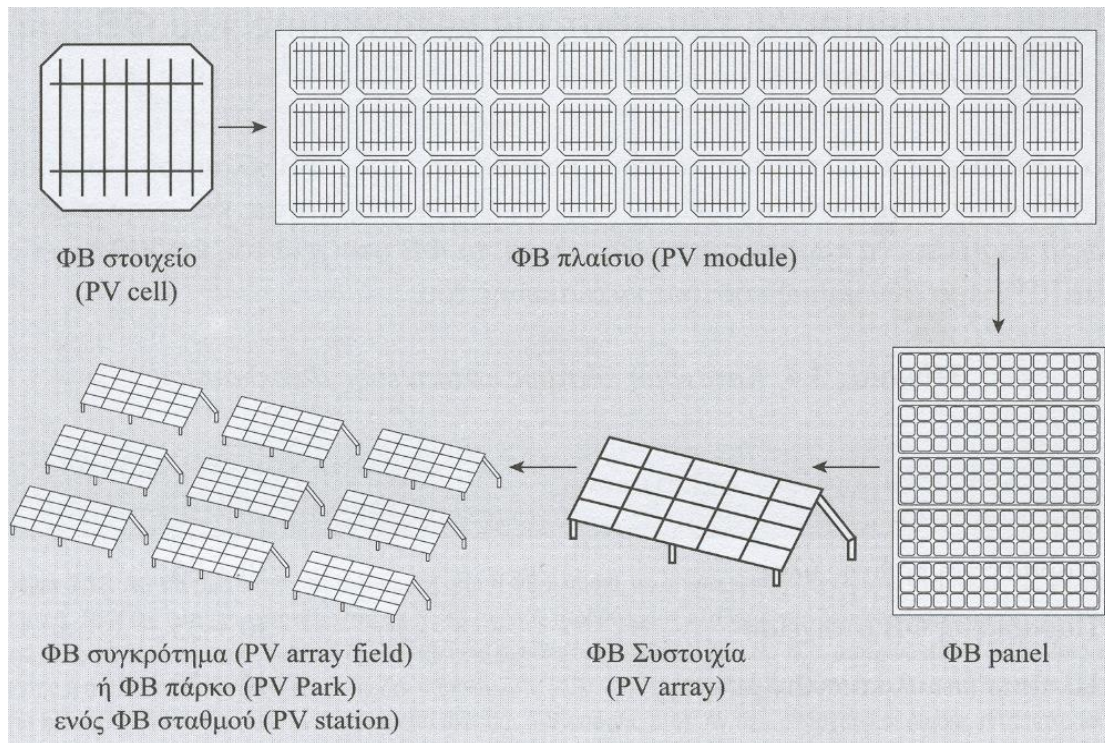


Σχήμα 5.8 Σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων παράλληλα.

Ένα σύνολο φωτοβολταϊκών συστοιχιών, κατάλληλα συνδεδεμένων (σε σειρά, παράλληλα ή μεικτά) ανάλογα με την επιθυμητή τάση και ένταση στους τελικούς ακροδέκτες του συστήματος, ονομάζεται **φωτοβολταϊκό συγκρότημα** ή **φωτοβολταϊκό πάρκο** (σχήμα 5.9). Το φωτοβολταϊκό πάρκο μαζί με τις υπόλοιπες διατάξεις που απαιτούνται για τον έλεγχο της φόρτισης των συσσωρευτών και τη μετατροπή του παραγόμενου συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, αποτελούν το **φωτοβολταϊκό σταθμό**.

Η επιλογή του τρόπου σύνδεσης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών μεταξύ τους, γίνεται με βάση την ονομαστική τάση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (όπως θα δούμε στο επόμενο ΚΕΦ, με την ονομαστική τάση στην είσοδο του μετατροπέα, φορτιστή, συσσωρευτών κλπ.). Η επιλογή του τρόπου σύνδεσης έχει σχέση (ανάλογα και με το μέγεθος της εγκατάστασης) και με τον περιορισμό των απωλειών. Συνδέοντας πολλούς φωτοβολταϊκούς συλλέκτες σε σειρά αυξάνουμε την τάση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης μειώνοντας αντίστοιχα το ονομαστικό ρεύμα του κάθε κλάδου. Το αρχικό κόστος εγκατάστασης σ' αυτή την περίπτωση είναι μεγαλύτερο.

Στο παρακάτω σχήμα 5.9 φαίνονται οι τυπικοί σχηματισμοί σύνθεσης φωτοβολταϊκών στοιχείων και πλαισίων.



**Σχήμα 5.9** Ορολογία και τυπικοί σχηματισμοί σύνθεσης φωτοβολταϊκών στοιχείων και πλαισίων.

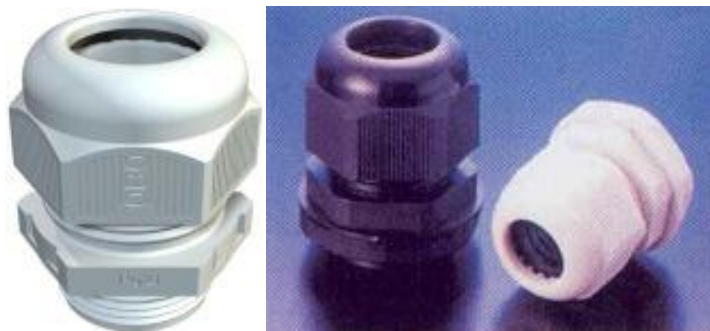
Για την προστασία των τμημάτων ενός φωτοβολταϊκού συγκροτήματος, από την εκφόρτιση του συσσωρευτή ή των συσσωρευτών, όταν το σύστημα των πλαισίων δεν παράγει τάση (κατά τη διάρκεια της νύχτας ή στη διάρκεια της ημέρας με πολύ συννεφιά), χρησιμοποιούνται διόδους αντεπιστροφής. Με τις διόδους αντεπιστροφής αποφεύγουμε τη δημιουργία ρευμάτων μέσα στους παράλληλους κλάδους. Τοποθετούμε διόδους αντεπιστροφής σε κάθε κλάδο και διόδους παράκαμψης σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο ενός κλάδου.

Όλες οι συνδεσμολογίες (δίοδοι παράκαμψης ή αντεπιστροφής, γραμμές ισχύος κλπ.) πρέπει να γίνονται μέσα σε στεγανά κουτιά αυξημένης προστασίας (IP68) (σχήμα 5.10).



**Σχήμα 5.10** Στεγανά κουτιά αυξημένης προστασίας.

Οι συνδέσεις πρέπει να είναι σταθερές, για την αποφυγή δημιουργίας τοπικών αντιστάσεων (πτώση τάσης, ανάπτυξη θερμότητας) και η είσοδος – έξοδος των καλωδίων, γίνεται με χρήση ειδικών στεγανών στυπιοθλιπτόν, (σχήμα 5.11).



*Σχήμα 5.11 Απεικόνιση στυπιοθλιπτόν.*

Τα καλώδια θα πρέπει να είναι ειδικού τύπου (κατάλληλα για εξωτερικό περιβάλλον), εύκαμπτα και στην αλλαγή διεύθυνσης πρέπει να γίνεται σωστή κάμψη. Οι εξωτερικές συνδέσεις των καλωδίων θα πρέπει να γίνονται με ειδικούς στεγανούς συνδετήρες ασφαλείας, ιδιαίτερα σε περιοχές που είναι προσβάσιμες σε παιδιά.

## 5.7 Πλεονεκτήματα φωτοβολταϊκών συλλεκτών

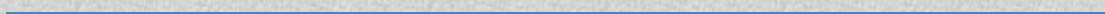
Τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συλλεκτών είναι τα ακόλουθα:

- Δεν έχουν κινούμενα μέρη και παράγουν ισχύ αθόρυβα.
- Δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον με αέρια ή με άλλα κατάλοιπα, αφού δεν λαμβάνει χώρα κάποια χημική αντίδραση.
- Λόγω του σπονδυλωτού τρόπου κατασκευής τους, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να προσαρμοστούν σε όλες τις απαιτήσεις μεγέθους και ζήτησης ισχύος.
- Μπορούν εύκολα να λειτουργήσουν παράλληλα με άλλα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνοντας την αξιοπιστία των συστημάτων.
- Είναι επεκτάσιμα ανάλογα με τις ανάγκες σε φορτίο χωρίς την απαίτηση ειδικής εγκατάστασης.
- Μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα και αξιόπιστα χωρίς την παρουσία κάποιου χειριστή.
- Επειδή δεν χρειάζονται διαρκή παρακολούθηση, έχουν πολύ μικρό κόστος λειτουργίας και συντήρησης.
- Δεν καταναλώνουν καύσιμο.
- Λειτουργούν χωρίς προβλήματα σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και κάτω από όλες τις καιρικές συνθήκες.

- Το ηλιακό κύτταρο δεν αλλοιώνεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του και έχει επίσης μεγάλη διάρκεια ζωής.

Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*

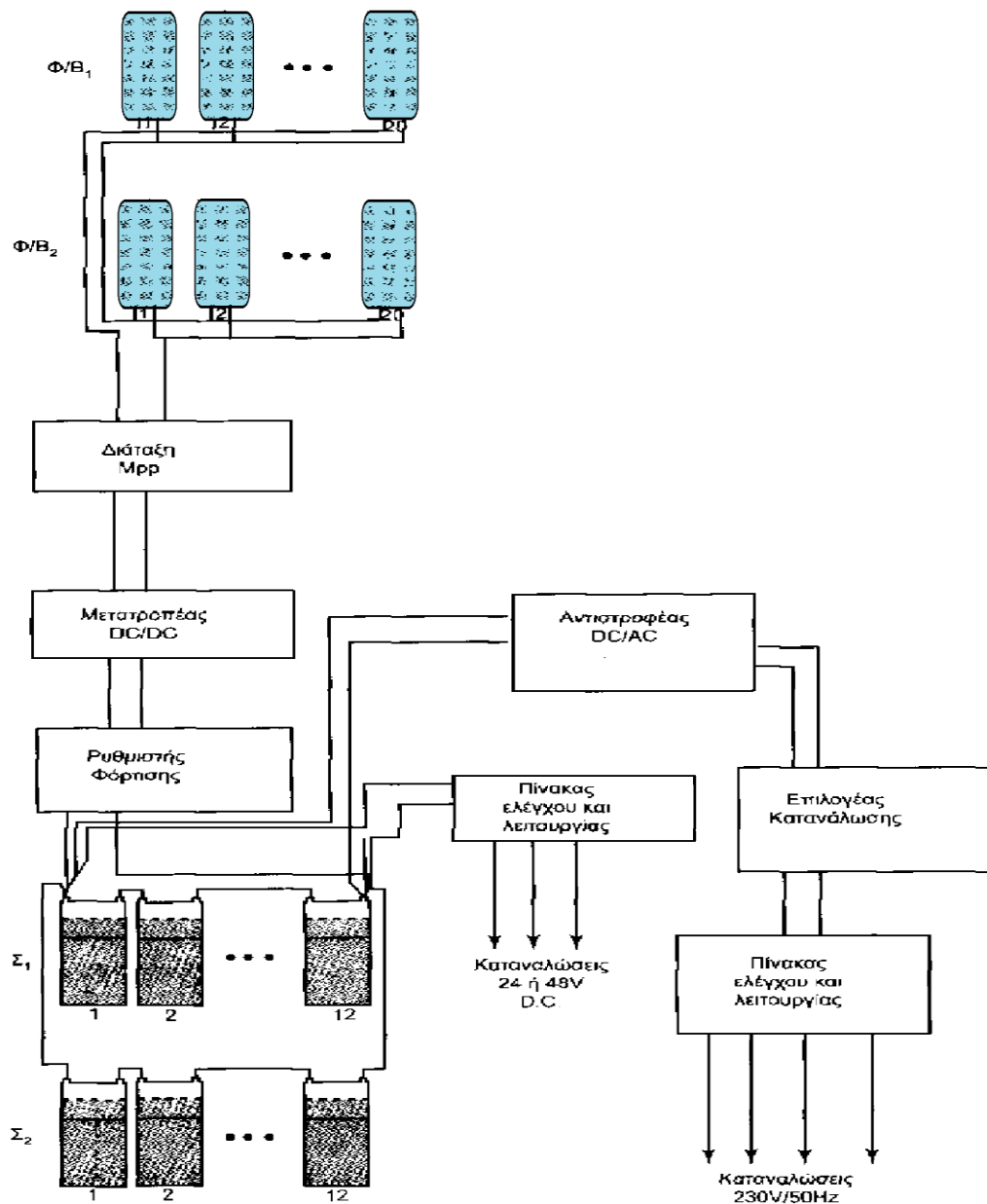




## ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

### 6.1 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα

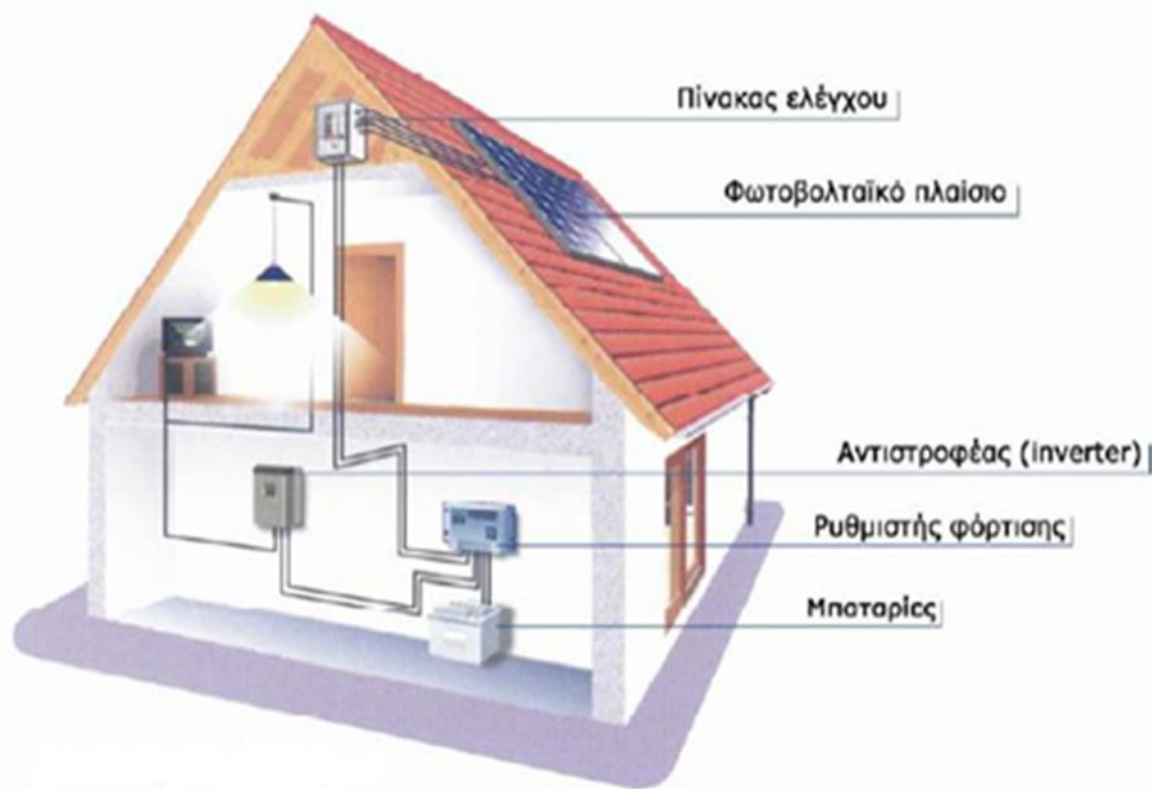
Το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα (σχήμα 6.1 και 6.2), είναι συνήθως εγκατεστημένο μόνιμα και μπορεί να καλύψει τις ανάγκες σε ηλεκτρισμό εξοχικών κατοικιών, σκαφών, αγροικιών, θερμοκηπίων, τροχόσπιτων και απομακρυσμένων σταθμών διαφόρων μετρήσεων.



Σχήμα 6.1 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα.  $\Phi/B_1$ ,  $\Phi/B_2$ , ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων και  $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_2$ , συστοιχίες συσσωρευτών βιομηχανικού τύπου.

Με σωστό υπολογισμό της αναγκαίας σε αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να καλύψει ακόμα και μόνιμες κατοικίες για απεξάρτηση από το βασικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται:

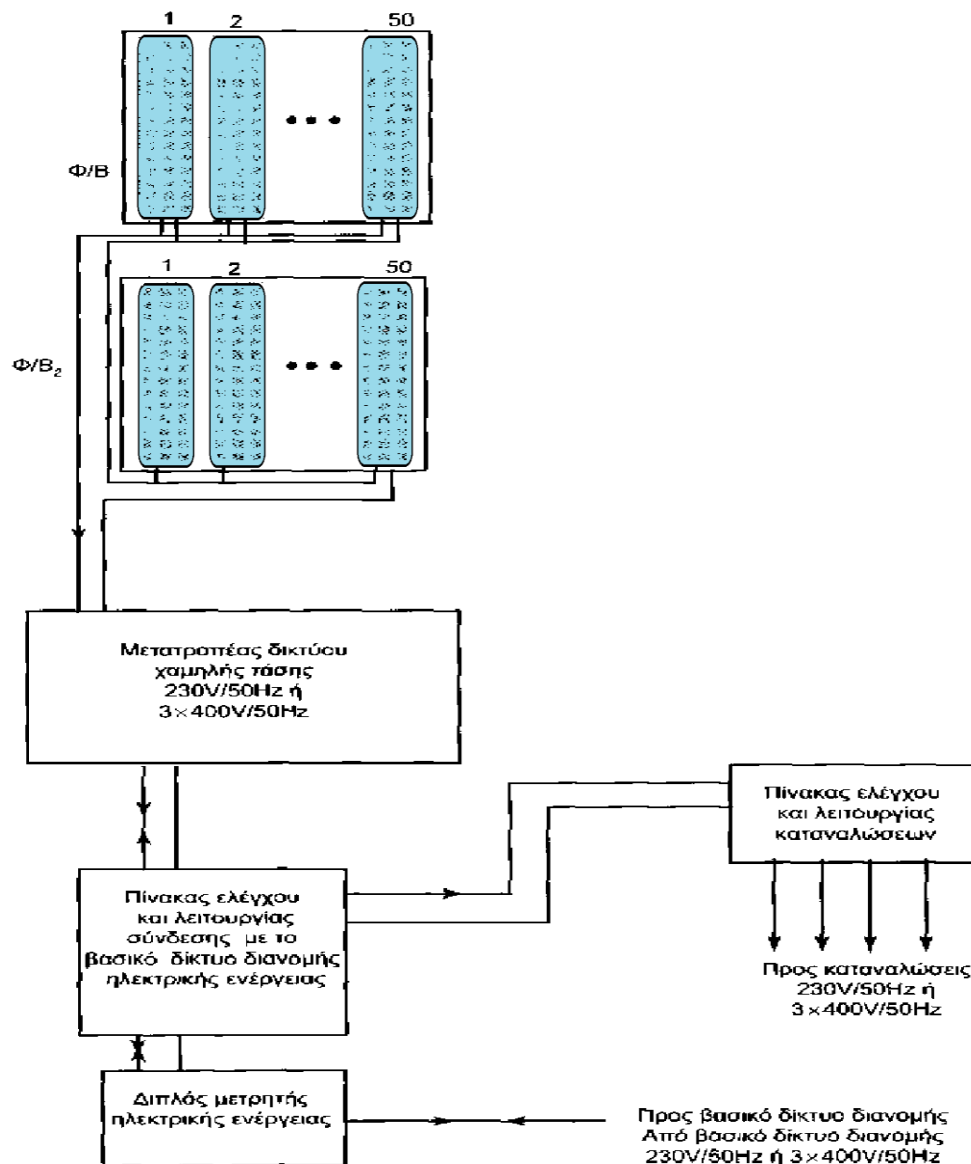
- Από τις ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων για την παραγωγή της αναγκαίας ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας.
- Από την διάταξη λειτουργίας Mppt (προσαρμόζει τη λειτουργία γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος).
- Από τον μετατροπέα DC/DC (προσαρμόζει την τάση εξόδου από τις ομάδες των φωτοβολταϊκών πλαισίων στην επιθυμητή τάση εισόδου του ρυθμιστή-φορτιστή).
- Από τον αυτόνομο ρυθμιστή-φορτιστή των συσσωρευτών αποθήκευσης (ελέγχει και ρυθμίζει τη διαδικασία φόρτισης και αποφόρτισης των συσσωρευτών αποθήκευσης).
- Από τον ηλεκτρονικό αντιστροφέα (inverter) που μετατρέπει τη συνεχή τάση εισόδου σε εναλλασσόμενη 230V/50Hz.
- Από τον επιλογέα κατανάλωσης (ελέγχει τη λειτουργία των καταναλώσεων και έχει τη δυνατότητα επιλογής των φορτίων σε περιπτώσεις περιορισμού της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας).
- Από τον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας των καταναλώσεων της ηλεκτρικής εγκατάστασης (φορτία 230V/50Hz).
- Από τον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας ορισμένων καταναλώσεων που θα λειτουργούν με συνεχή τάση 24V ή 48V.



*Σχήμα 6.2 Γενική μορφή αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.*

## 6.2 Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα (με δυνατότητα κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας)

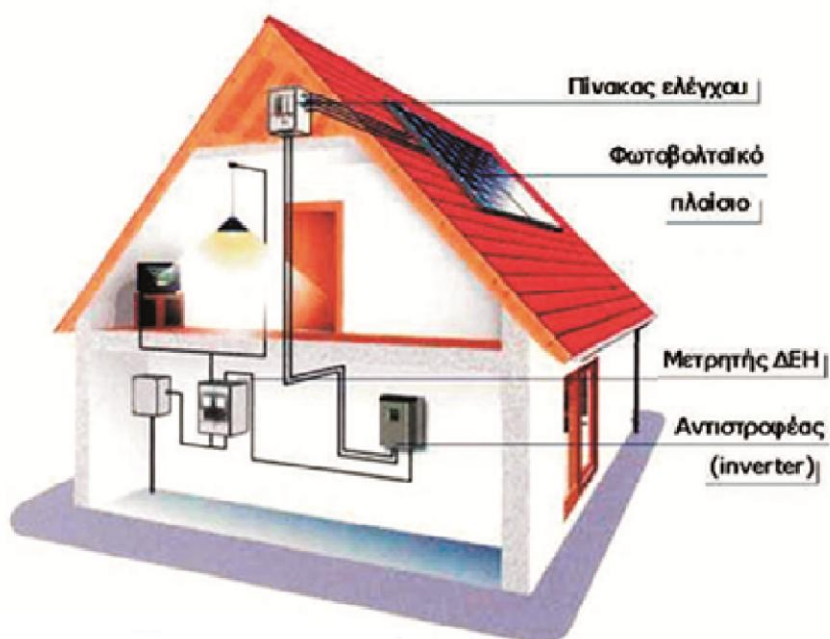
Κατασκευάζεται συνήθως για ισχύ από 10kW<sub>p</sub> και πάνω, με σύνδεση στο βασικό δίκτυο (σχήμα 6.3). Ο ιδιοκτήτης του συστήματος που είναι αυτοπαραγωγός, μπορεί εφόσον το επιθυμεί, να καταναλώνει όσο ηλεκτρική ενέργεια χρειάζεται και να πουλάει την υπόλοιπη, έναντι προσυμφωνημένης τιμής (με κέρδος) στο βασικό δίκτυο (π.χ. τις ηλιόλουστες ημέρες ή όταν απουσιάζει). Επίσης έχει τη δυνατότητα όταν δεν παράγει ηλεκτρική ενέργεια, να καλύπτει τις ανάγκες του από το βασικό δίκτυο, με χρέωση σ' αυτόν από την εταιρεία που εκμεταλλεύεται το βασικό δίκτυο (όταν έχει συννεφιά ή κατά τη διάρκεια της νύχτας).



Σχήμα 6.3 Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα με δυνατότητα κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Φ/Β<sub>1</sub>, Φ/Β<sub>2</sub>, ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι ότι δεν απαιτούνται συσσωρευτές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται:

- Από τις ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων για την παραγωγή μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας.
- Από τον μετατροπέα δικτύου, χαμηλής τάσης, μονοφασικό (230V, 50Hz) ή τριφασικό (3 · 400V, 50Hz).
- Από τον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας, σύνδεσης με το βασικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Από το διπλό μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Από τον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας των καταναλώσεων.



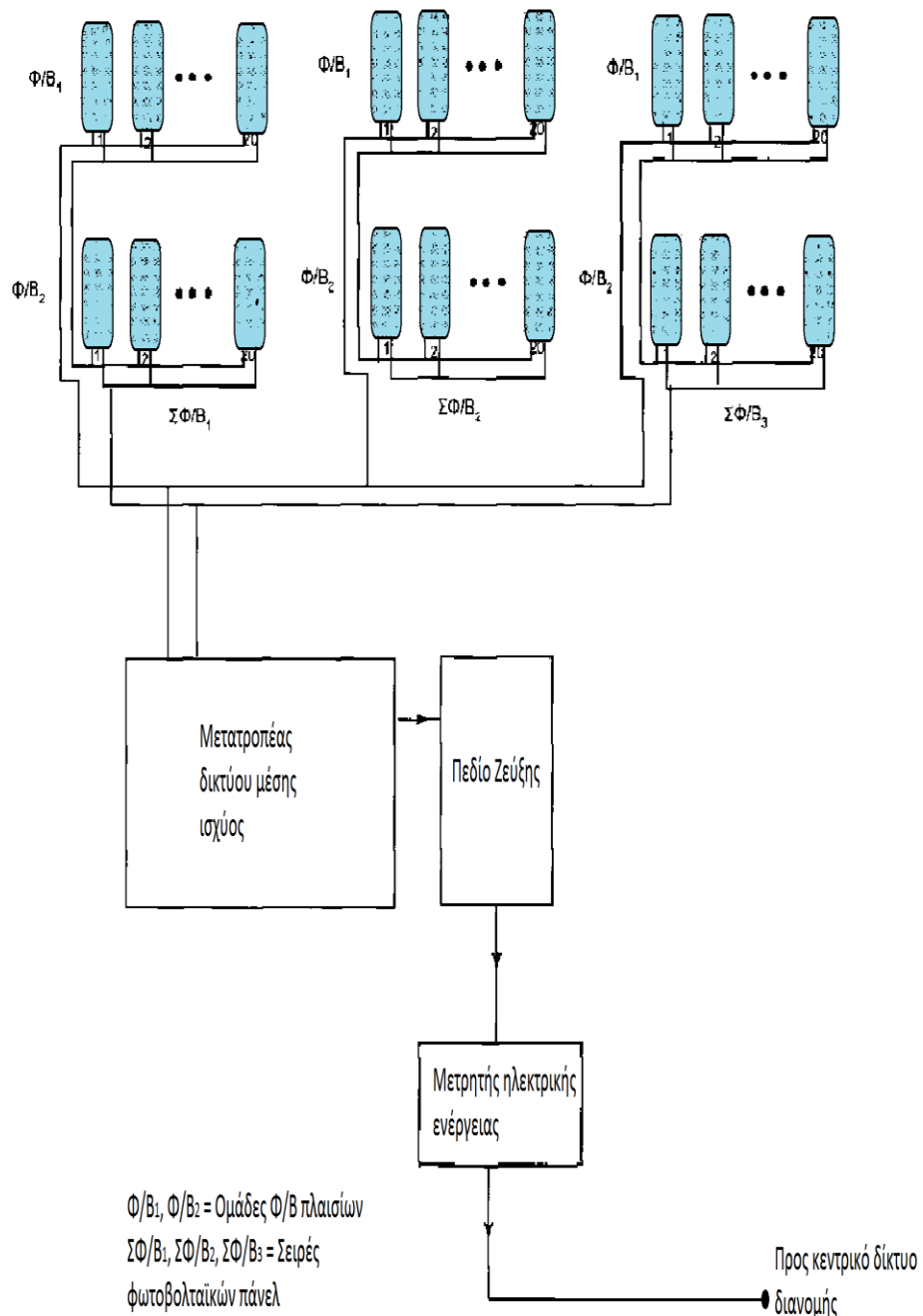
*Σχήμα 6.4 Γενική μορφή διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος με δυνατότητα κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας.*

### 6.3 Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα (η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται εξολοκλή-ρου στο κεντρικό δίκτυο)

Κατασκευάζεται συνήθως για ισχύ από 50kW<sub>p</sub> και πάνω με σκοπό να διοχετεύει όλη την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο κεντρικό δίκτυο (σχήμα 6.5 και ). Ανάλογα με την ισχύ των φωτοβολταϊκών συλλεκτών ο μετατροπέας δικτύου μπορεί να είναι:

- Μικρής ισχύος χαμηλής τάσης, μονοφασικός ή τριφασικός.
- Μέσης ισχύος χαμηλής τάσης τριφασικός ( $3 \cdot 400 \text{ V}$ ).
- Μεγάλης ισχύος μέσης τάσης τριφασικός ( $3 \cdot 20 \text{ KV}$ ).

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μορφή των περισσότερων διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων, που κατασκευάζονται από ιδιώτες, με αποκλειστικό σκοπό την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας στην ΔΕΗ.

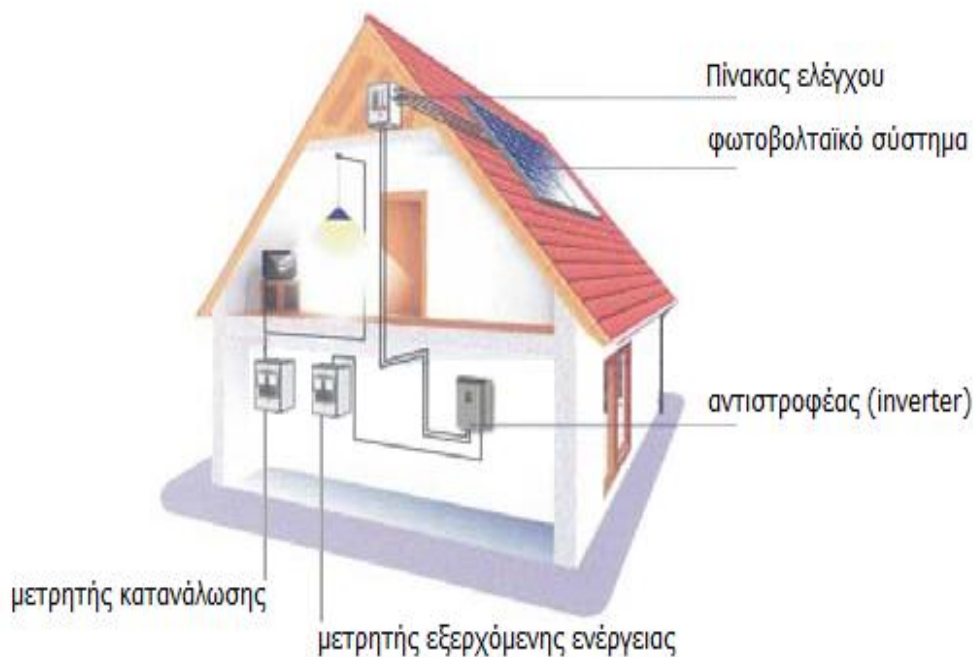


**Σχήμα 6.5** Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται εξολοκλήρου στο κεντρικό δίκτυο.

Ο μετατροπέας δικτύου συνδέεται με το πεδίο ζεύξης και φέρει ηλεκτρονική διάταξη, που σε περίπτωση διακοπής ρεύματος του κεντρικού δικτύου διανομής,

θέτει την φωτοβολταϊκή εγκατάσταση αυτομάτως εκτός. Ένα τέτοιο διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται:

- Από τις ομάδες (σειρές) των φωτοβολταϊκών πάνελ για εγκαταστημένη ισχύ από  $50\text{kW}_p$  και πάνω.
- Από τον μετατροπέα δικτύου με το πεδίο ζεύξης και τον μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Από την κεντρική παροχή σύνδεσης πεδίου ζεύξης και μετασχηματιστή κεντρικού βασικού δικτύου.



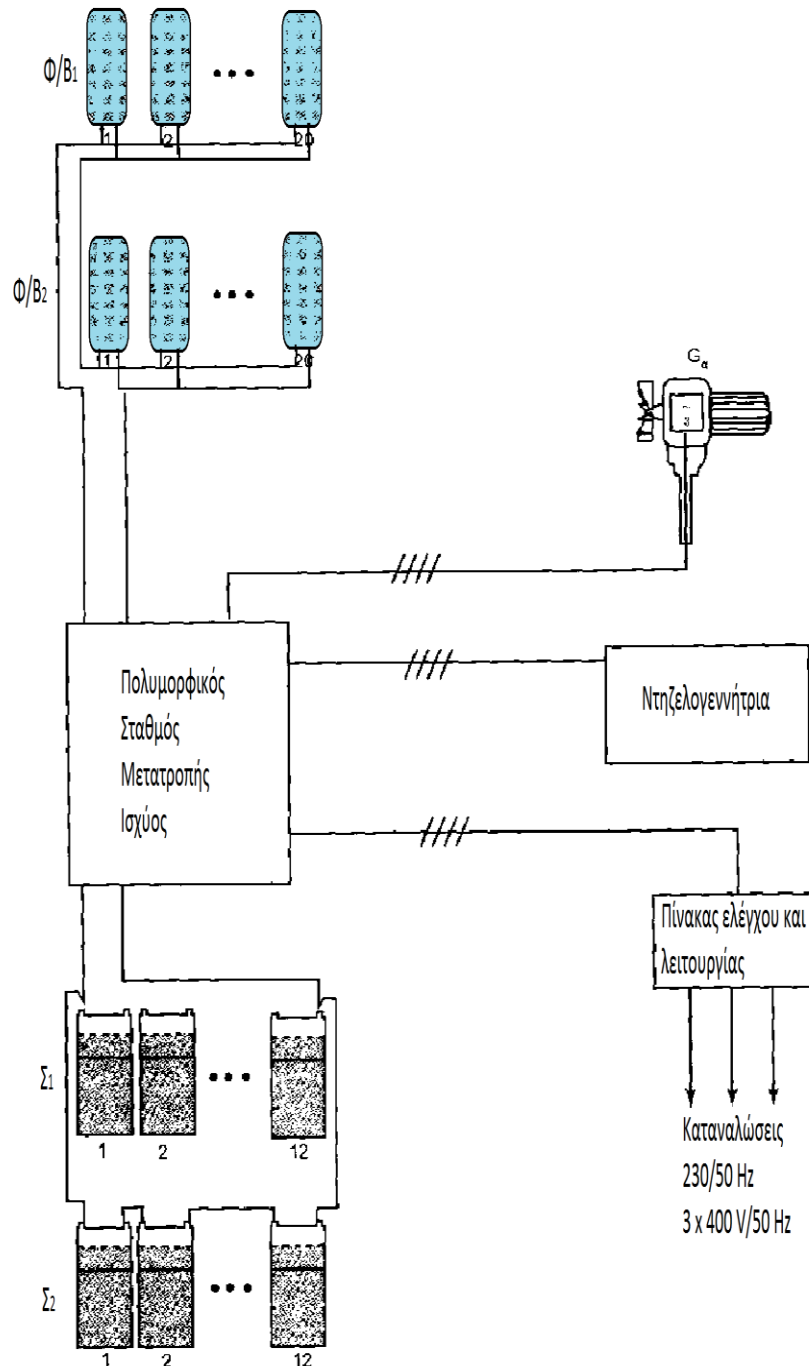
**Σχήμα 6.6** Γενική μορφή διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται εξολοκλήρου στο κεντρικό δίκτυο.

## 6.4 Υβριδικό σύστημα αυτόνομο

Το σύστημα αυτό (σχήμα 6.7) συνδυάζει δύο τουλάχιστον πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (συνδυασμός φωτοβολταϊκών πλαισίων και ανεμογεννήτριας). Μπορεί το σύστημα αυτό να έχει τη δυνατότητα σύνδεσης και με τρίτη πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ντηζελογεννήτρια). Ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα αποτελεί κατάλληλη και βιώσιμη λύση για περιοχές χωρίς πρόσβαση στο βασικό δίκτυο. Μπορεί να περιλαμβάνει και συσσωρευτές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για αδιάλειπτη λειτουργία των εγκαταστάσεων που τροφοδοτεί. Ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα περιλαμβάνει:

- Τις ομάδες των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

- Την ανεμογεννήτρια.
- Τον πολυμορφικό σταθμό μετατροπής ισχύος και αδιάλειπτης λειτουργίας.
- Τους συσσωρευτές αποθήκευσης.
- Τον πίνακα τροφοδοσίας των καταναλώσεων.



**Σχήμα 6.7** Υβριδικό σύστημα αυτόνομο,  $\Phi/B_1$ ,  $\Phi/B_2$ , ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων,  $G_a$  ανεμογεννήτρια,  $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_2$ , συσσωρευτές αποθήκευσης.

## 6.5 Υβριδικό σύστημα διασυνδεδεμένο

Συνδυάζει δύο ή και περισσότερες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (συνδυασμός φωτοβολταϊκών πλαισίων, ανεμογεννήτριας, νηξελογεννήτριας και συσσωρευτών αποθήκευσης). Όταν ένα υβριδικό σύστημα συνδέεται με το κεντρικό δίκτυο διανομής ή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι αναγκαία η νηξελογεννήτρια και οι συσσωρευτές αποθήκευσης.

Το σύστημα αυτό, αποτελεί την καλύτερη δυνατή λύση για νησιωτικές περιοχές και μπορεί να παρέχει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια έχοντας ως τελευταία λύση την λειτουργία της νηξελογεννήτριας.

Στην πράξη τα διασυνδεδεμένα υβριδικά συστήματα κατασκευάζονται για μεγάλη ισχύ και εξυπηρετούν πολλές καταναλώσεις. Ένα διασυνδεδεμένο υβριδικό σύστημα περιλαμβάνει:

- Τις ομάδες των φωτοβολταϊκών πλαισίων που συνήθως αποτελούν το φωτοβολταϊκό πάρκο.
- Την ομάδα των ανεμογεννητριών που συνήθως αποτελούν το αιολικό πάρκο.
- Την νηξελογεννήτρια.
- Τον πολυμορφικό σταθμό μετατροπής ισχύος.
- Τους συσσωρευτές αποθήκευσης που συνήθως αποτελούν τις συστοιχίες.

## 6.6 Ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες)

Όταν μία εγκατάσταση με φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αλλά λειτουργεί αυτόνομα, θα πρέπει να αποθηκεύει ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας την οποία έχει ανάγκη τις νυχτερινές ώρες ή τις ημέρες με συννεφιά (μικρή ή μηδενική ηλιοφάνεια). Το μέγεθος της ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να αποθηκεύεται εξαρτάται από τις ανάγκες που έχουμε σε ημερήσια βάση και από την πρόβλεψη που κάνουμε για ημέρες με μηδενική ηλιοφάνεια και αποτελεί στοιχείο υπολογισμού.

Η τοποθέτηση των συσσωρευτών γίνεται μέσα σε ιδιαίτερο χώρο (τμήμα αποθήκευσης ηλεκτροστασίου). Ο χώρος αυτός πρέπει να αερίζεται επαρκώς και η τοποθέτηση των συσσωρευτών θα πρέπει να γίνεται σε σειρές, με άνετο χώρο για παρακολούθηση και συντήρηση. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στις συνδέσεις των ακροδεκτών στους πόλους των συσσωρευτών ή των δίβολτων στοιχείων μεγάλης χωρητικότητας. Οι συνδέσεις θα πρέπει να γίνονται με ειδικά περιλαίμια και κοχλίες και να τοποθετείται στη συνέχεια αντισκοριακό υλικό.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συσσωρευτών με την ονομασία τους να προέρχεται από τον τύπο των ηλεκτροδίων κατασκευής τους. Έτσι έχουμε τους συσσωρευτές μολύβδου ( $Pb-H_2SO_4$ ), που είναι οι πιο διαδεδομένοι στα φωτοβολταϊκά συστήματα, λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που έχουν και του μικρού σχετικά κόστους.

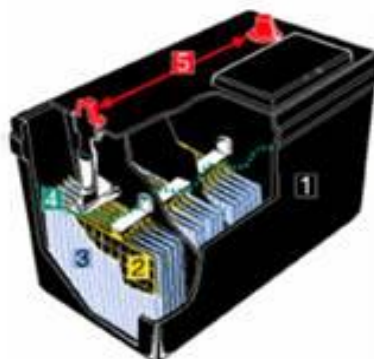


Επίσης άλλοι τύποι συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ο νικελίου-καδμίου (Nicc), νατρίου-θείου, ψευδαργύρου-βρωμίου, ψευδαργύρου-χλωρίου κ.λ.π.

## 6.7 Συσσωρευτές μολύβδου (Pb - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Οι συσσωρευτές μολύβδου αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια από τα οποία το θετικό (κάθοδος), είναι κατασκευασμένο από διοξείδιο του μολύβδου (PbO<sub>2</sub>) και το αρνητικό (άνοδος), από μεταλλικό μόλυβδο (Pb). Τα δύο ηλεκτρόδια τοποθετούνται μέσα σε ειδικό ανθεκτικό κιβώτιο το οποίο γεμίζεται με ηλεκτρολύτη (διάλυμα H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 20%) που μπορεί να είναι σε μορφή ζελέ ή σε υδαρή μορφή.

Κατά τη διαδικασία της φόρτισης, δηλαδή τη σύνδεση των πόλων του συσσωρευτή με πηγή συνεχούς ρεύματος ελεγχόμενης τάσης, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε χημική. Ενώ κατά τη διαδικασία της εκφόρτισης, δηλαδή την σύνδεση των πόλων του συσσωρευτή με ηλεκτρική κατανάλωση, η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Στο παρακάτω σχήμα 6.8 φαίνεται σε τομή ένας συσσωρευτής μολύβδου.



**Σχήμα 6.8** Συσσωρευτής μολύβδου σε τομή 1) Το κέλυφος 2) Πλάκες εσωτερικά θετικές και αρνητικές από μόλυβδο και οξείδιο του Μολύβδου 3) Διαχωριστικές πλάκες από συνθετικό υλικό 4) Διάλυμα θειικού οξέος σε νερό, ηλεκτρολύτης 5) Τους πόλους από μόλυβδο, οι πόλοι είναι τα σημεία σύνδεσης της μπαταρίας με τα φορτία.

Κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών μολύβδου είναι:

- α) **Ονομαστική τάση συσσωρευτή (U<sub>n</sub>).** Η ονομαστική τάση ενός στοιχείου συσσωρευτή μολύβδου είναι 2,25 V περίπου. Ανάλογα με τα στοιχεία που έχουμε συνδεδεμένα σε σειρά, έχουμε συσσωρευτές με ονομαστικές τάσεις 2,6,12, και 24 V.
- β) **Τάση φόρτισης.** Ο συσσωρευτής μολύβδου πρέπει να φορτίζεται με ειδικό φορτιστή και με τάση που ορίζεται από τον κατασκευαστή. Η τάση φόρτισης θα πρέπει να είναι σταθερή. Ο συσσωρευτής γενικά θεωρείται φορτισμένος όταν η τάση του κάθε στοιχείου φτάσει τα 2,4 V, δηλαδή σε μία μπαταρία των έξι στοιχείων ονομαστικής τάσης U<sub>n</sub>=12 V, η τάση στους πόλους φθάνει τα 14,4 V.

γ) **Τάση συντήρησης.** Είναι η τάση που πρέπει να εφαρμόζεται από μία πηγή συνεχούς ρεύματος, στους πόλους του συσσωρευτή, έτσι ώστε αυτός να παραμένει συνεχώς φορτισμένος.

δ) **Ρεύμα φόρτισης.** Το ρεύμα φόρτισης ορίζεται από τον κατασκευαστή και είναι αυτό με το οποίο πρέπει να φορτίζεται για να έχουμε μέγιστη διάρκεια ζωής. Το ρεύμα φόρτισης θα πρέπει να κυμαίνεται από 0,1 C μέχρι 0,2 C. Για παράδειγμα, σε ένα τυπικό συσσωρευτή μολύβδου 12 Volts και χωρητικότητα 18 Ah, το ρεύμα φόρτισης θα πρέπει να είναι  $I = 0.1 \cdot 18 = 1.8A$ , όπου είναι το ιδανικό ρεύμα φόρτισης για να έχουμε μέγιστη διάρκεια ζωής. Στην περίπτωση αυτή ο χρόνος φόρτισης του συσσωρευτή θα είναι  $t_f = 18/1.8 = 10h$ . Σε περιπτώσεις όπου το ρεύμα φόρτισης ξεπερνά το 0,2 C, τότε ο χρόνος φόρτισης είναι μικρότερος, όμως η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή μειώνεται αισθητά. Γενικά, όσο μακρύτερη είναι η περίοδος φόρτισης, τόσο υψηλότερη είναι η τελική στάθμη της χωρητικότητας και τόσο καλύτερη είναι η κατάσταση του συσσωρευτή. Οι συσσωρευτές μολύβδου δεν πρέπει να υπερφορτίζονται. Κατά την υπερφόρτιση ο υδατικός ηλεκτρολύτης εξατμίζεται και πρέπει να συμπληρωθεί με απεσταγμένο νερό. Αν ο συσσωρευτής είναι σφραγισμένος αυξάνεται η πίεση και ανοίγει η βαλβίδα ανακούφισης για να φύγουν τα αέρια.

ε) **Τάση εκφόρτισης.** Ως τάση εκφόρτισης ορίζεται η μικρότερη τιμή που μπορεί να υπάρχει στους ακροδέκτες του συσσωρευτή χωρίς αυτός να κινδυνεύει να καταστραφεί. Αν για οποιοδήποτε λόγο η τάση στους ακροδέκτες κατέβει κάτω από αυτή την τιμή (ορίζεται από τον κατασκευαστή και είναι συνήθως 2,00 V ανά στοιχείο), θα πρέπει μέσω ειδικής διάταξης (κατάλληλος αυτοματισμός) να αποσυνδεθούν τα φορτία από τον συσσωρευτή.

στ) **Ρεύμα εκφόρτισης.** Ορίζεται ως το ρεύμα εκείνο που εξαντλεί την χωρητικότητα του συσσωρευτή χωρίς αυτός να κινδυνεύει (τάση ανά στοιχείο από 2,4 σε 2 V). Το ρεύμα αυτό ισούτε με το 1/20 της ονομαστικής χωρητικότητας του συσσωρευτή.

ζ) **Χρόνος ζωής συσσωρευτή.** Οι συσσωρευτές δεν πρέπει να φορτίζονται για μεγάλο χρονικό διάστημα με πολύ υψηλή τάση γι' αυτούς (overcharging), ούτε να εκφορτίζονται κάτω από ένα κρίσιμο γι' αυτούς όριο (overdischarging). Η διαδικασία αυτή καθορίζει το χρόνο ζωής τους. Η υπερφόρτιση έχει σαν αποτέλεσμα την ηλεκτρόλυση και την παραγωγή υδρογόνου με ταυτόχρονη έντονη ελάττωση της στάθμης του ηλεκτρολυτικού διαλύματος (απώλεια νερού). Ο χρόνος ζωής των συσσωρευτών εκφράζεται σε κύκλους λειτουργίας (φόρτιση-εκφόρτιση).

η) **Ονομαστική και πρακτική χωρητικότητα.**

Ονομαστική χωρητικότητα είναι η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον συσσωρευτή και τη μετράμε σε αμπερώρια (Ah). Η χωρητικότητα των συσσωρευτών καθορίζεται με 0,05 C, που σημαίνει ότι για χωρητικότητα 50Ah μπορεί να εκφορτίζεται με 2,5A για χρόνο 20 ώρες.

Πρακτική χωρητικότητα είναι η ενέργεια που παίρνουμε από τον συσσωρευτή με τις συγκεκριμένες συνθήκες εργασίας. Στην πράξη οι συσσωρευτές εκφορτίζονται με πολύ μεγάλα ρεύματα, με αντίστοιχη μείωση της χωρητικότητας τους. Ένας συσσωρευτής με ονομαστική χωρητικότητα 50Ah, όταν εκφορτίζεται με 1C ( $I_M = 50$

Ah) μπορεί να αποδώσει μόνο το 30% της ονομαστικής του χωρητικότητας. Δηλαδή 15 Ah.

θ) **Αυτοεκφόρτιση συσσωρευτή.** Ένας φορτισμένος συσσωρευτής εκφορτίζεται ακόμη και αν δεν είναι συνδεδεμένος σε φορτίο (αυτοεκφόρτιση). Η αυτοεκφόρτιση οφείλεται στη συνεχή δράση του θεικού οξέος ( $H_2SO_4$ ), στα ηλεκτρόδια του συσσωρευτή κατά την οποία ο μόλυβδος (Pb) και το διοξείδιο του μολύβδου ( $PbO_2$ ), μετατρέπονται σε θεικό μόλυβδο ( $Pb SO_4$ ) με εκλυόμενα αέρια υδρογόνο ( $H_2$ ) και οξυγόνο ( $O_2$ ). Η αυτοεκφόρτιση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του συσσωρευτή. Σε θερμοκρασία  $5\text{ }^\circ C$ , το ηλεκτρικό φορτίο ελαττώνεται κατά 2% περίπου το μήνα. Σε θερμοκρασία  $15\text{ }^\circ C$ , το ηλεκτρικό φορτίο ελαττώνεται κατά 4% περίπου το μήνα, ενώ σε θερμοκρασία  $25\text{ }^\circ C$ , το ηλεκτρικό φορτίο ελαττώνεται κατά 10% περίπου το μήνα.

ι) **Ενέργεια που αποδίδει ένας συσσωρευτής.** Θεωρητικά η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε έναν συσσωρευτή υπολογίζεται από το γινόμενο της τάσης επί την χωρητικότητα του. Η ενέργεια που μας δίνει στην πράξη ένας συσσωρευτής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_k = \beta \cdot Q \cdot U_\beta \cdot h_\sigma$$

όπου:

$E_k$  = η ενέργεια που μας δίνει στην πράξη ο συσσωρευτής σε Wh.

$\beta$  = το βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή.

$Q$  = η χωρητικότητα του συσσωρευτή σε Ah.

$U_\beta$  = η τάση εκφόρτισης του συσσωρευτή σε V.

$h_\sigma$  = ο βαθμός απόδοσης του συσσωρευτή που συνήθως λαμβάνεται 0,85.

ια) **Αναγκαία χωρητικότητα συσσωρευτή.** Όταν λέμε αναγκαία χωρητικότητα συσσωρευτή, εννοούμε τη χωρητικότητα εκείνη, που πρέπει να έχει ο συσσωρευτής ή η συστοιχία των συσσωρευτών, για να έχουμε ενέργεια ικανή να καλύψει τις ανάγκες μας, στην πιο δυσμενή περίπτωση συνεχούς νέφωσης. Σύμφωνα με τα στοιχεία της μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας (θεωρητικός και πραγματικός αριθμός ωρών ηλιοφάνειας), τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο έχουμε την μικρότερη ηλιοφάνεια, ενώ τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο, τη μεγαλύτερη. Έτσι η δυσμενέστερη περίπτωση παρουσιάζεται τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο όπου η χωρητικότητα των συσσωρευτών πρέπει να είναι τέτοια, που να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των φορτίων, για διάρκεια μίας εβδομάδας. Παράδειγμα, για ημερήσια αναγκαία φορτία που η μέση τιμή τους είναι 50 kWh για τους μήνες Δεκέμβριο ή Ιανουάριο, θα πρέπει η συστοιχία των συσσωρευτών να είναι σε θέση να μας δώσει (για μία εβδομάδα με μηδενική ηλιοφάνεια),  $E_k = 50 \cdot 7 = 350\text{ kWh}$  ή 350.000 Wh. Για να επιτύχουμε τόσο μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκευμένη, θα πρέπει να συνδέσουμε κατάλληλα, περισσότερους από έναν συσσωρευτές.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι διαφορετικές κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται οι συσσωρευτές μολύβδου, ανάλογα με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις των εφαρμογών, για τις οποίες προορίζονται.

α/α	Σύστημα χρήσης	Εφαρμογές	Παρατηρήσεις
1	Εκκίνησης, φωτισμού και έναυσης (Starting, Lighting and Ignition, SLI)	Αυτοκίνητα, σκάφη και αεροσκάφη	Υψηλά ρεύματα σύντομης διάρκειας, δηλαδή αβαθείς εκφορτίσεις.
2	Διατάξεις έκτακτης τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας	UPS, τηλεφωνία, κ.α.	Αβαθείς εκφορτίσεις
3	Στατικής ή βιομηχανικής χρήσης	Υποβρύχια, τραίνα	Σχετικά μικρά ρεύματα εκφόρτισης, βαθιές εκφορτίσεις, μεγάλος χρόνος ζωής (πολλοί κύκλοι λειτουργίας)
4	Ηλεκτρικών οχημάτων	Οχήματα φόρτωσης, εκφόρτωσης και μεταφοράς εμπορευμάτων, ηλεκτρικά αυτοκίνητα κ.α.	Βαθείς εκφορτίσεις, μεγάλος χρόνος ζωής (πολλοί κύκλοι λειτουργίας)
5	Αποθήκευσης ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας (ΦΒ συσσωρευτές)	Αυτόνομα ΦΒ συστήματα (Stand alone PV systems) και υβριδικά συστήματα	Ίδιας κατηγορίας όπως οι συσσωρευτές βιομηχανικής χρήσης και ηλεκτρικών οχημάτων

## 6.8 Συνδεσμολογία συσσωρευτών

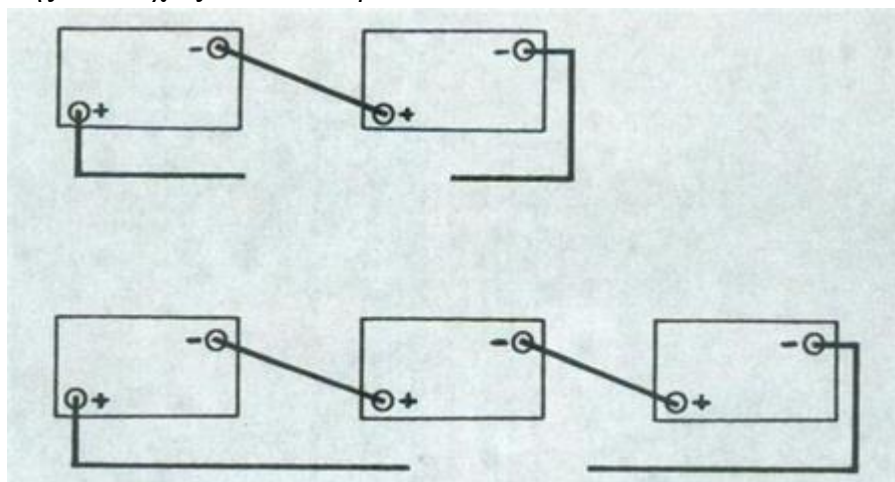
Στις μικρές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, όπου η ανάγκη για αποθηκευμένη ενέργεια δεν είναι ιδιαίτερα αυξημένη, μπορούμε και με έναν συσσωρευτή, κατάλληλης ονομαστικής τάσης και χωρητικότητας να έχουμε κάλυψη.

Στις μεσαίες και ιδιαίτερα στις μεγάλες εγκαταστάσεις με φωτοβολταϊκά και στις περιπτώσεις αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων, η ανάγκη για αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια είναι μεγάλη. Σ' αυτές τις περιπτώσεις συνδέουμε κατάλληλα περισσότερους από έναν συσσωρευτές. Η σύνδεση γίνεται με τη βοήθεια ειδικών εξαρτημάτων (συνδετήρες) τα οποία τοποθετούμε στους πόλους των συσσωρευτών (θετικός + και αρνητικός -). Οι συσσωρευτές συνδέονται μεταξύ τους με τρεις τρόπους:

### α) Σύνδεση σε σειρά.

Στην περίπτωση αυτή (σχήμα 6.9), συνδέουμε τον αρνητικό πόλο του πρώτου συσσωρευτή με τον θετικό του δεύτερου και συνεχίζουμε έτσι με όλους τους προς

σύνδεση συσσωρευτές. Ο θετικός πόλος του πρώτου συσσωρευτή και ο αρνητικός του τελευταίου, μας δίνουν τους τελικούς ακροδέκτες τροφοδοσίας της συγκεκριμένης συστοιχίας των συσσωρευτών.



Σχήμα 6.9 Σύνδεση δύο ή και περισσότερων συσσωρευτών σε σειρά.

Η συνολική ονομαστική τάση της συστοιχίας είναι ίση με το άθροισμα των ονομαστικών τάσεων όλων των συσσωρευτών που συνδέονται σε σειρά. Ενώ η συνολική ονομαστική χωρητικότητα της συστοιχίας είναι ίση με τη χωρητικότητα του ενός συσσωρευτή, δηλαδή:

$$U_{ολ} = U_1 + U_2 + \dots + U_v$$

$$Q_{ολ} = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_v$$

Η συνολική ονομαστική ένταση της συστοιχίας είναι παντού η ίδια και είναι ίση με την ονομαστική ένταση του ενός συσσωρευτή, δηλαδή:

$$I_{ολ} = I_1 = I_2 = \dots = I_v$$

Για την συνδεσμολογία σε σειρά, οι συσσωρευτές θα πρέπει να έχουν τα ίδια ονομαστικά μεγέθη (τάση, ένταση, χωρητικότητα). Στην πράξη συνδέουμε τους συσσωρευτές σε σειρά, όταν θέλουμε να έχουμε μεγάλη τάση και μικρή σχετικά ένταση.

### β) Παράλληλη σύνδεση

Στην περίπτωση αυτή συνδέουμε μαζί όλους τους θετικούς πόλους των συσσωρευτών και έχουμε τον θετικό πόλο της συστοιχίας και όλους τους αρνητικούς και έχουμε τον αρνητικό πόλο της συστοιχίας (σχήμα 6.10).

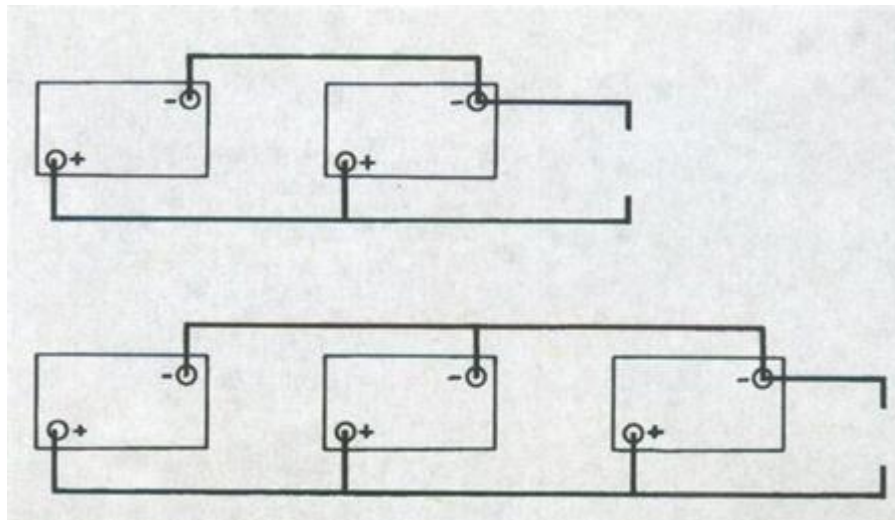
Η συνολική ονομαστική χωρητικότητα της συστοιχίας είναι ίση με το άθροισμα των επί μέρους χωρητικοτήτων των συσσωρευτών που είναι συνδεδεμένοι παράλληλα, ενώ η συνολική ονομαστική τάση της συστοιχίας είναι ίση με την τάση του ενός συσσωρευτή, δηλαδή:

$$Q_{ολ} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_v$$

$$U_{ολ} = U_1 = U_2 = \dots = U_v$$

Η συνολική ονομαστική ένταση της συστοιχίας είναι ίση με το άθροισμα των επί μέρους εντάσεων των συσσωρευτών που είναι συνδεδεμένοι παράλληλα, δηλαδή:

$$I_{ολ} = I_1 + I_2 + \dots + I_v$$

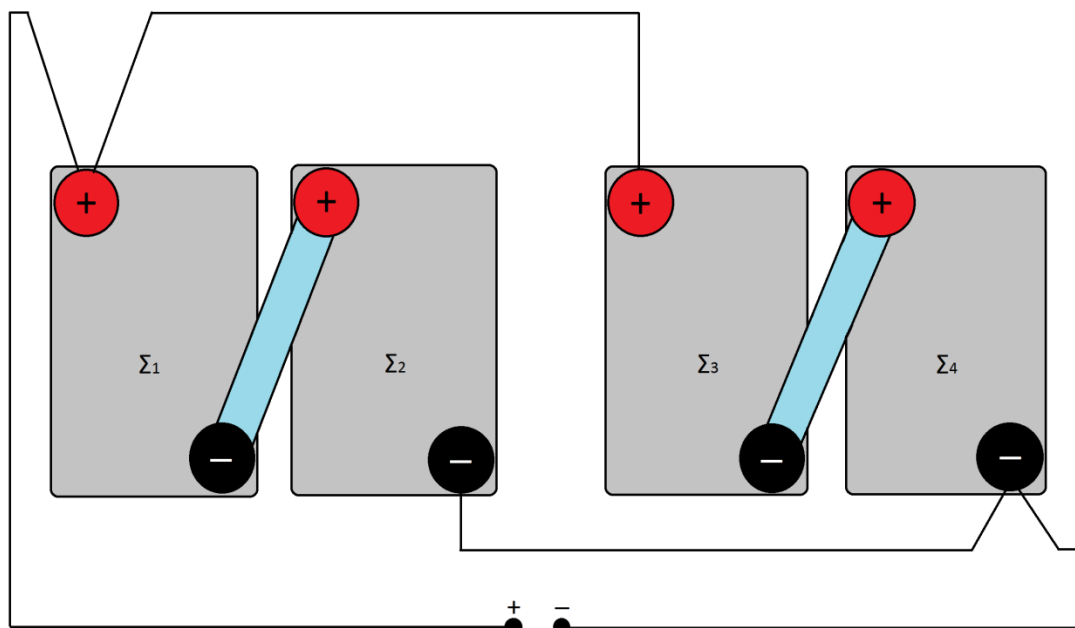


Σχήμα 6.10 Σύνδεση δύο ή και περισσότερων συσσωρευτών παράλληλα.

Για την παράλληλη σύνδεση, οι συσσωρευτές θα πρέπει να έχουν τα ίδια ονομαστικά μεγέθη (τάση, ένταση, χωρητικότητα). Στην πράξη συνδέουμε τους συσσωρευτές παράλληλα, όταν θέλουμε να έχουμε μεγάλη χωρητικότητα (μεγάλη ένταση) και μικρή σχετικά τάση.

**γ) Μικτή σύνδεση**

Η μικτή σύνδεση (σχήμα 6.11) χρησιμοποιείται για να έχουμε τη δυνατότητα σε μία συστοιχία να πάρουμε τελικά και μεγάλη τάση και μεγάλη χωρητικότητα (μεγάλη ένταση).



Σχήμα 6.11 Μικτή σύνδεση συσσωρευτών.

Η σύνδεση αυτή συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της σύνδεσης σε σειρά και της σύνδεσης παράλληλα. Έτσι στην περίπτωση αυτή έχουμε:

- $U_{1,2} = U_1 + U_2$  και  $U_{3,4} = U_3 + U_4$
- $U_{ολ} = U_{1,2} = U_{3,4}$
- $I_{1,2} = I_1 = I_2$  και  $I_{3,4} = I_3 = I_4$
- $I_{ολ} = I_{1,2} + I_{3,4}$
- $Q_{1,2} = Q_1 = Q_2$  και  $Q_{3,4} = Q_3 = Q_4$
- $Q_{ολ} = Q_{1,2} + Q_{3,4}$

Στην πράξη στην μικτή σύνδεση χρησιμοποιούμε τα ίδια ονομαστικά μεγέθη (τάση, ένταση, χωρητικότητα).

## 6.9 Ελεγκτής φόρτισης-εκφόρτισης

Η διαχείριση της ενέργειας που παράγουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα, απαιτεί την χρήση ηλεκτρονικών διατάξεων κατάλληλων για τη βελτιστοποίηση της αποθήκευσης, της μεταφοράς και της προστασίας του συστήματος και ειδικά των συσσωρευτών από υπερφόρτιση ή από υπερεκφόρτιση. Η ηλεκτρονική διάταξη για τον έλεγχο και την προστασία των συσσωρευτών είναι ο «Ελεγκτής – Ρυθμιστής φόρτισης - εκφόρτισης» (charge controller). Η διάταξη αυτή μπορεί να αποτελεί αυτοτελή μονάδα, μπορεί όμως και να βρίσκεται ενσωματωμένη με τον μετατροπέα (inverter), σε μία ολοκληρωμένη ηλεκτρονική μονάδα.

Η φόρτιση των συσσωρευτών, μέσω μιας πηγής ηλεκτρικής ενέργειας, π.χ. φωτοβολταϊκής συστοιχίας, ανεμογεννήτριας, ή ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, απαιτεί το συνεχή έλεγχο της κατάστασης φόρτισης τους, ώστε, όταν αυτοί φτάσουν στην κατάσταση μέγιστης φόρτισης, να διακόπτεται η διαδικασία. Έτσι, αποφεύγεται η υπέρταση του συσσωρευτή, η οποία θα είχε ως συνέπεια την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου, λόγω ηλεκτρόλυσης και συνακόλουθα μείωση της στάθμης του διαλύματος. Αντίστοιχα, απαιτείται έλεγχος του συσσωρευτή, όσο αυτός τροφοδοτεί την κατανάλωση, ώστε να προληφθεί η καταστροφική για τον συσσωρευτή, κατάσταση υπερεκφόρτισης (ελεγκτής εκφόρτισης).

Γενικά ο ελεγκτής φόρτισης – εκφόρτισης, στην πιο περιορισμένη του μορφή, εποπτεύει τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης ώστε να απομονώνει το σύστημα αποθήκευσης, αφενός από το σύστημα παραγωγής της ενέργειας, στην περίπτωση της υπερφόρτισης, και αφετέρου από το σύστημα κατανάλωσης, στην περίπτωση της υπερεκφόρτισης. Και στις δύο περιπτώσεις, η διακοπή αυτή προκαλείται όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή ξεπεράσει, προς τα άνω και αντίστοιχα προς τα κάτω, ορισμένα όρια τάσης (setpoints). Η διακοπή αυτή όταν έχουμε υπερφόρτιση ή υπερεκφόρτιση αντίστοιχα, επιτυγχάνεται από ένα σύνολο ολοκληρωμένων συστημάτων που ελέγχουν ηλεκτρικούς διακόπτες, ηλεκτρομηχανικούς διακόπτες (relays), ηλεκτρονικά ισχύος (transistors, thyristors, triacs κ.λ.π).

## 6.10 Τύποι ελεγκτών φόρτισης-εκφόρτισης

Στο εμπόριο υπάρχουν πολλοί τύποι ελεγκτών – ρυθμιστών φόρτισης, από την πιο απλή μορφή, μέχρι την πιο σύνθετη. Η επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή – ρυθμιστή φόρτισης έχει σχέση με τις απαιτήσεις του συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας, το μέγεθος και το κόστος της εγκατάστασης.

- **Ρυθμιστές φόρτισης μικρής ισχύος.**

Έχουν σχεδιαστεί για μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα, με ισχύ από 10 W μέχρι και 100 W (σχήμα 6.12), και έχουν την δυνατότητα αποσύνδεσης του συσσωρευτή σε περίπτωση υπερφόρτισης ή υπερεκφόρτισης ή αποσύνδεσης του φορτίου, λόγω χαμηλής τάσης του συσσωρευτή. Παρέχουν ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενο τρόπο φόρτισης με προστασία βαθιάς αποφόρτισης και ενσωματωμένο αισθητήρα θερμοκρασίας.

Φέρουν πλήρη ηλεκτρονική προστασία από υπέρταση φωτοβολταϊκού συλλέκτη, ανάστροφη πολικότητα συλλέκτη ή συσσωρευτή, υπερφόρτιση και βραχυκύκλωμα στην κατανάλωση. Έχουν ενδείξεις, κατάσταση φόρτισης, επίπεδο φόρτισης συσσωρευτή, αποσύνδεσης λόγω χαμηλής τάσης συσσωρευτή, υπερφόρτιση / βραχυκύκλωμα. Οι ρυθμιστές αυτοί, είναι κατάλληλοι για μικρές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σε μικρές αγροικίες, τροχόσπιτα και εφαρμογές ελεύθερου χώρου.

- **Ρυθμιστές φόρτισης χαμηλής ισχύος.**




Έχουν σχεδιαστεί για φωτοβολταϊκά συστήματα με ισχύ από 100 W μέχρι 1000 W (σχήμα 6.12). Παρέχουν εξαιρετικές ενδείξεις, προγραμματισμό και λει-τουργίες ασφάλειας. Το επίπεδο φόρτισης του συσσωρευτή επιδεικνύεται σαφώς με ένα ιστόγραμμα, καθώς επίσης και οι ενεργειακές ροές από και προς το συσσωρευτή και η κατάσταση των καταναλώσεων (π.χ. υπερφόρτιση, βραχυκύκλωμα φορτίου κ.λ.π.).

Η λειτουργία προστασίας βαθιάς αποφόρτισης, μπορεί να ρυθμιστεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους: ελεγχόμενη από τάση, ελεγχόμενη από το επίπεδο φόρτισης του συσσωρευτή ή προσαρμοστική ρύθμιση (πολυπλοκότητας). Έχουν ενσωματωμένη λειτουργία ακουστικής προειδοποίησης όπως επίσης και προγραμματιζόμενη λειτουργία φωτισμού τη νύχτα.

- **Ρυθμιστές ενεργειακών συστημάτων.**

Προσφέρουν πλήρη έλεγχο του κύκλου φόρτισης και τροφοδοσίας φορτίου (σχήμα 6.12), φέρουν ελεγκτή πολλαπλών λειτουργιών που μπορεί να ανοίξει ή να κλείσει την ισχύ σύμφωνα με τα κριτήρια που τίθενται από το χρήστη. Παρέχουν πλήρη ασφάλεια και έχουν τη δυνατότητα για κάθε ένδειξη ή μέτρηση μεγέθους.



Τύπος	Ρυθμιστές μικρής ισχύος	Ρυθμιστές χαμηλής ισχύος	Ρυθμιστές ενεργειακών συστημάτων
Εικόνα			
Τάση συστήματος	12 V ή 24 V	12 V ή 24 V	48 V
Μέγιστο ρεύμα φόρτισης	8 A	30 A	40 A
Μέγιστο ρεύμα κατανάλωσης	8 A	30 A	40 A
Τάση εκκινήσεως φόρτισης	11.8 V ή 23.6 V	11.1 V ή 22.2 V	42.8 V
Τάση διακοπής φόρτισης	14 V ή 27.2 V	13.1 V ή 25.2 V	50.4 V
Αυτοκατανάλωση	< 4 mA	< 4 mA	< 4 mA
Θερμοκρασία λειτουργίας	-20 έως +60 °C	-30 έως +70 °C	-30 έως +70 °C
Διαστάσεις (ΠxΥxΜ)	95x101x35 mm	142x96x34 mm	188x90x48 mm
Βάρος (g)	120 g	270 g	370 g

*Σχήμα 6.12 Ρυθμιστές φόρτισης για μέγιστη υποστήριξη ισχύς εισόδου φωτοβολταϊκών, έως και 100 W, 720 W και 2000 W αντίστοιχα.*

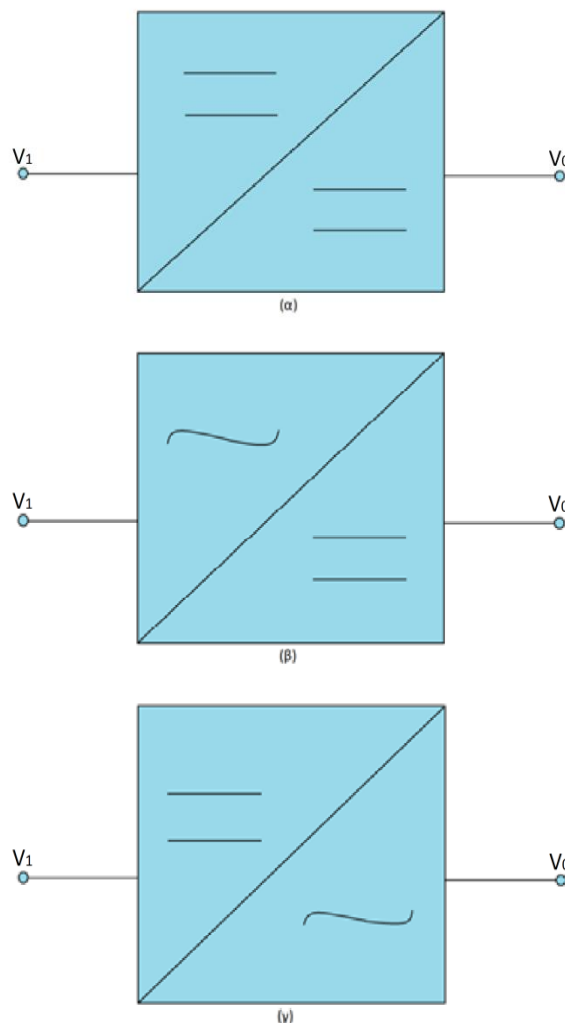
## 6.11 Μετατροπείς (converters)

Οι μετατροπείς (converters), είναι ηλεκτρονικές διατάξεις που μετατρέπουν:

- Συνεχές ρεύμα σε συνεχές οποιασδήποτε τάσης (DC-DC conversion).
- Συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο οποιουδήποτε πλάτους (DC-AC conversion).
- Εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή (AC-DC conversion).

Στην πράξη μπορεί να αποτελεί χωριστή μονάδα ή να αποτελεί ενιαία ηλεκτρονική διάταξη με τον ελεγκτή – ρυθμιστή φόρτισης. Όταν αποτελεί ενιαία διάταξη, η λειτουργία του είναι να προσαρμόζει την τάση που παράγει το σύστημα, στην τάση του συστήματος αποθήκευσης, ώστε να γίνεται πλήρη εκμετάλλευση της διαθέσιμης ενέργειας.

Οι συμβολικές παραστάσεις των τριών τύπων μετατροπέων είναι:



α) DC-DC β) AC-DC γ) DC-AC

## 6.12 Μετατροπέας DC - DC

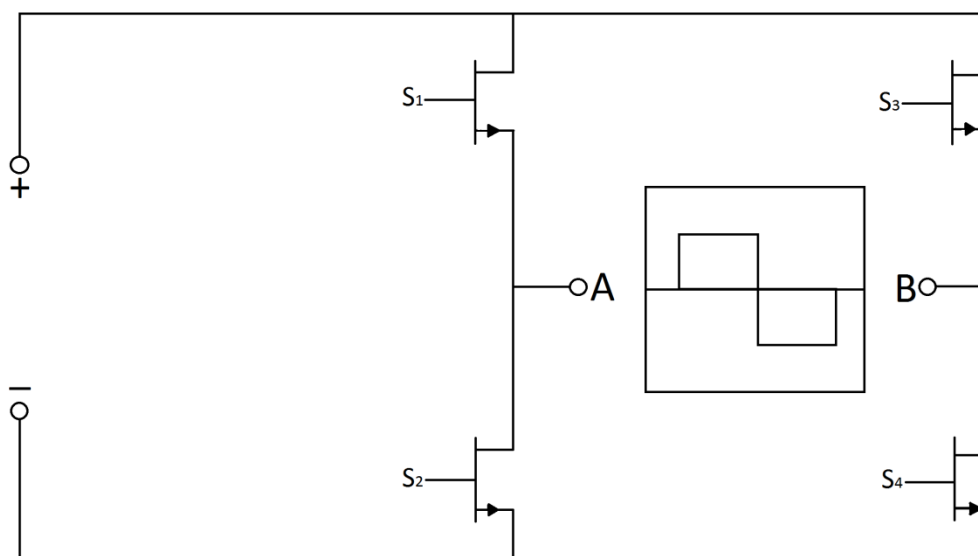
Η μετατροπή μιας συνεχούς τάσης, σε συνεχή με διαφορετική τιμή (μικρότερη ή μεγαλύτερη) γίνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις, συμβάλλοντας στη μείωση των απωλειών στη γραμμή μεταφοράς, από το χώρο παραγωγής στο χώρο κατανάλωσης.

Στο χώρο των φωτοβολταϊκών πλαισίων έχουμε σύνδεση των συλλεκτών σε σειρά ή παράλληλα, ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να μεταφέρεται, με όσο επιτρέπεται, υψηλή τάση για να έχουμε χαμηλό ρεύμα στη γραμμή μεταφοράς και επομένως χαμηλές απώλειες. Στο χώρο της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ο μετατροπέας DC-DC, προσαρμόζει την τάση των φωτοβολταϊκών πλαισίων ή της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στην τάση του συσσωρευτή, ώστε να υπάρχει πλήρη εκμετάλλευση της ενέργειας και επιπλέον να μην έχουμε συνθήκες υπέρτασης του συσσωρευτή. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν απόδοση περίπου 90%.

Στη διάταξη ενσωματώνεται μικροελεγκτής, ο οποίος, ελέγχει συνεχώς και επιβάλλει την προσαρμογή του σημείου λειτουργίας του συστήματος, που παράγει την ηλεκτρική ενέργεια, με το σημείο μέγιστης ισχύος, που καθορίζεται από τις συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Ο μικροελεγκτής ονομάζεται διάταξη παρακολούθησης Σημείου Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point Tracking Mpp<sub>T</sub>).

## 6.13 Μετατροπέας DC-AC (inverter)

Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος (DC) σε εναλλασσόμενο (AC) γίνεται πλέον με μία καθαρά ηλεκτρονική διάταξη, τον ηλεκτρονικό μετατροπέα DC-AC (inverter). Ο μετατροπέας αυτός είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος που μετατρέπει συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη (μονοφασική ή τριφασική). Η βασική αρχή λειτουργίας του περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα 6.13. Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε περιπτώσεις που διαθέτουμε πηγή συνεχούς ηλεκτρικής τάσεως και καταναλωτές εναλλασσόμενης, όπως συμβαίνει π.χ. στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές οικιακής ή βιομηχανικής χρήσεως. Αποτελείται από ηλεκτρονικούς διακόπτες (π.χ. bipolar tranzistors ισχύος, MOSFETs, thyristors κ.λπ.), η συνδυασμένη λειτουργία των οποίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σειράς τετραγωνικών παλμών, διαδοχικά ορθών και ανεστραμμένων (Inversion), παράγοντας έτσι ηλεκτρικό σήμα, που πλησιάζει πολύ την ημιτονική μορφή.



**Σχήμα 6.13** Βασική αρχή λειτουργίας του inverter.  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , τα διακοπτικά στοιχεία. Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (DC-AC conversion), επιτυγχάνεται με κλείσιμο – άνοιγμα των διακοπτικών στοιχείων, ανά δύο, χιαστί (1, 4 και 2, 3). Όσο τα  $S_1, S_4$  είναι αγώγιμα και τα  $S_2, S_3$  σε αποκοπή, τα σημεία  $A$  και  $B$  έχουν πρόσημα + και – αντίστοιχα. Όταν συμβαίνει το αντίστροφο, τα  $A$  και  $B$  έχουν πρόσημα – και + αντίστοιχα. Μ' αυτό τον τρόπο δημιουργείται η εναλλασσόμενη τετραγωνική τάση (κέντρο του διαγράμματος).

Ο inverter έχει πολύ καλή απόδοση που κυμαίνεται συνήθως από 93 έως 97%, η λειτουργία τους όμως συνοδεύεται, κατά περίπτωση, από παραγωγή μεγάλου πλήθους αρμονικών υψηλής συχνότητας. Οι αρμονικές, ιδιαίτερα σε περίπτωση σύνδεσης με το δίκτυο διανομής, προκαλούν προβλήματα και πρέπει πριν την σύνδεση, να τοποθετούνται ειδικές ηλεκτρονικές διατάξεις (φίλτρα). Στην πράξη, έχουμε τους μετατροπείς DC-AC δικτύου (μετατρέπουν την DC τάση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε AC τάση δικτύου) και τους μετατροπείς DC-AC συσσωρευτών (μετατρέπουν την DC τάση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε DC τάση των συσσωρευτών και την DC τάση των συσσωρευτών σε AC τάση κατανάλωσης ή δικτύου).

## 6.14 Μετατροπείς DC-AC δικτύου

Οι μετατροπείς DC-AC δικτύου, κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη και καλύπτουν μία μεγάλη κατηγορία εφαρμογών. Είναι κατάλληλοι για οικιακές ή βιομηχανικές εφαρμογές και καλύπτουν τις ανάγκες των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής, μεσαίας ή μεγάλης ισχύος.

➤ **Μετατροπείς DC-AC δικτύου μικρής ισχύος χαμηλής τάσης μονοφασικοί**

- Είναι εύκολοι στην εγκατάσταση (μειωμένες σχετικά δαπάνες εγκατάστασης).
- Είναι κατάλληλοι και για εσωτερική και εξωτερική εγκατάσταση.
- Φέρουν ειδική αδιάβροχη διάταξη για τη σύνδεση με το συνεχές και εναλλασσόμενο ρεύμα.
- Έχουν προστασία από υπέρταση και υπερένταση.
- Έχουν δυνατότητα για διάγνωση και επικοινωνία ενσύρματα ή ασύρματα.
- Καλύπτουν ένα εκτεταμένο πεδίο λειτουργίας από  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Τύπος	SB-3000TL	SB-5000TL
Εικόνα		
<b>ΜΕΓΕΘΗ ΕΙΣΟΔΟΥ (INPUT DC)</b>		
Μέγιστη Φ/Β ισχύς ( $P_{pv}$ )	4000 W	6250 W
Μέγιστη DC ισχύς ( $P_{DC, max}$ )	3200 W	5300 W
Μέγιστη DC τάση ( $U_{DC, max}$ )	550 V	600 V
Φ/Β περιοχή λειτουργίας MPPT ( $U_{pv}$ )	188V – 440 V	250 V – 480 V
Ελάχιστη DC τάση εισόδου (min. DC Voltage)	125 V	250 V
Μέγιστο ρεύμα εισόδου ( $I_{pv, max}$ )	17 A	21 A
Μέγιστος αριθμός strings (παράλληλα)	2	4
DC αποσύνδεση	Συνδετήρες καλωδίων Snap	Συνδετήρες καλωδίων Snap
Θερμικά ελεγχόμενα varistors	ναι	ναι
Έλεγχος διαρροής ρεύματος	ναι	ναι

Τύπος	SB-3000TL	SB-5000TL
<b>ΜΕΓΕΘΗ ΕΞΟΔΟΥ (OUTPUT AC)</b>		
Μέγιστη AC ισχύς ( $P_{AC, max}$ )	3000 W	5000 W
Ονομαστική AC ισχύς ( $P_{AC, nom}$ )	3000 W	5000 W
Περιοχή λειτουργίας της AC (τάσης $U_{AC}$ )	198 V – 260 V	211 V – 260 V
Αρμονικές	< 4 %	< 4 %
AC συχνότητα (FAC)	59.5 Hz – 60.5 Hz	59.3 Hz – 60.5 Hz
Διαφορά φάσης (cosφ)	1	1
Προστασία βραχυκυκλώματος	Ναι, έλεγχος ρεύματος	Ναι, έλεγχος ρεύματος
<b>ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ</b>		
Μέγιστη απόδοση	97 %	96,8 %
<b>ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</b>		
Διαστάσεις (Π/Υ/Μ)	470/445/180 (mm)	470/490/225 (mm)
Βάρος	22 kg	31 kg

**Πίνακας 6.14** Τεχνικά χαρακτηριστικά μετατροπέων δικτύου μικρής ισχύος, SB-4000TL και SB-5000TL (μονοφασικοί χαμηλής τάσης).

➤ **Μετατροπείς DC-AC μέσης ισχύος χαμηλής τάσης, τριφασικοί**

- Δυνατότητα σύνδεσης των συσκευών σε δίκτυο χαμηλής τάσης.
- Φέρουν ηλεκτρομαγνητικό διακόπτη ζεύξης – απόζευξης πεδίο DC με ηλεκτρικό servo κινητήρα.
- Έχουν προστασία υπέρτασης και κρουστικών τάσεων εντάσεων πεδίο DC και AC
- Έχουν διάταξη διόρθωσης αέργου ισχύος.
- Έχουν την δυνατότητα ελέγχου της εγκατάστασης και αξιολόγησης των στοιχείων.
- Έχουν πεδίο τάσης εισαγωγής και επιλογής από 300V DC μέχρι 600V DC.
- Στην έξοδο τους μας δίνουν τριφασική τάση χαμηλής τιμής 3 · 400 V και συχνότητα 50 Hz.


Τύπος	SMA-SC100	SC125LV
Εικόνα	 SMA Solar Technology AG	
<b>ΜΕΓΕΘΗ ΕΙΣΟΔΟΥ (INPUT DC)</b>		
Προτεινόμενη μέγιστη PV- ισχύς ( $P_{pv}$ )	110 kWp	145 kWp
Περιοχή DC τάσης MPPT ( $U_{pv}$ )	250 V – 600 V	300V – 600V
Μέγιστη τάση εισόδου ( $U_{pv, max}$ )	650 V	650 V
Μέγιστη ένταση εισόδου ( $I_{pv, max}$ )	430 A	448 A
Μέγιστος αριθμός strings (παράλληλα)	3	5
Προστασία DC υπέρτασης	ναι	ναι
<b>ΜΕΓΕΘΗ ΕΞΟΔΟΥ (OUTPUT AC)</b>		
Ονομαστική AC ισχύς ( $P_{AC, nom}$ )	100 kW	125 kW
Λειτουργική τάση $\pm 10 \%$	400 V	400 V
Ονομαστική AC ένταση ( $I_{AC, nom}$ )	145 A	180 A
AC συχνότητα (FAC)	50 Hz – 60 Hz	50 Hz – 60 Hz
Αρμονικές	< 3 %	< 3 %
Μετατόπιση φάσης (cosφ)	1	1
Προστασία AC υπέρτασης	ναι	ναι

Τύπος	SMA-SC110	SC125LV
<b>ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ</b>		
Μέγιστη απόδοση	95 %	94 %
<b>ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</b>		
Διαστάσεις (Πλάτος/Υψος/Βάθος)	1800/2000/850 (mm)	2000/2120/850 (mm)
Βάρος	1160 kg	1460kg

**Πίνακας 6.15** Τεχνικά χαρακτηριστικά μετατροπέων δικτύου μέσης ισχύος, SMA-SC100 και SC125LV (τριφασικοί χαμηλής τάσης).

➤ **Μετατροπέας DC-AC μεγάλης ισχύος μέσης τάξης**

- Έχουμε αύξηση της απόδοσης παραγωγής και μείωση κόστους λόγω άμεσης σύνδεσης σε μέση τάση.
- Φέρει M/I, M/T και κάλυμμα για υπαίθρια εγκατάσταση.
- Φέρει ηλεκτρομαγνητική διακοπή ισχύος πεδίου DC με ηλεκτροκινητήρες servo.
- Έχει προστασία υπέρτασης σε συνεχές και εναλλασσόμενο πεδίο.
- Έχει διάταξη διόρθωσης αέργου ισχύος.
- Έχει δυνατότητα ελέγχου των εγκαταστάσεων και αξιολόγησης στοιχείων.
- Αύξηση της αποδοτικότητας της εγκατάστασης από 1,5 μέχρι 2,0 % σε σχέση με εγκαταστάσεις με μετασχηματιστή χαμηλής τάσης.
- Μπορεί να κατασκευασθεί και χωρίς κάλυμμα για εσωτερική εγκατάσταση.

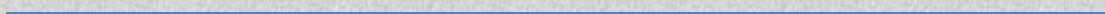
Τύπος	SC 1000MV
Εικόνα	



SC 1000MV ΜΕΓΕΘΗ ΕΙΣΟΔΟΥ (INPUT DC)	
Προτεινόμενη μέγιστη PV-ισχύς ( $P_{pv}$ )	1160 kW <sub>p</sub>
Περιοχή DC τάσης MPPT ( $U_{pv}$ )	450 V – 820 V
Μέγιστη τάση εισόδου ( $U_{pv, max}$ )	880 V
Μέγιστη ένταση εισόδου ( $I_{pv, max}$ )	2364 A
DC κυματισμός τάσης ( $U_{pp}$ )	< 3 %
Μέγιστος αριθμός strings (παράλληλα)	4
Προστασία DC υπέρτασης	ναι
ΜΕΓΕΘΗ ΕΞΟΔΟΥ (OUTPUT AC)	
Ονομαστική AC ισχύς ( $P_{AC, nom}$ )	1000 kW
Λειτουργική τάση $\pm 10$ %	3 x 20 kV
Ονομαστική AC ένταση ( $I_{AC, nom}$ )	28,8 A
Αρμονικές	< 3 %
Μετατόπιση φάσης (cosφ)	1
Προστασία AC υπέρτασης	ναι
ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	
Μέγιστη απόδοση	97,3 %
ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Διαστάσεις (Πλάτος/Υψος/Βάθος)	5400/3620/3000 (mm)
Βάρος	35 ton
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
Θερμοκρασία	-20 °C έως +40 °C
Υγρασία	0 έως 100 %

Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*



## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ Φ/Β ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

### 7.1 Μελέτη φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Για να προχωρήσουμε στους υπολογισμούς (μελέτη) μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, θα πρέπει να γνωρίζουμε:

- α) Το μέγεθος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (μικρή, μεσαία, μεγάλη)
- β) Τον προορισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (οικιακή χρήση, βιομηχανική χρήση, παραγωγή για τροφοδότηση οικισμού, παραγωγή για διοχέτευση στο κεντρικό δίκτυο διανομής κ.λπ.).
- γ) Πότε θα λειτουργεί η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση (χειμερινή περίοδο ή καλοκαιρινή περίοδο ή όλο το χρόνο).
- δ) Αν θα χρησιμοποιηθεί ή όχι βοηθητική πηγή ενέργειας (Ντηζελογεννήτρια).
- ε) Αν θα έχουμε υβριδικό σύστημα παραγωγής (φωτοβολταϊκά πλαίσια και ανεμογεννήτρια κ.λπ.).
- στ) Αν θα γίνεται αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας (χρήση συσσωρευτών).
- ζ) Ποια θα είναι η μέγιστη ισχύς ζήτησης.
- η) Ποιο θα είναι το είδος του φορτίου (φωτισμός ή κίνηση) .
- θ) Το χρόνο λειτουργίας του φορτίου (ημέρα ή νύχτα ή όλο το 24ωρο).
- ι) Αν η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση θα είναι ή όχι συνδεδεμένη με το κεντρικό δίκτυο διανομής.
- ια) Που θα τοποθετηθεί η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση και ποιο θα είναι το κόστος γης.
- ιβ) Τι είδους βάσεις θα χρησιμοποιηθούν (σταθερές με ετήσια βέλτιστη κλίση, σταθερές με μηνιαία βέλτιστη κλίση, περιστρεφόμενες με χειροκίνητη κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο, περιστρεφόμενες με αυτόματη παρακολούθηση της πορείας του ήλιου για συνεχή κάθετη πρόσπτωση).
- ιγ) Το είδος των φωτοβολταϊκών συλλεκτών που θα χρησιμοποιήσουμε (μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά, λεπτού υμένα).
- ιδ) Το είδος των ηλεκτρονικών διατάξεων και των συσκευών που θα χρησιμοποιήσουμε (στοιχεία από κατασκευαστή)
- ιε) Τα μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής.

Μια ολοκληρωμένη τεχνικο-οικονομική μελέτη για εφαρμογή φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτιριακές εγκαταστάσεις ή σε υπαίθριους χώρους, με βάση και το ισχύον νομοθετικό και επενδυτικό πλαίσιο, περιλαμβάνει:

- Τον υπολογισμό της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στη θέση της εγκατάστασης με βάση την ετήσια ή την μηνιαία βέλτιστη κλίση για

σταθερές βάσεις ή τους αντίστοιχους υπολογισμούς για τις περιπτώσεις περιστρεφόμενων βάσεων.

- Τους τρόπους τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών στον οικοπεδικό χώρο ή στα κτίρια.
- Τον υπολογισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, σε ετήσια βάση, ανά KW εγκαταστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών για κάθε μία από τις περιπτώσεις του τρόπου τοποθέτησης των συλλεκτών στον οικοπεδικό χώρο ή στα κτίρια.
- Τα ηλεκτρολογικά σχέδια της εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών καθώς και τις προδιαγραφές των υλικών και των συσκευών που θα χρησιμοποιηθούν.
- Τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων.
- Την εξέταση των συνθηκών που υπάρχουν στην περιοχή για την δυνατότητα σύνδεσης με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο (χαμηλής ή μέσης τάσης).
- Την οικονομική αξιολόγηση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης σύμφωνα με το νομικό πλαίσιο που ισχύει.
- Την διαδικασία για την ένταξη του έργου στον αναπτυξιακό νόμο.
- Την προετοιμασία των φακέλων για την αδειοδότηση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

## 7.2 Εκτίμηση του μεγέθους των ενεργειακών αναγκών

Αν είναι γνωστός ο προορισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούμε κατά προσέγγιση να εκτιμήσουμε τις ενεργειακές απαιτήσεις των καταναλωτών.

Όταν η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση αφορά έναν καταναλωτή (όπως η τροφοδότηση μιας οικίας για τετραμελή οικογένεια με μέση συμπεριφορά) θα έχουμε τις ενεργειακές ανάγκες που προκύπτουν από τον παρακάτω πίνακα 7.1.

Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας για τους μήνες Ιούνιο-Ιούλιο-Αύγουστο είναι 574000Wh ή 574KWh ανά μήνα, ενώ το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας για τους υπόλοιπους μήνες είναι 264000Wh ή 264 KWh ανά μήνα.

Πάντως, για λόγους απόδοσης και οικονομίας δεν συνιστάται η χρήση φωτοβολταϊκών για την κάλυψη ηλεκτρικών συσκευών με μεγάλη ηλεκτρική κατανάλωση, όπως θερμοσίφωνα, ηλεκτρικό καλοριφέρ, ηλεκτρική κουζίνα, κλιματιστικό κ.λπ. Για τις χρήσεις αυτές υπάρχουν οικονομικότερες λύσεις που δεν στηρίζονται στην ηλεκτρική ενέργεια, όπως ηλιακός θερμοσίφωνα, κουζίνα υγραερίου, ενεργειακό τζάκι κ.λπ.

a/a	Όνομασία ηλεκτρικής συσκευής	Τυπική ισχύς (W)	Χρόνοι λειτουργίας σε ώρες ανά μήνα	Μηνιαία κατανάλωση (Wh)	Παρατηρήσεις
1	Ψυγείο	300	200	60000	
2	Καταψύκτης	300	200	60000	
3	Ανεμιστήρας	100	100	10000	Μόνο για τους μήνες Ιούνιο-Ιούλιο και Αύγουστο
4	Λαμπήρες υψηλής απόδοσης	100	300	30000	
5	Λαμπτήρες φθορισμού	50	300	15000	
6	Πλυντήριο ρούχων	2500	10	25000	
7	Πλυντήριο πιάτων	1000	20	20000	
8	Ηλεκτρικό σίδερο	1000	10	10000	
9	Στεγνωτήρας μαλλιών	1000	2	2000	
10	Τηλεόραση	100	200	20000	
11	Υπολογιστής	100	50	5000	
12	Κλιματιστικό	3000	100	300000	Μόνο για τους μήνες Ιούνιο-Ιούλιο και Αύγουστο
13	Τοστιέρα	1000	5	5000	
14	Στερεοφωνικό	100	60	6000	
15	Φούρνος μικροκυμάτων	1500	4	6000	
	<b>Σύνολο</b>	<b>12150</b>			

*Πίνακας 7.1 Ενεργειακές ανάγκες κατοικίας τεσσάρων ατόμων με μέση συμπεριφορά.*

Από τον παραπάνω πίνακα 7.1 προκύπτει ότι η μέγιστη εγκαταστημένη ισχύς είναι  $P_m = 12150 \text{ W}$  ή  $12,150 \text{ KW}$ . Επειδή οι καταναλωτές δεν λειτουργούν ταυτόχρονα, υπολογίζουμε την μέγιστη απαιτούμενη ισχύ παίρνοντας υπόψη τον συντελεστή ετεροχρονισμού, που για την περίπτωση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων για οικίες λαμβάνεται περίπου στην τιμή  $\sigma_{ετ} = 0,40$ . Έπομένως:

$$P_{ma} = P_m \cdot \sigma_{ετ} = 0,40 P_m \Rightarrow$$

$$P_{ma} = 0,40 \cdot 12,15 = 4,86 \text{ KW}$$

Η μέγιστη απαιτούμενη ισχύς που προκύπτει από την παραπάνω σχέση, θα πρέπει να είναι πάντα μεγαλύτερη από την ισχύ της κάθε συσκευής του πίνακα 7.1 (4860 W > 3000 W).

### 7.3 Εκτίμηση του συνολικού βαθμού απόδοσης του Φ/Β συστήματος

Η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων θεωρητικά υπολογίζεται από το πηλίκο της μηνιαίας ενεργειακής απαίτησης προς την ολική μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία, σε KWh/m<sup>2</sup>, που προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Έπομένως θεωρητικά έχουμε:

$$F_a = \frac{E_a}{H_{mk}}$$

Όπου,  $F_a$  = η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε m<sup>2</sup>.

$E_a$  = ενεργειακή απαίτηση σε KWh.

$H_{mk}$  = μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε KWh/m<sup>2</sup>.

Η παραπάνω σχέση μας δίνει την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, θεωρώντας ότι ο βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι ίσος με την μονάδα. Στην πράξη ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και η τιμή του είναι πολύ μικρότερη από τη μονάδα. Έτσι θα αναφερθούμε στον βαθμό απόδοσης φωτοβολταϊκού συλλέκτη και στον βαθμό απόδοσης των ηλεκτρονικών διατάξεων σχετικά με τους παράγοντες επιρροής τους.

- **Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού συλλέκτη**

Ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού συλλέκτη εξαρτάται από το υλικό και τον τρόπο κατασκευής και δίνεται από τον κατασκευαστή. Έτσι για φωτοβολταϊκά πλαίσια πυριτίου έχουμε:

- Άμορφο  $n_{\pi\lambda} = 5 - 7 \%$
- Πολυκρυσταλλικά  $n_{\pi\lambda} = 10 - 14 \%$
- Μονοκρυσταλλικά  $n_{\pi\lambda} = 14 - 17 \%$

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και εξαρτάται από τον συντελεστή  $\sigma_\theta$  (συντελεστής θερμοκρασίας περιβάλλοντος), για τον οποίο έχουμε τις τιμές:

- $\sigma_\theta \sim 0,80$  για τους καλοκαιρινούς μήνες.
- $\sigma_\theta \sim 0,90$  για τους χειμερινούς μήνες.
- $\sigma_\theta \sim 0,85$  μέση ετήσια τιμή.

Η απόδοση όμως των φωτοβολταϊκών πλαισίων επηρεάζεται και από την ρύπανση των συλλεκτών και εξαρτάται από τον συντελεστή  $\sigma_p$  (συντελεστής ρύπανσης), για τον οποίο έχουμε τις τιμές:

- $\sigma_p \sim 1$  για πολύ μικρή έως μηδενική ρύπανση.
- $\sigma_p \sim 0,90$  για μέτρια ρύπανση.
- $\sigma_p \sim 0,80$  για υψηλή ρύπανση.

Έπειδή σε περιοχές με υψηλούς δείκτες ρύπανσης έχουμε μεγάλη μείωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, περίπου 20%, θα πρέπει να γίνεται περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας τους με απορρυπαντικό.

Επομένως: 
$$n_\sigma = n_{\pi\lambda} \cdot \sigma_\theta \cdot \sigma_p$$

- **Βαθμός απόδοσης των ηλεκτρονικών διατάξεων και των εγκαταστάσεων τροφοδοσίας και ελέγχου ενός φωτοβολταϊκού συστήματος**

Ο βαθμός αυτός προκύπτει από το γινόμενο των βαθμών απόδοσης των επί μέρους διατάξεων που έχουν σχέση με την παρακολούθηση, φόρτιση – εκφόρτιση, μετατροπή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως:

$$n_\delta = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \dots n_v$$

Στην πράξη, συνήθως, έχουμε:

- Βαθμός απόδοσης μετατροπέων περίπου 0,90.
- Βαθμός απόδοσης συσσωρευτών περίπου 0,85.
- Βαθμός απόδοσης διατάξεων παρακολούθησης και ελέγχου περίπου 0,98.
- Βαθμός απόδοσης εγκαταστάσεων (καλωδιώσεις κ.λπ) περίπου 0,97.

Στους υπολογισμούς λαμβάνουμε μία τιμή που ανάλογα με το είδος και το πλήθος των ηλεκτρονικών διατάξεων και των συσκευών κυμαίνεται από  $n_\delta = 0,65$  μέχρι  $n_\delta = 0,80$ .

- **Υπολογισμός του συνολικού βαθμού απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος.**

Ο συνολικός βαθμός του φωτοβολταϊκού συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση:

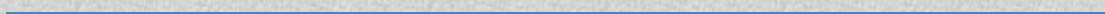
$$n_{ολ} = n_\sigma \cdot n_\delta$$

Η σχέση αυτή μας δίνει την αναγκαία επιφάνεια των φωτοβολταϊκών συλλεκτών ή πλαισίων που είναι:

$$F_\sigma = \frac{F_a}{n_{ολ}} = \frac{E_\alpha}{H_{mk} \cdot n_\sigma \cdot n_\delta}$$

Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*





## ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η κινητική ενέργεια του ανέμου η οποία οφείλεται κυρίως στην άνιση θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο. Περίπου το 2% της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στον πλανήτη μας, μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια η οποία υπολογίζεται σε  $3,6 \cdot 10^9$  MW . Η ενέργεια αυτή είναι τεράστια συγκρινόμενη με τις ανάγκες της ανθρωπότητας. Ενδεικτικά οι ενεργειακές ανάγκες των Η.Π.Α. είναι μόλις το 10% της ενέργειας των ανέμων που πνέουν εκεί, γεγονός που αποδεικνύει πόσο πλούσια πηγή ενέργειας είναι ο άνεμος. Οι πλέον ευνοημένες περιοχές του πλανήτη μας από πλευράς αιολικού δυναμικού είναι οι χώρες της πολικής και εύκρατης ζώνης, ιδιαίτερα κοντά στις ακτές.

Η αιολική ενέργεια μας προσφέρει τη δυνατότητα να παράγουμε ηλεκτρισμό χωρίς να επιβαρύνουμε το περιβάλλον. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις περιορίζονται κυρίως στην οπτική όχληση, σε αντίθεση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που ζημιώνουν το περιβάλλον με τα απόβλητά τους (στερεά, υγρά και αέρια ) και τους πυρηνικούς σταθμούς.

Η ισχύς ρεύματος είναι ανάλογη της πυκνότητάς του και του κύβου της ταχύτητάς του. Έτσι για την ίδια ταχύτητα και διατομή ένα ρεύμα αέρα θα έχει περίπου 800 φορές μικρότερη ενέργεια από αντίστοιχη δέσμη νερού. Η αιολική ενέργεια συνεπώς είναι μια «αραιή» ή «ήπια» μορφή ενέργειας, δηλαδή είναι μικρή η ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα χρόνου που μπορεί να δεσμευτεί σε κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας που προσβάλλεται από τον άνεμο. Για παράδειγμα άνεμος εντάσεως 5 μποφόρ, περίπου 9,5 m/s, έχει ισχύ 500 W ανά  $m^2$  προσβαλλόμενης επιφάνειας, ενώ ένας ανεμοκινητήρας (A/K) μπορεί στην καλύτερη περίπτωση να δεσμεύσει το 48% αυτής της ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη κατασκευής μονάδων, μεγάλων διαστάσεων. Σ' αυτό το μειονέκτημα αντεπεξέρχεται με επιτυχία η σημερινή τεχνολογία με την κατασκευή ανεμοκινητήρων μεγάλων διαστάσεων που ανταγωνίζονται οικονομικά τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Παράλληλα η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από το πλεονέκτημα ότι δίνει απ' ευθείας μηχανική ενέργεια μια «αναβαθμισμένη» κατά την τεχνική ορολογία, μορφή ενέργειας που με πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης και απλά μέσα μετατρέπεται σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια εξορισμού έχει τοπικό χαρακτήρα και επομένως συντελεί στην περιφερειακή και τοπική ανάπτυξη. Αποτελεί συνεπώς μια αστείρευτη πηγή ενέργειας με αξιοσημείωτο δυναμικό και δωρεάν πρώτη ύλη στη διάθεση της ανθρωπότητας και προβάλλει σήμερα ως μια από τις πιο κατάλληλες εναλλακτικές πηγές για την παραγωγή ηλεκτρισμού αλλά και για άλλες χρήσεις.

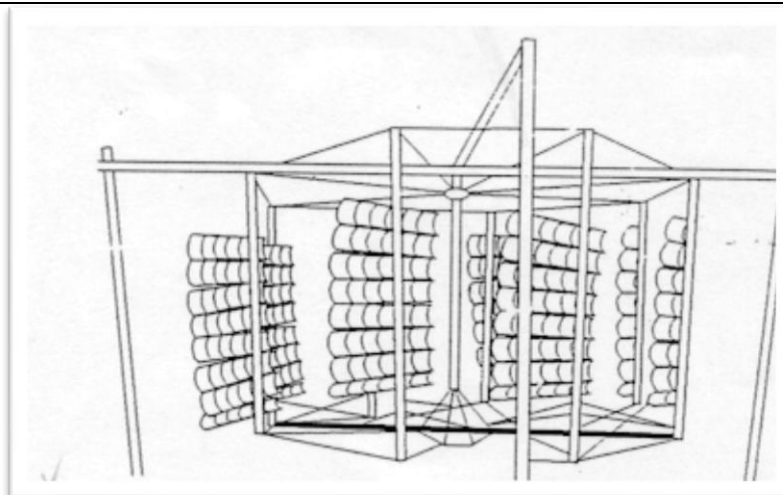
## 8.1 Ιστορική αναδρομή

Η αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου ξεκίνησε από τα πρώιμα ιστορικά χρόνια και έπαιξε αποφασιστικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας με τη χρήση της τόσο στη ναυτιλία όσο και στην άρδευση καθώς και στις αγροτικές καλλιέργειες. Η αναφορά της ελληνικής μυθολογίας στο θεό «Αίοιο», ο οποίος με τη βοήθεια των οκτώ βοηθών θεών (των οκτώ πρωτευόντων ανέμων : Βορέα, Καικία, Αηλιώτη, Εύρο, Νότο, Λίψ, Ζέφυρο και Σκίρωνα) θεωρείται ο διαχειριστής των ανέμων, υπογραμμίζει τη σημασία της αιολικής ενέργειας στην οικονομική και παραγωγική δραστηριότητα εκείνων των χρόνων.



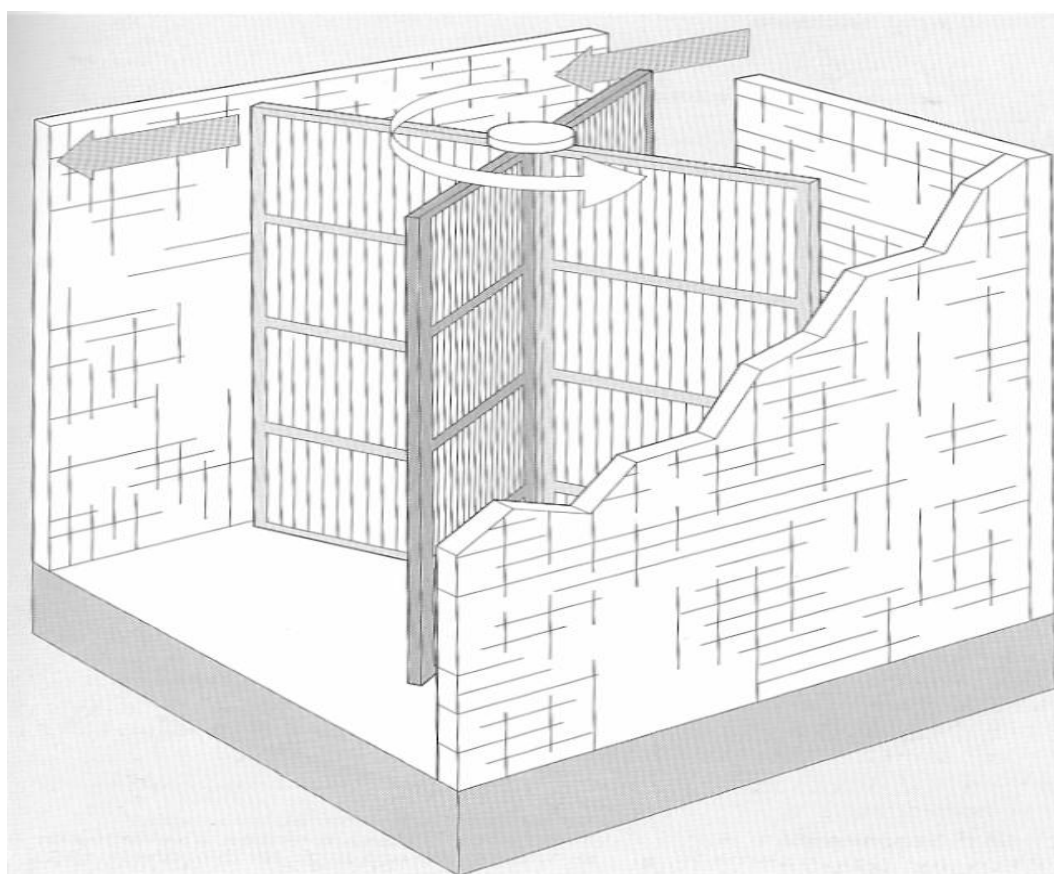
**Σχήμα 8.1** Οι οκτώ βοηθοί του Αιόλου απεικονίζονται στο πύργο των αέρηδων (κτίσμα του 1<sup>ου</sup> π.Χ. αιώνα στην πλάκα).

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τον άνθρωπο για την κίνηση των ιστιοφόρων πλοίων. Οι ιστορικές και αρχαιολογικές αναφορές υποστηρίζουν επίσης ότι αιολικές μηχανές (ανεμόμυλοι) χρησιμοποιήθηκαν από τους σημαντικότερους αρχαίους λαούς, τους Κινέζους, τους Πέρσες, και τους Αιγύπτιους. Κύριο υλικό κατασκευής τους ήταν το ξύλο, τα πανιά καθώς και ειδικές λιθόκτιστες κατασκευές. Για παράδειγμα, στην Αίγυπτο διατηρούνται οι πέτρινες βάσεις ανεμόμυλων με ηλικία μεγαλύτερη των τριών χιλιάδων ετών, ενώ σύμφωνα με τις ιστορικές μαρτυρίες ήδη τον 7<sup>ο</sup> π.Χ. αιώνα στην Βαβυλωνία ανεμόμυλοι έδιναν την απαραίτητη ενέργεια για την άρδευση της Μεσοποταμίας. Λέγεται μάλιστα ότι ο βασιλιάς Χαμουραμί της Βαβυλωνίας, ήδη από το 17<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ., είχε συλλάβει κάποιο σχέδιο, προκειμένου να αρδεύσει τη κοιλάδα της Μεσοποταμίας με τη βοήθεια της αιολικής ενέργειας.



**Σχήμα 8.2** Απεικόνιση Κινέζικου ανεμόμυλου.

Παράλληλα, αρχαιολογικές ανασκαφές στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα στο Αφγανιστάν έφεραν στο φως σημαντικό αριθμό από ανεμόμυλους κάθετου άξονα στα Σίστρα και στην περιοχή της Βακτρίας, η οποία αποικίσθηκε κυρίως από Έλληνες της Στρατιάς του Μεγάλου Αλεξάνδρου. Σύμφωνα με τις υπάρχουσες ενδείξεις, οι χρησιμοποιούμενοι ανεμόμυλοι τόσο στη Βαβυλωνία (ο ανεμόμυλος των Περσών) όσο και στην Κίνα (ο κινέζικος ανεμόμυλος) ήταν κατακόρυφου άξονα. Αργότερα, τον 3<sup>ο</sup> π.Χ. αιώνα ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς σχεδίασε τον κατά πάσα πιθανότητα πρώτο ανεμόμυλο οριζόντιου άξονα με τέσσερα πτερύγια.



**Σχήμα 8.3** Ανεμόμυλος πλακών κατακόρυφου άξονα.

Η χρήση των ανεμόμυλων για την άλεση των δημητριακών και την άρδευση συνεχίστηκε στις χώρες τις ανατολής, στη Μικρά Ασία και στο Αιγαίο και κατά τη Βυζαντινή εποχή. Στην Ευρώπη υποστηρίζεται ότι οι ανεμόμυλοι εμφανίστηκαν περίπου το 1200 μ.Χ. και μεταφέρθηκαν από τους σταυροφόρους κατά την επιστροφή τους από τα Ιεροσόλυμα. Η πρώτη γραπτή αναφορά των ευρωπαϊκών ανεμόμυλων οριζοντίου άξονα δίνεται σε ένα γαλλικό φορολογικό έγγραφο του 1125 μ.Χ. ενώ το πρώτο γνωστό σκίτσο ευρωπαϊκού ανεμόμυλου βρίσκεται σε ένα εκκλησιαστικό ψαλτήριο του 12<sup>ου</sup> αιώνα. Έτσι την εποχή του Μεσαίωνα ανεμόμυλοι εμφανίζονται στην Ολλανδία, την Ισπανία ( ο θρύλος του Δον Κιχώτη ), την Πορτογαλία, την Γαλλία και την Ιταλία. Στην Ολλανδία μάλιστα γύρω στο 1500 μ.Χ. οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για την άντληση των νερών από τις περιοχές που βρίσκονται σε χαμηλότερη στάθμη από αυτήν της θάλασσας.



Αντίγραφο του πρώτου  
Περσικού ανεμόμυλου

Μεσογειακός  
ανεμόμυλος

Αμερικανικός  
ανεμοκινητήρας

Ο τύπος του ανεμόμυλου που χρησιμοποιήθηκε στην Ευρώπη την εποχή του Μεσαίωνα ήταν ως επί το πλείστον οριζόντιου άξονα με τέσσερα πτερύγια ( περιστρεφόμενου κλωβού, περιστρεφόμενης οροφής). Οι κύριες χρήσεις του ήταν το άλεσμα των σιτηρών, το κόψιμο του καπνού, του ξύλου και άλλων γεωργικών προϊόντων, καθώς και η άντληση νερού για άρδευση ή αποξήρανση. Ένας άλλος τύπος ανεμόμυλου, ο οποίος εξαπλώθηκε ιδιαίτερα την εποχή της Αναγέννησης και του αμερικανικού ονείρου, ήταν ο αργός πολύπτερος ανεμόμυλος, ο οποίος χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα για την άντληση νερού και ονομάζεται «Αμερικανικός ανεμόμυλος». Για την αποκατάσταση της ιστορικής αλήθειας, ο ανεμόμυλος αυτός προέρχεται από την Ευρώπη και χρησιμοποιήθηκε από τους αποίκους αρχικά στα ανατολικά παράλια της Αμερικής για την κίνηση αντλιών με αποτέλεσμα να παρουσιάσει μεγάλη εξάπλωση. Παρ' όλα αυτά το Σικάγο γίνεται την περίοδο 1870 έως 1930 το κέντρο βιομηχανικής παραγωγής ανεμόμυλων, με εκτιμώμενη παραγωγή έξι εκατομμυρίων ( 6.000.000 ) μονάδων την περίοδο που προαναφέραμε. Η χρήση των ανεμόμυλων στις Η.Π.Α. έφθασε στο απόγειό της μεταξύ 1920 και 1930 με την εγκατάσταση περίπου 600.000 μηχανών. Ο συγκεκριμένος τύπος ανεμοκινητήρα , αν και δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή ενεργειακή απόδοση, εμφανίζει σημαντική

ροπή λειτουργίας ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, γεγονός που τον καθιστά ιδιαίτερα αποδοτικό σε γεωργικές και βιοτεχνικές εφαρμογές. Βασικό του μειονέκτημα είναι το σχετικά μεγάλο βάρος, που οφείλεται στον τύπο και στο πλήθος των πτερυγίων που χρησιμοποιεί.



**Σχήμα 8.4** Πολύπτερος Αμερικανικός ανεμοκινητήρας.

Στις αρχές του αιώνα μας πρώτοι οι Δανοί παράγουν ηλεκτρισμό από τον άνεμο, ενώ στην Αμερική ανεμόμυλοι μεταλλικής κατασκευής χρησιμοποιούνται επίσης για ηλεκτροδότηση. Έτσι, το 1891 λειτούργησε στο Askov της Δανίας πειραματικός ανεμοκινητήρας με δύο ηλεκτρικές γεννήτριες ( 2·9 kW ) και διάμετρο 22,8 m, κάτω από την επίβλεψη του καθηγητή P. La Cour. Αντίστοιχα, τη δεκαετία του 1930 κατασκευάστηκε στη Βαλτική μηχανή 100 kW, με σχεδιαστική επίβλεψη των Sabanin Yuriev. Τέλος το 1940 κατασκευάστηκε στο Vermont των Η.Π.Α. ένας πειραματικός δίπτερος ανεμοκινητήρας σημαντικής ισχύος.

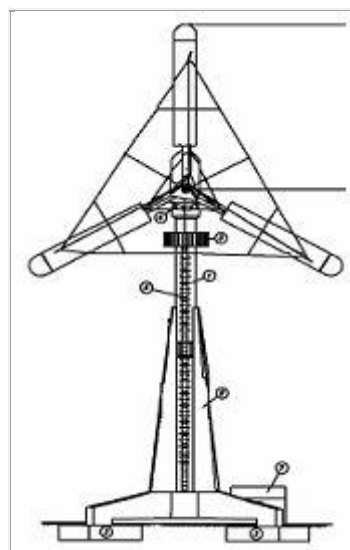


Πρωτοπόρος στην αιολική ενέργεια θεωρείται ο Roul la Cour (1846-1908), μετεωρολόγος όπου στην συνέχεια σχεδίασε τα πρώτα συστήματα αιολικής ενέργειας.

Κατά την διάρκεια του 2ου Παγκοσμίου πολέμου η δανέζικη τεχνική εταιρεία F.L.Smith κατασκεύασε συστήματα αιολικής ενέργειας με 2 ή 3 λεπίδες.



Ο μηχανικός Johannes Joul ήταν ένας από τους πρώτους μαθητές του Roul la Cour σε σειρά μαθημάτων το 1904 με τίτλο «Ηλεκτρονικοί του Ανέμου».



Α/Γ τύπου GEDSER

Στη συνέχεια αναφέρονται οι κυριότεροι χρονικοί σταθμοί της εξελικτικής πορείας του ανεμόμυλου.

- 1200 μ.Χ. Ανεμόμυλοι οριζόντιου άξονα χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη για το άλεσμα σιταριού.
- 1500 μ.Χ. Στα πεδινά της Ολλανδίας εμφανίζονται οι πρώτοι ανεμόμυλοι. Ο Don Quixote τους φέρνει στην Ισπανία
- 1600 μ.Χ. Άποικοι κατασκευάζουν ανεμόμυλους ευρωπαϊκού τύπου στα ανατολικά παράλια της Αμερικής.

- 1700 μ.Χ. Οι ατμομηχανές αρχίζουν να αντικαθιστούν τους ανεμόμυλους.
- 1860 Οι Αμερικανοί κατασκευάζουν πολύπτερους ανεμόμυλους (multi bladed) για να χρησιμοποιηθούν για κίνηση αντλιών.
- 1870 Το Σικάγο γίνεται κέντρο βιομηχανικής παραγωγής ανεμόμυλων.
- 1900 Οι Δανοί παράγουν ηλεκτρισμό από τον άνεμο.
- 1920 Ανεμόμυλοι μεταλλικής κατασκευής χρησιμοποιούνται στην Αμερική για ηλεκτροδότηση στα αγροτικά σπίτια.
- 1930 Οι ανεμόμυλοι στις αγροτικές περιοχές αντικαθίστανται από την επέκταση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.
- 1940 Στο Vermont (Η.Π.Α.) κατασκευάζεται για πρώτη φορά πειραματικός ανεμοκινητήρας αρκετά μεγάλης ισχύος με δύο πτερύγια.
- 1950 Η ατομική ενέργεια μειώνει το ενδιαφέρον για χρησιμοποίηση της αιολικής ενέργειας.
- 1960 Η μόλυνση του περιβάλλοντος από τις υπάρχουσες πηγές ενέργειας (άνθρακας- πετρέλαιο) αρχίζει να γίνεται έντονη.
- 1970 Η έλλειψη καυσίμων αναζωογονεί το ενδιαφέρον για αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου.
- 1976 Τεχνολογικά αναπτυγμένες χώρες διαθέτουν για πρώτη φορά μεγάλο ύψος χρημάτων για προγράμματα γύρω από την τεχνικοοικονομική διερεύνηση των ανεμοκινητήρων.
- 1983 Κατασκευή ανεμοκινητήρων ισχύος 3 MW.
- 1990 Κατασκευή ανεμοκινητήρων ισχύος 7 MW.

Στα χρόνια που ακολούθησαν το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο η χρήση της ατομικής ενέργειας και οι χαμηλές τιμές του πετρελαίου περιόρισαν δραστικά το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Όμως η ρύπανση του περιβάλλοντος και οι διαδοχικές ενεργειακές κρίσεις υποχρέωσαν ξανά τις τεχνολογικά αναπτυγμένες χώρες να ενδιαφερθούν έντονα για αυτή τη καθαρή και αρχαία ενεργειακή πηγή του πλανήτη μας, τον άνεμο.

## 8.2 Οι Αιολικές μηχανές στην Ελλάδα

Στη χώρα μας η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στη ναυσιπλοΐα ήταν καθιερωμένη από αρχαιοτάτων χρόνων, ενώ ιστορικές μαρτυρίες αναφέρουν ότι και οι ανεμόμυλοι ήταν ήδη γνωστοί στα νησιά του Αρχιπελάγους και στην Κρήτη από το 2000 π.Χ. . Αρκετά χρόνια αργότερα και κυρίως στα ανατολικά τμήματα της ελληνικής επικράτειας, τα οποία είναι ιδιαίτερα ανεμώδη, η άλεση των δημητριακών κατά τη Βυζαντινή εποχή και κατά την τουρκοκρατία μέχρι τις αρχές του εικοστού αιώνα γινόταν αποκλειστικά με τη χρήση ανεμόμυλων και νερόμυλων. Ο αριθμός των ανεμόμυλων ήταν σημαντικός κυρίως στις Κυκλάδες, στη Ρόδο, στη Χίο, στην Ανατολική Κρήτη αλλά και γενικότερα στα νησιά του Αιγαίου, στα ανατολικά παράλια της ηπειρωτικής χώρας και στις υψηλές ορεινές περιοχές της ενδοχώρας. Στατιστικά στοιχεία εμπειριστατωμένης μελέτης με τίτλο «Ο ανεμόμυλος στις Κυκλάδες» αναφέρει την ύπαρξη 644 εν λειτουργία ανεμόμυλων στα νησιά των Κυκλάδων περί τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα.

Στην πατρίδα μας αναπτύχθηκε ένας τύπος ανεμόμυλου οριζόντιου άξονα, διαφορετικός από εκείνους άλλων βορειοευρωπαϊκών χωρών, προσαρμοσμένος στις ανάγκες και στο κλίμα της περιοχής (Μεσογειακός ανεμόμυλος ). Οι ανεμόμυλοι αυτοί είναι πέτρινοι με πάνινα ( όπως και ο Πορτογαλικός ) πτερύγια. Βέβαια, σε ορισμένες περιοχές από τα υπάρχοντα πέτρινα κτίσματα φαίνεται ότι λειτούργησαν και ανεμόμυλοι κατακόρυφου άξονα, πιθανότατα τύπου «πανεμόνιο». Μάλιστα σε βιβλίο του 1486 περιγράφεται ανεμόμυλος με κατακόρυφο άξονα εγκατεστημένος στη Κρήτη. Πιο συγκεκριμένα, στη χώρα μας χρησιμοποιήθηκαν ανεμόμυλοι κυρίως στην ανατολική Κρήτη για την άντληση ποτιστικού νερού από πηγάδια. Οι ανεμόμυλοι αυτοί είναι σιδερένιοι με υφασμάτινα πανιά, και αναφέρονται συγκεντρωμένοι κυρίως στο οροπέδιο του Λασιθίου. Την εποχή της άνθησής τους, πριν το 1940, υπήρχαν έξι χιλιάδες ανεμόμυλοι, ενώ στα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα λειτουργούσαν περίπου χίλιοι. Οι κατασκευαστές των ανεμόμυλων αυτού του τύπου είναι ντόπιοι σιδηρουργοί, ενώ το κόστος ενός τέτοιου ανεμόμυλου το 1960 ήταν περίπου πέντε χιλιάδες δραχμές. Κάθε ανεμόμυλος στο Λασιθί αντλεί κατά μέσο όρο 35 έως 50 m<sup>3</sup> από ένα μέσο βάθος 15m (μέση παροχή 4 m<sup>3</sup>/h) εργαζόμενος 9÷10 ώρες ημερησίως. Παράλληλα, στη Σητεία (ανατολική Κρήτη) αναφέρθηκε μια ενδιαφέρουσα μέθοδος αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας, η οποία διερευνάται ως προς την οικονομικοτεχνική ελκυστικότητα της και σήμερα. Στην περίπτωση της Σητείας η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται για την άντληση νερού με την βοήθεια ανεμόμυλων, το οποίο αποθηκεύεται σε υψηλή δεξαμενή. Στη συνέχεια η διαθέσιμη υδατόπτωση χρησιμοποιείται κατά βούληση σε προσκείμενους νερόμυλους.

Όμως, αν και ο μεγαλύτερος αριθμός ανεμόμυλων στη χώρα μας ήταν εγκατεστημένος στην ανατολική Κρήτη, οι γνωστότεροι ανεμόμυλοι, κυρίως για λόγους τουριστικούς, είναι οι ανεμόμυλοι της Μυκόνου. Η ύπαρξη των ανεμόμυλων στη Μύκονο είναι εξακριβωμένη από τον 15<sup>ο</sup> αιώνα, με πρώτη αναφορά στον



ανεμόμυλο της θέσης «Κάστρο», του οποίου τα θεμέλια διεσώζοντο μέχρι πρόσφατα. Ιστορικά η λειτουργία των ανεμόμυλων μνημονεύεται αρχικά στο διάταγμα της Βενετίας της 8<sup>ης</sup> Μαρτίου 1518, όπου μεταξύ των αιτημάτων των Μυκονίων που γίνονται αποδεκτά περιλαμβάνεται και η άρση της απαγόρευσης άλεσης από τους αλευρόμυλους κατά τις βραδινές ώρες του Σαββάτου και της Κυριακής.

Αργότερα ο Tournefort (1700) στο σχεδιάγραμμα του λιμανιού της Μυκόνου σημειώνει δέκα (10) ανεμόμυλους κατά παράταξη στην περιοχή με την τοπωνυμία «Κάτω Μύλοι» ή «Πολλοί Μύλοι». Το 1755 στο κτηματολόγιο της Μυκόνου μνημονεύονται δεκαεπτά (17) ανεμόμυλοι. Η επίσημη δε έκθεση του 1828 αναφέρει εικοσιεννέα (29) ανεμόμυλους. Τέλος, σύμφωνα με προφορικές παραδόσεις, ο μέγιστος αριθμός των ανεμόμυλων του νησιού έφθασε τους σαράντα (40).



**Σχήμα 8.5** Παραδοσιακός ανεμόμυλος στην παραλία Αϊ Γιάννης Λευκάδας. Τον 19<sup>ο</sup> αιώνα λειτουργούσαν εδώ επτά ανεμόμυλοι που έφεραν κυρίως ρώσικα ονόματα λόγω των δημητριακών που έρχονταν απ' τη Ρωσία για να αλέσουν.

Η ικανότητα αλέσματος των ανεμόμυλων στις διάφορες θέσεις της χώρας κυμαίνεται από 20÷70 kg σιτηρών την ώρα, ανάλογα με το προσανατολισμό της πτερύγωσης και την ταχύτητα του ανέμου. Η δυναμικότητα ενός ανεμόμυλου της Μυκόνου εκτιμάται στον ένα τόνο σιταριού σε κάθε εργάσιμο δωδεκάωρο. Επομένως, θεωρώντας τη λειτουργία είκοσι (20) ανεμόμυλων για εξήντα (60) ημέρες ετησίως, η αλεστικότητα της Μυκόνου ανέρχεται σε τέσσερις χιλιάδες (4000) τόνους σιταριού το χρόνο. Επίσης, σύμφωνα με πληροφορίες, στο παρελθόν οι ανεμόμυλοι της Μυκόνου χρησιμοποιήθηκαν και για την άλεση του φλοιού πεύκου και βελανιδιών για χρήση στη βυρσοδεψία.

Αρκετοί ανεμόμυλοι (επτά) βρίσκονται και σήμερα στη θέση «Κάτω Μύλοι», είναι δε οικοδομημένοι επάνω στο έδαφος του «κοινού των Μυκονίων» και επομένως ανήκουν στους σημερινούς τους ιδιοκτήτες μόνο κατά το κτίσμα και τις τεχνικές εγκαταστάσεις. Όσοι από αυτούς βρίσκονται σε καλή κατάσταση χρησιμοποιούνται σήμερα ως κατοικίες. Ο μοναδικός ανεμόμυλος της περιοχής που βρίσκεται σε καλή κτιριακή και λειτουργική κατάσταση και είναι σε θέση να λειτουργεί και σήμερα είναι ο γνωστός «Μύλος του Γερώνυμου», όπου Γερώνυμος είναι το ψευδώνυμο του παλαιού του ιδιοκτήτη. Ο μύλος αυτός έχει ηλικία περίπου τριακοσίων (300) ετών και δε σταμάτησε να λειτουργεί από της ιδρύσεώς του. Ανατολικά του μύλου αυτού και κοντά στο δρόμο που οδηγεί στην Άνω Μερά βρίσκεται ένας άλλος ανεμόμυλος με την προσωνομία «Μύλος του Πεντάρα». Και οι δύο αυτοί ανεμόμυλοι δεν παρουσιάζουν αξιόλογες διαφορές, εκτός από το γεγονός ότι ο ανεμόμυλος του «Μύλου του Πεντάρα» έχει δέκα (10) αντένες έναντι των δώδεκα (12) του «Μύλου του Γερώνυμου», ο οποίος είναι και ο πλέον καθιερωμένος αριθμός. Τα τελευταία χρόνια σε όλα τα νησιά των Κυκλάδων λιγότεροι από δέκα ανεμόμυλοι συνεχίζουν να εξυπηρετούν τον αρχικό προορισμό τους (Φολέγανδρος, Σίκινος, Δονούσα) ή δουλεύουν εποχικά για κτηνοτροφίες (Τήνος, Νάξος) ή «λειτουργούν» για τουριστικούς λόγους (Μύκονος).



**Σχήμα 8.6** Το παρελθόν και το μέλλον παντρεμένα μαζί. Παραδοσιακός ανεμόμυλος και σύγχρονες ανεμογεννήτριες στο Κόρωνο Νάξου.

### 8.3 Μειονεκτήματα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας

Όπως προαναφέρθηκε, η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν από τον άνθρωπο, τόσο στη ναυτιλία όσο στην άρδευση και στη γεωργία. Αντικαταστάθηκε όμως από άλλες πηγές ενέργειας για ολόκληρο σχεδόν τον εικοστό αιώνα λόγω των σημαντικών μειονεκτημάτων που παρουσίαζε σε σύγκριση με τις υπόλοιπες «πυκνότερες» μορφές ενέργειας. Βέβαια, σήμερα οι χρησιμοποιούμενες μηχανές δεν έχουν καμία σχέση τόσο από αεροδυναμικής σκοπιάς όσο και από κατασκευαστικής αντοχής και ποιότητας με τους θρυλικούς ανεμόμυλους, εμφανίζουν δε αξιοσημείωτη συγκέντρωση ισχύος. Παρ' όλα αυτά είναι χρήσιμο να εξετάσουμε τα κυριότερα μειονεκτήματα που αποδίδονται στην αιολική ενέργεια, ώστε να αποκτήσουμε μια πλέον ολοκληρωμένη εικόνα. Για παράδειγμα:

- i. Η **χαμηλή ροή** αξιοποιήσιμης κινητικής ενέργειας του ανέμου ( $\text{Watt/m}^2$ ) κατατάσσει την αιολική ενέργεια στις «αραιές» μορφές ενέργειας. Τυπικές τιμές ροής της αξιοποιούμενης αιολικής ισχύος κυμαίνονται μεταξύ  $200 \text{ W/m}^2$  και  $500 \text{ W/m}^2$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση είτε μεγάλου αριθμού ανεμοκινητήρων είτε μηχανών μεγάλων διαστάσεων, για την παραγωγή της επιθυμητής ποσότητας ενέργειας. Σήμερα καταβάλλονται προσπάθειες αύξησης της συγκέντρωσης ισχύος των αιολικών μηχανών, οι οποίες σε επιλεγμένες περιπτώσεις πλησιάζουν ή και υπερβαίνουν τα  $600 \text{ W/m}^2$ .
- ii. Η **αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης** της ταχύτητας και της διεύθυνσης των ανέμων δε μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε την απαραίτητη αιολική ενέργεια τη στιγμή που τη χρειαζόμαστε. Το γεγονός αυτό μας υποχρεώνει να χρησιμοποιούμε τις αιολικές μηχανές κυρίως σαν εφεδρικές πηγές ενέργειας σε συνδυασμό πάντοτε με κάποια άλλη πηγή ενέργειας (π.χ. σύνδεση με ηλεκτρικό δίκτυο, παράλληλη λειτουργία με μονάδες Diesel κλπ).
- iii. Σε **περιπτώσεις διασύνδεσης** της αιολικής εγκατάστασης με το ηλεκτρικό δίκτυο η παραγόμενη ενέργεια δεν πληροί πάντοτε τις τεχνικές απαιτήσεις του δικτύου με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η τοποθέτηση αυτοματισμών ελέγχου, μηχανημάτων ρύθμισης τάσεως και συχνότητας, καθώς και ελέγχου της άεργης ισχύος. Η εξέλιξη της τεχνολογίας σήμερα έχει δώσει λύσεις στα περισσότερα από τα αναφερόμενα προβλήματα, ιδιαίτερα με την κατασκευή ανεμογεννητριών μεταβλητού βήματος και μεταβλητών στροφών. Παρ' όλα αυτά υπάρχει κάποιο αυξημένο κόστος για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της παραγόμενης ενέργειας, το οποίο προστίθεται στο σημερινό κόστος της παραγόμενης Kwh. Τέλος, ακόμα και σήμερα εξακολουθούν να μας απασχολούν οι διαδικασίες ζεύξης-απόζευξης αιολικών μηχανών στο ηλεκτρικό δίκτυο λόγω των μεταβατικών φαινομένων που αυτές προκαλούν. Λόγω των τελευταίων προβλημάτων απαγορεύεται η διασύνδεση, πέραν

ενός ορίου αποδιδόμενης ισχύος, αιολικών μηχανών σε μικρά τοπικά ηλεκτρικά δίκτυα, τα οποία όμως αποτελούν και την πλειοψηφία των δικτύων του ελληνικού αρχιπελάγους.

iv. Αντίστοιχα, σε **περιπτώσεις αυτόνομων μονάδων** είναι απαραίτητη η ύπαρξη συστημάτων αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας, σε μια προσπάθεια να έχουμε συγχρονισμό της ζήτησης και της διαθέσιμης ενέργειας. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται αυξημένο αρχικό κόστος (λόγω της προσθήκης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας) και βέβαια επιπλέον απώλειες ενέργειας κατά τις φάσεις μετατροπής και αποθήκευσης, καθώς και αυξημένες υποχρεώσεις συντήρησης για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας.

v. Ένα ακόμα μειονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι η **περιορισμένη δυνατότητα αξιοποίησης** του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού. Στην πραγματικότητα αξιοποιούμε μερικώς μόνο την κινητική ενέργεια του ανέμου, η οποία αντιστοιχεί σε ένα περιορισμένο φάσμα ταχύτητας του ανέμου.

vi. Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψιν ότι από το σύνολο της απορροφούμενης από μια ανεμογεννήτρια αιολικής ενέργειας μόνο ένα **περιορισμένο μέρος της μετατρέπεται σε ωφέλιμη ενέργεια** λόγω των αεροδυναμικών και των μηχανικών απωλειών και των αντίστοιχων περιορισμών.

vii. Τέλος, θα πρέπει να επισημάνουμε το σχετικά **υψηλό κόστος της αρχικής επένδυσης** για την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας, ειδικά μάλιστα για μεμονωμένες περιπτώσεις αιολικών μηχανών μικρού μεγέθους. Στο σημείο αυτό πρέπει να προσθέσουμε ότι η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας και ο ανταγωνισμός μεταξύ των κατασκευαστών έχει τα τελευταία χρόνια συμπίεσει σημαντικά τις τιμές των ανεμογεννητριών, βελτιώνοντας ταυτόχρονα και την αξιοπιστία τους.



## 8.4 Πλεονεκτήματα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας

Αν και δεν είναι δυνατό να αγνοήσουμε τα μειονεκτήματα που συνοδεύουν την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, είναι επίσης σημαντικό να ληφθούν υπόψιν και οι παρακάτω παράγοντες, ορισμένοι από τους οποίους ισχύουν ιδιαίτερα στη χώρα μας, ώστε να διαμορφώσουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα για τις δυνατότητες και τους περιορισμούς αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα:

i. Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια **ανανεώσιμη πηγή ενέργειας**. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η αιολική ενέργεια δεν εξαντλείται σε αντίθεση με το σύνολο των συμβατικών καυσίμων, των οποίων τα βεβαιωμένα αποθέματα του πλανήτη μας αναμένεται να εξαντληθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα.

ii. Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια **καθαρή μορφή ενέργειας, ήπια προς το περιβάλλον**. Η χρήση της δεν επιβαρύνει τα οικοσυστήματα των περιοχών εγκατάστασης και παράλληλα αντικαθιστά ιδιαίτερα ρυπογόνες πηγές ενέργειας, όπως το κάρβουνο, το πετρέλαιο και η πυρηνική ενέργεια. Τα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα των περισσότερων αναπτυγμένων χωρών καθώς και της χώρας μας (π.χ. Αθήνα, Πτολεμαΐδα, Μεγαλόπολη κ.λ.π.) καθιστούν την αιολική ενέργεια ιδιαίτερα ελκυστική σε σχέση με τη προστασία του περιβάλλοντος.

Επιπλέον, **ειδικά για τη χώρα μας** ισχύουν και τα ακόλουθα στοιχεία:

iii. Η χώρα μας και κυρίως τα νησιωτικά συμπλέγματα του Αιγαίου διαθέτουν πολύ **υψηλό αιολικό δυναμικό** και μάλιστα άριστης ποιότητας. Πράγματι στα περισσότερα νησιά του Αρχιπελάγους εμφανίζονται άνεμοι υψηλής ταχύτητας και μεγάλης διάρκειας σχεδόν ολόκληρο το έτος.

iv. Η **περιορισμένη συμβολή των ανανεώσιμων πηγών** ενέργειας στο εθνικό ενεργειακό ισοζύγιο, με αμελητέα μάλιστα τη συμβολή της αιολικής ενέργειας, καθιστά προφανές τις σχεδόν απεριόριστες δυνατότητες σύστασης αιολικών εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας, σε μια αγορά με σημαντικό αριθμό αναξιοποίητων θέσεων εγκατάστασης.

v. Η **ισχυρή εξάρτηση της χώρας μας** από εισαγόμενα καύσιμα, τα οποία οδηγούν αφενός σε συναλλαγματική αιμορραγία τη χώρα μας, αφετέρου σε εξάρτησή της από χώρες εκτός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ας σημειωθεί ότι, η χώρα μας εξαρτάται κυρίως από το εισαγόμενο πετρέλαιο, που προέρχεται από χώρες υψηλού πολιτικό-οικονομικού κινδύνου και οι οποίες εμπλέκονται αρκετά συχνά σε πολιτικές και στρατιωτικές κρίσεις. Με τον τρόπο αυτό το μεσοπρόθεσμο κόστος παραγωγής ενέργειας, η οποία αποτελεί τον κυριότερο ίσως παραγωγικό συντελεστή για πλήθος βασικών αγαθών, δε μπορεί να προβλεφθεί με λογικά σενάρια, πράγμα που οδηγεί σε υπερβολική αβεβαιότητα τον αντίστοιχο σχεδιασμό της εθνικής οικονομίας.

vi. Η **υψηλή σεισμικότητα** της χώρας μας εγκυμονεί κινδύνους για τις θερμοηλεκτρικές και κυρίως τις πυρηνικές εγκαταστάσεις, με αποτέλεσμα να θεωρείται προβληματική στο άμεσο μέλλον η κατασκευή πυρηνικών μονάδων στη χώρα μας. Προφανώς, με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα είναι δυνατή η δημιουργία υψηλής ασφάλειας συμβατικών μονάδων, με δυσανάλογη όμως αύξηση του κόστους της παραγόμενης ενέργειας.

vii. Η σημαντική **διασπορά και ανομοιομορφία του κόστους παραγωγής** της ηλεκτρικής ενέργειας στα διάφορα τμήματα της χώρας μας έχει ως αποτέλεσμα, ακόμα και στην περίπτωση που η μέση τιμή διάθεσης της ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα μας είναι ελαφρώς κατώτερη του οριακού κόστους της παραγόμενης αιολικής Kwh, σε αρκετά νησιά το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας να είναι πολλαπλάσιο, ενίοτε και υπερδεκαπλάσιο του οριακού κόστους παραγωγής της Δ.Ε.Η. .

Από τα διαθέσιμα στοιχεία, ενώ το οριακό κόστος παραγωγής της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού κυμαίνεται μεταξύ των 0,068 και των 0,072 Euro/Kwh για τα έτη 2000 και 2002, τιμή που βασίζεται σε ιστορικά στοιχεία, το αντίστοιχο μέσο κόστος λειτουργίας των αυτόνομων σταθμών παραγωγής «ΑΣΠ» κυμαίνεται το ίδιο διάστημα μεταξύ 0,13 και 0,15 Euro/Kwh. Την ίδια στιγμή προκύπτει ότι υπάρχουν ΑΣΠ, των οποίων και μόνο η συμμετοχή του καυσίμου στο κόστος παραγωγής υπερβαίνει κατά πολύ το οριακό κόστος παραγωγής της επιχείρησης.

Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι είναι δυνατή η αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων από την αιολική ενέργεια, τουλάχιστον στις παραπάνω νησιωτικές περιοχές, δεδομένου μάλιστα ότι αυτές διαθέτουν και το καλύτερο αιολικό δυναμικό.

viii. Η δυνατότητα **τόνωσης της ελληνικής κατασκευαστικής δραστηριότητας** με προϊόντα υψηλής Εγχώριας Προστιθέμενης Αξίας (Ε.Π.Α.) και συγκριτικά χαμηλού επενδυτικού κόστους, όπως θα μπορούσε να αποτελέσει η απόφαση συμπαραγωγής ανεμογεννητριών στη χώρα μας, συνεισφέροντας ταυτόχρονα και στη μείωση της ανεργίας.

ix. Η **υψηλή Ε.Π.Α.**, η οποία συνοδεύει την απόφαση εγχώριας παραγωγής ανεμογεννητριών. Η εκτιμώμενη Ε.Π.Α. μπορεί να φθάσει και να υπερβεί με τη σταδιακή απόκτηση εμπειρίας και στο 90% του συνολικού κόστους μιας ανεμογεννήτριας, ενισχύοντας ταυτόχρονα την εθνική οικονομία.

x. Η **αξιόλογη εγχώρια ηλεκτρο-μηχανολογική εμπειρία**, καθώς και το σημαντικό επιστημονικό-ερευνητικό ενδιαφέρον και δραστηριότητα στη γνωστική περιοχή της αιολικής ενέργειας.

xi. Η **δυνατότητα αξιοποίησης επενδυτικών προγραμμάτων**, που χρηματοδοτούνται εν μέρει από ελληνικούς και κοινοτικούς φορείς, δεδομένων των υψηλών επιχορηγήσεων και του συγκριτικά χαμηλού συνολικού κόστους που συνοδεύουν παρόμοιες επενδύσεις σε τομείς αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών

ενέργειας. Επιπλέον, είναι δυνατή στη περίπτωση ίδρυσης αιολικών πάρκων η σταδιακή εγκατάσταση των μηχανών, με διαχρονική κατανομή του κόστους επένδυσης σύμφωνα με το σχεδιασμό του επενδυτή.

xii. Η **έλλειψη ισχυρών ελληνικών οικονομικών συμφερόντων**, που έχουν επενδύσει σε άλλες μορφές ενέργειας, όπως για παράδειγμα, η πυρηνική ενέργεια στη Γαλλία, το πετρέλαιο στις Αραβικές χώρες, και τα όποια θα μπορούσαν να αποθαρρύνουν τυχόν κυβερνητικό ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Πράγματι, τα τελευταία χρόνια με την ενθάρρυνση της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η πολιτεία έχει δείξει αυξημένο ενδιαφέρον για τη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στην εγχώρια ενεργειακή αγορά, με τη θέσπιση νομικού πλαισίου (π.χ. νόμος 2244/94, 2773/99) αλλά και τη χρηματοδότηση αντίστοιχων έργων (π.χ. νόμος 2234/94 ή 2601/98), χωρίς βέβαια να αρθούν πλήρως οι αντιξοότητες που συνοδεύουν τη λειτουργία της κρατικής μηχανής και των αντίστοιχων γραφειοκρατικών μηχανισμών. Αρνητική επίσης εξέλιξη αποτελεί η πολιτική επιλογή της Ελληνικής πολιτείας υπέρ της αυξημένης διείσδυσης του εισαγόμενου φυσικού αερίου στο εγχώριο ενεργειακό ισοζύγιο.

xiii. Η **δυνατότητα αποκεντρωμένης ανάπτυξης** μέσα από αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας, γεγονός που μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την οικονομική δραστηριότητα των τοπικών κοινωνιών.

xiv. Η **αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας**, που περιορίζει τις απώλειες και το κόστος μεταφοράς και συνεισφέρει στην υποστήριξη των τοπικών δικτύων με έγχυση ηλεκτρικής ισχύος πλησίον των περιοχών υψηλής κατανάλωσης.

Συνοψίζοντας τα ανωτέρω πιστεύουμε ότι τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας είναι ασυγκρίτως περισσότερα και σοβαρότερα από τα υπάρχοντα μειονεκτήματα. Για το λόγο αυτό η στρατηγική απόφαση να αξιοποιηθεί στη χώρα μας το υπάρχον αιολικό δυναμικό, καθώς και να αναπτυχθούν κατασκευαστικές μονάδες παραγωγής ανεμογεννητριών μπορεί κάλλιστα να οδηγήσει σε οικονομικά βιώσιμες αλλά και ελκυστικές επενδύσεις, μη λαμβάνοντας στους ισολογισμούς μας υπόψιν τα παράλληλα οφέλη, που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος και την οικονομική ανεξαρτησία της χώρας μας.

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψιν την τοπογραφία της χώρας μας και την αφθονία των μικρών νησιών και των απομονωμένων αγροκτημάτων, πρέπει να ενθαρρύνουμε και την εγκατάσταση ανεμογεννητριών μικρών-μεσαίων διαστάσεων από ιδιώτες. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τους πιο συντηρητικούς υπολογισμούς της Ε.Ε., υπάρχουν στην Ευρωπαϊκή ένωση πάνω από πεντακόσιες εξήντα χιλιάδες (560.000) ιδιωτικές απομονωμένες αγροικίες, από τις οποίες περίπου το 10% ανήκει στη χώρα μας. Οι αγροικίες αυτές δεν έχουν πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο, με αποτέλεσμα η πιθανή εγκατάσταση ανεμογεννητριών να συνεισφέρει στην επίλυση των ενεργειακών τους προβλημάτων.

Τέλος στην περίπτωση κατά την οποία θα αποφασιστεί η εγχώρια παραγωγή

σημαντικού αριθμού ανεμογεννητριών, οι αντίστοιχες κατασκευαστικές εταιρίες θα έχουν τη δυνατότητα να επωφεληθούν και από τα λεγόμενα «φαινόμενα οικονομίας κλίμακας», τα οποία συνοδεύουν τη μαζική παραγωγή προϊόντων.

## 8.5 Εφαρμογές των ανεμοκινητήρων σήμερα

Η κλιμάκωση των ανεμοκινητήρων σύμφωνα με τις κατασκευές που έχουν γίνει σήμερα γίνεται βάσει της ισχύος τους και διακρίνονται σε:

- Ανεμοκινητήρες μικρής ισχύος μέχρι 20 KW
- Ανεμοκινητήρες μέσης ισχύος 20-250 KW
- Ανεμοκινητήρες μεγάλης ισχύος >250 KW

Οι ανεμοκινητήρες μικρής ισχύος χρησιμοποιούνται σε απομονωμένες περιοχές για κάλυψη αγροτικών αναγκών,- ιδιαίτερα για άντληση και θέρμανση νερού, θέρμανση κατοικίας, φωτισμό και άλλες μικροεφαρμογές. Τις περισσότερες φορές η λύση αυτή είναι οικονομικότερη. Οι ανεμοκινητήρες του τύπου αυτού είναι ανεξάρτητοι, μη συνδεδεμένοι με δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιούν γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που φορτίζει τους συσσωρευτές.

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με ανεμοκινητήρες μέσης και μεγάλης ισχύος μπορεί να γίνεται σε συνεργασία με δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

- (α) Λειτουργία ανεμοκινητήρα για εξοικονόμηση καυσίμου. Ο τρόπος αυτός λειτουργίας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη νησιωτική Ελλάδα όπου επικρατούν ισχυροί άνεμοι, και το κόστος της παραγόμενης KWh είναι υψηλό λόγω του αυξημένου κόστους του kg καυσίμου λόγω της θαλάσσιας μεταφοράς και του μικρού μεγέθους του σταθμού.
- (β) Λειτουργία ανεμοκινητήρα ως σταθμού βάσης θεωρώντας ότι η εγκατεστημένη ισχύς της Diesel μειώνεται κατά ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του ανεμοκινητήρα.
- (γ) Λειτουργία ως αντλητικού σταθμού για αποθήκευση νερού, και χρησιμοποίηση του στην υδροηλεκτρική του εκμετάλλευση.

Ειδικότερα συμπληρώνονται τα ακόλουθα:



### 8.5.1 Εφαρμογές άντλησης

Χαρακτηριστική περίπτωση είναι «το οροπέδιο με τους 10.000 ανεμόμυλους» όπως αποκαλείται το οροπέδιο του Λασιθίου της Κρήτης λόγω του αριθμού των ανεμόμυλων που χρησιμοποιούνται εκεί για άρδευση. Μια πιο μοντέρνα παραλλαγή εφαρμογής άντλησης είναι το σύστημα άντλησης με ανεμόμυλους που σχεδιάστηκε στον Καναδά με σκοπό την άντληση νερού και κατόπιν την με μεγάλη πίεση εκτόξευση του ως τεχνητή βροχή για πότισμα. Στις εφαρμογές άντλησης μπορούν να αναφερθούν και σύγχρονα συστήματα αφαλάτωσης στα οποία ο ανεμοκινητήρας μέσω αντλιών προωθεί (υπόγλυκο-θαλασσινό) νερό δια μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης και παράγει πόσιμο νερό.

Εκτός των αυτόνομων αυτών μονάδων στις εφαρμογές άντλησης, τον τελευταίο καιρό πολλά πειραματικά κέντρα μελετούν την συνεργασία αιολικών συστημάτων με ντιζελοκινητήρες ή ηλεκτροκίνητες μονάδες άντλησης με σκοπό την εξοικονόμηση καυσίμου. Από τα μέχρι τώρα αποτελέσματα προκύπτει ότι υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Τέλος μελετάται η συνεργασία αιολικών μηχανών και μικρών υδροστροβίλων για τη δημιουργία αυτόνομων υδροηλεκτρικών σταθμών. Στην περίπτωση αυτή οι ανεμογεννήτριες θα προωθούν νερό στον ταμιευτήρα υψηλής ενεργειακής στάθμης απ' όπου και όταν απαιτείται θα τροφοδοτείται ο υδροστρόβιλος του σταθμού. Το ενεργειακό αυτό σχέδιο είναι ελκυστικό δεδομένου ότι λύνει το πρόβλημα της αποθήκευσης της ενέργειας ενώ παρέχει συγχρόνως αυτονομία.

### 8.5.2 Εφαρμογές θερμότητας

Η μηχανική κίνηση που παράγεται από την ενέργεια του ανέμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας στην παραγωγή θερμότητας είτε με την τριβή μεταξύ των στερεών είτε κατάθλιψη υγρών. Η θερμότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση χώρων, θερμοκηπίων, στη βιομηχανία, στην αποξήρανση γεωργικών προϊόντων κ.α.. Αξιόλογη ήταν η προσπάθεια που έγινε σε χωριό της Δανίας, όπου οι μαθητές και καθηγητές σχολείου κατασκεύασαν μια ανεμογεννήτρια 2 MW για θέρμανση των κτιριακών εγκαταστάσεων του σχολείου και για παροχή ζεστού νερού.

### 8.5.3 Εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρισμού

Η μηχανική ενέργεια του δρομέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κίνηση γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το παραγόμενο ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιείται για τη φόρτιση συσσωρευτών (μικρές μονάδες) ή να διοχετεύεται απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε στην περίπτωση αυτή γίνεται εξοικονόμηση καυσίμου από τον κεντρικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής. Μια άλλη δυνατότητα με πολύ καλές προοπτικές είναι η χρήση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για ηλεκτρόλυση νερού και η αποθήκευση του παραγόμενου υδρογόνου. Το υδρογόνο θα

μπορούσε να μεταφερθεί σε άλλες θέσεις για καύση (π.χ. κινητήρες αυτοκινήτων) με προϊόν καύσης το νερό.

## 8.6 Προοπτικές εφαρμογής ανεμοκινητήρων στην Ελλάδα

Η χώρα μας βρίσκεται στην εύκρατη ζώνη όπου επικρατούν καλής ταχύτητας άνεμοι, συγχρόνως όμως έχει και ευνοϊκή διαμόρφωση εδάφους που συμβάλει στην επαύξηση της αιολικής ενέργειας. Οι παραλιακές περιοχές, και ιδιαίτερα οι νησιωτικές, προσφέρονται για εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου, και εξασφαλίζουν ικανοποιητικό συντελεστή χρησιμοποίησης της εγκατάστασης. Επομένως τα νησιά μας διεκδικούν πρωταρχική θέση στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, γι' αυτό και εκεί παλαιότερα γινόταν σε μεγάλη κλίμακα εκμετάλλευση της ενέργειας αυτής, αλλά και γιατί δεν υπήρχαν πρωτογενείς μορφές ενέργειας.

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας θα μπορούσε να καλύψει ένα μεγάλο μέρος των αναγκών των νησιών μας και να γίνει πηγή εθνικού πλούτου. Στο νησιωτικό χώρο εξ άλλου δεν εμφανίζονται τυφώνες και υπάρχει πνοή ανέμου όλο το χρόνο με ελάχιστες ημέρες άπνοιας.

Σήμερα οι ανάγκες των νησιών σε ενέργεια καλύπτονται από τους αυτόνομους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι είναι τοπικοί Ντιζελοηλεκτρικοί σταθμοί, εκτός από Κρήτη και Ρόδο, ενώ μερικά νησιά που είναι κοντά στην ηπειρωτική πλευρά έχουν συνδεθεί και τροφοδοτούνται από τα κεντρικά δίκτυα. Ένας αριθμός νησιών έχουν συνδεθεί μεταξύ τους και τροφοδοτούνται από κεντρικούς αυτόνομους σταθμούς. Για χρόνια προβλέπεται ότι τα νησιά που είναι απομακρυσμένα από την ηπειρωτική Ελλάδα, θα στηρίζουν την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών στην αυτόνομη παραγωγή και θα παραμένουν ανεξάρτητα από το εθνικό δίκτυο.

Οι δαπάνες για προμήθεια και εγκατάσταση μονάδων παραγωγής, αγορά και μεταφορά καυσίμων, λειτουργία και συντήρηση των μονάδων, στρεφόμενη και εγκαταστημένη εφεδρεία για την εξυπηρέτηση μικρών φορτίων με μεγάλες μεταβολές, επιβαρύνουν υπέρμετρα το κόστος παραγωγής. Αλλά και η ανάγκη επέκτασης των δικτύων για εξυπηρέτηση των διασπαρμένων καταναλωτών δημιουργεί κόστος. Για όλα αυτά χρειάζεται διερεύνηση και αναζήτηση της πιο πρόσφορης λύσης μέσα σε πλαίσιο οικονομικά αποδεκτό. Περιοχές που βρίσκονται μακριά από τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ή μικρά νησάκια που δεν δικαιολογείται η εγκατάσταση αυτόνομου σταθμού μπορούν να εξυπηρετηθούν με μικρές ανεμογεννήτριες ικανές να καλύψουν ανάγκες φωτισμού, άντλησης νερού, θέρμανσης νερού και κατοικίας, και ψύξης για συντήρηση τροφίμων. Οι ανεμογεννήτριες της ισχύος αυτής λειτουργούν και σε μικρές ταχύτητες ανέμου, έχουν απλή και ανθεκτική κατασκευή και για τις ανάγκες φωτισμού όταν υπάρχει άπνοια χρησιμοποιούν συστοιχία συσσωρευτών. Σ' αυτόν τον τύπο που από παλιά

χρησιμοποιείται έχουν γίνει τελευταία σημαντικές βελτιώσεις στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α.. Η χρήση του έχει επιβληθεί με ασφάλεια στη ναυτιλία για φωτοσημάνσεις, που οποιαδήποτε άλλη λύση θα ήταν υπερβολικά δαπανηρή. Ο ελληνικός θαλάσσιος χώρος έχει 700 φωτοσημάνσεις, από τις οποίες οι 70 είναι επιτηρούμενες και από αυτές μόνο οι 15 ηλεκτροδοτούνται. Επισημαίνεται η ανάγκη χρησιμοποίησης της αιολικής ενέργειας για ηλεκτροδότηση τουλάχιστον στις επιτηρούμενες φωτοσημάνσεις όπου το προσωπικό έχει πρόσθετες ανάγκες ρεύματος.

Επομένως οι ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενεργειακή εξυπηρέτηση απομακρυσμένων περιοχών, τόσο στο νησιωτικό όσο και στην ηπειρωτικό χώρο.

Ο τύπος της ανεμογεννήτριας ο οποίος μας ενδιαφέρει είναι αυτός των μέσων ισχύων, ο οποίος λειτουργεί παράλληλα με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα η λειτουργία παράλληλα με το δίκτυο γιατί όπως αναφέρθηκε προηγουμένως για πολλά ακόμα χρόνια τα περισσότερα νησιά θα στηρίζουν την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών στην αυτόνομη παραγωγή με μηχανές DIESEL. Στην περίπτωση αυτή σκοπός της ανεμογεννήτριας είναι η εξοικονόμηση καυσίμου, ενώ οι μηχανές DIESEL θα αναπληρώνουν την ανεμογεννήτρια στο δίκτυο όταν η πνοή του ανέμου είναι χαμηλή, καθώς επίσης θα καλύπτουν και τα φορτία αιχμής της περιοχής ή του νησιού. Στην ανεμογεννήτρια μέσης ισχύος υπάρχει ένα όριο στην ισχύ της σε σχέση με το μέγεθος και την κατανομή των φορτίων του δικτύου στο οποίο πρόκειται να συνδεθεί. Αυτό συμβαίνει γιατί οι απότομες και μεγάλοι εύρους μεταβολές της ισχύος της ανεμογεννήτριας επηρεάζουν τη λειτουργία του αυτόνομου σταθμού, και ειδικότερα τους ρυθμιστές στροφών των μηχανών DIESEL και τους ρυθμιστές τάσεως των γεννητριών με αποτέλεσμα την εμφάνιση ταλάντωσης τάσεως και συχνότητας στο δίκτυο.

Η ονομαστική ισχύς ανεμογεννήτριας (μέγιστη δυνατή ισχύς) θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι μικρότερη από το ελάχιστο φορτίο του εικοσιτετραώρου. Η τιμή αυτή της ονομαστικής ισχύος καθορίζεται από την επιτρεπτή αύξηση των στροφών της γεννήτριας, λόγω μείωσης φορτίου, ώστε η αύξηση αυτή να μην επιφέρει ουσιαστική μεταβολή στη συχνότητα του ρεύματος. Για την καμπύλη φορτίου του νησιού με μέγιστη ισχύ  $P$  (φορτίο αιχμής) εάν επιτρέπεται σχετική αύξηση της συχνότητας του ρεύματος κατά  $\delta$  θα πρέπει:

$$\delta = \frac{\eta - \eta_{FL}}{\eta_{FL}}$$

Όπου  $\eta_{FL}$  οι στροφές πλήρους φορτίου.

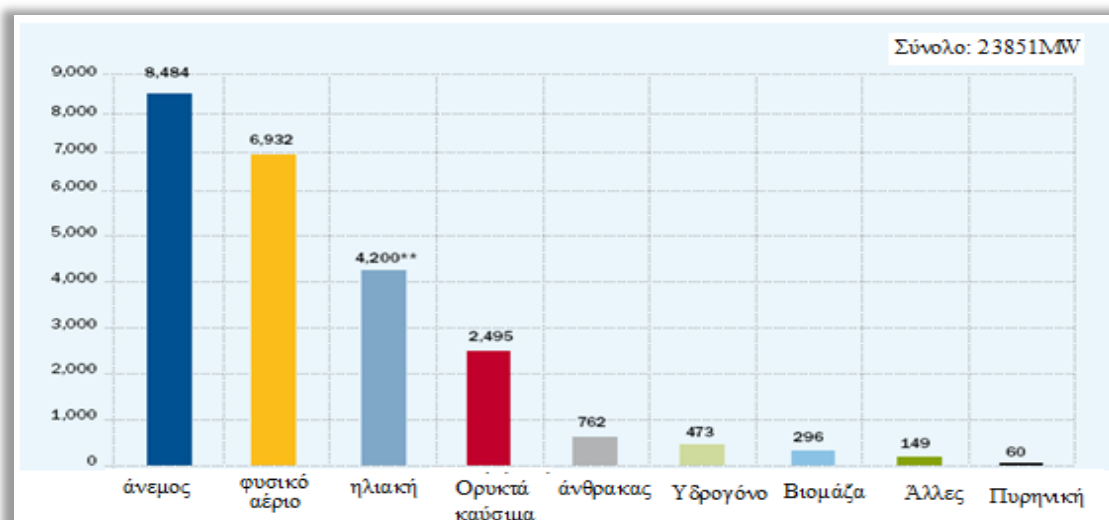
## 8.7 Κινητικότητα στον διεθνή και ελληνικό χώρο

Η Δανία υπήρξε η πρώτη Ευρωπαϊκή χώρα που υιοθέτησε μια επιτυχημένη πολιτική ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας και παρέμεινε η κυρίαρχη χώρα αναφορικά με την παραγωγή ηλεκτρισμού από αιολική ενέργεια μέχρι σήμερα. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η κλίμακα ανεμογεννητριών μεγέθους 300 με 500 KW άρχισε να εισάγεται με επιτυχία στην υπόλοιπη Ευρώπη, σηματοδοτώντας την έκρηξη της αιολικής ενέργειας στη Γερμανία. Κατά τη διάρκεια της ραγδαίας αυτής αύξησης, η Γερμανική βιομηχανία αιολικής ενέργειας έφτασε τα τεχνολογικά επίπεδα της Δανίας και τώρα διαδραματίζει πρωταγωνιστικό ρόλο στην παγκόσμια αγορά αιολικών συστημάτων. Παρόμοια πορεία ακολούθησε και η Ισπανία από τα μέσα της δεκαετίας του '90. Αυτή η ανάπτυξη κατέστη δυνατή λόγω της ύπαρξης ισχυρών αγορών με ασφαλείς συνθήκες για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά.

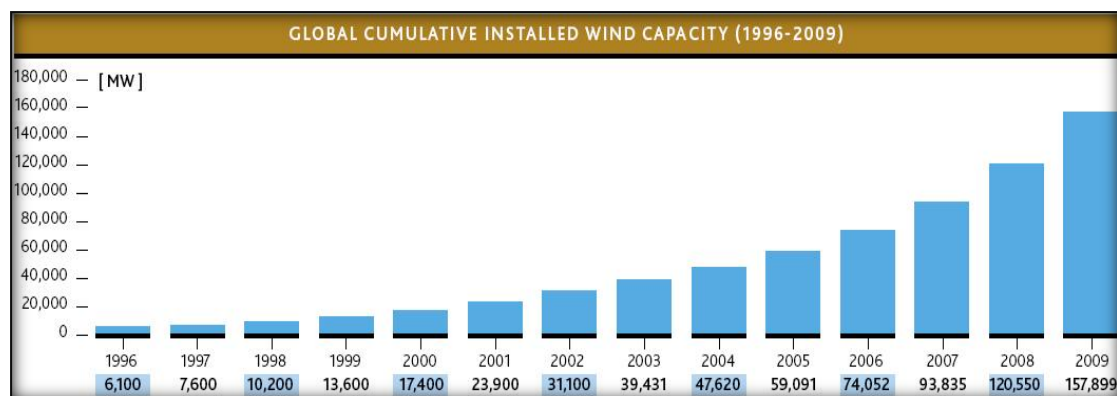
1973	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
0,2	7,3	19,3	24,6	35,3	59,6	53,4	26,1	35,4

Σχήμα 8.7 Χρηματοδότηση του προγράμματος αιολικής ενέργειας στις ΗΠΑ ( $10^6$  \$).

Η πορεία ανάπτυξης της αγοράς της αιολικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια υπήρξε συνεχής και εντυπωσιακή. Μέχρι το τέλος του 2008 περίπου 121 GW ανεμογεννητριών είχαν εγκατασταθεί και λειτουργούσαν σε 60 χώρες. Από αυτά τα 69,5 GW περίπου ήταν εγκατεστημένα στην Ευρωπαϊκή Ένωση.



Σχήμα 8.8 Εγκατεστημένη ισχύς στην ΕΕ το 2008.



Σχήμα 8.9 Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας 1996-2009.

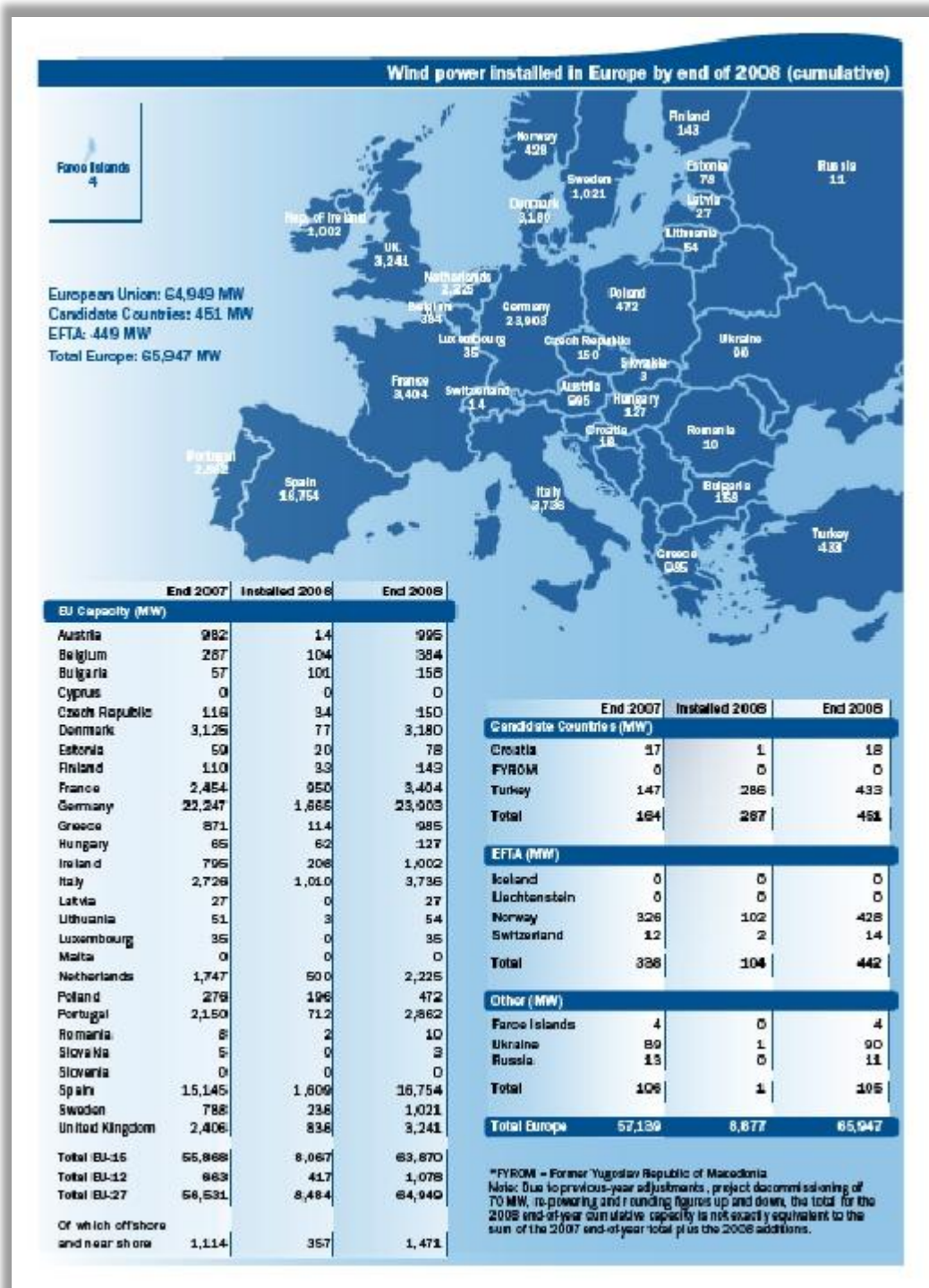
Οι πέντε σημαντικότερες αγορές αιολικής ενέργειας (Η.Π.Α., Γερμανία, Ισπανία, Κίνα και Ινδία) κάλυπταν περίπου το 72% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος το 2008. Οι παραδοσιακά κυρίαρχες στον τομέα χώρες της Ευρώπης (Γερμανία, Ισπανία και Δανία), πλαισιώνονται πλέον από την Ιταλία, τη Γαλλία, τη Μεγάλη Βρετανία, την Πορτογαλία και την Ολλανδία, οι οποίες έχουν εμφανίσει σημαντικούς ρυθμούς ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια. Η Γερμανική αγορά από μόνη της κατέχει περίπου το 36% της Ευρωπαϊκής αγοράς και το 20% της παγκόσμιας αγοράς.

Η ίδια τάση τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να διαφαίνεται όχι μόνο στην Ευρώπη όσο και σε άλλες περιοχές του κόσμου. Στο τέλος του 2008 υπήρχαν 9 κράτη με εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 3000 MW, ενώ το 2007 ήταν μονάχα 6. Πέραν των παραδοσιακών μεγάλων αγορών της δεκαετίας του 1990 (Γερμανία, Η.Π.Α., Ισπανία και Δανία), η Η.Π.Α., η Κίνα και η Ινδία εμφανίζουν ραγδαίους ρυθμούς ανάπτυξης. Οι υπόλοιπες χώρες με εγκατεστημένη ισχύ άνω των 3000 MW είναι η Ιταλία, η Γαλλία και η Μεγάλη Βρετανία.

Όπως προκύπτει υπάρχουν χώρες με πολύ μεγάλους ρυθμούς ανάπτυξης όπως η Γαλλία, η Ιταλία, η Μεγάλη Βρετανία και η Πορτογαλία που δεν κατατάσσονται στις 5 σημαντικότερες αγορές, αλλά εμφανίζουν μεγάλη δυναμική. Ειδικότερα, στην Ευρώπη αν και την τελευταία πενταετία έχουν κυριαρχήσει η Γερμανία και η Ισπανία, σταδιακά το ποσοστό εγκατάστασης στις δύο αυτές χώρες μειώνεται λόγω της αύξησης των άλλων αγορών που αναφέρθηκαν πιο πάνω, αν και το 2007 η τάση αυτή προσωρινά ανακόπτεται λόγω της σημαντικής αύξησης των εγκαταστάσεων στην Ισπανία.

Η βιομηχανία των ανεμογεννητριών αναπτύχθηκε σε εκείνες τις χώρες που δημιούργησαν και στήριξαν την ανάπτυξη των αιολικών εγκαταστάσεων. Σήμερα οι χώρες προέλευσης των βιομηχανιών που προμηθεύουν την παγκόσμια αγορά ταυτίζονται με αυτές που έχουμε τις περισσότερες εγκαταστάσεις. Τα τελευταία χρόνια παράλληλα με την σημαντική αύξηση της αγοράς παρατηρείται και η συγκέντρωση της παραγωγής σε όλο και λιγότερους και μεγαλύτερους κατασκευαστές. Οι τέσσερις μεγαλύτεροι κατασκευαστές (τρεις από τους οποίους είναι Ευρωπαίοι) κάλυπταν τα 3/5 της παγκόσμιας αγοράς το 2007. Οι Ευρωπαίοι κατασκευαστές στο σύνολό τους καλύπτουν περίπου τα 2/3 της παγκόσμιας αγοράς.

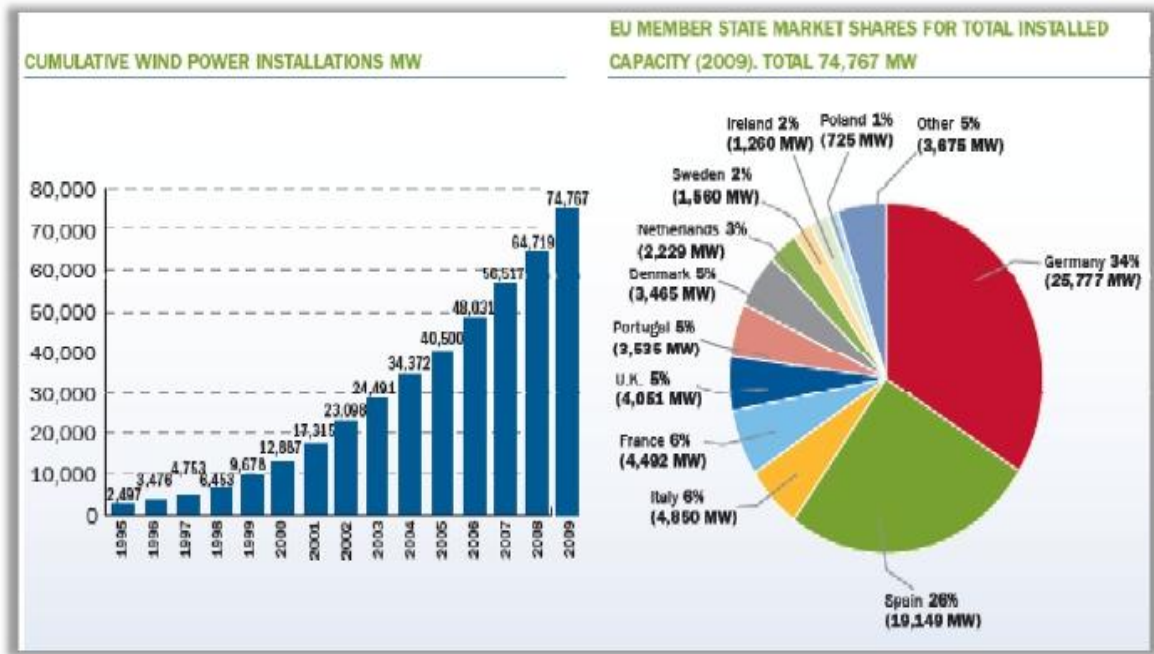
Τα τελευταία χρόνια παρατηρούμε επίσης την είσοδο στον τομέα της κατασκευής ανεμογεννητριών ,μεγάλων εταιριών του ενεργειακού χώρου (General Electric, Siemens) κυρίως μέσω της εξαγοράς υπαρχόντων κατασκευαστών



Σχήμα 8.10 Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ευρώπη το 2008.

Η τεχνολογία είναι πλέον διαθέσιμη και εξελίσσεται συνεχώς και τα κόστη έχουν μειωθεί σημαντικά. Στα 25 χρόνια ύπαρξης των ανεμογεννητριών στην αγορά, το μέγεθός τους εκατονταπλασιάστηκε όσον αφορά την ονομαστική ισχύ (από 50

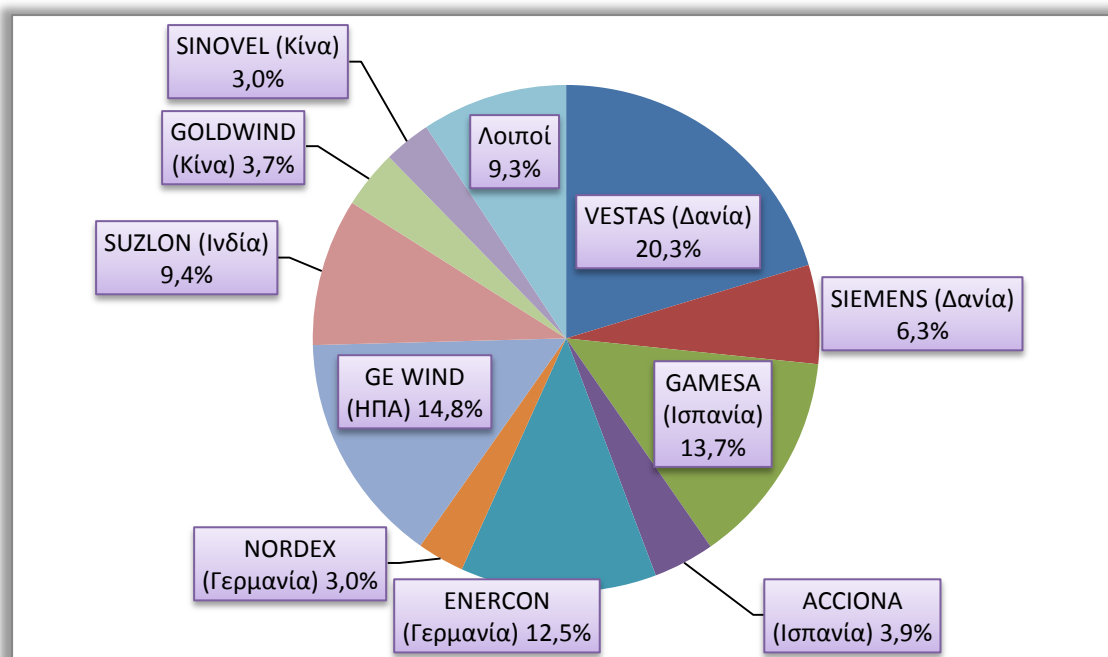
KW σε 500 KW) και οχταπλασιάστηκε όσον αφορά την διάμετρό τους (από 15m σε 124m). Το μέσο μέγεθος ανεμογεννητριών που εγκαθίσταται ετησίως αυξάνεται συνεχώς: από 240 KW το 1993 σε 890 KW το 2000 και σε 1492 KW το 2007.



Σχήμα 8.11 Συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην ΕΕ το 2009.

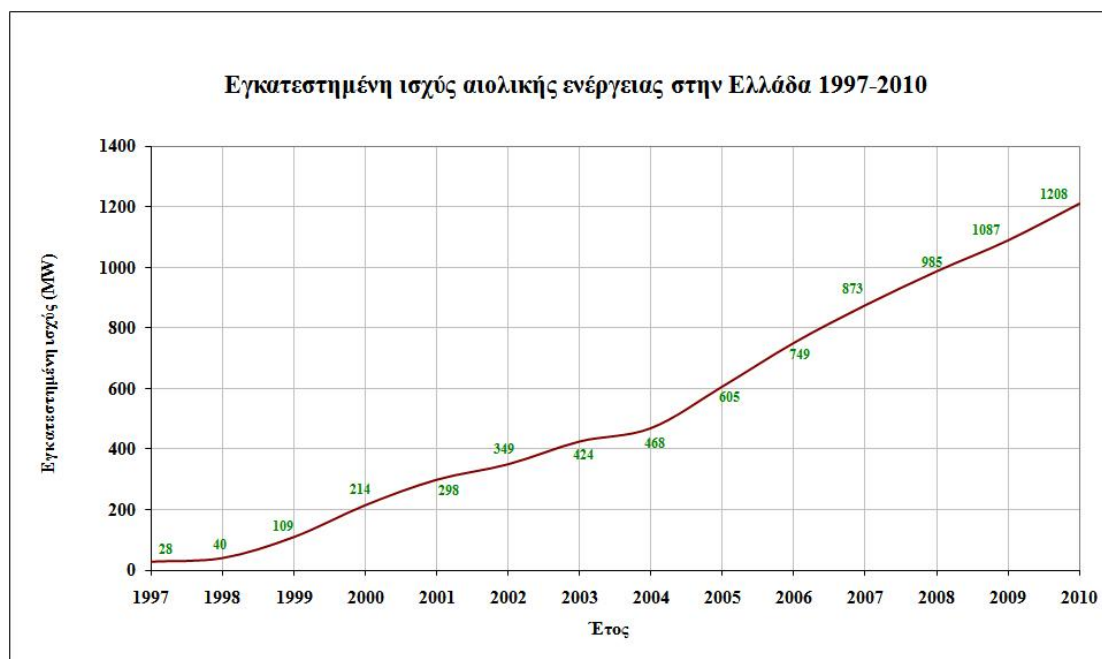


Σχήμα 8.12 Εξέλιξη μεγέθους ανεμογεννητριών.



**Σχήμα 8.13** Οι σημαντικότεροι κατασκευαστές στον κόσμο-Ποσοστά επί τοις ετήσιας εγκατεστημένης ισχύος (2007.)

Τα 52,9% των ανεμογεννητριών που εγκαταστάθηκαν το 2007 είχαν εγκατεστημένη ισχύ άνω των 1,5 MW και το 98,7% άνω των 750 KW. Το 2001 τα αντίστοιχα ποσοστά ήταν 17% και 68%.



**Σχήμα 8.14** Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα 1997-2010.

Θα πρέπει πάντως να παρατηρήσουμε ότι η αύξηση αυτή δεν γίνεται με τον ίδιο τρόπο σε όλες τις χώρες. Οι συνθήκες της αγοράς αλλά και η τοπογραφία και οι υποδομές παίζουν σημαντικό ρόλο. Στην Αμερική και την Ισπανία διαμορφώνεται



σε 1,7 και 1,5 GW αντίστοιχα, ενώ παραμένει σημαντικά χαμηλότερο στην Ινδία και την Κίνα με το μέσο μέγεθος που εγκαταστάθηκε το 2006 να είναι 900KW.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή στη Λευκή Βίβλο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, έθεσε ως στόχο για την αιολική ενέργεια τα 40 GW εγκατεστημένης ισχύος μέχρι το 2010. Ο στόχος αυτός επιτεύχθηκε στο τέλος του 2005. Για το λόγο αυτό, προτάθηκαν από την Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας νέοι στόχοι, πιο ρεαλιστικοί δεδομένης της παρούσας κατάστασης ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας. Οι στόχοι αυτοί είναι 80 GW για το 2010, 180 GW για το 2020 και 300 GW για το 2030. Η αιολική ενέργεια συνεισφέρει σήμερα το 4% περίπου της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ε.Ε.. Αν οι στόχοι αυτοί επιτευχθούν η αιολική ενέργεια θα παράγει το 13% το 2020 και το 23% το 2030.

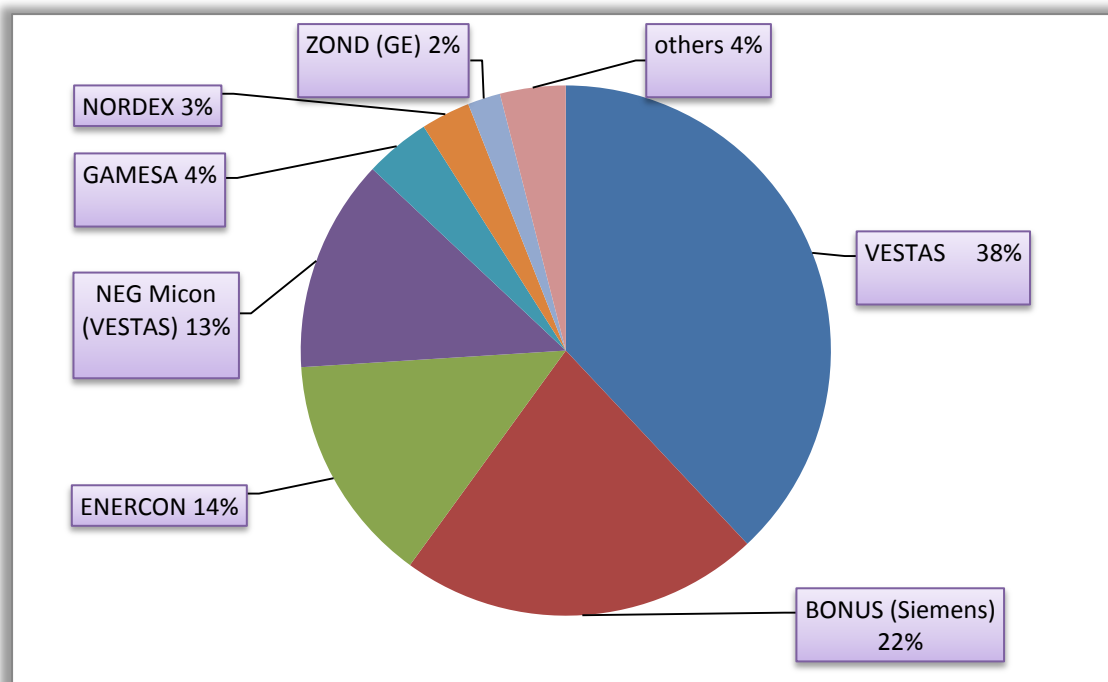
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ	ΙΣΧΥΣ (MW)	Αριθμ. Α/Γ	%
VESTAS	321,37	270	36,9%
BONUS (SIEMENS)	193,00	258	22,2%
ENRCON	123,94	163	14,2%
NEG Micon (VESTAS)	117,28	149	13,5%
GAMESA	31,45	37	3,6%
NORDEX	28,50	45	3,3%
ZOND	18,53	40	2,1%
JACOBS	12,00	20	1,4%
HMZ	10,80	36	1,2%
WINDMASTER			
NEDWIND	5,00	10	0,6%
EAB WINDMATIC	3,92	50	0,5%
NORDTANK	1,25	5	0,1%
TACKE	1,50	3	0,2%
OA	1,10	2	0,1%
WINCON	0,65	6	0,1%
MICON	0,63	2	0,1%
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>870,91</b>	<b>1096</b>	<b>100%</b>

**Σχήμα 8.15** Μερίδια κατασκευαστών ανεμογεννητριών στην Ελληνική αγορά (Στοιχεία ΕΛΕΤΑΕΝ, 2007.)

Στην Ελλάδα απ' την άλλη, πριν από το 1977 η δραστηριότητα στη περιοχή της αιολικής ενέργειας ήταν περιορισμένη, πλην ελαχίστων ατομικών προσπαθειών όπως του Ι. Χατζηβασιλειάδη της ΔΕΗ. Ο καθηγητής του Ε.Μ.Π. Γ. Μπεργελές, ανέπτυξε στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής του Ε.Μ.Π. ερευνητική δραστηριότητα μέσω διπλωματικών εργασιών και διδακτορικών εργασιών. Η δραστηριότητα ήταν και θεωρητική με την ανάπτυξη και πειραματική κάνοντας εκτεταμένη χρήση της αεροδυναμικής σήραγγας του εργαστηρίου.

Για τη διάδοση, αξιοποίηση και εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, δημιούργησε ήδη από το 1981

ιδιαίτερη Διεύθυνση Εναλλακτικών Μορφών Ενέργειας. Η διεύθυνση αυτή διεξάγει προκαταρκτικές ερευνητικές μελέτες για τη χαρτογράφηση του αιολικού δυναμικού της χώρας (ελληνικός αιολικός Άτλαντας), του εντοπισμού θέσεων, ιδιαίτερα στα νησιά υψηλού αιολικού δυναμικού για την εγκατάσταση αιολικών μηχανών. Παράλληλα με διεθνείς συνεργασίες ή και με συνεργασία με ελληνικά πανεπιστήμια και ελληνικούς κατασκευαστικούς οίκους προχώρησε και προχωρεί στην εγκατάσταση αιολικών μηχανών διαφόρων ισχύων.

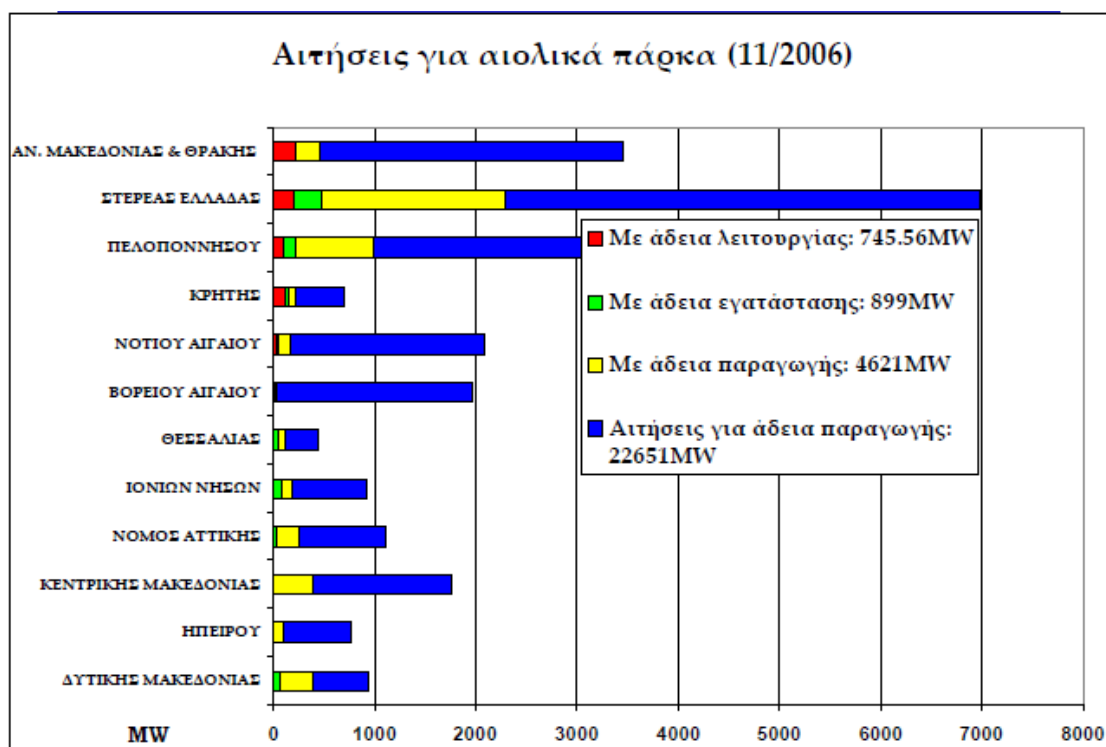


**Σχήμα 8.16** Εγκατεστημένη ισχύς ανά κατασκευαστή (Στοιχεία ΕΛΕΤΑΕΝ, 2007).

Το πρώτο αιολικό πάρκο της χώρας που λειτούργησε επί 5 χρόνια και έδωσε σημαντική εμπειρία ήταν το αιολικό πάρκο της Κύθνου με 5 ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 20 KW έκαστη. Οι ανεμογεννήτριες αυτές αντικαταστάθηκαν ήδη από μεγαλύτερες ισχύος 33 KW.

Στη Μύκονο λειτουργεί από το 1988 ανεμογεννήτρια ισχύος 100 KW, ενώ στην Κάρπαθο, υπάρχει Α/Γ ισχύος 175 KW. Προβλέπεται σύντομα να εγκατασταθούν ανεμογεννήτριες 500 KW στο Λαύριο και στα Άνω Μούλια Κρήτης, ενώ στην Άνδρο προβλέπεται η εγκατάσταση Α/Γ ισχύος 350 KW. Στη Σκύρο εγκαταστάθηκε ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, και προβλέπεται η εγκατάσταση μιας κατακόρυφου άξονα, ισχύος 100 KW. Και οι δύο ανεμογεννήτριες είναι ελληνικής σχεδίασης (εργαστήριο αεροδυναμικής Ε.Μ.Π.) και ελληνικής κατασκευής.

Τέλος προβλέπεται να εγκατασταθούν αιολικά πάρκα στη Άνδρο (1500 KW), στη Λήμνο (440 KW), Σάμο (900 KW), Χίο (1 MW), Εύβοια (5 MW), Κρήτη (5 MW), Λέσβο (5 MW) κλπ.



Σχήμα 8.17 Αιτήσεις για αιολικά πάρκα (11/2006).

Κατασκευαστής	Τύπος	Ισχύς
Bonus (Δανία)	CT/CS // CT/AS	600 kW // 1-2.3 MW
DeWind (Γερμανία / Αγγλία)	VTDI	600 kW - 2 MW
Enercon (Γερμανία)	VTDD	300 kW - 4.5 MW
GE Wind Energy (ΗΠΑ/ Γερμανία)	CT/CS // VTDI	600 kW // 900 kW - 3.6 MW
Lagerwey (Ολλανδία)	VT/AGP // VTDD	250 kW // 750 kW - 2 MW
Jeumont Industrie (Γαλλία)	VTDD	750 kW - 1.5 MW
MADE (Ισπανία)	CT/CS // VTSGP	660 kW - 1.3 MW; 2 MW
NEG Micon (Δανία)	CT/CS // CT/AS // VTDI	600 kW - 1.5 MW // 1.5-2 MW // 2.75 MW
Nordex (Γερμανία)	CT/CS // VTDI	600 kW - 1.3 MW // 1.5-2.5 MW
REpower Systems (Γερμανία)	CT/CS // CT/AGP // VTDI	600 - 750 kW // 1.5-2 MW 1050 kW
Vestas (Δανία)	SVT/OSP // VTDI	660 kW - 2.75 MW // 850 kW - 3 MW

**CT/CS** = Σταθερών Στροφών, Σταθερό βήμα έλικας  
**CT/AS** = Σταθερών Στροφών, Ενεργό stall (αρνητικό μεταβλητό βήμα έλικας, 3-5 degrees)  
**VTDI** = Μεταβλητής ταχύτητας (+ έλεγχος pitch), Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης  
**VTDD** = Μεταβλητής ταχύτητας, Σύγχρονη Γεννήτρια + έλεγχος pitch (Enercon + Lagerwey + 1.5 MW Jeumont), Σταθερό βήμα έλικας (Jeumont J48 (750 kW))  
**VTSGP** = Μεταβλητής ταχύτητας + έλεγχος pitch, με Σύγχρονη Γεννήτρια  
**VT/AGP** = Μεταβλητής ταχύτητας /+ έλεγχος pitch, με Ασύγχρονη Γεννήτρια (100% τροφοδότηση μέσω των μετατροπέων)  
**CT/AGP** = Σταθερών Στροφών + έλεγχος pitch με Ασύγχρονη Γεννήτρια  
**SVT/OSP** = Ημι-μεταβλητής ταχύτητας + έλεγχος pitch (Σύστημα OptiSlip)

Σχήμα 8.18 Κατασκευάστριες Εταιρείες, Τύποι Ανεμογεννητριών και επίπεδα ισχύος.

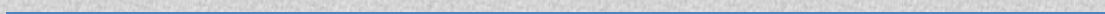
Σήμερα η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς ανέρχεται στα 600 KW ενώ προβλέπεται στην τρέχουσα δεκαετία να αυξηθεί στα 150 MW.

Για σύγκριση να αναφερθεί ότι η σημερινή εγκαταστημένη αιολική ισχύς στη Ευρωπαϊκή Κοινότητα είναι 340 MW με πρόβλεψη μέχρι το 2000 να αυξηθεί στα 4000 MW, δηλαδή η Δ.Ε.Η. με το αιολικό της πρόγραμμα θα βρίσκεται στην ευρωπαϊκή πρωτοπορία.

Η σημαντική αυτή αύξηση οφείλεται ουσιαστικά στο ενδιαφέρον των ευρωπαϊκών κοινοτήτων για την μείωση της ενεργειακής εξάρτησης που μέσω χρηματοδοτούμενων ενεργειακών προγραμμάτων επιχειρείται η ανάπτυξη μιας ευρωπαϊκής ενεργειακής τεχνολογίας.

Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*



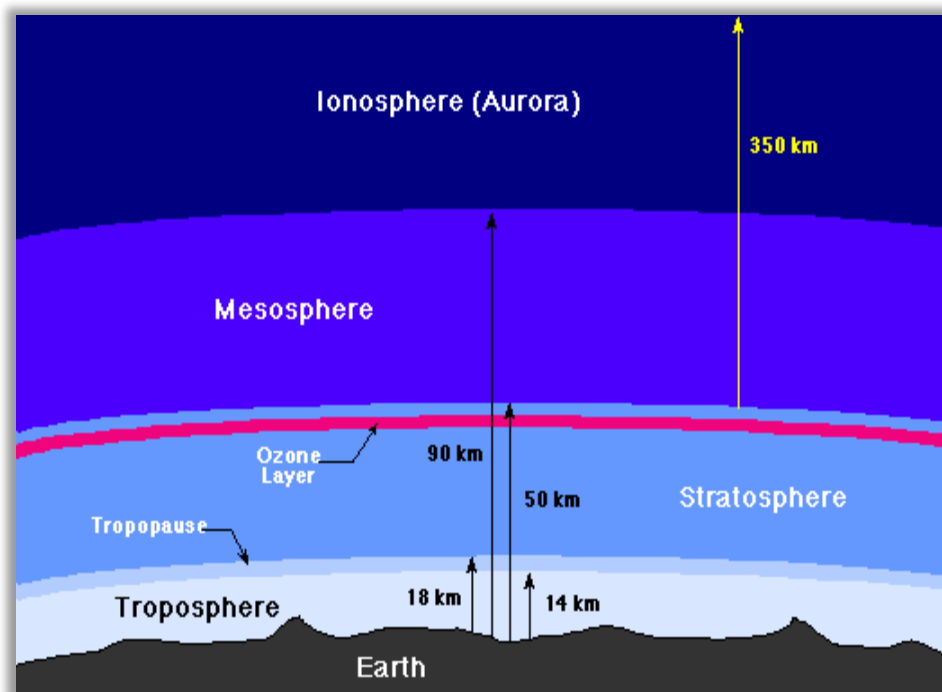
## ΤΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

### 9.1 Γενικά για την ατμόσφαιρα

Ατμόσφαιρα ονομάζεται ο χώρος μέσα στον οποίο δημιουργούνται και εκδηλώνονται τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Ο χώρος αυτός ορίζεται ως το σφαιροειδές αέριο περίβλημα που περικλείει ένα ουράνιο σώμα. Οι δυνάμεις που τη συγκρατούν σε υδροστατική ισορροπία γύρω από το σώμα αυτό είναι οι βαρυτικές δυνάμεις του πλανήτη. Οι διάφορες διαταραχές και τα φαινόμενα που αυτές συνεπάγονται, οφείλονται σε μικρές αποκλίσεις από αυτή τη κατάσταση ισορροπίας.

Το μείγμα των αερίων που συνιστούν την ατμόσφαιρα της Γης εκτείνεται μέχρι ύψους 800 με 1000 km από την επιφάνεια του εδάφους με μεγαλύτερο ύψος (ή βάθος) στον ισημερινό και μικρότερο στους πόλους. Τα συνιστώσα αέρια είναι ανομοιόμορφα κατανεμημένα στο ύψος αυτό με τρόπο ώστε το 99,9% της ολικής μάζας της ατμόσφαιρας να βρίσκεται στα πρώτα 50 km και το 0,099% στην περιοχή μεταξύ 50 και 100 km ύψους.

Τα σπουδαιότερα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας, εκτός από τη σύνθεσή της είναι η θερμοκρασία, η πίεση και η πυκνότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά υπόκεινται σε σημαντικές μεταβολές που εξαρτώνται από το υψόμετρο, την ώρα, την ηλιακή επίδραση (δηλαδή την εποχή) και άλλους παράγοντες.



Σχήμα 9.1 Η σύνθεση της ατμόσφαιρας.

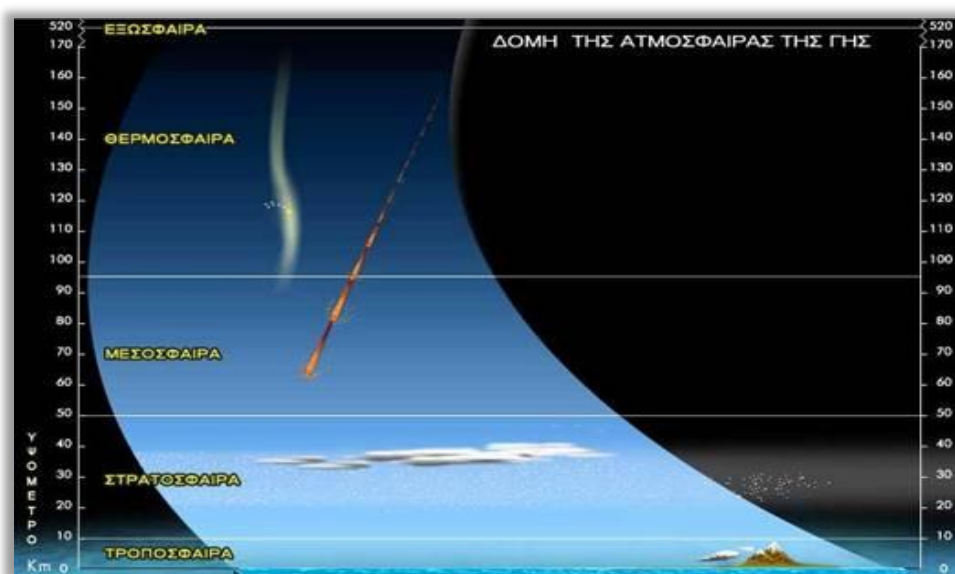
Η θερμοκρασία στην ατμόσφαιρα μεταβάλλεται από ένα ελάχιστο  $-138^{\circ}\text{C}$  που μετρήθηκε σε ύψος 85 km, μέχρι ένα μέγιστο, σε περιόδους μέγιστης ηλιακής

επίδρασης 1227°C σε ύψη μεγαλύτερα των 400 km. Οι θερμοκρασίες αυτές, κατά ένα μέρος, εξαρτώνται από την έκταση στην οποία τα διάφορα αέρια των περιοχών αυτών απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που εκπέμπουν στη συνέχεια.

Η πίεση της ατμόσφαιρας, που εξαρτάται από το ολικό βάρος του αέρα που βρίσκεται από πάνω της, μειώνεται προοδευτικά καθώς το ύψος αυξάνεται. Πιο συγκεκριμένα, ενώ στην επιφάνεια της θάλασσας έχει μια μέση τιμή 760 mmHg, σε ύψος 100 km πέφτει στα  $2,26 \cdot 10^{-4}$  mmHg, στα  $1,00 \cdot 10^{-6}$  mmHg, στο ύψος των 200 km και ούτω καθ' εξής.

Η πυκνότητα της ατμόσφαιρας κατά τον ίδιο τρόπο μειώνεται με την αύξηση του υψόμετρου. Στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας βρίσκεται μια τιμή  $1,226 \text{ kg/m}^3$  ενώ στα 100 km η μέση πυκνότητα είναι μόνο  $4,97 \cdot 10^{-7} \text{ kg/m}^3$  και στα 200 km έχει μειωθεί στα  $3,32 \cdot 10^{-10} \text{ kg/m}^3$ .

Για ευκολία στη μελέτη των διαφόρων ατμοσφαιρικών φαινομένων, η ατμόσφαιρα υποδιαιρείται σε ζώνες. Ο διαχωρισμός που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι αυτός που στηρίζεται στην κατανομή της θερμοκρασίας με το ύψος. Η πρώτη περιοχή που εκτείνεται από το επίπεδο του εδάφους μέχρι το πρώτο ελάχιστο της θερμοκρασίας, καλείται Τροπόσφαιρα. Η επόμενη περιοχή που εκτείνεται μέχρι το δεύτερο μέγιστο της θερμοκρασίας (το πρώτο μέγιστο της θερμοκρασίας βρίσκεται στο επίπεδο του εδάφους), καλείται Στρατόσφαιρα. Η πιο πάνω περιοχή, που φθάνει μέχρι το δεύτερο θερμοκρασιακό ελάχιστο, είναι η Μεσόσφαιρα. Η τέταρτη περιοχή που ακολουθεί, είναι η Θερμόσφαιρα. Πέρα από τη Θερμόσφαιρα βρίσκεται άλλη μια περιοχή η οποία όμως, δεν ορίζεται από τη θερμοκρασία της, καλείται Εξώσφαιρα και πιστεύεται ότι αρχίζει σε ύψος περίπου 400 km.



Σχήμα 9.2 Η δομή της ατμόσφαιρας.

Ο κύριος όγκος της γήινης ατμόσφαιρας είναι ηλεκτρικά ουδέτερος. Ωστόσο, σε ύψος πάνω από 50 km περίπου, ένα μικρό τμήμα της ατμόσφαιρας είναι ιονισμένο,

περιέχοντας ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η περιοχή αυτή της ατμόσφαιρας καλείται Ιονόσφαιρα και υποδιαιρείται στις επιμέρους ζώνες D, E, F1 και F2. Η κύρια αιτία ιονισμού των στοιχειωδών σωματιδίων της ατμόσφαιρας είναι η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλιακού φάσματος.

Τέλος σύμφωνα με έναν άλλο τρόπο χωρισμού, η ατμόσφαιρα διαιρείται σε μια περιοχή όπου δεν υπάρχει σχεδόν καμιά μεταβολή στη χημική της σύνθεση, την Ομόσφαιρα και μια άλλη περιοχή, πιο πάνω με σημαντικές μεταβολές στη σύνθεση την Ετερόσφαιρα.

Επίσης οι μεταβατικές ζώνες ανάμεσα σε μερικές από τις κύριες αυτές περιοχές, έχουν ιδιαίτερα ονόματα. Για παράδειγμα, η οριακή περιοχή ανάμεσα στην Τροπόσφαιρα είναι γνωστή ως Τροπόπαυση και η περιοχή ανάμεσα στη Στρατόσφαιρα και τη Μεσόσφαιρα ονομάζεται Στρατόπαυση.

Γενικά πάντως, ο πιο απλοποιημένος χωρισμός της ατμόσφαιρας είναι σε κατώτερη και ανώτερη ατμόσφαιρα. Η κατώτερη ατμόσφαιρα συνήθως θεωρείται ότι φθάνει μέχρι τη κορυφή της Στρατόσφαιρας – ένα ύψος περίπου 50 km. Κάθε τι πιο πάνω, ανήκει στην ανώτερη ατμόσφαιρα.

## 9.2 Ο Άνεμος

Οι άνεμοι αποτελούν κίνηση αέριας μάζας στην ατμόσφαιρα που κυρίως προκαλείται από την ηλιακή ακτινοβολία. Ειδικότερα είναι αποτέλεσμα των θερμοκρασιακών διαφορών που δημιουργούνται στην τροπόσφαιρα είτε λόγω του γεωγραφικού πλάτους είτε λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης. Οι διαφορετικές γεωγραφικές θερμοκρασίες οφείλονται σε δύο κυρίως παράγοντες:

Υψομετρική διαφορά δύο σημείων

Διαφορετική φύση της επιφάνειας (έδαφος ή νερό)

Οι άνεμοι που δημιουργούνται λόγω διαφορετικού γεωγραφικού πλάτους είναι φαινόμενα σχεδόν σταθερά ή μεταβλητά με μεγάλη περίοδο μεταβολής (εποχικά). Λόγω των μεγάλων γεωγραφικών αποστάσεων που καλύπτουν οι κινήσεις αυτές καθώς και της μεγάλης ατμοσφαιρικής μάζας που μετακινείται, τα φαινόμενα αυτά επηρεάζονται και από την περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της.

Οι άνεμοι που οφείλονται στο δεύτερο παράγοντα χαρακτηρίζονται από μικρή χρονική διάρκεια (ωριαία ή ημερησία) και παρατηρούνται είτε κοντά σε ορεινούς όγκους, σε κοιλάδες ή σε λεκανοπέδια, είτε σε περιοχές κοντά σε θάλασσα ή λίμνη που υπάρχει διαφορετικός ρυθμός θέρμανσης ή ψύξης του εδάφους και του υδάτινου όγκου.

Η ένταση των τοπικών ανέμων και τα φαινόμενα που συνδέονται με αυτούς, εντείνονται ή εξασθενούν ανάλογα με τους συνοπτικούς ανέμους της πρώτης κατηγορίας.

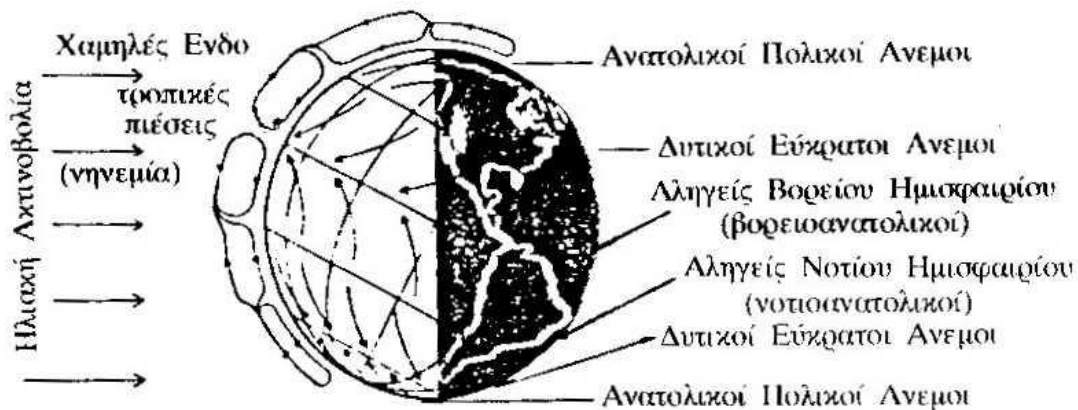
Στην Ευρώπη οι άνεμοι που πνέουν επηρεάζονται από τα ανατολικά ρεύματα



του Ατλαντικού, τα ψυχρά βόρεια και τα θερμά τροπικά της Σαχάρας. Έτσι οι επικρατούντες άνεμοι είναι για τον μεν χειμώνα οι Νοτιοδυτικοί ενώ για το καλοκαίρι οι Δυτικοί και οι Βορειοδυτικοί. Ως προς την ένταση, οι άνεμοι της χειμερινής περιόδου είναι ισχυρότεροι καθώς το καλοκαίρι τα τοπικά συστήματα, όπως οι θαλάσσιες αύρες, έχουν μεγαλύτερη ένταση και μειώνουν την επίδραση του συνοπτικού πεδίου.



Σχήμα 9.3 Αν δεν υπήρχε η περιστροφή της γης, το πεδίο θα ήταν σταθερό.



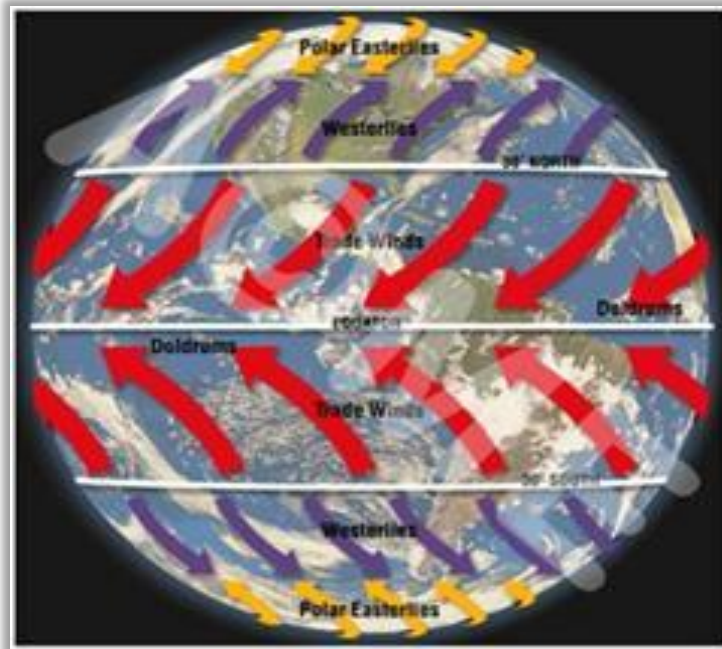
Σχήμα 9.4 Λόγω περιστροφής δημιουργείται μεταβλητό πεδίο τοπικών ανέμων.

Οι Δυτικοί και βορειοδυτικοί άνεμοι επικρατούν κατά κύριο λόγο στο χώρο της Μεσογείου καθώς στην περιοχή αυτή το γενικό πεδίο υφίσταται μικρότερη επίδραση από τα βόρεια ρεύματα που πνέουν από τη Ρωσία. Παρόλα αυτά, όμως, τα έντονα τοπικά συστήματα στις παράκτιες περιοχές μεταβάλλουν πολλές φορές τη γενική αυτή κατεύθυνση των ανέμων.

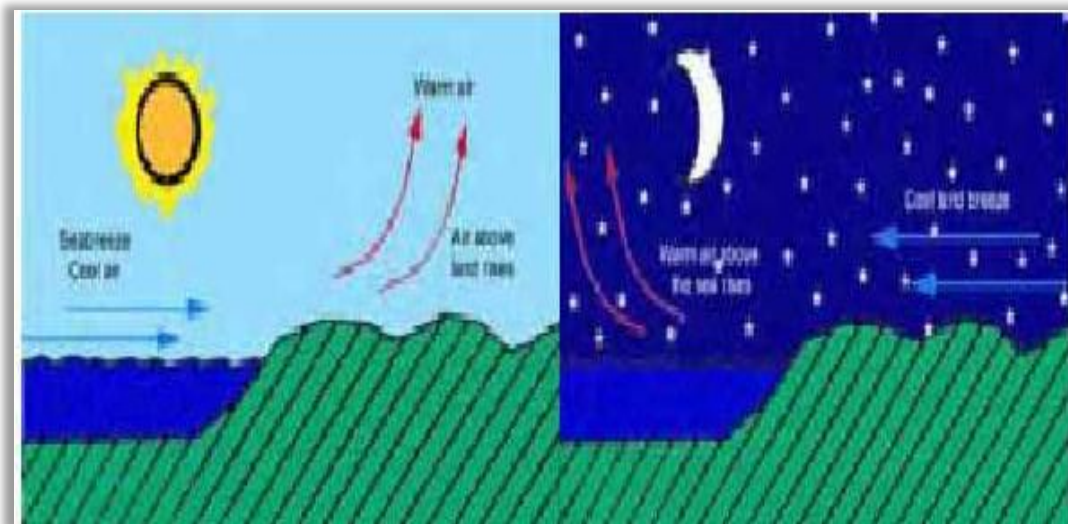
Στον ελλαδικό χώρο, λόγω και τη μορφολογία της Βαλκανικής Χερσονήσου, τη χειμερινή περίοδο επικρατούν τοπικοί Βόρειοι-Βορειοανατολικοί άνεμοι η ένταση των οποίων είναι μέση έως ισχυρή, την άνοιξη γίνονται νοτίων διευθύνσεων, ισχυρής επίσης έντασης, ενώ το καλοκαίρι η ένταση των ανέμων πέφτει με συνέπεια την εμφάνιση πολλών ημερών με νηνεμιά.

Η ενέργεια που η αέρια μάζα λαμβάνει από τον ήλιο εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος, που η διαφοροποίηση στη θέρμανση εδάφους οδηγεί στη δημιουργία κλίσεων πίεσης που μαζί με τις δυνάμεις Coriolis και τις φυγόκεντρες εξισορροπούν τις αδρανειακές δυνάμεις .

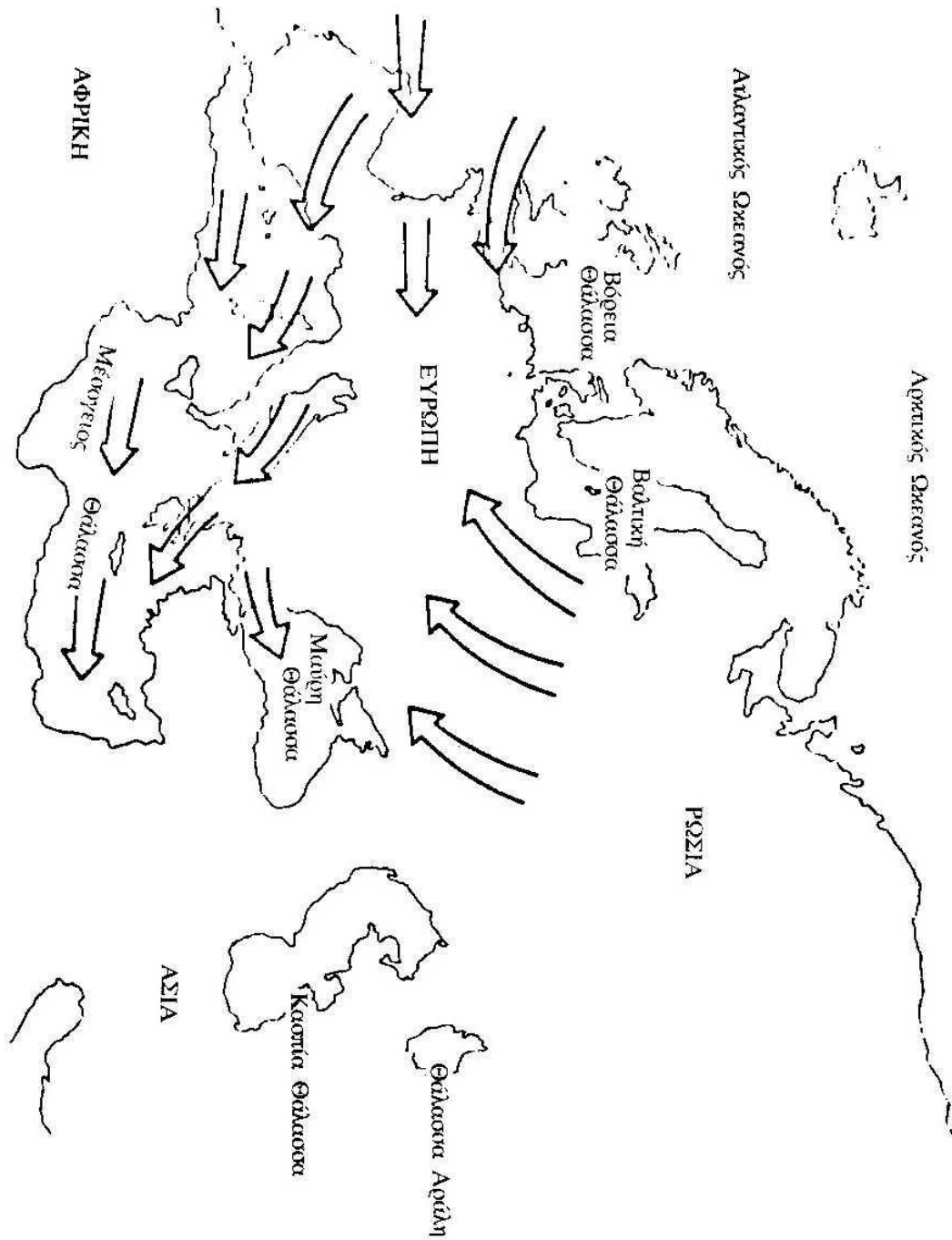
Από ιστορικούς λόγους έχει επικρατήσει στους μετεωρολόγους η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου στη κλίμακα Beaufort αντί του σωστού m/s.



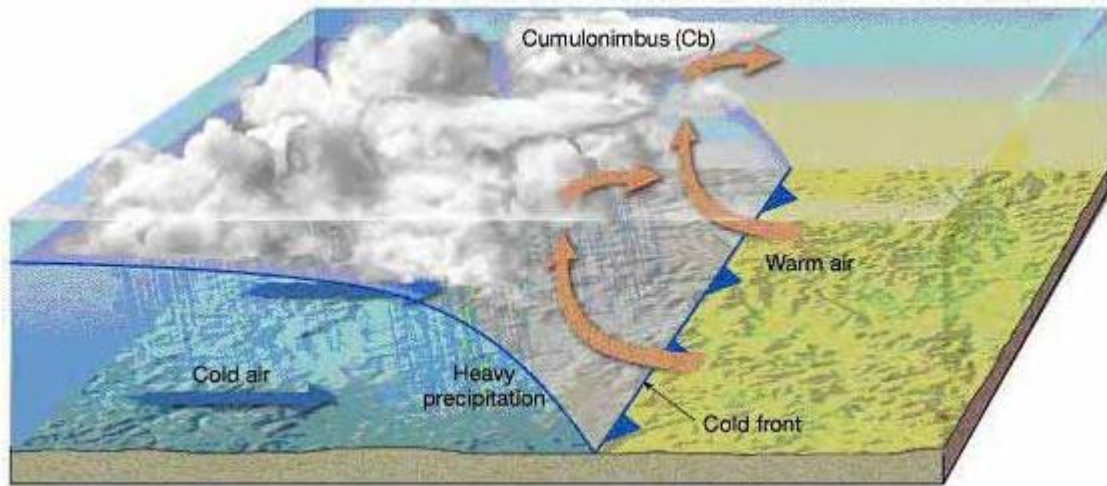
Σχήμα 9.5 Το πεδίο κυκλοφορίας των ανέμων στην επιφάνεια της γης.



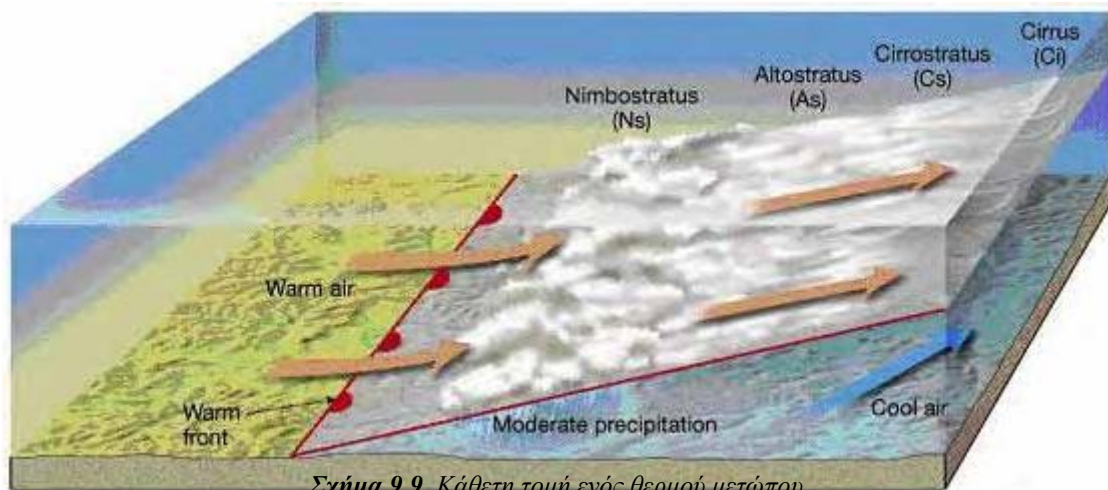
Σχήμα 9.6 Ροή του ανέμου.



Σχήμα 9.7 Οι συνοπτικοί άνεμοι που κατά κύριο λόγο πνέουν στην Ευρώπη.

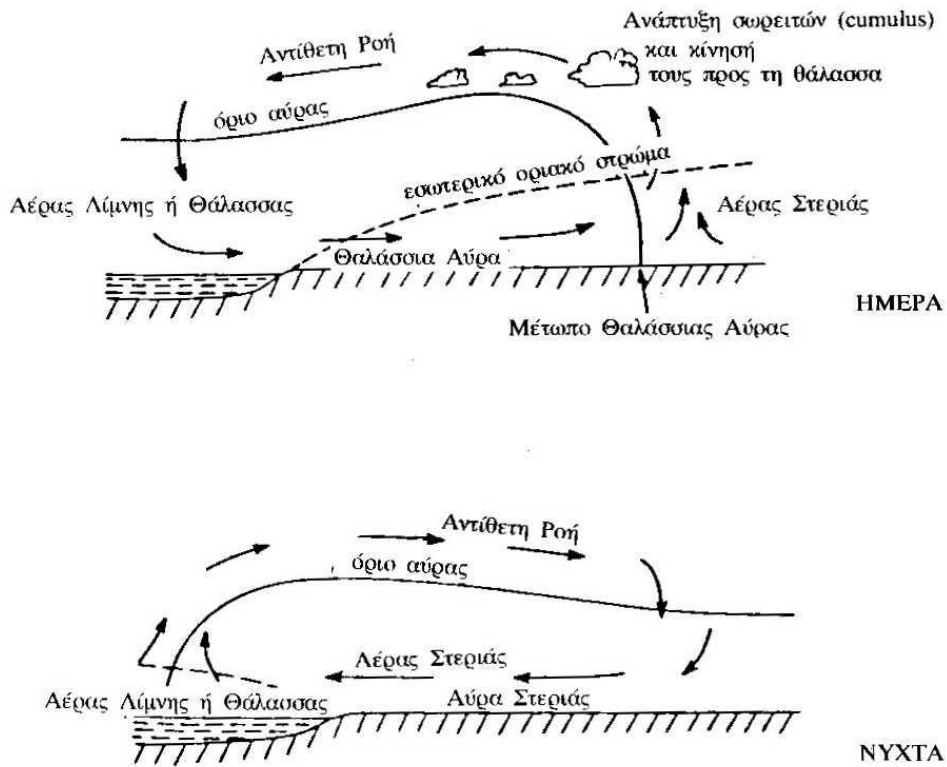
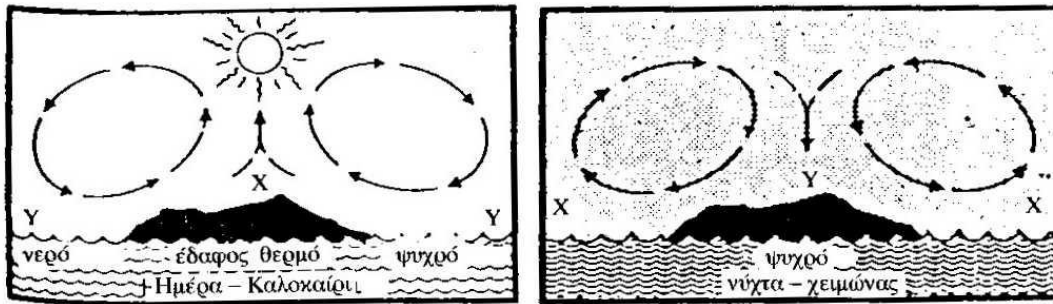


Σχήμα 9.8 Κάθετη τομή ενός ψυχρού μετώπου.



Σχήμα 9.9 Κάθετη τομή ενός θερμού μετώπου.

Από το σύνολο των κινήσεων του ανέμου η σπουδαιότερη σε σχέση με τον προσδιορισμό του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής είναι η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου. Βέβαια, για την επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας απαιτείται επιπλέον η γνώση της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου, να έχουν καταγραφεί οι επικρατούσες στην περιοχή αναταράξεις, ο στροβιλισμός και η τύρβη του ανέμου, καθώς και η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους από το έδαφος.



Σχήμα 9.10 Ημερήσια μεταβολή της αέρας λόγω διαφορετικού ρυθμού θέρμανσης – ψύξης του εδάφους και του νερού (θάλασσα ή λίμνη).

### 9.3 Χαρακτηριστικές παράμετροι του ανέμου

Η γνώση των χαρακτηριστικών του ανέμου είναι απαραίτητη στη μελέτη του αιολικού δυναμικού.

**α. Μέση ταχύτητα του ανέμου.**

Είναι ένα ιδιαίτερα μεταβλητό μέγεθος με σημαντική εξάρτηση από τα χαρακτηριστικά του εδάφους.

**β. Στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου.**

Είναι το άθροισμα της μέσης ταχύτητας και της διακύμανσης γύρω από τη μέση τιμή.

**γ. Μέγιστη ταχύτητα του ανέμου.**

Εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση της περιοχής και τα χαρακτηριστικά του εδάφους και καθορίζει την αντοχή μιας αιολικής μηχανής. Με βάση τις μετρήσεις ανά ώρα καθορίζεται η μέγιστη ημερήσια ταχύτητα του ανέμου και στη συνέχεια η μέγιστη μηνιαία και τέλος η μέγιστη ετήσια ταχύτητα του ανέμου που θα πρέπει να μελετηθεί σε βάθος χρόνου τουλάχιστον μιας δεκαετίας.

**δ. Ριπή του ανέμου.**

Είναι η ξαφνική και μικρής διάρκειας (περίπου 20 sec) αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου μετά το τέλος της ριπής επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα. Η ριπή συνήθως ξεπερνά τα 9 m/sec και διαφέρει από τα συνηθισμένα επίπεδα περίπου κατά 4-5 m/sec. Οι ριπές ανέμου καθορίζουν την κόπωση της μηχανής και αν διαρκέσουν περισσότερο από 30 sec, θα πρέπει ο μηχανισμός ασφαλείας να θέσει την ανεμογεννήτρια εκτός λειτουργίας.

**ε. Διεύθυνση του ανέμου.**

Ορίζεται από το σημείο του ορίζοντα από το οποίο φυσάει ο άνεμος σε σχέση με τη θέση την οποία μελετάμε. Η διεύθυνση του ανέμου εμφανίζει μικρότερες διακυμάνσεις από την ταχύτητα και εξαρτάται από το προσανατολισμό της τοποθεσίας, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τη βλάστηση (βουνό, κοιλάδα, λόφος, κτίρια κλπ).

Ως κύρια διεύθυνση του ανέμου ορίζεται η διεύθυνση που συνεισφέρει τουλάχιστον 10% στη συνολική διαθέσιμη αιολική ενέργεια. Ως επικρατούσες διευθύνσεις ανέμου ορίζονται οι διευθύνσεις που εμφανίζουν, στην περιοχή που μελετάμε τη μεγαλύτερη συχνότητα και αλλάζουν με την εποχή. Η διεύθυνση του ανέμου καθορίζεται με τη χρήση Ροδογράμματος

		<b>Ταχύτητα</b>	<b>Μέση</b>	<b>Ταχύτητα</b>	
--	--	-----------------	-------------	-----------------	--

α/α	Beaufort	(cm/sec)	ταχύτητα (m/sec)	(Km/h)	Ονομασία	Ενδείξεις
1	0	0-0,2	0,10	2<	Νηνεμία	Ο καπνός ανεβαίνει κάθετα
2	1	0,3-1,5	0,90	2-6	Ελαφρός αέρας	Η διεύθυνση προσδιορίζεται από το καπνό. Η διεύθυνση δεν φαίνεται από ανεμοδείκτη
3	2	1,6-3,3	2,45	7-11	Ασθενής αέρας (Ηπια αύρα)	Γίνεται αισθητή στο πρόσωπο. Η διεύθυνση φαίνεται από ανεμοδείκτη
4	3	3,4-5,4	4,40	12-19	Λεπτός αέρας (Μέτρια αύρα)	Ξεδιπλώνει τη σημαία (λεπτό ύφασμα)
5	4	5,5-7,9	6,70	20-30	Μέτριος αέρας (Δροσερή αύρα)	Κινούνται τα μικρά κλαδιά των δέντρων και σηκώνει σκόνη
6	5	8-10,7	9,35	31-40	Λαμπρός αέρας (Ισχυρή αύρα)	Έχουμε ταλάντωση των μικρών δέντρων
7	6	10,8-13,8	12,30	41-50	Ισχυρός αέρας	Κινούνται τα μεγάλα κλωνάρια των δέντρων και σφυρίζουν τα τηλεφωνικά καλώδια
8	7	13,9-17,1	15,50	51-60	Σφοδρός αέρας	Κινούνται όλα τα δέντρα
9	8	17,2-20,7	18,95	62-74	Ορμητικός αέρας	Σπάζουν τα μικρά κλαδιά των δέντρων και εμποδίζεται το βάδισμα
10	9	20,8-24,4	22,60	75-87	Θύελλα	Υπάρχει κίνδυνος για ελαφρές κατασκευές
11	10	24,5-28,4	26,45	88-102	Ισχυρή θύελλα	Ξεριζώνονται δέντρα
12	11	28,5-32,6	30,55	103-120	Σφοδρή θύελλα	Έχουμε εκτεταμένες ζημιές
13	12	32,7-36,9	34,8	>120	Καταιγίδα	Έχουμε σοβαρές καταστροφές

Σχήμα 9.11 Μέτρηση ταχύτητας ανέμου στην κλίμακα Beaufort και μετατροπή σε m/sec.

**στ. Τραχύτητα του εδάφους.**

Η τραχύτητα εκφράζει το είδος του εδάφους. Η τραχύτητα εκφράζεται:

1. Από το μήκος τραχύτητας  $Z_0$ .
2. Από την κλάση (κατηγορία τραχύτητας).

Το μήκος τραχύτητας μπορεί να αλλάζει με τις εποχές, ορίζεται για επιφάνειες με ομοιόμορφη κατανομή στοιχείων τραχύτητας και επηρεάζεται από την πυκνότητα των εδαφικών χαρακτηριστικών. Για επίπεδη περιοχή, με τα στοιχεία τραχύτητας να καταλαμβάνουν το 10-20%, το  $Z_0$  συνοδεύεται με το μέσο ύψος ( $h$ ) των στοιχείων τραχύτητας με τη σχέση:

$$Z_0 = 0,15h$$

$$\text{Av} \quad Z_0 \leq 0,03, \text{ κλάση} = 1,698823 + \ln(z_0)/\ln(150),$$

$$\text{Av} \quad Z_0 > 0,03, \text{ κλάση} = 3,912489 + \ln(z_0)/\ln(3,333333),$$

**ζ. Ανατάραξη του αέρα (Τύρβη).**

Είναι διακύμανση της ταχύτητας του αέρα γύρω από τη μέση τιμή. Η ένταση της ανατάραξης εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους. Μπορεί να υπολογιστεί με βάση το μήκος της τραχύτητας  $Z_0$ .

Για  $Z_0 \leq 0,20m$ .

$$I = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}$$

Για  $Z_0 > 0,20m$ .

$$I = \frac{-0,14 \ln Z_0 + 0,78}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}$$

Όπου  $Z_0$  η τραχύτητα του εδάφους σε m,  $Z$  το ύψος αναφοράς σε m, και  $I$  η ένταση ανατάραξης αέρα καθαρός αριθμός.

**η. Στροβιλισμός του αέρα.**

Στροβιλισμός είναι η δημιουργία ανωμαλιών στη ροή του αέρα λόγω της ανατάραξης και των διαφόρων χαρακτηριστικών εμποδίων της επιφάνειας του εδάφους.



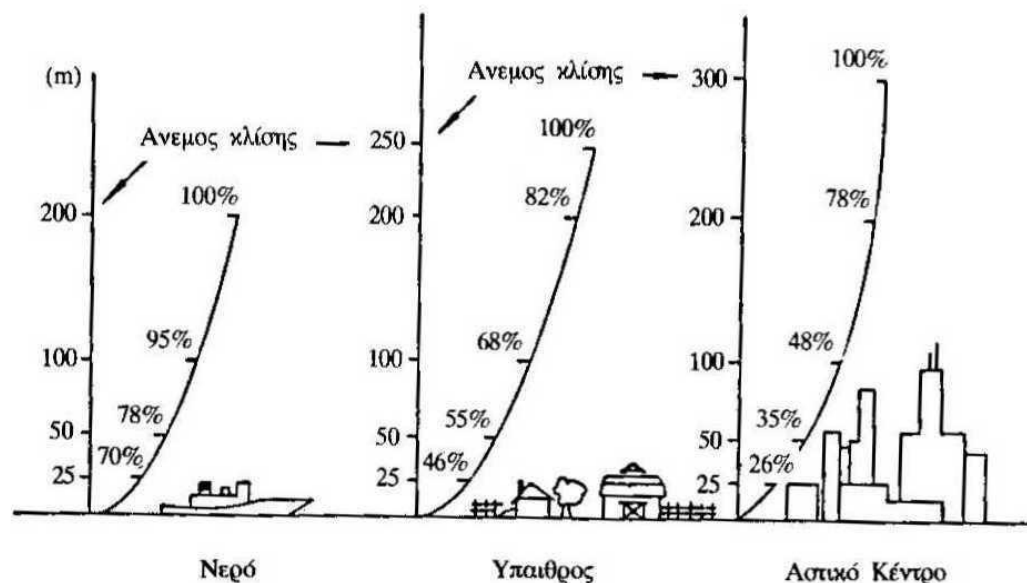
**θ. Κατανομή του ανέμου.**

Η κατανομή του ανέμου εκφράζει τις μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου σε συνάρτηση με το ύψος.

## 9.4 Γενικά για το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα

Καθώς η ατμόσφαιρα βρίσκεται σε σχετική κίνηση στο κατώτατο τμήμα της λόγω του ιξώδους του αέρα δημιουργείται ένα στρώμα αέρα, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, μέσα στο οποίο η σχετική ταχύτητα μεταβάλλεται από μηδέν πάνω στην επιφάνεια της γης, μέχρι μεγαλύτερες τιμές. Στο οριακό αυτό στρώμα δεν μπορούν να αγνοηθούν οι δυνάμεις τριβής, όπως η διαστατική ανάλυση δείχνει ότι μπορεί να γίνει για τον αέρα έξω από τη στοιβάδα αυτή.

Το ύψος (ή πάχος ή βάθος) του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (ΑΟΣ), δεν είναι σταθερό ούτε τοπικά ούτε χρονικά. Οι κύριοι παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται η τιμή αυτή είναι η μορφή του στερεού ορίου (τραχύτητα εδάφους), που είναι η επιφάνεια της γης, και η κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας. Στην ουδέτερη ατμοσφαιρική κατάσταση, όπου η ταχύτητα του αέρα σε ύψος δέκα μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους είναι μεγαλύτερη από  $5 \div 7 \text{ ms}^{-1}$ , δηλαδή  $U_{Z=10} \geq 5 \div 7 \text{ ms}^{-1}$ , ο δεύτερος παράγοντας εξαλείφεται και μένει ο προσδιορισμός του ύψους του ΑΟΣ ως συνάρτηση της μορφολογίας της επιφάνειας του εδάφους και πιο συγκεκριμένα της τραχύτητάς του. Για ομαλό έδαφος και αδύναμο άνεμο το πάχος του οριακού στρώματος μπορεί να είναι της τάξης των 200 μέτρων ενώ για ανώμαλη επιφάνεια (μεγάλη τραχύτητα) και έντονο άνεμο είναι δυνατό να φθάσει μέχρι 1200 μέτρα. Αντίθετα για πολύ ευσταθή κατάσταση της ατμόσφαιρας το πάχος του ΑΟΣ είναι της τάξης των 30 μέτρων ενώ σε συνθήκες που ευνοούν την έντονη ανάμιξη του αέρα (ανοδικά – καθοδικά ρεύματα) το ύψος του ΑΟΣ φθάνει μέχρι 3 km. Ωστόσο όμως, οι μετρήσεις που κατά καιρούς έγιναν στη φύση δίνουν διάφορες τιμές ακόμα και για επιφάνειες παρόμοιας τραχύτητας.



**Σχήμα 9.12** Μεταβολή του ύψους του ατμοσφαιρικού στρώματος ανάλογα με την τραχύτητα του εδάφους.

Η κυριότερη αιτία της ασυμφωνίας αυτής είναι ότι οι περιοχές που έχουν σχετικά μεγάλη έκταση και συγχρόνως παρουσιάζουν ομοιόμορφη τραχύτητα ώστε να αναπτυχθεί πλήρως το ΑΟΣ, περιορίζονται σε ορισμένες μόνο κατηγορίες (έρημος, θάλασσα, πεδιάδες με ομοιόμορφη κάλυψη). Αντίθετα οι περιοχές που ενδιαφέρουν συνήθως (αστικά ή βιομηχανικά κέντρα, παραθαλάσσιες ή παραλίμνιες περιοχές) εκτός του ότι ο αέρας που τις περιβάλλει σπάνια βρίσκεται σε ουδέτερη κατάσταση λόγω της θερμικής ανομοιομορφίας προς κάθε κατεύθυνση, παρουσιάζουν έντονες μεταβολές της τραχύτητας του εδάφους με αποτέλεσμα είτε να μην προλαβαίνει να αναπτυχθεί το ΑΟΣ είτε να δημιουργείται εσωτερικό οριακό στρώμα, που τροποποιεί την αρχική μορφή του οριακού στρώματος. Για να υπάρχει μια κοινή αναφορά, χωρίς όμως να περιορίζεται κάποια ευελιξία επιλογής, προτάθηκε από τον Counihan, για το ουδέτερο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα μια μέση τιμή για κάθε μορφή εδάφους ίση με 600 μέτρα.

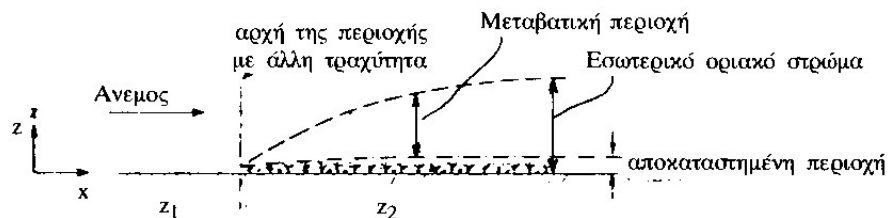
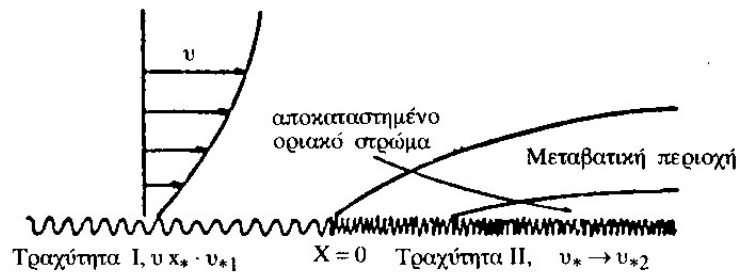
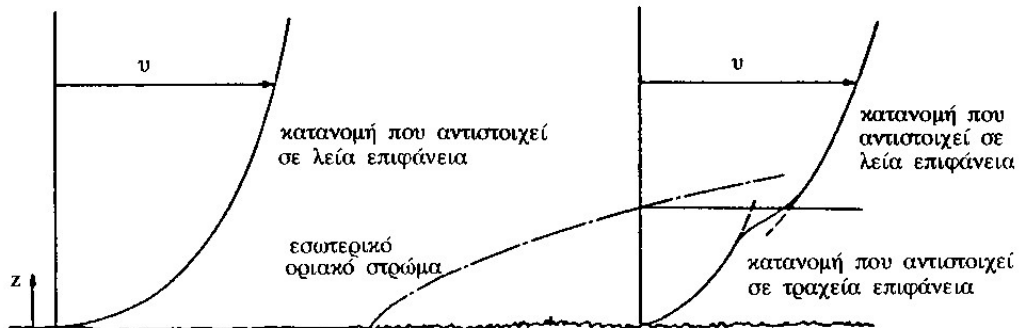
Μετά τον έστω και τυπικό καθορισμό της τιμής του ύψους του στρώματος αυτού, μένει ο μαθηματικός προσδιορισμός της κατακόρυφης κατανομής των μεγεθών που σχετίζονται με τη ρευστομηχανική δομή του. Εξετάζεται η ουδέτερη ατμοσφαιρική κατάσταση όπου δεν εμφανίζονται θερμοκρασιακές αποκλίσεις από την αδιαβατική θερμοβαθμίδα, κατάσταση που κυρίως ενδιαφέρει για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού. Οι αποκλίσεις αυτές έχουν ως αποτέλεσμα, εκτός από τη μεταβολή του ύψους του ΑΟΣ, να επηρεάζουν και τη δομή του. Επίσης στην ουδέτερη κατάσταση και μέχρι το ύψος του ΑΟΣ η πυκνότητα του αέρα μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σταθερή καθώς επίσης και η υπόλοιπη φυσική κατάσταση του (πχ υγρασία) και η χημική του σύνθεση.

Κατ' αρχή θα πρέπει να προσδιοριστεί η φύση της ροής και αν όντως είναι ροή οριακού στρώματος. Αναφέρθηκε στην αρχή ότι, καθώς οι αέριες μάζες κινούνται ως προς την επιφάνεια της γης, δημιουργείται ένα οριακό στρώμα μέσα στο οποίο το διάνυσμα της ταχύτητας του αέρα μεταβάλλεται από μηδέν στην επιφάνεια της γης, μέχρι την τιμή που μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελεύθερη ροή. Η επιβράδυνση της ροής εξ αιτίας της επιφάνειας της γης, δημιουργεί μια ροή που μοιάζει με τη ροή του οριακού στρώματος όταν οι κλίσεις της πίεσης κατά μήκος (διαμήκης κατεύθυνση) της ροής είναι μεγάλες σε σύγκριση με τις κλίσεις που είναι κάθετες στη ροή. Αντίθετα, η ροή που δημιουργείται σε διαστάσεις μικροκλίμακας, λόγω τοπικών μεταβολών της θερμοκρασίας, παρουσιάζει ένα πεδίο ροής με μικρότερη ομοιότητα προς αυτό του οριακού στρώματος.

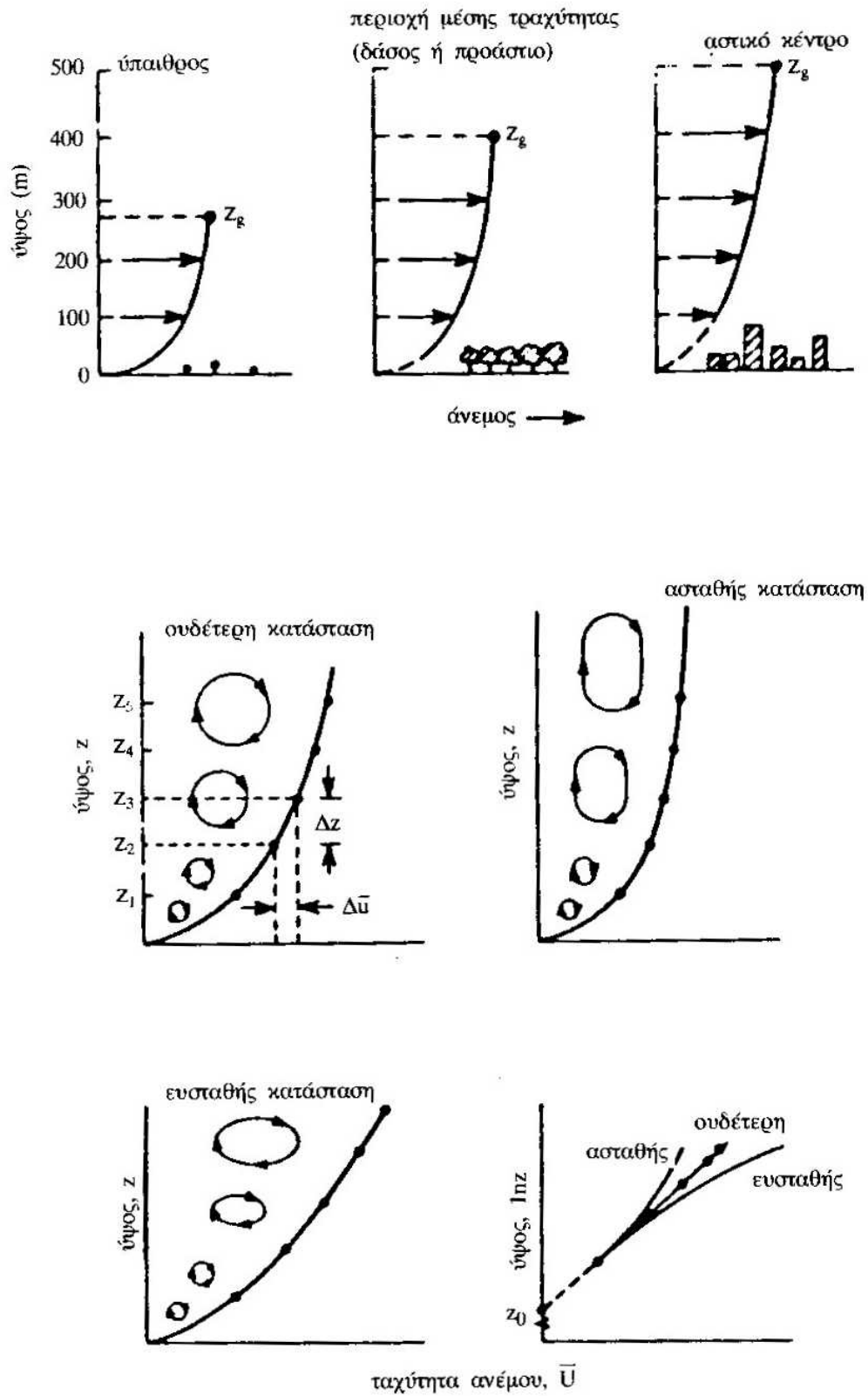
Παραδείγματα όπου η ροή του ανέμου δεν είναι τύπου οριακού στρώματος συναντώνται στις αποκολλημένες περιοχές στα υπήνεμα λόφων ή βουνών, στις καταγίδες και στους κυκλώνες. Ωστόσο, τις περισσότερες φορές και ειδικότερα στην Ευρώπη, μέχρι ύψους 1000 μέτρων τουλάχιστον, η ροή είναι τύπου οριακού στρώματος επιτρέποντας έτσι να μιλάμε σχεδόν πάντα για ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ΑΟΣ).

Μέσα στο στρώμα αυτό μπορούν να διακριθούν τρία επιμέρους στρώματα. Σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του εδάφους βρίσκεται το στρωτό οριακό υπόστρωμα

του οποίου το πάχος είναι το πολύ μερικά χιλιοστά. Ο αέρας που το αποτελεί προσκολλάται σε όλες τις επιφάνειες του στερεού ορίου. Το δεύτερο στρώμα πάνω

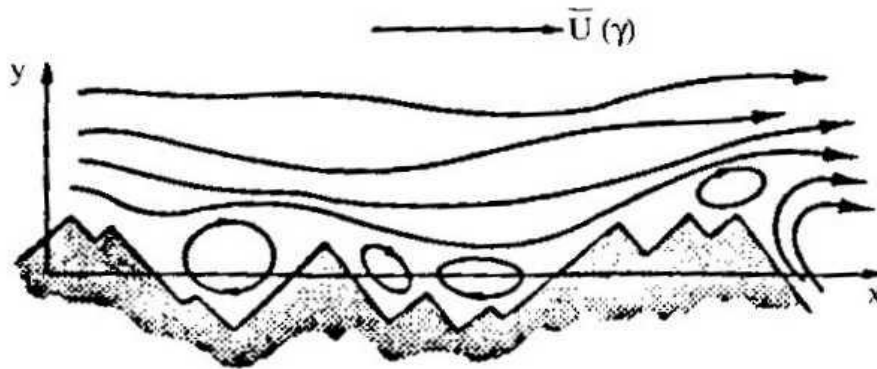


Σχήμα 9.13 Διαταραχές του ΑΟΣ και ανάπτυξη εσωτερικού οριακού στρώματος λόγω μεταβολών της τραχύτητας του στερεού ορίου.



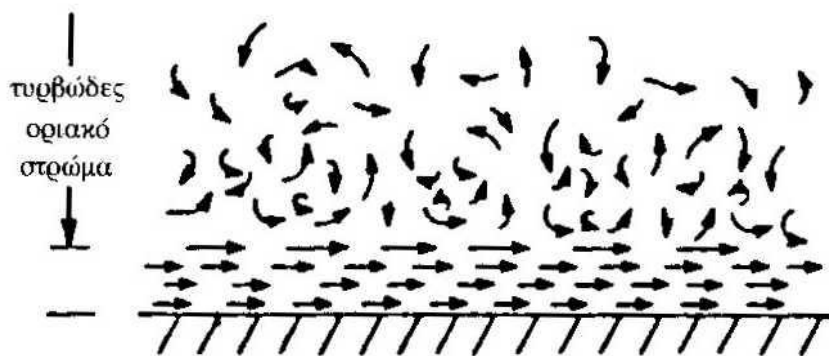
**Σχήμα 9.14** Δομή του ΑΟΣ με την επίδραση της τραχύτητας του εδάφους και της ατμοσφαιρικής ευστάθειας ως προς το σχήμα και την μορφή των στροβίλων.

από οριακό υπόστρωμα, είναι τυρβώδες και η τύρβη που παράγεται οφείλεται σε μηχανικά αίτια (χαρακτηριστικό της ουδέτερης κατάστασης της ατμόσφαιρας) παρά σε θερμικά. Στην περίπτωση αυτή είναι χρήσιμο το τυρβώδες οριακό στρώμα να χωρίζεται σε δύο υποστρώματα, το επιφανειακό στρώμα και το στρώμα Ekman.



**Σχήμα 9.15** Αίτια δημιουργίας του οριακού στρώματος – ροή πάνω από τραχεία επιφάνεια.

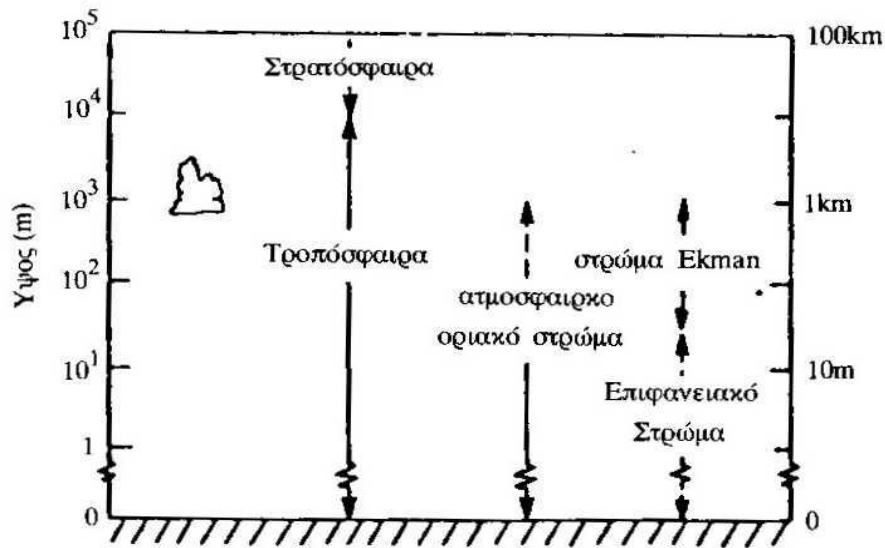
Το επιφανειακό τυρβώδες στρώμα, χαρακτηρίζεται από έντονη, μικρής κλίμακας, τύρβη που δημιουργείται κατά κύριο λόγο από την επιφανειακή τραχύτητα και κατά δεύτερο λόγο από τη μεταφορά θερμότητας λόγω ρευμάτων, ενώ η διανομή της ταχύτητας είναι τέτοια ώστε η οριζόντια διατημητική τάση να είναι σχεδόν σταθερή ανεξάρτητη από το ύψος. Το πάχος του επιφανειακού στρώματος κατά τη διάρκεια της ημέρας φθάνει μέχρι 100 μέτρα ενώ τη νύχτα, που το πάχος ολόκληρου του ΑΟΣ ελαττώνεται, το πάχος αυτό γίνεται μόνο μερικά μέτρα.



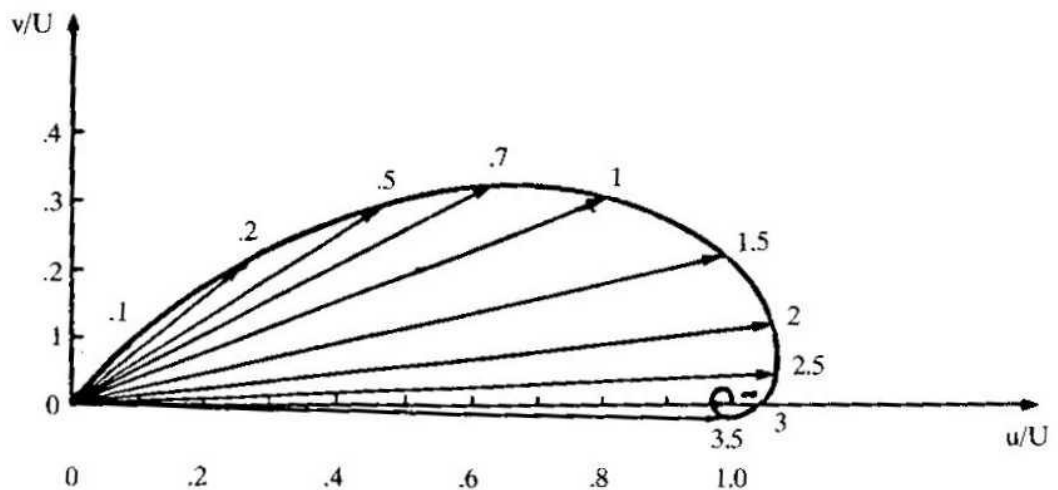
**Σχήμα 9.16** Στρωτή και τυρβώδες κίνηση του αέρα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Το στρώμα Ekman που εκτείνεται από την κορυφή του επιφανειακού στρώματος μέχρι το ύψος του ΑΟΣ, είναι ένα στρώμα στο οποίο υπάρχει ισορροπία

μεταξύ της δύναμης Coriolis, της δύναμης λόγω κλίσης της πίεσης και των διατμητικών τάσεων. Κύριο χαρακτηριστικό του στρώματος Ekman είναι η στροφή, καθώς αυξάνει το ύψος, του διανύσματος της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου γύρω από κατακόρυφο άξονα, με τρόπο ώστε, με προβολή των διανυσμάτων σε οριζόντιο επίπεδο, τα άκρα τους να βρίσκονται σε μια σπείρα, τη σπείρα Ekman. Αυτό οφείλεται στο ότι το κάθε στρώμα του ρευστού επιβραδύνεται λόγω τριβής από το στρώμα που βρίσκεται από κάτω και σαν αντίδραση η ταχύτητα του επάνω στρώματος, λόγω της περιστροφής της γης, στρέφεται προς τα δεξιά της τάσης που εφαρμόζεται. Καθώς η τάση μεταβιβάζεται από το ένα στρώμα στο άλλο, το διάνυσμα στρέφεται σταδιακά. Έτσι όσο προσεγγίζεται το έδαφος το διάνυσμα της ταχύτητας στρέφεται προς τα αριστερά του διανύσματος της ταχύτητας που επικρατεί σε ύψος 1 km για το βόρειο ημισφαίριο της γης και δεξιά για το νότιο. Η ταχύτητα αυτή καλείται γεωστροφική.



Σχήμα 9.17 Διάκριση των στρωμάτων του ατμοσφαιρικού αέρα κοντά στο έδαφος.



**Σχήμα 9.18** Η σπείρα του Ekman του διανύσματος της ταχύτητας. Ο λόγος του ύψους  $z$  προς το ύψος του στρώματος Ekman  $\delta E$  ( $z/\delta E$ ), που αντιστοιχεί σε κάθε διάνυσμα, σημειώνεται επάνω στην σπείρα.

Το ιδανικό στρώμα Ekman που καλύπτει όλο το πάχος του ΑΟΣ παρατηρείται σπάνια λόγω του ότι ο συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας  $\mu_t$  (eddy viscosity coefficient) που επηρεάζει τις δύο συνιστώσες της οριζόντιας ταχύτητας ( $U, V$ )  $U/U_{0L}$  και  $V/U_{0L}$  της σπείρας, μεταβάλλεται συνεχώς και πολύ γρήγορα με το ύψος κοντά στο έδαφος. Με άλλα λόγια η μαθηματική έκφραση του στρώματος Ekman ισχύει μόνο επάνω από το επιφανειακό στρώμα. Έτσι, μια περισσότερο ικανοποιητική περιγραφή του ΑΟΣ, παίρνεται με το συνδυασμό της λογαριθμικής κατακόρυφης διανομής ταχύτητας, για το επιφανειακό στρώμα με τη σπείρα Ekman για τα μεγαλύτερα ύψη.

### 9.5 Ένταση του ανέμου

Η κίνηση του ανέμου ακολουθεί τους νόμους της μηχανικής ρευστών, οι οποίοι διέπουν την τυρβώδη ροή συνεκτικού ρευστού. Συνεπώς, η ταχύτητα του ανέμου είναι ένα ιδιαίτερα μεταβλητό μέγεθος, το οποίο εμφανίζει διακυμάνσεις τόσο σε χρονικά διαστήματα εκατοστών του δευτερολέπτου όσο και σε διαστήματα ωρών. Ακολουθώντας την ανάλυση που ισχύει για τυρβώδη πεδία ροής, η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου γράφεται σαν άθροισμα της μέσης ταχύτητας του ανέμου  $\bar{V}$  και μιας διακύμανσης  $V'(t)$  δηλαδή:  $V(t) = \bar{V} + V'(t)$  ενώ η **μέση ταχύτητα** του ανέμου σε μια χρονική περίοδο  $T$  δίνεται σαν:

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} V(t') d't$$

Εξετάζοντας το πεδίο ταχυτήτων μιας περιοχής, είναι σημαντικό να καταγραφούν και οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει σημαντικά την κατασκευαστική αντοχή του πύργου στήριξης της ανεμογεννήτριας, καθώς και τη μέγιστη φόρτιση των πτερυγίων της μηχανής. Όπως είναι λογικό, οι μέγιστες ταχύτητες του ανέμου εξαρτώνται από τη γεωγραφική θέση της περιοχής καθώς και από το τοπογραφικό της ανάγλυφο.



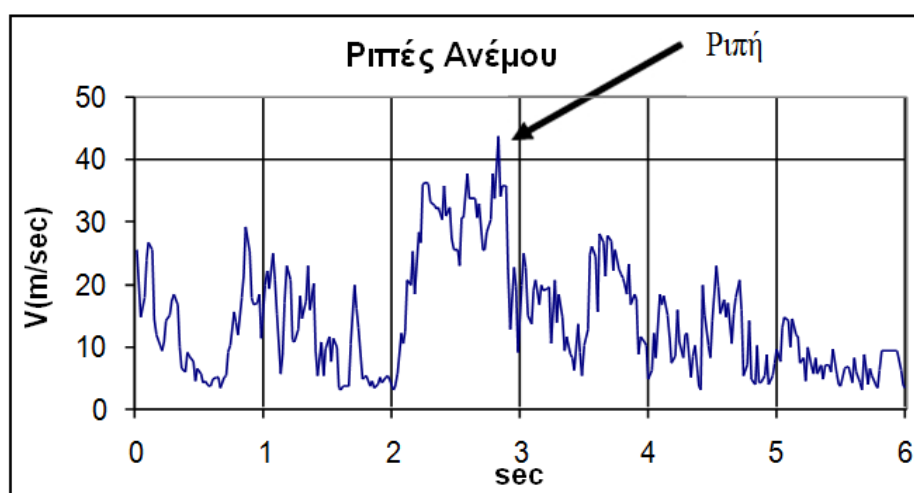


T (sec)

Σχήμα 9.19 Στιγμιαία ταχύτητα ανέμου.

Συνήθως, για τη στατική πρόβλεψη των μέγιστων ταχυτήτων χρησιμοποιούνται οι μέσες ωριαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου για μια σειρά ετών. Το στατιστικό δείγμα που προκύπτει αναλύεται με βάση το στατιστικό νόμο των «ακραίων τιμών», οπότε επιχειρείται ο προσδιορισμός της μέγιστης ταχύτητας του ανέμου, ο οποίος αναμένεται να εμφανισθεί σε μια χρονική περίοδο ορισμένων ετών, που σχετίζεται με το χρόνο ζωής μιας αιολικής μηχανής. Με τον τρόπο αυτό και με κάποια σημαντική βεβαιότητα (πιθανότητα) οι κατασκευαστές προσδιορίζουν τη μέγιστη καταπόνηση των τμημάτων της εγκατάστασης.

Προβλήματα στην ομαλή λειτουργία μιας αιολικής εγκατάστασης δημιουργούνται και από ξαφνικούς ανέμους ιδιαίτερα μεγάλης έντασης και μικρής διάρκειας, οι οποίοι καλούνται **ριπές ανέμου**. Συγκεκριμένα, **ριπή ανέμου** ορίζεται μια ξαφνική μικρής διάρκειας ( $\leq 20$  sec) αύξηση της ταχύτητας του ανέμου ( $\geq 9,3$  m/sec), η οποία διαφέρει από τη μέση τιμή της ταχύτητας στο διάστημα που προηγήθηκε και ακολουθεί κατά τουλάχιστον 4m/sec, ενώ η ταχύτητα του ανέμου επανέρχεται στη συνέχεια στα προηγούμενα επίπεδα τιμών. Οι ξαφνικές ριπές του ανέμου και η διάρκειά τους συνδέονται άμεσα με τη φόρτιση των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας. Επιπλέον, πρέπει να προστεθεί ότι στην περίπτωση που παρουσιασθούν ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες ανέμου με διάρκεια μεγαλύτερη των 30 sec, οι ανεμογεννήτριες τίθενται συχνά (για λόγους αυτοπροστασίας) εκτός λειτουργίας. Ο άνεμος είναι λιγότερο ριπαίος πάνω σε εκτεταμένες υδάτινες επιφάνειες και περισσότερο ριπαίος πάνω από επιφάνειες με έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο ή με υψηλά εμπόδια (πχ υψηλά κτίρια).



Σχήμα 9.20 Ριπές του ανέμου.

Για τον προσδιορισμό της μέσης μέγιστης ριπής του ανέμου  $\bar{V}_{max}$  σε ύψος  $z$  συναρτήσει της μέσης ωριαίας τιμής της ταχύτητας στο ίδιο ύψος, μπορεί να γραφεί ότι:  $\bar{V}_{max}(z) = \bar{V}(z) \cdot [1 + \gamma \cdot I_u(z)]$  όπου  $\gamma(t)$  ο συντελεστής ριπής και  $I_u$  η αδιάστατη τιμή της τύρβης κατά τη διεύθυνση του ανέμου. Ο συντελεστής ριπής δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma(t) = 0,42 \ln \left( \frac{3600}{t} \right)$$

Παρόμοια αποτελέσματα δίνονται από την εξίσωση, η οποία προσδιορίζει τη ριπή του ανέμου  $V_t$  χρονικής διάρκειας  $t$  δευτερολέπτων συναρτήσει της μέσης ωριαίας ταχύτητας στο ύψος μελέτης  $z$ , του συντελεστή τραχύτητας  $z_0$  της περιοχής και ενός χρονικού συντελεστή  $C(t)$ , δηλαδή:

$$V_t(z) = \bar{V}(z) \cdot \left[ 1 + 0,98 \left( \frac{C(t)}{\ln \left( \frac{z}{z_0} \right)} \right) \right]$$

Για διευκόλυνση της εφαρμογής της εξίσωσης δίνεται ότι:

$z_0 = 0,0005$  m για θάλασσες και λίμνες

$z_0 = 0,001$  m για επίπεδες επιφάνειες

$z_0 = 0,5$  m για πυκνόφυτες περιοχές και προάστια πόλεων

t (sec)	C(t)	t (sec)	C(t)
1	3,00	100	1,02
3	2,66	200	0,70
10	2,32	300	0,54
20	2,00	600	0,36
30	1,75	1000	0,16
50	1,35		

## 9.6 Μέτρηση έντασης ανέμου

Για τη μέτρηση της έντασης του ανέμου χρησιμοποιούνται τα **ανεμόμετρα ή οι ανεμογράφοι**. Τα πλέον απλά ανεμόμετρα είναι τα ανεμόμετρα ταχύτητας, στα οποία η ένταση του ανέμου προκύπτει από την ταχύτητα περιστροφής που επιβάλλει ο άνεμος σε ορισμένα τμήματα του οργάνου. Τα ανεμόμετρα αυτού του τύπου είναι αθροιστικά και μετρούν μέσες τιμές της έντασης του ανέμου. Για την καταγραφή των στιγμιαίων τιμών της έντασης του ανέμου χρησιμοποιούνται τα ανεμόμετρα πίεσης, στα οποία η ένταση προσδιορίζεται από την πίεση που ασκεί ο άνεμος σε ορισμένα τμήματα του οργάνου.

Επιπλέον των προαναφερομένων συνηθισμένων τρόπων μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιούνται και ανεμόμετρα θερμού στοιχείου καθώς και ανεμόμετρα τύπου laser, κυρίως σε πειραματικές εγκαταστάσεις υψηλής ακρίβειας, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση μελέτης του ομόρου ανεμογεννήτριας μέσα σε αεροδυναμική σήραγγα.

Από τα κλασικά ανεμόμετρα ταχύτητας, τα πλέον γνωστά είναι τα **κυπελλοφόρα ανεμόμετρα**. Αυτά αποτελούνται από έναν κατακόρυφο άξονα στην κορυφή του οποίου υπάρχουν τρεις ή τέσσερις οριζόντιοι βραχίονες συμμετρικά τοποθετημένοι. Στα άκρα κάθε βραχίονα είναι τοποθετημένο ένα ημισφαιρικό ή κωνικό κύπελλο, σε τρόπο ώστε η διαμετρική τομή του να είναι κατακόρυφη. Γνωρίζοντας ότι η αεροδυναμική αντίσταση της κοίλης πλευράς είναι σημαντικά μεγαλύτερη της κυρτής, το σύστημα περιστρέφεται υπό την επίδραση του ανέμου και ο αριθμός των περιστροφών του καταγράφεται δια μέσου του κατακόρυφου άξονα σε ένα καταγραφικό σύστημα. Για την καταγραφή των στροφών του κατακόρυφου άξονα χρησιμοποιούνται διάφορα συστήματα, που περιλαμβάνουν:

- α. Μηχανικό στροφόμετρο, που καταγράφει τον αριθμό των περιστροφών των κυπέλλων από τη στιγμή έναρξης λειτουργίας του οργάνου.
- β. Ηλεκτρική επαφή, η οποία κλείνει μετά από ένα ορισμένο αριθμό στροφών, και μέσω καταγραφικού δίνει απευθείας τη μέση ταχύτητα του ανέμου.
- γ. Μικρή ηλεκτρογεννήτρια, η οποία μετατρέπει την περιστροφική κίνηση του άξονα σε ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο και μετατρέπεται σε ένδειξη ταχύτητας.
- δ. Φωτοηλεκτρικό διακόπτη, ο οποίος μετατρέπει την ταχύτητα περιστροφής σε στιγμιαία ταχύτητα ανέμου στην έξοδο του συστήματος.

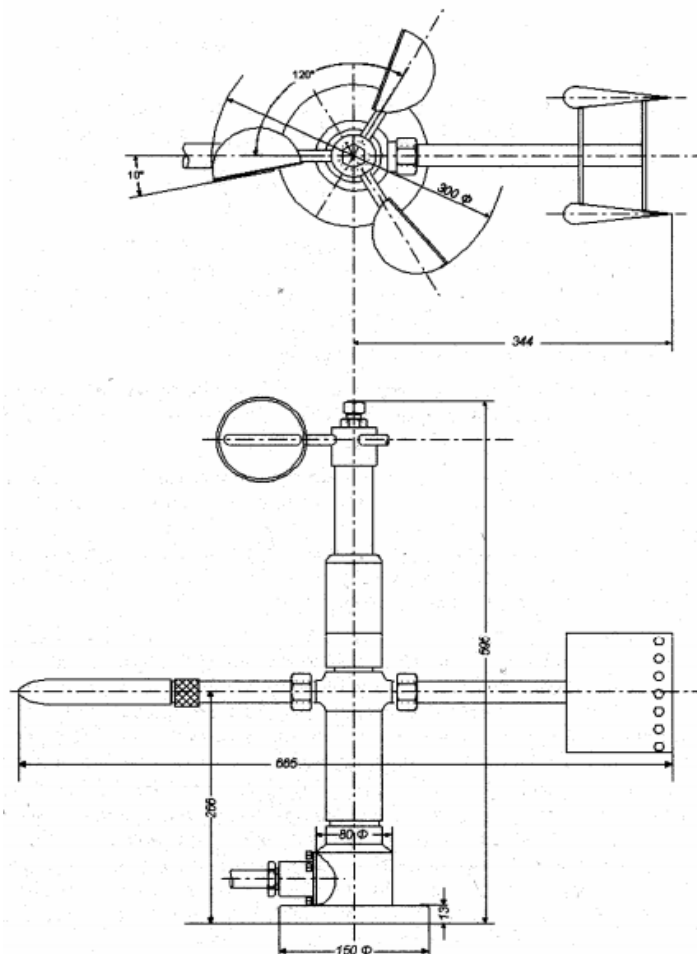
Μέχρι σήμερα έχουν αναφερθεί αρκετές προσπάθειες συσχέτισης της ταχύτητας του ανέμου  $V$  με τη γραμμική ταχύτητα  $u$  περιστροφής των κυπέλλων, πράγμα που αν επιτευχθεί, θα διευκολύνει τη βαθμονόμηση των ανεμομέτρων. Εν

γένει ο λόγος  $V/u$  δεν είναι σταθερός. Ομαλότερη δε συμπεριφορά παρουσιάζουν ανεμόμετρα με:

α. Τρία κύπελλα αντί τεσσάρων, δεδομένου ότι η στρεπτική ροπή συστήματος με τρία κύπελλα είναι πιο ομοιόμορφη για όλο το πεδίο ταχυτήτων του ανέμου, ενώ εμφανίζει και μεγαλύτερες τιμές στρεπτικής ροπής ανά μονάδα βάρους.

β. Κωνικά κύπελλα έναντι των σφαιρικών.

γ. Στρογγυλεμένα χείλη των κυπέλλων, δεδομένου ότι είναι λιγότερο ευαίσθητα στις αναταράξεις του αέρα από ότι τα έχοντα αιχμηρά χείλη.



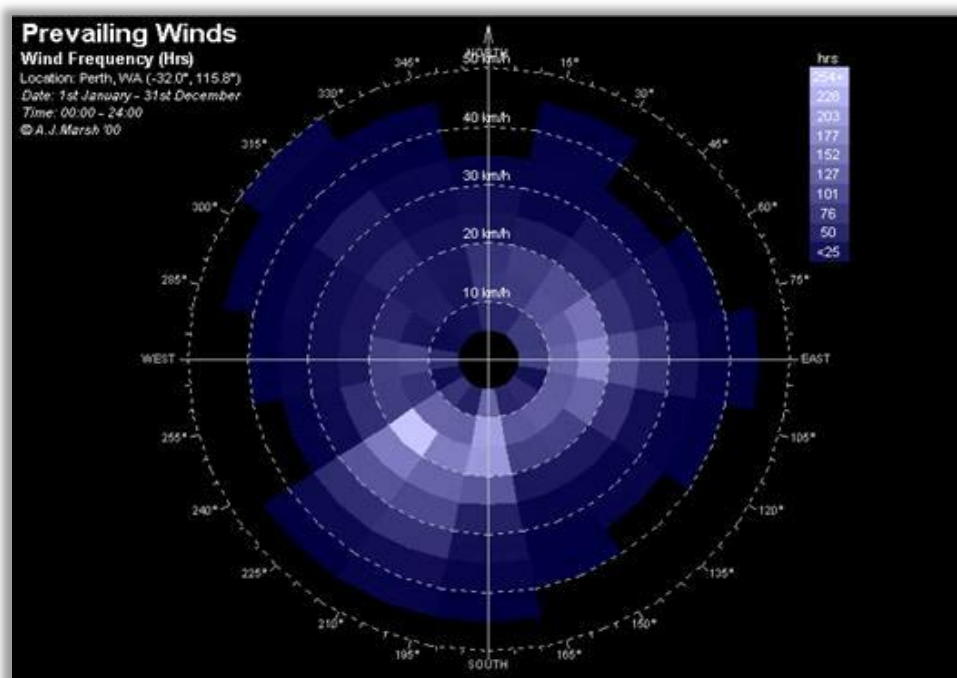
Σχήμα 9.21 Κυπελλοφόρο ανεμόμετρο.

Ένα βασικό μειονέκτημα των ανεμομέτρων αυτού του τύπου οφείλεται στο γεγονός ότι δεν έχουν συμμετρική απόκριση στην αύξηση ή μείωση της έντασης του ανέμου, δεδομένου ότι τα κύπελλα οργάνου εξακολουθούν λόγω αδράνειας να περιστρέφονται ακόμα και όταν ο άνεμος σταματήσει. Στις περιπτώσεις αυτές οι ενδείξεις του οργάνου είναι μεγαλύτερες από την πραγματική ένταση του ανέμου.

Για κλιματολογικούς και πρακτικούς λόγους έχει συμφωνηθεί ότι σε μια ομοιογενή περιοχή (η οποία εκτείνεται 300 μέτρα γύρω από το όργανο), ο ανεμογράφος πρέπει να τοποθετείται σε ύψος 10 μέτρα από το έδαφος, ώστε να επιτυγχάνεται μια αντιπροσωπευτική καταγραφή του αιολικού δυναμικού της περιοχής. Σε μια τοποθεσία με ομοιόμορφη κατανομή εμποδίων με μέσος ύψος εμποδίων  $H$ , το όργανο πρέπει να τοποθετηθεί σε ύψος  $10+H$  μέτρων από το έδαφος, όπου  $H_{\max} \leq 12$  m. Στην περίπτωση ύπαρξης εμποδίων γύρω από το όργανο, πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν στην εύρεση της βέλτιστης θέσης του οργάνου οι διαστάσεις των εμποδίων, εφόσον είναι απαραίτητο να γίνουν μετρήσεις στην περιοχή αυτή. Αντίστοιχες διορθώσεις πρέπει να ληφθούν υπόψιν στην περίπτωση υποχρεωτικής τοποθέτησης του ανεμομέτρου σε ειδικές θέσεις, όπως για παράδειγμα στην κορυφή ενός κτιρίου, δεδομένου ότι το ίδιο κτίριο διαταράσσει τη ροή του ανέμου.

## 9.7 Διεύθυνση του ανέμου

Η διεύθυνση του ανέμου σε μια θέση δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται συνεχώς, καθορίζεται δε με βάση το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος, σε σχέση με τη θέση μέτρησης. Η διεύθυνση του ανέμου είναι συνάρτηση του αληθούς βορρά και μετριέται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού, σε μοίρες ή σε τιμές που αντιστοιχούν σε ολόκληρο κυκλικό τομέα. Ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια χρησιμοποιούνται 8, 16 ή 32 τομείς όπου καθορίζονται οι κυκλικοί τομείς για κάθε μια από τις 32 διευθύνσεις.



Σχήμα 9.22 Διεύθυνση του ανέμου – Ροδόγραμμα.

Με βάση τις παρατηρήσεις της διεύθυνσης του ανέμου μπορούμε να χαράξουμε σε «πολικό διάγραμμα» (ή ανεμολόγιο ροζέτα) τις συχνότητες (%), σε σχέση με το σύνολο των παρατηρήσεων που διαθέτουμε, ανάλογα με το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος. Στο ίδιο διάγραμμα είναι δυνατό να παρασταθεί και η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά την εκάστοτε διεύθυνση. Επιπλέον, για μεγαλύτερη ακρίβεια είναι δυνατός ο υπό κλίμακα σχεδιασμός, ώστε να εμφανίζονται και τα διαστήματα έντασης του ανέμου για κάθε διεύθυνση. Τέλος, στο κέντρο του πολικού διαγράμματος και σε ειδικό κύκλο κατάλληλης ακτίνας καταγράφεται το ποσοστό της νηνεμίας.

Κατά την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, χαρακτηρίζουμε σαν **κύρια διεύθυνση** του ανέμου κάθε διεύθυνση η οποία συνεισφέρει τουλάχιστον 10% στη συνολική διαθέσιμη αιολική ενέργεια. Οι κύριες διευθύνσεις του ανέμου είναι διαφορετικές για κάθε τοποθεσία, δεδομένου ότι ο προσανατολισμός των λόφων, των βουνών, των κοιλάδων, η υπάρχουσα βλάστηση καθώς και η ύπαρξη κτιρίων ανάμεσα στα άλλα επηρεάζουν τις κύριες διευθύνσεις του ανέμου.

Η διεύθυνση του ανέμου, η οποία στην υπό μελέτη περιοχή έχει τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης, ονομάζεται **επικρατούσα διεύθυνση**. Η επικρατούσα διεύθυνση μεταβάλλεται συνήθως με την εποχή του χρόνου. Τέλος, ο χώρος μεταξύ του σημείου στο οποίο θέλουμε να εγκαταστήσουμε μια ανεμογεννήτρια και του σημείου του ορίζοντα από το οποίο πνέει συνήθως ο άνεμος (επικρατούσα διεύθυνση) μας προσδιορίζει την **προσήνεμη περιοχή**. Αντίστοιχα, η **υπήνεμη περιοχή** είναι αυτή η οποία είναι προστατευμένη από τον άνεμο (περιοχές που εκτίθενται σε ανέμους με ελάχιστη συχνότητα εμφάνισης) και είναι συχνά αντίθετη της προσήνεμης περιοχής. Στον Ελλαδικό χώρο η επικρατούσα κατά κανόνα διεύθυνση των ανέμων είναι η βόρεια και βορειοανατολική, ιδιαίτερα στην περιοχή του Αιγαίου, χωρίς βέβαια να αποκλείονται περιπτώσεις σε περιοχές με διαφορετική επικρατούσα διεύθυνση.

## 9.8 Καθορισμός της διεύθυνσης του ανέμου

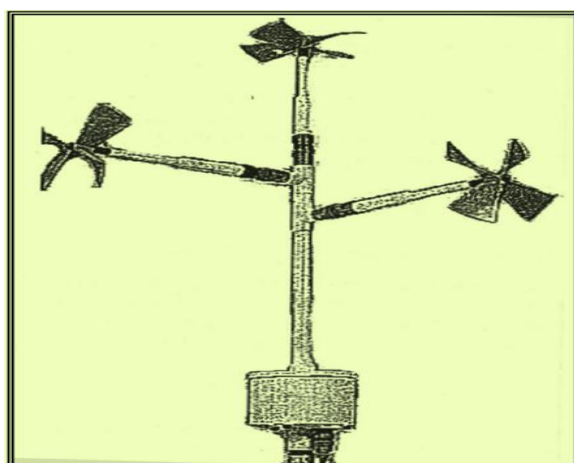
Η διεύθυνση του ανέμου βρίσκεται συνήθως με τη βοήθεια των ανεμοδεικτών. Ο ανεμοδείκτης αποτελείται από ένα κατακόρυφο άξονα στο πάνω άκρο του οποίου περιστρέφεται ένας οριζόντιος άξονας με ένα ή δύο ελάσματα στο ένα άκρο του. Όταν η πίεση που ασκεί ο άνεμος εξισορροπηθεί και από τις δύο πλευρές του ελάσματος του ανεμοδείκτη, αυτός έχει στραφεί έτσι, ώστε ο δείκτης του ανεμοδείκτη (που βρίσκεται και το αντίβαρο εξισορρόπησης του ελάσματος) να διευθύνεται προς τη μεριά από την οποία φυσά ο άνεμος.

Ένας ακριβής ανεμοδείκτης έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- α. Περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του με ελάχιστες τριβές.
- β. Δεν παρουσιάζει τάσεις κλίσης προς μια διεύθυνση. Αυτό επιτυγχάνεται με την ακριβή αντιστάθμιση των ελασμάτων με τη χρήση αντίβαρου.
- γ. Εμφανίζει τη μέγιστη ροπή στρέψης για δεδομένη αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου σε σχέση με την αδράνεια του οργάνου.
- δ. Παρουσιάζει γρήγορη απόκριση στις διαρκείς διακυμάνσεις της διεύθυνσης του ανέμου.
- ε. Παρουσιάζει επαρκή απόσβεση των στρεπτικών ταλαντώσεων.



*Σχήμα 9.23* Ανεμοδείκτης



*Σχήμα 9.24* Τριαξονικός ανεμοδείκτης

Τέλος, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι, επειδή η διεύθυνση του ανέμου μετριέται συναρτήσει του αληθούς βορρά, το όργανο πρέπει να προσανατολιστεί με τη βοήθεια της χαραγής που υπάρχει επάνω του.

Για μικρομετεωρολογικές κυρίως εφαρμογές χρησιμοποιούνται πλέον εξελιγμένοι τύποι ανεμογράφων. Ο **τριαξονικός ανεμογράφος** χρησιμοποιείται για να καταγράψει και τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή μας δίνει ταυτόχρονα την ένταση και τη διεύθυνση του ανέμου.

Ο τριαξονικός ανεμογράφος αποτελείται από ένα κατακόρυφο άξονα, που στην κορυφή του έχει ένα σύστημα τριών αξόνων καθέτων ανά δύο μεταξύ τους. Στην άκρη του κάθε άξονα στρέφεται μια έλικα αποτελούμενη από τέσσερα ελάσματα κατάλληλης αεροδυναμικής σχεδίασης. Ο αριθμός των περιστροφών στη μονάδα του χρόνου καταγράφεται υπό τη μορφή ηλεκτρικών παλμών. Οι άξονες του οργάνου μπορεί να προσανατολισθούν προς το βορρά, προς την ανατολή και προς το ζενίθ του τόπου. Με τον τρόπο αυτό ο ανεμογράφος μετράει τις τρεις ορθογώνιες συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας του ανέμου. Με κατάλληλο προγραμματισμό είναι δυνατό να καταγράφονται οι στιγμιαίες και οι μέσες τιμές του διανύσματος της ταχύτητας. Οι ανεμογράφοι του τύπου αυτού θεωρούνται υψηλής ακρίβειας και δεν επηρεάζονται από την αύξηση ή τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Τέλος, η διεύθυνση του ανέμου μπορεί να υπολογισθεί και με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο, μέσα από τη μέτρηση των τριών συνιστωσών της ταχύτητας του ανέμου.

## 9.9 Στροβιλισμός και αναταράξεις του αέρα

Η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου γύρω από μια μέση ταχύτητα είναι χαρακτηριστικό φαινόμενο της τυρβώδους ροής. Μέτρο της διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου αποτελεί η διασπορά της ταχύτητας του ανέμου « $\sigma_v^2$ », η οποία ορίζεται σαν:

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} (V(t') - \bar{V})^2 \cdot d't$$

Με τυπική χρονική περίοδο μέτρησης  $T=10 \text{ min}$ .

Ονομάζουμε **ένταση της ανατάραξης** και συμβολίζουμε με  $I$  το λόγο της διασποράς προς τη μέση ταχύτητα του ανέμου. Το μέγεθος αυτό χαρακτηρίζεται και σαν ένταση της τύρβης του ανέμου, προσδιορίζει δε και το επίπεδο της τύρβης της ατμόσφαιρας σε μια περιοχή. Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

$$I = \frac{\sigma_v}{\bar{V}}$$



Η ένταση της ανατάραξης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους της υπό μελέτη περιοχής, καθώς και από το γενικό επίπεδο τύρβης της ατμόσφαιρας. Εν γένει, η ένταση της ανατάραξης είναι ανάλογη της τραχύτητας του εδάφους και αντιστρόφως ανάλογη του ύψους μελέτης από το έδαφος. Εάν χρησιμοποιήσουμε το αντιπροσωπευτικό μήκος  $z_0$  της μέσης τοπικής τραχύτητας, η ένταση της ανατάραξης προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$I = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

( $z_0 \leq 0,20$  m) και

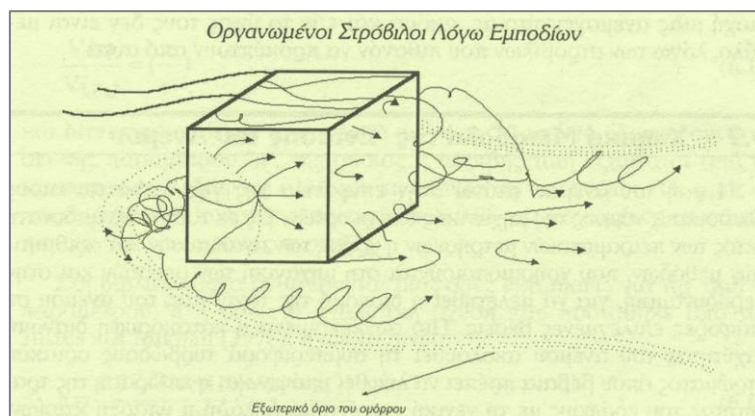
$$I = \frac{(0,78 - 0,14 \ln z_0)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

( $z_0 > 0,20$  m)

Η ένταση της ανατάραξης ή το επίπεδο της τύρβης του αέρα επηρεάζει σημαντικά τόσο την αεροδυναμική συμπεριφορά μιας ανεμογεννήτριας όσο και τα χαρακτηριστικά ολόκληρης της εγκατάστασης.

Οι αναταράξεις του ανέμου είναι το αποτέλεσμα των τυχαίων στροβιλισμών που υπάρχουν σε κάθε τυρβώδες πεδίο ροής, ενισχύονται δε από την τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους. Επιπλέον όμως του στροβιλισμού της τύρβης, η παρουσία εμποδίων κάτω από ορισμένες ανεμολογικές συνθήκες είναι δυνατόν να δημιουργήσουν **οργανωμένους στροβίλους**, οι οποίοι αλλοιώνουν συνολικά το πεδίο ταχύτητας του ανέμου.

Ο στροβιλισμός των οργανωμένων στροβίλων επηρεάζει τόσο την παραγόμενη ισχύ μιας ανεμογεννήτριας, όσο και τη δυναμική συμπεριφορά των κατασκευαστικών στοιχείων της εγκατάστασης. Γενικά, είναι σκόπιμο να μελετώνται λεπτομερώς τα εμπόδια που βρίσκονται στην περιοχή μιας ανεμογεννήτριας, ακόμα και εάν το ύψος τους δεν είναι μεγάλο, λόγω των στροβίλων που πιθανόν να προκύπτουν από αυτά.



Σχήμα 9.25 Οργανωμένοι στρόβιλοι λόγω εμποδίων.

## 9.10 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος

Το πρόβλημα έκφρασης με κάποιο νόμο, εκθετικό ή λογαριθμικό, της κατακόρυφης μεταβολής του μέτρου της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου είναι θέμα αρκετών μελετών. Πολλές φορές η εκλογή φαίνεται αυθαίρετη καθώς υπάρχουν επιχειρήματα υπέρ και κατά και των δύο νόμων, του εκθετικού και του λογαριθμικού. Οι εκφράσεις που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιβλιογραφία για διανομή ταχύτητας μέσα στο επιφανειακό στρώμα είναι:

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^{1/a} \quad (\text{εκθετικός νόμος})$$

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{λογαριθμικός νόμος})$$

ή

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)$$

όπου  $U$ ,  $U_1$  και  $U_2$  η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας στα ύψη  $z$ ,  $z_1$  και  $z_2$  αντίστοιχα.

- $u_*$  η ταχύτητα τριβής (friction velocity)
- $1/a$  ο εκθέτης του εκθετικού νόμου
- $k$  η σταθερά von Karman (=0,35)
- $z_0$  η παράμετρος τραχύτητας ή μήκος τραχύτητας
- $d$  η μετατόπιση μηδενικού επιπέδου

Συνήθως στα μετεωρολογικά προβλήματα χρησιμοποιείται ο εκθετικός νόμος λόγω του πιο εύκολου μαθηματικού χειρισμού του. Η τιμή του εκθέτη  $1/a$  αποτελεί μια ένδειξη της μορφής της επιφάνειας του εδάφους, αφού η τιμή αυτή είναι συνάρτηση μόνο της τραχύτητας ή του μήκους τραχύτητας που συνήθως χρησιμοποιείται.

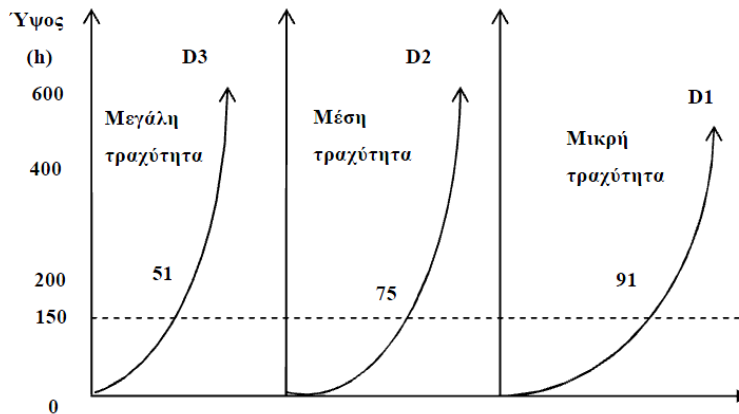
Η εμπειρική σχέση μεταξύ ύψους τραχύτητας  $z_0$  και του εκθέτη  $a$  για τη διανομή ταχύτητας μεταξύ 10 έως 30 μέτρα

$$z_0 = 15,25 \exp\left(-\frac{1}{1/a}\right)$$

δίνει με ικανοποιητική ακρίβεια τη συσχέτιση ( $z_0$ ,  $a$ ) για ύψη τραχύτητας από  $10^{-4}$  m μέχρι 1m.

Η έκφραση, ωστόσο της κατακόρυφης κατανομής της οριζόντιας συνιστώσας

της ταχύτητας με τον εκθετικό νόμο παρουσιάζει για ορισμένους ερευνητές πολλά τρωτά σημεία, ειδικά για τα πρώτα μέτρα του ΑΟΣ. Έχει διαπιστωθεί ότι στα πρώτα



Σχήμα 9.26 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σε συνάρτηση με το ύψος και τη τραχύτητα του εδάφους

μέτρα, η κατακόρυφη κατανομή ακολουθεί τον εκθετικό νόμο ενώ στα μεγαλύτερα ύψη ο λογαριθμικός νόμος δίνει ακριβέστερη μαθηματική έκφραση της κατανομής σε σύγκριση με τον εκθετικό νόμο. Το πρόβλημα επιπλέον στη χρησιμοποίηση του λογαριθμικού νόμου είναι η εύρεση της ακριβούς τιμής, σε κάθε τμήμα της φυσικής επιφάνειας, της ταχύτητας τριβής, της μετατόπισης του μηδενικού επιπέδου και της σταθεράς von Karman που επίσης δεν έχει σταθερή τιμή. Ο προσεγγιστικός προσδιορισμός των τιμών των μεγεθών αυτών εξαλείφει τα πλεονεκτήματα της ακριβούς μαθηματικής έκφρασης της κατακόρυφης κατανομής με το λογαριθμικό νόμο. Έτσι, όμως προκύπτει σφάλμα προσδιορισμού της κατανομής, παρόμοιας τάξης μεγέθους με αυτό που εμπεριέχεται στη χρησιμοποίηση του εκθετικού νόμου, με τον οποίο, όμως, υπάρχει το πλεονέκτημα του ταχύτερου προσδιορισμού και επιπλέον, της μεγαλύτερης ευελιξίας ένταξης της κατακόρυφης κατανομής, σε κάποια ομάδα κατανομών γνωστών επιφανειών οι οποίες έχουν ήδη μελετηθεί εκ των προτέρων.

Ο λογαριθμικός νόμος μεταβολής της ταχύτητας (και αναλογικά ο εκθετικός) για να χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερες αποστάσεις από το έδαφος πρέπει να διορθωθεί για τις επιδράσεις της περιστροφής της γης.

Ο τροποποιημένος λογαριθμικός νόμος για ύψη μέχρι τα 200 m περίπου που προτείνεται στη βιβλιογραφία είναι

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) + 5,75 \frac{z}{h} \right]$$

όπου:

$$h = u_* / \delta f$$

f η παράμετρος Coriolis =  $2 \Omega \sin \varphi \cong 10^{-4} \text{ S}^{-1}$

$\Omega$  η γωνιακή περιστροφή της γης  
 $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος

## 9.11 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο

Η ταχύτητα του ανέμου σε ορισμένη θέση στο χώρο δεν παραμένει σταθερή με τον χρόνο. Μεταβάλλεται και κατά μέγεθος και κατά διεύθυνση.

Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο για μια μεγάλη χρονική περίοδο περιέχει μεταβολές που οφείλονται σε εποχιακές διακυμάνσεις ταχύτητας, σε μεταβολές ταχύτητας που οφείλονται σε παροδικά κλιματολογικά συστήματα και σε μεταβολές ταχύτητας που οφείλονται στην ασταθή φύση της ροής. Η τελευταία έχει χαρακτηριστικές κλίμακες χρονικών μεταβολών μέχρι λίγων ωρών ενώ οι μεταβολές ταχύτητας λόγω κλιματολογικών συστημάτων έχουν χρονική κλίμακα ημερών. Με την ανάλυση της ταχύτητας του ανέμου στο φάσμα συχνοτήτων διαπιστώνει κανείς τις προηγούμενες περιοχές από τη διαφορετική ενεργειακή κατανομή του στο φάσμα.

Ορίζεται μέση ταχύτητα (χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης 10 min έως 1 ώρα) και τύρβη της ροής  $\overline{u'^2}$ , ως:

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \quad \overline{u'^2} = \frac{1}{T} \int_0^T (U(t) - \bar{U})^2 dt$$

Η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι απαραίτητη για ενεργειακούς σκοπούς, η τιμή της τύρβης της ροής απαιτείται για τον υπολογισμό των μεταβαλλόμενων φορτίων που επιδρούν στην ανεμογεννήτρια και που οδηγούν σε γήρανση υλικών.

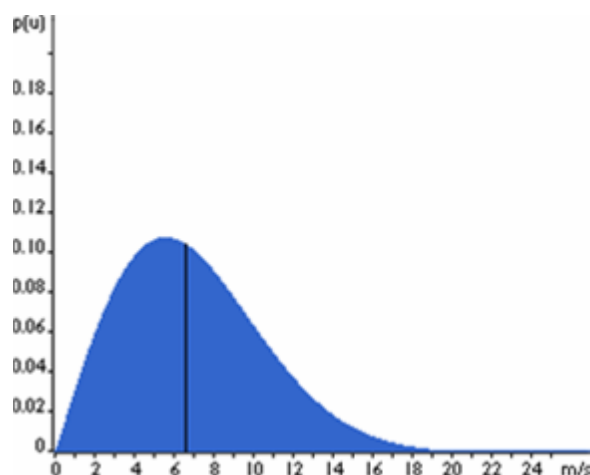
Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας έχει χαρακτηριστικό και τη διάρκειά της. Έτσι λοιπόν μια ριπή ανέμου χαρακτηρίζεται από τη μέση τιμή της κατά τη διάρκεια της ριπής. Συνήθως εξετάζεται ριπή ανέμου διάρκειας 3 sec ενώ είναι προφανής η μέση τιμή της ριπής για χρονική περίοδο ίση με τη χρονική περίοδο ολοκλήρωσης της μέσης ταχύτητας είναι η ίδια με τη μέση τιμή ταχύτητας για  $T = 1h$ .

Η μέση τιμή ταχύτητας σε μια περιοχή μπορεί να είναι ετήσια (καταγραφή των μέσων ετήσιων ταχυτήτων), εποχιακή (μέση τιμή χειμώνα) συγκεκριμένου ύψους ή ετών (μέση τιμή χειμώνων), ημερήσια (μέση τιμή ημέρας ή ημερών) και τέλος μέση ωριαία τιμή.

Οι εποχιακές και ημερήσιες τιμές επηρεάζονται από τη διαδοχή των εποχών και την εναλλαγή ημέρας και νύχτας. Η ενεργειακή απόδοση ανεμογεννήτριας με διάρκεια ζωής 20 τουλάχιστον ετών θα εξαρτηθεί από τη μέση ετήσια τιμή ταχύτητας ανέμου στη θέση εγκατάστασής της. Η μέση αυτή ετήσια τιμή θα προκύψει από μετρήσεις ταχυτήτων ανέμου για πολλά χρόνια προκειμένου να εξαχθεί η μέση ετήσια ταχύτητα. Μετρήσεις αποδεικνύουν ότι η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου κάθε χρόνο διαφέρει από μέρος σε μέρος και από χρόνο σε χρόνο, με αποτέλεσμα σήμερα

να θεωρείται απαραίτητο να υπάρχουν ανεμολογικές μετρήσεις τουλάχιστον 3-5 ετών στη θέση εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας.

Η εποχιακή διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου αποτελεί χρήσιμο στοιχείο για τον υπολογισμό της εποχιακής ενεργειακής απόδοσης της ανεμογεννήτριας και της ποιότητας προσαρμογής της καμπύλης ενεργειακής παραγωγής και ζήτησης .



*Σχήμα 9.27 Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας των ταχυτήτων του ανέμου.*

Η διάρκεια πνοής του ανέμου είναι από τα πλέον απαραίτητα στοιχεία που πρέπει να είναι γνωστά στη θέση εγκατάστασης της μηχανής. Η καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου, εκφράζει το ποσοστό του χρόνου (πχ τις ώρες του έτους από τις 8760) για τις οποίες πνέει άνεμος ταχύτητας μεγαλύτερης μιας συγκεκριμένης τιμής. Η καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας ταχύτητας  $P(V)$  αποτελεί μια άλλη καμπύλη ισοδύναμη με τη καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου και εκφράζει τη πυκνότητα πιθανότητας ο άνεμος να έχει ταχύτητα μεταξύ  $V - dV/2$  και  $V + dV/2$ .

Ο πίνακας διπλής εισόδου συχνότητας πνοής ανά διεύθυνση μπορεί να παρασταθεί γραφικά με το ροδόγραμμα ανέμου. Το ροδόγραμμα της θέσης είναι ένα αρκετά εποπτικό διάγραμμα που δίνει αμέσως τη κατεύθυνση ανέμου που επικρατεί στην περιοχή και τη διάρκεια πνοής ανέμου από κάθε κατεύθυνση.

## 9.12 Η τύρβη του ανέμου

Τυπικό ανεμογραφικό καταγραφικό μεταβολής του ανέμου δείχνει ότι ο φυσικός άνεμος μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από ένα ευρύ φάσμα υψηλής συχνότητας ριπών που επιτίθεται σε μικρότερης συχνότητας μεταβαλλόμενο άνεμο. Είναι προφανές ότι οι διαταραχές ταχύτητας του ανέμου είναι τυχαίες στον χαρακτήρα τους και δεν μπορούν να αναλυθούν με ντετερμινιστικό τρόπο. Προς το παρόν χρησιμοποιούνται στατιστικές τεχνικές για την περιγραφή των

χαρακτηριστικών μεταβολής του ανέμου.

Από τον ορισμό της μέσης τιμής ταχύτητας προκύπτει ότι η τύρβη ορίζεται ως η διαταραχή ταχύτητας (διαφορές στιγμιαίας ταχύτητας) με περίοδο μικρότερη από την περίοδο ολοκλήρωσης της μέσης τιμής. Η μέση τιμή ταχύτητας για περίοδο ολοκλήρωσης  $T$  ορίζεται ως:

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt$$

Η τύρβη συνεπώς ορίζεται ως:

$$u(t) = U(t) - \bar{U}$$

και η ένταση τύρβης:

$$\bar{u}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [U(t) - \bar{U}]^2 dt$$

Όπου  $T$  η περίοδος ολοκλήρωσης της μέσης τιμής ταχύτητας. Μέτρο της μεταβλητότητας της τύρβης αποτελεί η ποσότητα:

$$I = \frac{\sqrt{\bar{u}^2}}{\bar{U}}$$

που αποτελεί και την αδιάστατη τιμή της τύρβης.

Μετρήσεις στο επιφανειακό οριακό στρώμα (50-100 μέτρα από το έδαφος) έδειξαν ότι η ένταση της τύρβης έχει άμεση σχέση με την ταχύτητα τριβής  $u_*$

$$\sqrt{\bar{u}^2} = 2,5u_*$$

οπότε ο λογαριθμικός νόμος μεταβολής της ταχύτητας δίνει τη μεταβολή της αδιάστατης τιμής της τύρβης με το ύψος

$$I(z) = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

Χρησιμοποιώντας την εμπειρική σχέση μεταξύ ύψους τραχύτητας  $z_0$  και του εκθέτη του νόμου μεταβολής της ταχύτητας καθ' ύψος προκύπτει ότι:

$$I(z) = \frac{a}{1 - a \ln\left(\frac{1\theta}{z}\right)}$$

και ότι

$$I(10m) = a$$

Συνεπώς μετρήσεις της έντασης της τύρβης στα 10 m από το έδαφος οδηγούν στην εκτίμηση του συντελεστή  $a$  του εκθετικού νόμου.

Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου είναι τυχαίες και μετρήσεις δείχνουν ότι η συνάρτηση της πυκνότητας πιθανότητας της διαταραχής ταχύτητας  $u$  ακολουθεί προσεγγιστικά την κατανομή Gauss

$$P(u) = \frac{1}{\sigma_u^2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma_u^2}\right)$$

Η στιγμιαία τιμή ταχύτητας αν θεωρηθεί περιοδική συνάρτηση με περίοδο  $T$  (το χρόνο μέσης τιμής) μπορεί να αναλυθεί κατά Fourier. Η κατανομή της ενεργείας διαταραχών ταχύτητας στο φάσμα συχνοτήτων έχει τυπική γραφική παράσταση με τη κλασική κλίση  $-5/3$  στην αδρανειακή περιοχή των μεγάλων συχνοτήτων.

### 9.12.1 Φάσμα τύρβης

Η συνάρτηση φασματικής πυκνότητας τύρβης ορίζεται έτσι ώστε:

$$S_u(n)dn$$

να αποτελεί την ενεργειακή συνεισφορά στη τύρβη  $u^2$  των συχνοτήτων  $n$ ,  $n + dn$ . Ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης σε ολόκληρο το φάσμα συχνοτήτων δίνει τη μεταβλητότητα τύρβης  $u^2$ :

$$u^2 = \int_0^{\infty} S_u(n)dn \quad \text{ή} \quad u^2 = \int_0^{\infty} n \cdot S_u(n)d(\ln n)$$

Η δεύτερη έκφραση είναι χρήσιμη στις γραφικές παραστάσεις λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων  $n$ . Διάφορες εμπειρικές θέσεις έχουν προταθεί για το  $S_u(n)$ . Η μορφή που γενικά γίνεται αποδεκτή ως η καλύτερη είναι αυτή του Von- Karman.

$$\frac{n \cdot S_u(n)}{u^2} = \frac{4\tilde{n}}{[1 + 70,8\tilde{n}^2]^{5/6}}$$

Η διαμήκης κλίμακα τύρβης είναι ένα μέτρο του μέσου μεγέθους της δίνης που συνήθως αναφέρεται ως οι δίνες που περιέχουν την ενέργεια της τύρβης. Η κλίμακα τύρβης μπορεί να εκτιμηθεί από

$$X_{Lu}(z) = 25 \frac{z^{0,35}}{z_0^{0,063}}$$

Υπάρχει μεγάλη διακύμανση στις δημοσιευμένες τιμές της κλίμακας τύρβης. Η προηγούμενη έκφραση βασίζεται σε στοιχεία που θεωρούνται τα πλέον αξιόπιστα. Πάντως εκφράζει τις μετρήσεις με ακρίβεια  $\pm 30\%$ .

Η περιοχή χαμηλών συχνοτήτων του φάσματος σχηματίζει την μακρομετεωρολογική πλευρά και οι μεταβολές οφείλονται σε κινήσεις αερίων μαζών

μεγάλης κλίμακας όπως χαμηλά βαρομετρικά, αντικυκλώνες με περίοδο 4 περίπου ημερών.

Η περιοχή υψηλών συχνοτήτων, περιοχή μεταβολής που οφείλεται στην ατμοσφαιρική τύρβη, σχηματίζουν την περιοχή της μικρομετεωρολογίας. Οι μεταβολές αυτές είναι αποτέλεσμα μηχανικής ανάμειξης των κατώτερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας από την τραχύτητα εδάφους και έχουν την ενέργειά τους κεντραρισμένη σε περίοδο 1 min.

### 9.12.2 Ριπές ανέμου

$$\bar{U}_{\mu\epsilon\gamma}(z) = \bar{U}(z) + \gamma\sqrt{u^2}(z)$$

όπου  $\gamma$  ο συντελεστής ριπής. Η τιμή του  $\gamma$  εξαρτάται από την αδράνεια και το είδος του ανεμόμετρου καθώς και από το χρόνο που λαμβάνεται η μέση τιμή της ριπής του ανέμου. Ο  $\gamma$  είναι ανεξάρτητος του ύψους τραχύτητας  $z_0$  και ύψους  $z$ . Διαιρώντας με  $\bar{U}(z)$  προκύπτει:

$$\frac{\bar{U}_{\mu\epsilon\gamma}(z)}{\bar{U}(z)} = g(z) = 1 + \gamma I_u(z)$$

Ο συντελεστής ριπής δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma(t) = 0,42 \ln(3600/t)$$

όπου  $t$  διάρκεια μέτρησης της μέσης τιμής της ριπής.

Περίοδος ριπής $t$ (sec)	Συντελεστής ριπής $\gamma$	Λόγος ριπής $g$ (10 m)
1	3,44	1,6
3	2,98	1,51
5	2,76	1,48
10	2,47	1,43
20	2,18	1,38
30	2,01	1,35
60	1,72	1,3
600	0,75	1,13
3600	0	1

Για ριπή διάρκειας ολοκλήρωσης 3sec προκύπτει:  $\gamma = 2,98$ , οπότε ο λόγος ριπής είναι:

$$g_{3sec}(z) = 1 + 2,98 I_u(z)$$

Η σχέση αυτή προέκυψε από μετρήσεις στη Μ. Βρετανία.

Ο λόγος ριπής μπορεί να υπολογιστεί από τις ανεμολογικές μετρήσεις. Κατά συνέπεια μπορεί να προκύψει στο ύψος του ανεμομέτρου η τιμή της τύρβης, οπότε προκύπτει το ύψος τραχύτητας  $z_0$  και ο εκθέτης  $a$ . Για ύπαιθρο (ομαλό έδαφος)  $z_0 = 0,03$  m



$$g_{3sec} = 1 + 2,98 \frac{1}{\ln\left(\frac{10}{0,03}\right)} = 1,51$$

### 9.13 Χωρική μεταβολή της έντασης του ανέμου

Η ροή του ανέμου επάνω στην επιφάνεια της γης υπόκειται στους κλασικούς νόμους της μηχανικής των ρευστών. Ως εκ τούτου, είναι δυνατή εκτός των πειραματικών μετρήσεων η χρήση των αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων, που χρησιμοποιούνται στην μηχανική των ρευστών και στην αεροδυναμική, για να μελετηθεί η διανομή της ταχύτητας του ανέμου σε διάφορες επιλεγμένες θέσεις. Πιο συγκεκριμένα, η κατακόρυφη διανομή ταχύτητας του ανέμου ακολουθεί τη συμπεριφορά τυρβώδους οριακού στρώματος, όπου βέβαια πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η επίδραση της τραχύτητας του εδάφους με τη γενική της έννοια, δηλαδή η ύπαρξη κτιρίων, βράχων, δένδρων κλπ.

Για την περιγραφή της κατακόρυφης διανομής της ταχύτητας του ανέμου έχουν προταθεί διάφορες αναλυτικές σχέσεις, οι οποίες στηρίζονται στη θεωρία των οριακών στρωμάτων. Σαν γενική παρατήρηση πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας ότι η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει σημαντικά με το ύψος από το έδαφος στο οποίο αναφέρονται οι μετρήσεις. Συνήθως η μεταβολή αυτή είναι αξιοσημείωτη μέχρι τα πρώτα εκατό (100 m) μέτρα από το έδαφος, δηλαδή μέχρι το συνηθισμένο πάχος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.

Οι κυριότερες διανομές ταχύτητας που έχουν προταθεί είναι:

- α. η λογαριθμική διανομή (log-law) η οποία εκφράζεται σαν:

$$V(z) = k_1 \cdot \ln(z/z_0) + k_2$$

ή

$$\frac{V(z)}{V(z_1)} = \frac{\ln[(z - z^*)/z_0]}{\ln[(z_1 - z^*)/z_0]}$$

και δίνει την ταχύτητα σε ύψος  $z$  από το έδαφος συναρτήσει κάποιων αριθμητικών σταθερών, του τυπικού ύψους τραχύτητας της περιοχής  $z_0$  και του ύψους μετατόπισης μηδενικού επιπέδου  $z^*$ . Στην περίπτωση πολύπλοκου τοπογραφικού ανάγλυφου η παράμετρος  $z_0$  εξαρτάται και από τη διεύθυνση του ανέμου.

- β. η εκθετική διανομή (power law) η οποία εκφράζεται σαν:

$$\frac{V(z)}{V(z_1)} = \left(\frac{z}{z_1}\right)^a$$

και δίνει την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος  $z$  από το έδαφος συναρτήσει της παραμέτρου  $a$ , της οποίας η ακριβής τιμή εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους αλλά και την διεύθυνση του ανέμου. Οι τιμές της παραμέτρου  $a$  κυμαίνονται κατά κανόνα μεταξύ του 0,08 για παγωμένες επιφάνειες και του 0,45 για αστικές περιοχές.

Στην βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες εκτιμήσεις για την τιμή της παραμέτρου  $a$ , όπως η αναλυτική σχέση που προτάθηκε από τους Justus και Mikhail (1976), η οποία δίνει:

$$a = \frac{0,37 - 0,088 \ln[V(z = z_1)]}{1 - 0,088 \ln(z_1/10)}$$

Οι ίδιοι ερευνητές προτείνουν για γρήγορους υπολογισμούς μια μέση τιμή ίση με  $a = 0,023 \pm 0,03$ , ενώ ο Vadot προτείνει μια μέση τιμή ίση με  $a = 0,20$ . Από άλλους συγγραφείς έχει προταθεί συσχέτιση μεταξύ του ύψους τραχύτητας  $z_0$  και του εκθέτη  $a$  βάσει της σχέσης:

$$z_0 = 15,25 \exp\left(-\frac{1}{a}\right)$$

Ολοκληρώνοντας, πιστεύουμε ότι για σχετικά γρήγορους υπολογισμούς μια τυπική τιμή  $a = 0,20$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αρκετή ακρίβεια, εφόσον δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί για την υπό μελέτη τοποθεσία.

Όλες οι ανωτέρω εξισώσεις ισχύουν για επίπεδη επιφάνεια, η οποία ορίζεται βάσει των κάτωθι περιορισμών, δεχόμενοι πάντοτε ότι η θέση που γίνονται οι ανεμολογικές μετρήσεις συμπίπτει με τη θέση πιθανής εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας:

α. Η διαφορά ύψους μεταξύ της θέσης της ανεμογεννήτριας και του περιβάλλοντος χώρου σε ακτίνα 12 km να μην είναι μεγαλύτερη των 60 μέτρων.

β. Όλοι οι λόφοι με λόγο ύψους προς πλάτος μικρότερο από 0,016 σε ακτίνα 4 km πρέπει να έχουν διαφορά ύψους μεταξύ του υψηλότερου και χαμηλότερου σημείου το πολύ το 1/3 της διαφοράς ύψους μεταξύ του κάτω μέρους του στροφείου της ανεμογεννήτριας και του χαμηλότερου σημείου του εδάφους.

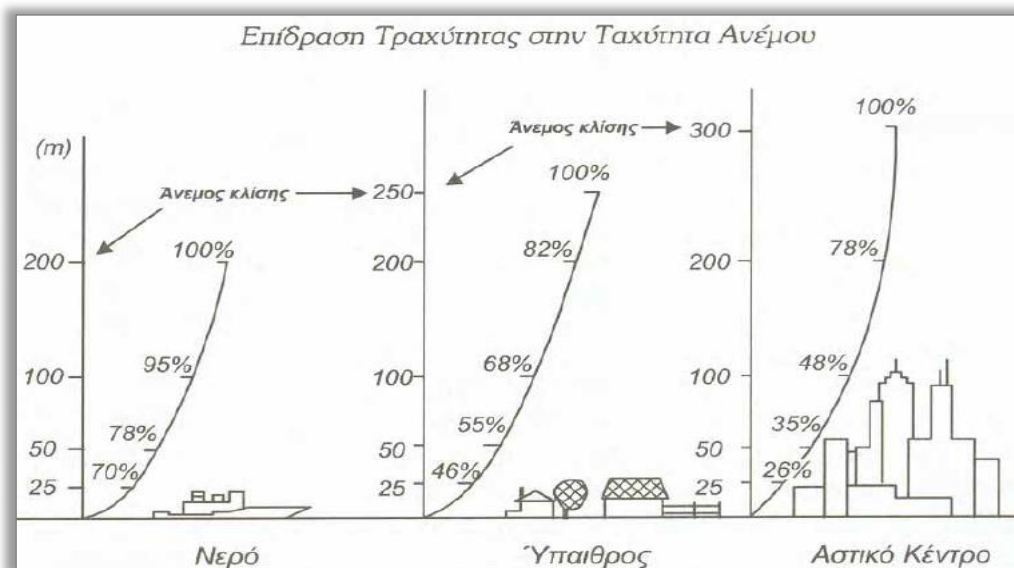
Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι σχεδόν πάντοτε απαραίτητη η αναγωγή των μετρήσεων των χαρακτηριστικών του ανέμου στο υπό μελέτη ύψος λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, δεδομένου ότι οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου παρουσιάζονται συνήθως ανηγμένες σε ύψος 10 ή 30 μέτρων. Όμως, πρέπει να τονισθεί ότι η εφαρμογή των εξισώσεων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, δεδομένης της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στην εκτίμηση των παραμέτρων  $z_0$  και  $a$ . Για το λόγο αυτό και για τον περιορισμό του σφάλματος κατά τη μέτρηση της καμπύλης ισχύος των ανεμογεννητριών, οι κανονισμοί IEA (International Energy Association)

συνιστούν την τοποθέτηση των ανεμομέτρων στο ύψος της πλήμνης της μηχανής και όχι τη χρήση των παραπάνω εμπειρικών αναγωγικών σχέσεων.

Τέλος, για τη χρησιμοποίηση των παραπάνω ημιεμπειρικών διανομών ταχύτητας για αποστάσεις μεγαλύτερες των 50 m από το έδαφος είναι σκόπιμο να συμπεριληφθούν και διορθώσεις λόγω περιστροφής της γης.

### 9.14 Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους

Είναι συνηθισμένο το φαινόμενο της μέτριας λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας, αν και έχει εγκατασταθεί σε περιοχή με υψηλό αιολικό δυναμικό. Στις περισσότερες από τις περιπτώσεις αυτές η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε έντονα μεταβαλλόμενο πεδίο ροής λόγω της υψηλής τύρβης της περιοχής. Η εμφάνιση υψηλής τύρβης, εξαρτάται εκτός από τις γενικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, τόσο από την ύπαρξη μεμονωμένων κτιρίων ή άλλων εμποδίων όσο και από την τραχύτητα του εδάφους της περιοχής. Άλλωστε, η τραχύτητα του εδάφους επηρεάζει άμεσα και την τιμή του συντελεστή  $a$  της εκθετικής διανομής της ταχύτητας.



Σχήμα 9.28

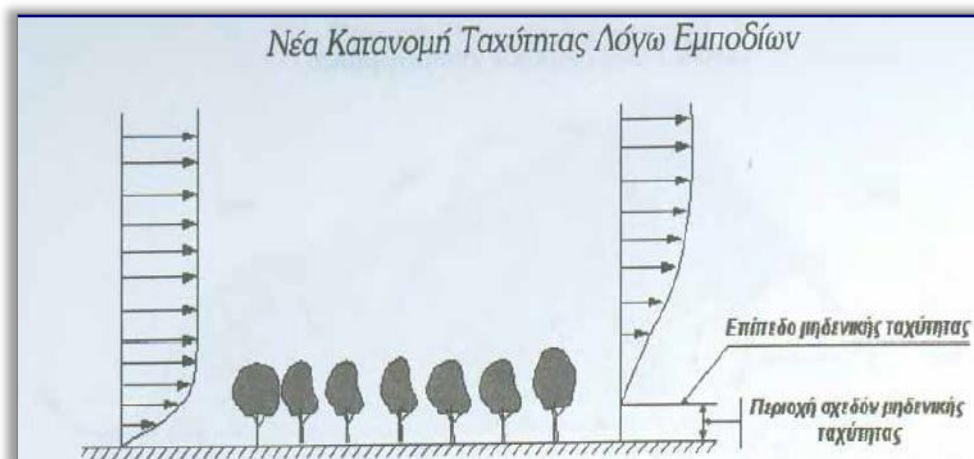
Επιφάνεια	Περιγραφή	$z_0$
Πάγος, Βούρκος	Λεία Επιφάνεια	$\approx 10^{-5}$
Ήρεμη Θάλασσα, Χιονισμένη περιοχή	Επίπεδη Λοφώδης περιοχή	$\approx 10^{-4}$
Άμμος, Έρημος, Υπήνεμη Παραλία	Εξαρτάται από μέγεθος κόκκων και την παρουσία αμμόλοφων ή κυματώσεων	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Χιονισμένη Αγροτική Περιοχή	Ομαλή Επιφάνεια	$\approx 10^{-3}$
Γυμνό Έδαφος	Μεγαλύτερες τιμές για οργανωμένο	$10^{-3} \div 10^{-2}$
Γρασίδι - Χόρτα	Ύψους 0.02 ÷ 0.1m Ύψους 0.25 ÷ 1.0m	$\approx 0.003 \div 0.01$ $\approx 0.04 \div 0.1$
Αεροδρόμιο-Διάδρομος	Περιοχή αεροδρομίου	$\approx 0.02$
Αγροτικές Καλλιέργειες	Εξαρτάται από την ένταση του ανέμου	$\approx 0.04 \div 0.20$
Τυπικές Αγροτικές περιοχές	Χωράφια με μεμονωμένα δένδρα και κτίρια	0.01 ÷ 0.1
Περιβόλι Οπωροφόρων	Εξαρτάται από τις εποχές	0.5 ÷ 1.0
Πολλά Δένδρα, Λίγα κτίσματα, Δενδρόφυτοι φράκτες	Εξαρτάται από το είδος των δέντρων	0.01 ÷ 0.03
Δάση	-	1.0 ÷ 6.0
Μικρές Πόλεις ή Προάστια	Χαμηλά σπίτια, δέντρα κλπ.	0.1 ÷ 2.0
Κέντρα πόλεων ή πολύ έντονο ανάγλυφο ορεινής περιοχής	Κτίρια ύψους 10 ÷ 50 m Ιδιαίτερα ανομοιόμορφη έκταση	1.0 ÷ 10.0

Σχήμα 9.29 Τυπικές τιμές τραχύτητας επιφανειών.

### 9.15 Επίδραση επιφανειακών εμποδίων

Για τη σωστή αεροδυναμική συμπεριφορά μιας αιολικής μηχανής είναι σκόπιμο η πτερωτή της ανεμογεννήτριας να βρίσκεται εκτός του πεδίου επιρροής τυχόν επιφανειακών εμποδίων. Με τον τρόπο αυτό έχουμε μεγιστοποίηση της

διαθέσιμης κινητικής ενέργειας του ανέμου, το πεδίο ροής είναι ελεύθερο στροβιλισμού και η τύρβη του ανέμου είναι η ελάχιστη δυνατή. Είναι συνεπώς σκόπιμο να εντοπίσουμε τις περιοχές επιρροής των κυριότερων επιφανειακών εμποδίων.



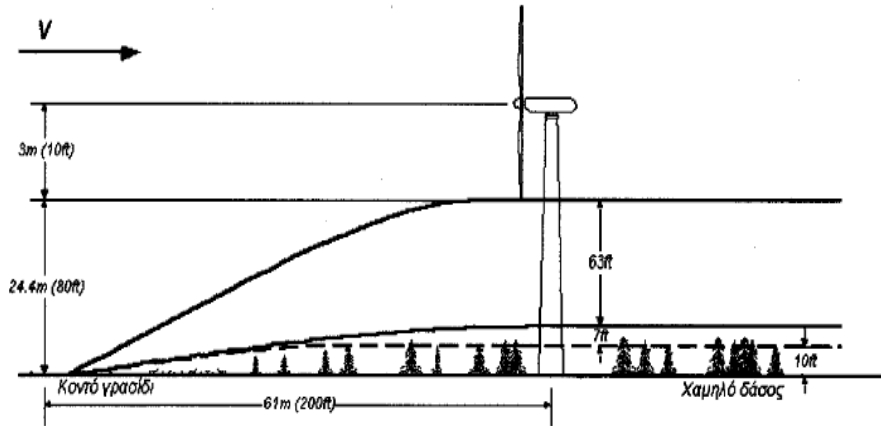
Σχήμα 9.30

Η παρουσία **συστοιχίας δένδρων** έχει ως αποτέλεσμα το μηδενισμό της ταχύτητας του ανέμου μέχρι και το ύψος κορυφής των δένδρων, ενώ το οριακό στρώμα φαίνεται να αναπτύσσεται από την κορυφή των δένδρων ως κατάντη. Στις περιπτώσεις αυτές το ύψος της ζώνης επιρροής είναι τουλάχιστον πέντε ως έξι ( $5 \div 6$ ) φορές το μέσο ύψος των δένδρων. Τέλος, η τοποθέτηση της περωτής της ανεμογεννήτριας θα πρέπει εκτός του οριακού στρώματος, που αναπτύσσεται στην περιοχή της συστοιχίας.

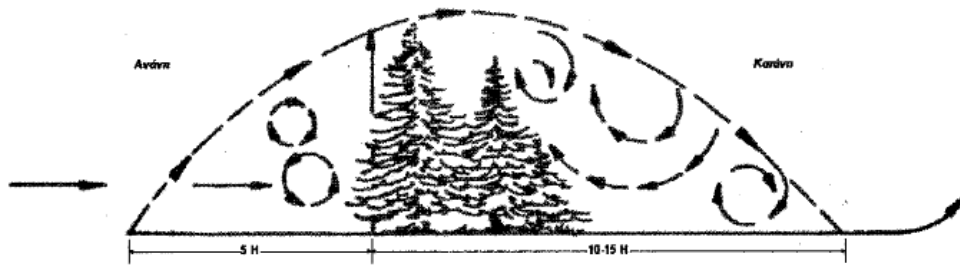
Πολύ συχνά και για περιπτώσεις **υψηλών δένδρων** αναφέρεται στην υπό μελέτη τοποθεσία η ύπαρξη περιοχών, όπου έχουμε μηδενισμό της ταχύτητας του ανέμου και δημιουργία έντονων στροβίλων ανακυκλοφορίας. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται «ανεμόφρακτες» και αποτελούν σαφή ένδειξη της ύπαρξης ανέμου υψηλών ταχυτήτων.

Τα **παρακείμενα κτίρια** αποτελούν ένα άλλο είδος εμποδίων, δεδομένου ότι η παρουσία τους διαταράσσει σε σημαντική έκταση το πεδίο ροής του ανέμου. Επιπλέον, οι οξείες γωνίες του κτιρίου αποτελούν την πηγή εκροής μεμονωμένων στροβίλων, με αποτέλεσμα την πλήρη τροποποίηση των χαρακτηριστικών του ανέμου.

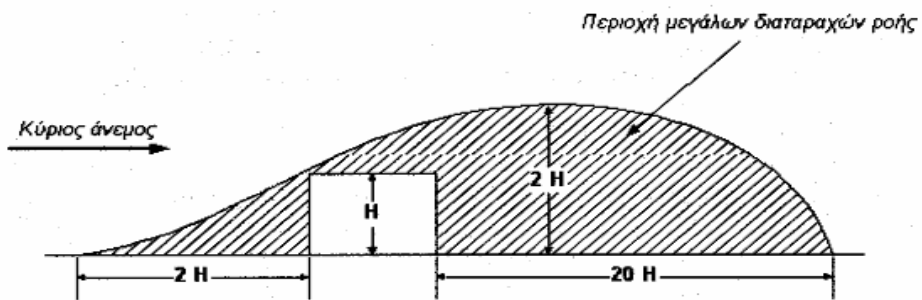
Εκτεταμένες έρευνες που αφορούν τη ροή γύρω από τα κτίρια κατέληξαν ότι η ζώνη επιρροής των κτιρίων περιλαμβάνει δύο φορές το ύψος του κτιρίου ανάντη, δέκα φορές το ύψος του κτιρίου κατάντη και ύψος τουλάχιστον διπλάσιο του κτιρίου



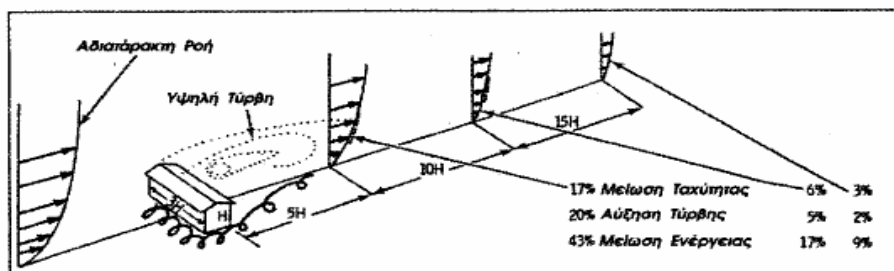
Σχήμα 9.31 Ζώνη επιρροής χαμηλών εμποδίων καθ' ύψος.



Σχήμα 9.32 Πεδίον ροής πλησίον ανεμοφράκτη.



Επίδραση Εμποδίου σε Ενέργεια-Τύρβη της Ροής



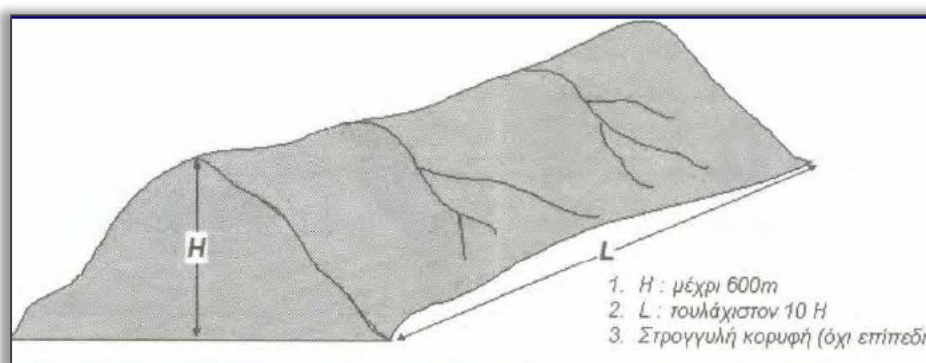
Σχήμα 9.33 Επίδραση εμποδίου σε Ενέργεια-Τύρβη της ροής.

στην περίξ του κτιρίου περιοχή. Σαν παράδειγμα αναφέρεται ότι σε απόσταση δεκαπλάσια του ύψους του κτιρίου έχουμε κατά 5% αύξηση του επιπέδου της τύρβης και κατά 6% μείωση της ταχύτητας του αέρα, η οποία και οδηγεί σε μείωση κατά 17% της διαθέσιμης ενέργειας του αδιατάρακτου ρεύματος στην ανάντη του κτιρίου.

### 9.16 Επίδραση του τοπογραφικού ανάγλυφου της περιοχής

Όπως προαναφέραμε, οι αναλυτικές σχέσεις που περιγράφουν τη διανομή ταχύτητας ισχύουν με μαθηματική ακρίβεια μόνο σε περιοχές που χαρακτηρίζονται ως «επίπεδες επιφάνειες». Όμως, η πλειοψηφία των περιοχών με υψηλό αιολικό δυναμικό χαρακτηρίζονται από έντονο ανάγλυφο. Συνεπώς, επειδή η διαμόρφωση του πεδίου ταχύτητας επηρεάζεται μεν από την τραχύτητα του εδάφους και τα επιφανειακά εμπόδια, πλην όμως μεγαλύτερη επίδραση έχουν οι εδαφολογικές ιδιομορφίες στην περιοχή της πιθανής θέσης εγκατάστασης μιας αιολικής μηχανής, είναι σκόπιμο να αναφέρουμε ορισμένα προκαταρκτικά στοιχεία, που αφορούν την παρουσία λοφοσειρών και περασμάτων στην υπό διερεύνηση περιοχή. Για ακριβέστερες αναλύσεις απαιτείται η μελέτη του τοπογραφικού ανάγλυφου της περιοχής είτε υπό κλίμακα σε αεροδυναμική σήραγγα είτε με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων πλήρους ανάλυσης του πεδίου ροής.

Η έννοια της λοφοσειράς λαμβάνεται κάθετη στην επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου. Το μέγιστο ύψος της λοφοσειράς δεν υπερβαίνει τα εξακόσια (600 m) μέτρα, ενώ το πλάτος της είναι τουλάχιστον δεκαπλάσιο του ύψους της λοφοσειράς. Η ανάλυσή μας βασίζεται στην υπόθεση ότι ο άνεμος περνάει επάνω από τη λοφοσειρά και δεν την παρακάμπτει κινούμενος πλαγίως.

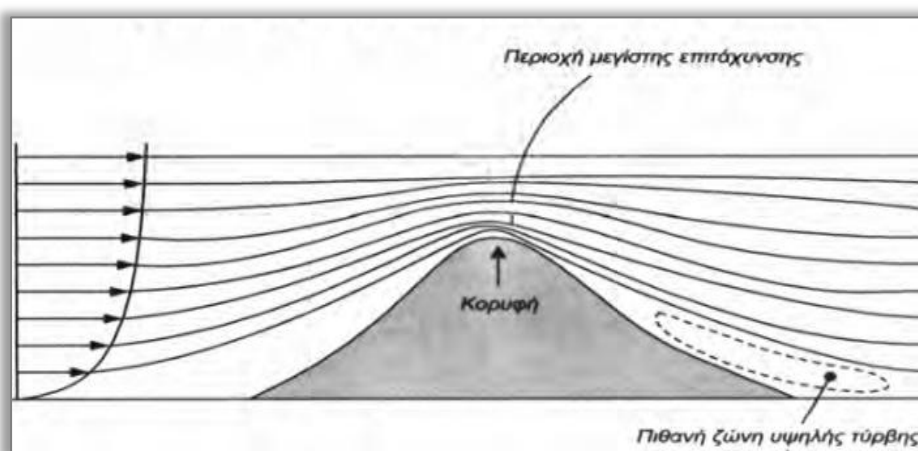


Σχήμα 9.34 Στοιχεία ορισμού λοφοσειράς.

Βασιζόμενοι στους κλασικούς νόμους της αεροδυναμικής υποηχητικών ταχυτήτων (πχ εξίσωση Bernoulli), μπορούμε να πούμε ότι η κορυφή της λοφοσειράς είναι μια πολύ καλή θέση εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας, δεδομένης της συμπίεσης των γραμμών ροής, η οποία ισοδυναμεί με επιτάχυνση της αέριας δέσμης.

Ένας πιθανός διπλασιασμός της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή της κορυφής ισοδυναμεί με οκταπλασιασμό της διαθέσιμης ισχύος του ανέμου στην εν λόγω περιοχή. Συχνά είναι προτιμότερο να εγκατασταθεί η ανεμογεννήτρια λίγο πριν την κορυφή της λοφοσειράς, ώστε να αποφευχθούν αφενός αρνητικές κλίσεις της ταχύτητας που συνοδεύουν τυχόν αποκόλληση της ροής, αφετέρου περιοχές υψηλής τύρβης.

Τέλος στη βιβλιογραφία ότι η ιδανική λοφοσειρά εμφανίζει κλίση περίπου  $15^\circ$  ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ενώ δεν είναι αποδεκτές λοφοσειρές χαμηλών κλίσεων. Σύμφωνα με την υφιστάμενη εμπειρία οι τριγωνικής διάταξης λοφοσειρές έχουν την καλύτερη επίδραση στο πεδίο ροής του ανέμου.



Σχήμα 9.35 Ταχύτητα ανέμου στην περιοχή υψώματος.

Ολοκληρώνοντας, πρέπει να επισημάνουμε ότι ιδιαίτερη επίδραση στη συνολική διανομή της ταχύτητας του ανέμου έχει η διαμόρφωση του εδάφους, δεδομένου ότι η παρουσία εμποδίων, στενώσεων ή ανοιγμάτων τροποποιεί σημαντικά τα αιολικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής. Αν και υπάρχουν αρκετές αναλυτικές ημιεμπειρικές σχέσεις που προτείνουν διορθώσεις της ταχύτητας του ανέμου παρουσία εμποδίων ή λόγω της τραχύτητας του εδάφους, ακριβείς υπολογισμοί μπορούν να γίνουν μόνο με την αριθμητική προσομοίωση της υπό εξέταση περιοχής και τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. **Σαν γενικός, τέλος, κανόνας πρέπει να τηρηθεί η αρχή ότι ο δρομέας (πτερωτή) μιας ανεμογεννήτριας πρέπει να βρίσκεται έξω από τη ζώνη επιρροής οποιουδήποτε επιφανειακού εμποδίου που βρίσκεται ανάντη της ανεμογεννήτριας, ώστε να μεγιστοποιηθεί η διαθέσιμη αιολική ενέργεια και να ελαχιστοποιηθεί η αναπτυσσόμενη ατμοσφαιρική τύρβη.**



## 9.17 Επεξεργασία των ανεμολογικών δεδομένων

Για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής δεν είναι αρκετό να γνωρίζουμε απλώς τη μέση ταχύτητα του ανέμου της περιοχής, αλλά απαιτείται η κατά το δυνατόν ακριβέστερη γνώση της κατανομής των συχνοτήτων εμφάνισης των διάφορων ταχυτήτων καθώς και των αντίστοιχων διευθύνσεων. Συνήθως για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης του ανέμου, εκτιμάται με ακρίβεια  $10^\circ$  η μέση διεύθυνση του ανέμου για χρονικά διαστήματα 10 min.

Για τον προσδιορισμό της έντασης του ανέμου επεξεργαζόμαστε τις καταγραφές της ταχύτητας του ανέμου. Εάν αυτές είναι στιγμιαίες, έχουμε τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε τόσο τις διακυμάνσεις όσο και τις τυχόν ριπές του ανέμου. Εάν ο ανεμογράφος είναι αθροιστικός, τότε δεν καταγράφονται οι διακυμάνσεις της ταχύτητας και προσδιορίζεται αθροιστικά η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια μιας προκαθορισμένης χρονικής περιόδου (πχ μιας ώρας).

Τέλος, στην περίπτωση που τα όργανα που μετρούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ανέμου είναι εγκατεστημένα σε κινούμενα με ταχύτητα  $u$  μέσα, πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι τα όργανα αυτά καταγράφουν τη σχετική  $W$  και όχι την απόλυτη  $V$  ταχύτητα του ανέμου. Για την εκτίμηση της πραγματικής (απόλυτης) ταχύτητας του ανέμου πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις της κινηματικής και πιο συγκεκριμένα η σχέση του Γαλιλαίου, δηλαδή:

$$\vec{V} = \vec{W} + \vec{u}$$

### 9.17.1 Ετήσια καμπύλη διάρκειας

Καταγράφοντας τις μέσες ταχύτητες του ανέμου ανά ορισμένη χρονική περίοδο (πχ μέσες ημερήσιες, μέσες ωριαίες) σε μια συγκεκριμένη θέση και σε ένα συγκεκριμένο ύψος στη διάρκεια ενός έτους, είναι δυνατή η δημιουργία της ετήσιας καμπύλης διάρκειας του ανέμου, η οποία μας δείχνει τον αριθμό των περιόδων του χρόνου, που ο άνεμος έχει ένταση μεγαλύτερη από μια ορισμένη τιμή.

### 9.17.2 Ετήσια καμπύλη συχνότητας

Στη θέση της καμπύλης ταχύτητας – διάρκειας, είναι δυνατή η χάραξη της αντίστοιχης καμπύλης (ή και ιστογράμματος) ταχύτητας – συχνότητας. Για παράδειγμα, η εν λόγω καμπύλη (ιστόγραμμα) μπορεί να προκύψει από τη καμπύλη διάρκειας (και αντίθετα) και δίνει το ποσοστό του έτους κατά το οποίο η μέση ταχύτητα του ανέμου βρίσκεται μέσα σε καθορισμένα όρια (πχ από 3 έως 4 m/s). Στην περίπτωση χρήσης συνεχούς καμπύλης και όχι ιστογράμματος, η αντιστοίχιση γίνεται για τη μέση ταχύτητα κάθε διαστήματος (πχ 3,5 m/sec). Η καμπύλη συχνότητας εμφανίζει εν γένει ένα ή το πολύ δύο μέγιστα, ενώ υπάρχουν αξιόλογες προσπάθειες αναλυτικής περιγραφής της, με τη χρήση κατάλληλων αναλυτικών παραμετρικών συναρτήσεων.

### 9.17.3 Καμπύλες διαστημάτων νηνεμίας

Η μελέτη των συνεχών χρονικών περιόδων (πχ ώρες, ημέρες) με νηνεμία ή με χαμηλές ταχύτητες του ανέμου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, δεδομένου ότι προσδιορίζει τις χρονικές περιόδους που η αιολική εγκατάσταση βρίσκεται εκτός λειτουργίας ή παρέχει μικρή ισχύ. Στις περιόδους αυτές οι ενεργειακές ανάγκες τις κατανάλωσης πρέπει να καλυφθούν είτε από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο είτε από αυτόνομες εφεδρικές πηγές ενέργειας είτε τέλος από αποθηκευμένη αιολική ενέργεια με τη χρήση συσσωρευτών. Για αυτόνομες εγκαταστάσεις, οι περίοδοι νηνεμίας καθορίζουν σε ένα βαθμό και το μέγεθος των συσσωρευτών και επιδρούν συνεπώς στο κόστος της εγκατάστασης.

Τα χρησιμοποιούμενα διαγράμματα, μας δίνουν στον οριζόντιο άξονα το πλήθος των συνεχών χρονικών περιόδων (πχ ημέρες) και στον κατακόρυφο άξονα τη συχνότητα επανάληψης των περιόδων της νηνεμίας. Στο διάγραμμα αυτό χαράζονται οι αντίστοιχες καμπύλες για ταχύτητες μικρότερες συγκεκριμένων τιμών.

## 9.18 Θεωρητικός υπολογισμός κατανομής συχνότητων ταχύτητας ανέμου

Για τον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού μιας θέσης απαιτείται η γνώση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας, ενέργειας που μεταβάλλεται όμως με το χρόνο. Αντιπροσωπευτική τιμή της όμως μπορεί να είναι η μέση ετήσια τιμή η οποία όμως για να υπολογισθεί απαιτεί τη γνώση της διάρκειας πνοής των ανέμων κάθε κατηγορίας ή κλίμακας ταχυτήτων.

Με την ύπαρξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι επιθυμητή για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού η ύπαρξη αναλυτικής έκφρασης της διάρκειας πνοής του ανέμου ή της πυκνότητας πιθανότητας πνοής ανέμων.

Γι' αυτό έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι προσαρμογής αναλυτικών εκφράσεων σε διαθέσιμες ανεμολογικές μετρήσεις. Από τις διάφορες προτάσεις φαίνεται ότι η αναλυτική σχέση Weibull για την πυκνότητα πιθανότητας έχει ευρύτερη προσαρμογή και γι' αυτό έχει γενικά καθιερωθεί.

Η κατανομή Weibull είναι μια διπαραμετρική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας με παραμέτρους  $c$  και  $k$  και έχει την αναλυτική έκφραση:

$$P(u) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k}$$

όπου  $V$  η ταχύτητα του ανέμου και  $c$  και  $k$  παράμετροι.

Η ποσότητα  $P(V)dV$  εκφράζει την πιθανότητα να φυσάει άνεμος στην περιοχή ταχύτητας μεταξύ  $V-dV/2$  και  $V+dV/2$  ή αλλιώς η ποσότητα  $8760 P(V)dV$  φανερώνει τις ώρες το χρόνο (1 έτος έχει 8760 ώρες) που φυσάει άνεμος ταχύτητας μεταξύ  $V - dV/2$  και  $V+dV/2$ .

Είναι φανερό ότι η μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι:

$$\bar{V} = \int_{V=0}^{\infty} VP(V)dV$$

Οπότε εκτέλεση πράξεων οδηγεί στη σχέση:

$$\bar{V} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

Όπου  $\Gamma$  η συνάρτηση γάμα.

Η ετήσια μεταβλητότητα του ανέμου (προσοχή όχι τύρβη) που ορίζεται ως

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} [V - \bar{V}]^2 P(V)dV$$

με την εκτέλεση πράξεων εκφράζεται από τη σχέση:

$$\sigma^2 = c^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$$

Η μεταβλητότητα  $\sigma^2$  σχετίζεται με τη μέση τιμή ταχύτητας με τη σχέση:

$$\sigma^2 = \overline{V^2} - \bar{V}^2$$

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ημιεμπειρικές σχέσεις για τις παραμέτρους  $c$  και  $k$ , όπως:

$$c = \frac{1,39\bar{V}^2}{(\bar{V}-2)} - 2^{0,089} \quad \text{και} \quad k = 1 + 0,48(\bar{V} - 2)$$

Η αθροιστική κατανομή συχνοτήτων (ή διάρκεια πνοής ανέμου) δίνεται από τη σχέση:

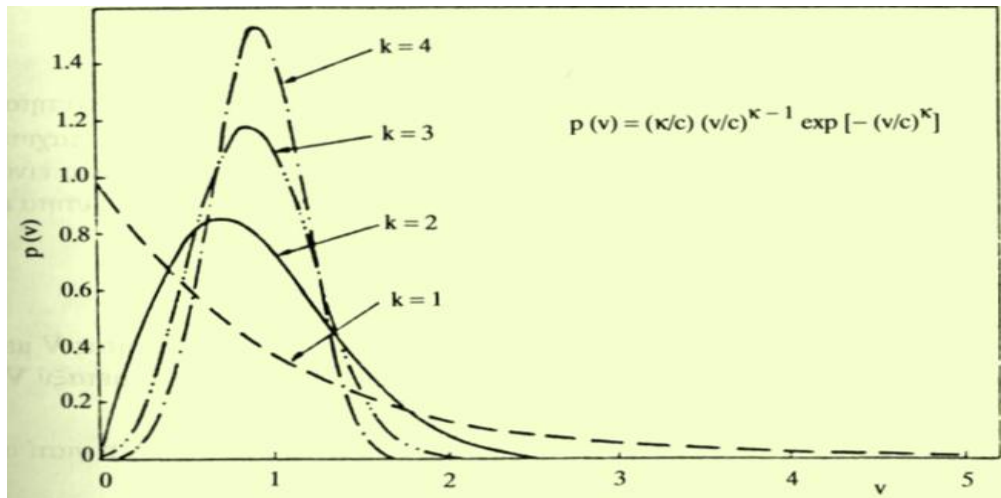
$$P(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} P(V)dV = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right]$$

Εκφράζει τη πιθανότητα να φυσάει άνεμος ταχύτητας μικρότερης τη  $V_x$  ή αλλιώς το ποσοστό του χρόνου που φυσάει άνεμος ταχύτητας μικρότερης της  $V_x$ .

### 9.18.1 Μέθοδος υπολογισμού των παραμέτρων $k$ και $c$

Οι παράμετροι κλίμακας ταχύτητας  $c$  και μορφής  $k$  της κατανομής

Weibull είναι δυνατόν να υπολογισθούν αν υπάρχουν μετεωρολογικές μετρήσεις στην περιοχή, προσαρμόζοντας με ελάχιστα τετράγωνα την αναλυτική σχέση στα πειράματα.

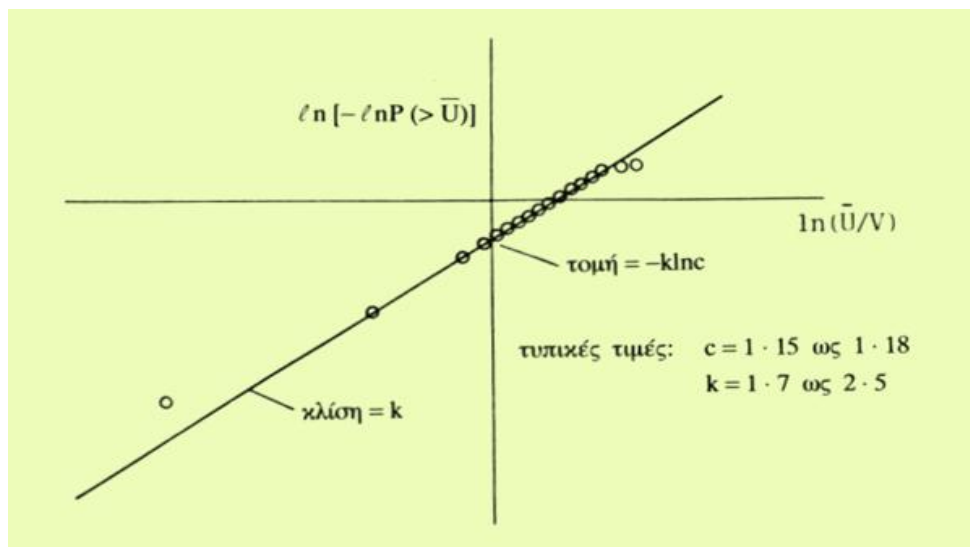


Σχήμα 9.36 Τυπική μορφή κατανομής Weibull.

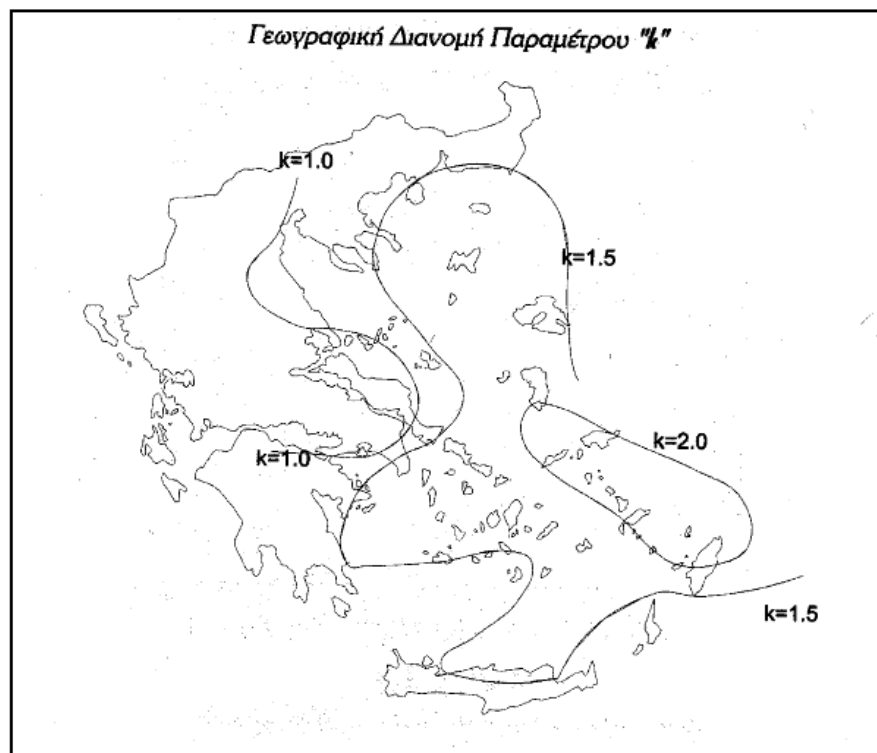
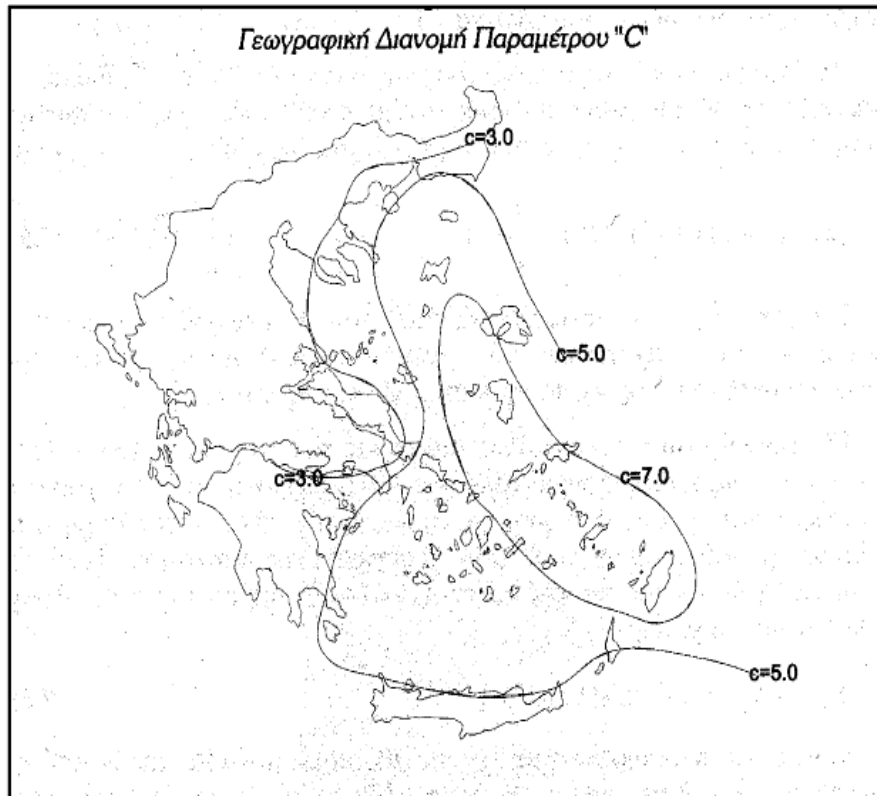
Συγκεκριμένα η αναλυτική σχέση διάρκειας πνοής ανέμου μπορεί να λογαριθμισθεί και να δώσει τη γραμμική σχέση:

$$\ln[-\ln[1 - P(V \leq V_x)]] = k \ln c + \ln V_x$$

οπότε οι ανεξάρτητες μεταβλητές  $k$  και  $c$  μπορούν να υπολογισθούν με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για διάφορες τιμές ταχυτήτων  $V_x$ .



Σχήμα 9.37 Η κατανομή Weibull σε λογαριθμική κλίμακα.



### 9.18.2 Ενέργεια και ισχύς ανέμου

Μια τοποθεσία χαρακτηρίζεται ανεμολογικά από τη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου  $\bar{V}$ , ταχύτητα η οποία προκύπτει από τη μέση τιμή των στιγμιαίων ταχυτήτων που δείχνουν τα ανεμογραφικά όργανα για μεγάλη περίοδο. Αν  $k$  και  $c$  είναι οι χαρακτηριστικές παράμετροι Weibull στην περιοχή τότε η μέση ετήσια ταχύτητα είναι:

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} VP(V)dV$$

Σχέση που ολοκληρώνει (μέση τιμή), το γινόμενο της στιγμιαίας ταχύτητας  $V$  με την πιθανότητα  $P(V)dV$  να υπάρχει τέτοια ταχύτητα (αυστηρά ταχύτητα μεταξύ  $V$  και  $V+dV$ ).

Η μέση ετήσια τιμή της ισχύος του ανέμου δεν είναι ίση με  $1/2\rho(\bar{V})^3$  γιατί απλά

$$(\overline{V^3}) \neq (\bar{V})^3$$

αλλά η μέση ετήσια τιμή της ισχύος του ανέμου θα προκύψει από τη σχέση:

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2}\rho V^3 P(V)dV$$

Εκτέλεση των πράξεων οδηγεί προσεγγιστικά στη σχέση:

$$\bar{P} = 2\frac{\rho}{2}(\bar{V})^3$$

δηλαδή η μέση ετήσια ισχύς του ανέμου είναι διπλάσια αυτής που προκύπτει χρησιμοποιώντας τον κύβο της μέσης ετήσιας τιμής ταχύτητας του ανέμου.

Η συνολική ετήσια ενέργεια του ανέμου είναι τότε:

$$E = 8760\bar{P}$$

### 9.18.3 Διανομή Rayleigh

Η διανομή Rayleigh είναι μια ειδική μορφή της διανομής Weibull και προκύπτει από αυτή, όταν η παράμετρος  $k$  ληφθεί ίση με 2. Η προτεινόμενη τιμή της παραμέτρου  $k$  αποτελεί μια αρκετά ρεαλιστική τιμή για την περιοχή του Αιγαίου. Με τον τρόπο αυτό απλοποιούνται οι αναλυτικές σχέσεις και για τον προσδιορισμό της

διανομής χρειάζεται μόνο η μέση ταχύτητα του ανέμου στην υπό μελέτη περιοχή, δηλαδή:

$$f(V) = \frac{\pi V}{2\bar{V}^2} \cdot \exp\left[-\frac{\pi V^2}{4\bar{V}^2}\right]$$

Η διανομή Rayleigh χρησιμοποιείται εναλλακτικά στη θέση της διανομής Weibull, επειδή παρουσιάζει συγκρίσιμα αποτελέσματα με λιγότερες μαθηματικές πράξεις. Η διανομή Rayleigh, χρειάζεται μόνο τη μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας  $\bar{V}$  μιας περιοχής, η οποία μπορεί να υπολογιστεί βάσει των μετρημένων ποσοστών εμφάνισης των διάφορων τιμών της ταχύτητας. Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση:

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^{i=n} f_i(V) \cdot V_i$$

όπου  $n$  είναι το πλήθος των διακριτών τιμών ταχύτητας, που έχουμε λάβει υπόψη μας κατά τη διάρκεια της καταγραφής των μετρήσεων.

## 9.19 Εκτίμηση του αιολικού δυναμικού της Ελλάδας

### 9.19.1 Μεθοδολογία

Το αιολικό δυναμικό της χώρας εκτιμήθηκε για πρώτη φορά από το εργαστήριο αεροδυναμικής του Ε.Μ.Π. Στην έρευνα αυτή, το πρώτο βήμα αποτέλεσε η χάραξη καμπυλών ισοταχυτήτων ανέμου σε ολόκληρο τον ελλαδικό χώρο και σε κλίμακα χάρτου 1:100.000. Κατόπιν θεωρήθηκε η μέση απόσταση θέσεων εγκατάστασης ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους τα 5 km, οπότε οι κορυφές των ισοπλευρών τριγώνων αποτελούσαν πιθανές θέσεις εγκατάστασης ανεμογεννητριών. Στη συνέχεια πάνω στο χάρτη χαράχθηκαν οι γραμμές μέσης τάσης του εθνικού ηλεκτρικού δικτύου και σημειώθηκαν οι θέσεις εκείνες εγκατάστασης ανεμογεννητριών που γειτνιάζουν με το δίκτυο. Οι θέσεις αυτές εγκατάστασης ανεμογεννητριών είναι οι οικονομικότερες από άποψη κόστους για διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο.

### 9.19.2 Χάραξη καμπυλών ισοταχυτήτων ανέμου

Για τη χάραξη των καμπυλών μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου στον ελλαδικό χώρο χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας και οι μετρήσεις της ΔΕΗ.

Ορισμένα αποτελέσματα της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας βασίζονται σε παρατηρήσεις 20 – 40 ετών και προέρχονται από 100 μετεωρολογικούς σταθμούς. Σε 40 απ' αυτούς οι μετρήσεις γίνονται με ανεμογράφο είτε με ανεμόμετρο χειρός δ

Θέση	(3) ΔΕΗ	(4) ΔΕΗ	(5)	δεσμευόμενη αιολική ενέργεια kwh/m <sup>2</sup>
Αθήνα		4,0 (± 0,2)		141
Αθήνα (Αστεροσκοπείο)		2,3 (± 0,1)		27
Αλεξανδρούπολη		3,5 (± 0,5)		94
Άνδρος		-	6,7	662
Βόλος		3,9 (± 0,4)		130
Ζάκυνθος		-	6,6	632
Ηράκλειο		4,6 (± 0,8)		14
Θεσσαλονίκη		2,90 (± 0,6)		54
Θήρα		6,6 (± 0,8)		632
Καβάλα		1,6 (± 0,2)		9
Κύθηρα	6,2	5,5 (± 0,4)		429
Κύθνος		-	6,8	691
Κύμη		2,5 (± 0,1)		34
Κως	6,2	6,2 (± 0,5)		524
Λαύριο		-	6,4	576
Λήμνος	6,0	5,2 (± 0,4)		386
Μήλος		6,3 (± 0,4)		550
Μυτιλήνη	5,2	5,0 (± 0,6)		291
Νάξος	7,0	7,2 (± 0,6)		787
Ναύπλιο		3,9 (± 0,7)		130
Ρόδος		5,3 (± 0,6)	5,7	366
Σάμος	6,0	6,3 (± 0,5)		511
Σκύρος	7,0	6,5 (± 0,5)		677
Σητεία		3,3 (± 0,5)		79
Χανιά		2,4 (± 0,8)		30
Χίος		4,0 (± 0,3)	6,2	524

Σχήμα 9.38 Μέσες ταχύτητες ανέμου.

a/a	Περιοχή	V(m/s) Περίοδος μετρήσεων
1	Άνδρος (Καλυβάρι)	9,7 (1981 – 90)
2	Τήνος (Αγ. Μαρίνα)	9,5 (1987 – 90)
3	Μύκονος (Φάρος)	10,8 (1983 – 90)
4	Κρήτη (Άνω Μούλια)	8,1 (1981 – 83)
5	Λήμνος (Βούναρος)	8,1 (1986 – 90)
6	Λέσβος (Ματσινέλι)	8,7 (1987 – 90)
7	Χίος (Ποταμιά)	8,1 (1986 – 89)
8	Σάμος (Μαραθόκαμπος)	10,4 (1986 – 90)
9	Εύβοια (Αγ. Σπυρίδων)	9,2 (1989 – 90)
10	Κάρπαθος (Σπόα)	9,6 (1983 – 89)
11	Σκύρος (Ασπούς)	6,5 (1987 – 89)
12	Σαμοθράκη (Αγ. Ανδρέας)	6,6 (1986 – 89)

Σχήμα 9.39 Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμων (10 m από το έδαφος. Μετρήσεις ΔΕΗ).



φορές την ημέρα. Τα αποτελέσματα της εργασίας βασίστηκαν στη στατιστική επεξεργασία μετρήσεων 20 μετεωρολογικών σταθμών της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 150 km και καλύπτουν έτσι ικανοποιητικά την περιοχή του Αιγαίου πελάγους και επαρκούν για την χάραξη των ισοταχυτήτων ανέμου στην περιοχή αυτή.

Στο εσωτερικό της χώρας όμως δεν υπάρχει επαρκές δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών για την ακριβή χάραξη των ισοταχυτήτων ανέμου. Έτσι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται βασίστηκαν σε ανεπαρκή αριθμό μετεωρολογικών σταθμών.

Πρέπει να τονισθεί ότι σχεδόν όλες οι θέσεις μετεωρολογικών σταθμών είναι ακατάλληλες για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού επειδή διαφορετικοί είναι οι σκοποί που οι σταθμοί αυτοί εξυπηρετούν (πχ συνήθως θέσεις αεροδρομίων που είναι κατά κανόνα υπήνεμες θέσεις). Γι' αυτό για τη σωστή εκτίμηση του αιολικού δυναμικού απαιτείται η ακριβής γνώση της μορφολογίας του εδάφους, της παραμέτρου τραχύτητας και κατά συνέπεια του εκθέτη  $\alpha$  αναγωγής ταχυτήτων με το ύψος από το έδαφος.

Για ανεμογεννήτριες διαμέτρου δρομέα 50 m το τυπικό ύψος από το έδαφος εγκατάστασης τους είναι 50 m. Στο ύψος αυτό η ταχύτητα είναι κατά 31% μεγαλύτερη της ταχύτητας στο ύψος μετρήσεως 10 m. Ο εκθέτης  $\alpha$  λήφθηκε ίσος με 0,17 τυπική τιμή για την τοπογραφία του ελλαδικού χώρου. Ο πίνακας «τάδε» συνοψίζει τα αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν στη χάραξη των ισοταχυτήτων που φαίνονται στο σχήμα «τάδε». Ο πίνακας «τάδε» δείχνει επίσης την παντελή έλλειψη ανεμολογικών στοιχείων για το εσωτερικό του ελλαδικού χώρου.

Στο σχήμα «τάδε» παρουσιάζεται το αιολικό δυναμικό της χώρας καθώς και το αιολικό δυναμικό των άλλων μελών κρατών των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων.

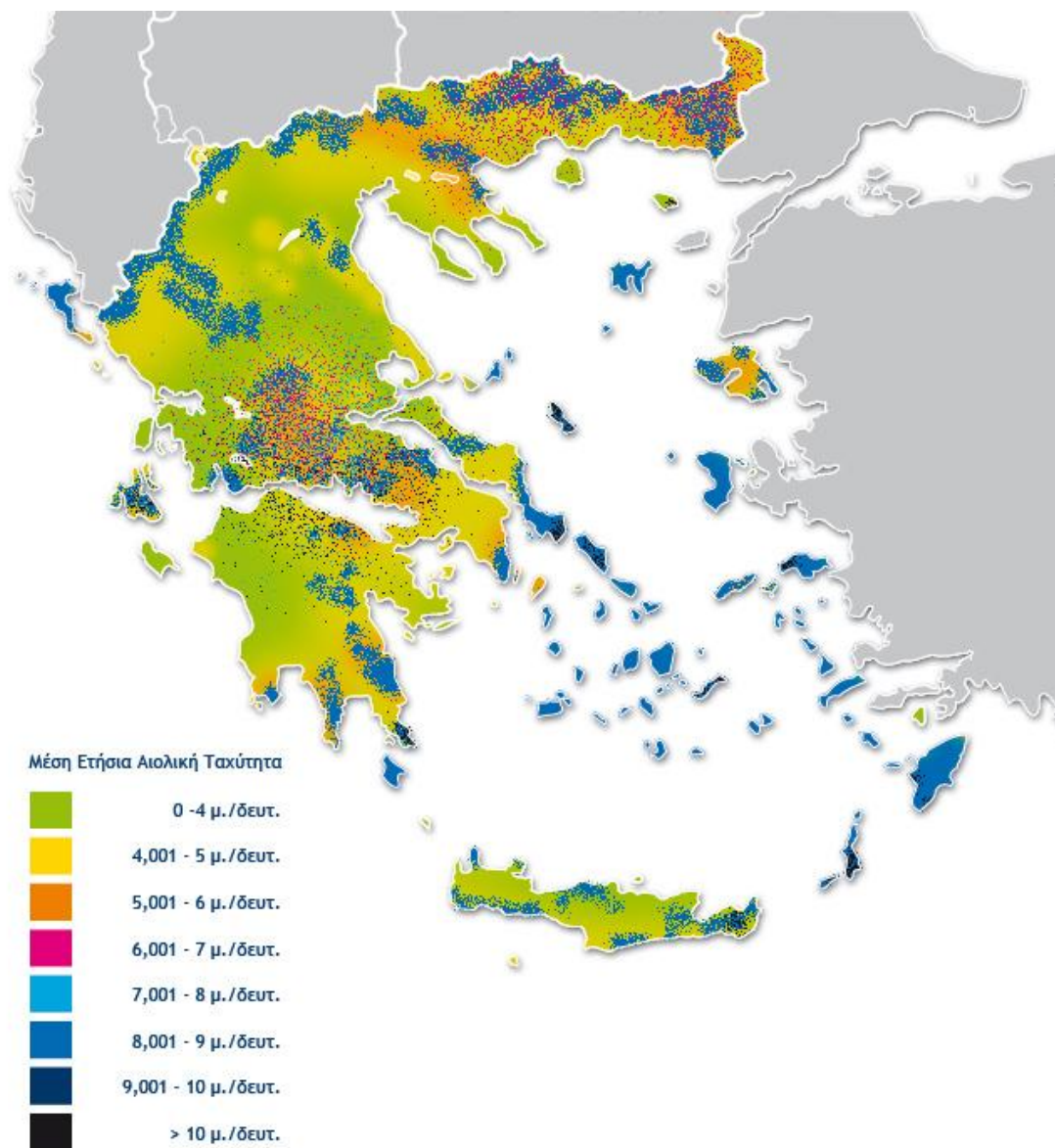
Από την απλή εξέταση των ισοταχυτήτων του σχήματος «τάδε» και από το σχήμα «τάδε» συνάγεται το ασφαλές συμπέρασμα της ύπαρξης υψηλού αιολικού δυναμικού στο νησιωτικό χώρο. Για την περιοχή αυτή η πυκνότητα πιθανότητας διανομής ταχύτητας εκφράζεται ικανοποιητικά με την καμπύλη διανομής Weibull και ότι η παράμετρος  $k$  είναι περίπου σταθερή ίση με  $k=2$ . Παραμετρική μελέτη αναφορικά με την επίδραση του  $k$  στο ετήσιο δεσμευόμενο αιολικό δυναμικό από ανεμοκινητήρα δείχνει ότι η παράμετρος αυτή έχει μικρή επίδραση και ότι τα ετήσια δεσμευόμενα αιολικά  $K_{wh}$  στο ύψος 10 m δίνονται από την έκφραση

$$E = 10,5\bar{V}^3 \quad KWh/\epsilon\tau\eta\sigma\acute{\iota}\omega\varsigma/m^2$$

όπου  $\bar{V}$  η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου σε m/s.

Με τις ισοταχείς καμπύλες του σχήματος «τάδε» και με τη βοήθεια της παραπάνω σχέσης μπορεί να εκτιμηθεί το αιολικό δυναμικό που μπορεί να δεσμευτεί από ανεμογεννήτριες σε μια περιοχή.

Πρέπει όμως να τονιστεί ότι οι καμπύλες ισοταχυτήτων είναι απλώς



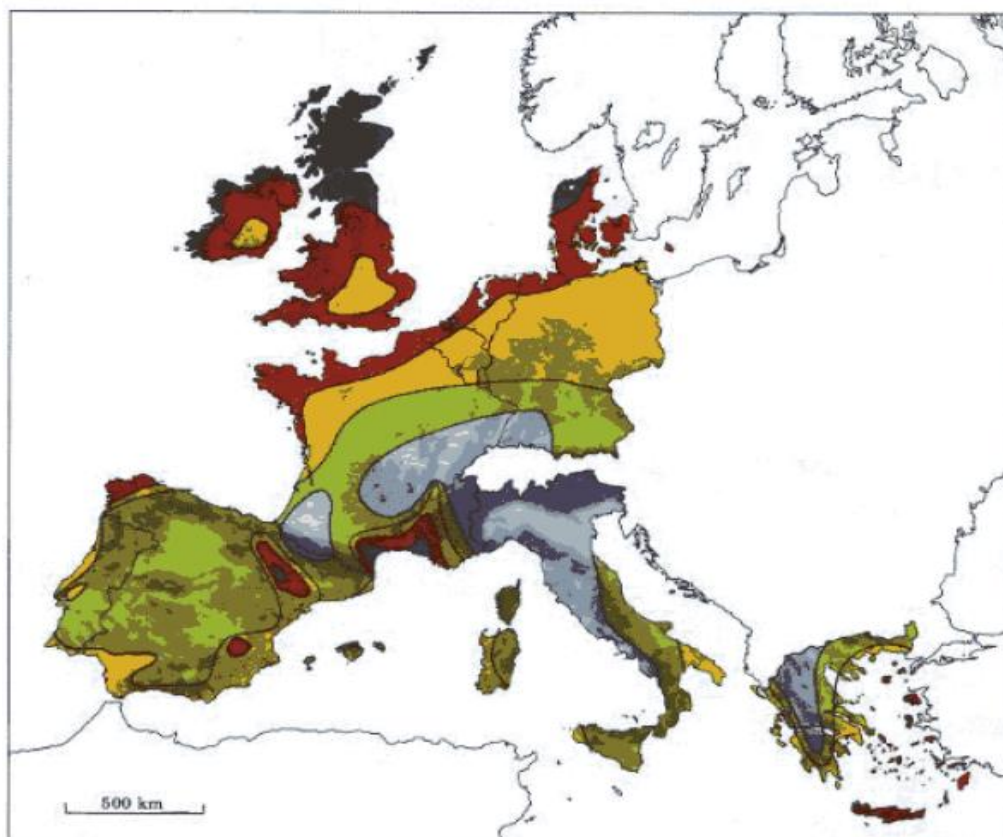
*Σχήμα 9.40* Χάρτης αιολικού δυναμικού της Ελλάδας.

ενδεικτικές του αιολικού δυναμικού της χώρας και πρέπει να χρησιμοποιούνται ως πρώτη ένδειξη ότι σε μια περιοχή υπάρχει ή δεν υπάρχει ικανοποιητικό αιολικό δυναμικό γιατί η ακριβής τιμή του αιολικού δυναμικού σε κάθε θέση είναι ισχυρή συνάρτηση της τοπογραφίας της περιοχής

### 9.19.3 Εκτίμηση του αριθμού των ανεμογεννητριών

Η εκτίμηση του αριθμού των θέσεων εγκατάστασης ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους βασίστηκε στις ακόλουθες παραδοχές:

#### Μέση απόσταση ανεμογεννητριών 5 km



Wind resources <sup>1</sup> at 50 metres above ground level for five different topographic conditions									
Sheltered terrain <sup>2</sup>		Open plain <sup>3</sup>		At a sea coast <sup>4</sup>		Open sea <sup>5</sup>		Hills and ridges <sup>6</sup>	
$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$
> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

Μια θέση θεωρείται κατάλληλη για εγκατάσταση ανεμογεννητριών αν:

- (1) Η περιοχή έχει μέση ετήσια ταχύτητα (στα 10 m από το έδαφος), μεγαλύτερη των 4 m/s.
- (2) Η θέση βρίσκεται σε υψόμετρο μικρότερο των 1000 m και μεγαλύτερο των - 10 m.
- (3) Η θέση απέχει απόσταση μεγαλύτερη των 500 m από τα όρια μεγάλης πόλης.
- (4) Δεν υπάρχουν ιδιαίτεροι λόγοι μη εγκατάστασης, ως αρχαιολογικοί χώροι, ασταθή εδάφη, κεραιές αναμεταδόσεως, στρατιωτικές εγκαταστάσεις.

Επίσης μεταξύ ισοταχυτήτων μετρήθηκε και ο αριθμός των χωριών με κατοίκους της τάξεως των 1000 ώστε να εκτιμηθεί και ο αριθμός του μικρού μεγέθους ανεμογεννητριών που μπορούν να εγκατασταθούν.

Δεχόμενοι ότι οι μεγάλες ανεμογεννήτριες έχουν διάμετρο 50 m με τυπική ισχύ 750 KW και με ύψος πύργου 50 m μπορούμε να εκτιμήσουμε σε πρώτη

Περιοχή ή νησί	Α/Γ μεγάλου μεγέθους	Α/Γ μικρού μεγέθους	Εγκατεστημένη ισχύς (MW)		Ενέργεια ετησίως (MWH)	
			Αιολική (KW)	Ηλεκτρική (KW)	Αιολική (ΑΓ)	Ηλεκτρική
Πελοπόννησος πλην βορείου τμήματος	479	98	369000	–	1213	–
Βόρειος Πελοπόννησος	311	54	238650	–	613	–
Στερεά Ελλάδα	66	22	51700	–	872	–
Εύβοια	47	25	35250	–	1213	–
Θεσσαλία	264	42	202200	–	613	–
Ήπειρος	19	4	14650	–	875	–
Χαλκιδική – Θεσσαλονίκη - Πιερία	106	14	80900	–	1197	–
Κρήτη	240	86	18800	–	1213	–
Κάσος	4	2	3200	400	2666	528
Κάρπαθος	15	5	11750	3144	2666	3313
Κύθηρα	14	5	11000	–	1892	2076
Φολέγανδρος	2	1	1600	185,6	1894	140
Μήλος	9	3	1050	3400	2428	4402
Σίφνος	4	2	3200	1328	2666	1510
Αμοργός	7	3	1350	707	3330	1394
Ίος	7	–	5250	1192	3330	1394
Ανάφη	1	1	850	139,2	3330	92
Θήρα	6	3	4800	3200	2792	5227
Σίκινος	2	1	1600	196	2666	147
Κάλυμνος	4	2	3200	18224	3330	23202
Αστυπάλαια	5	1	3850	400	3330	568
Ρόδος	46	16	36100	11168	1614	7770
Κως	10	5	7900	–	2311	6395
Καστελόριζο	1	–	750	86,4	1213	–
Ζάκυνθος	20	5	15500	1000	2787	–
Σπέτσες	1	–	750	–	143	–
Πόρος	3	–	2250	–	143	–
Αίγινα	4	–	3000	–	143	–

Σχήμα 9.41 Πλήθος Α/Κ και ενεργειακή απόδοση.

προσέγγιση την εγκατεστημένη αιολική ισχύ, την ετήσια δεσμευόμενη αιολική ενέργεια κατά τόπους και συνολικά στον ελλαδικό χώρο. Στον πίνακα «τάδε» παρουσιάζεται επίσης για σύγκριση και εξαγωγή συμπερασμάτων η εγκατεστημένη ισχύς του αυτόνομου ντιζελοηλεκτρικού σταθμού σε κάθε νησί ως και η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Με εξέταση του πίνακα συμπεραίνεται ότι στον ελλαδικό χώρο μπορούν να εγκατασταθούν τουλάχιστον 2160 μονάδες ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους και

479 μονάδες μικρού μεγέθους εκ των οποίων 1300 μονάδες στην ηπειρωτική Ελλάδα. Έτσι η συνολικά εγκατεστημένη αιολική ισχύς στον ηπειρωτικό χώρο είναι της τάξεως των 970 MW, τάξη μεγέθους που αποτελεί περίπου το 20% της σημερινής εγκατεστημένης ισχύος της ΔΕΗ.

Διαπιστώνεται επίσης από τον πίνακα «τάδε» ότι στα νησιά οι ανεμογεννήτριες μπορεί να αποδώσουν περισσότερη ενέργεια από τις ετήσιες ανάγκες ηλεκτρικής κατανάλωσης του νησιού. Φυσικά το μέγεθος της παρεχόμενης στο ηλεκτρικό δίκτυο του νησιού αιολικής ενέργειας θα εξαρτηθεί από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου του νησιού και του σταθμού παραγωγής και αυτό το θέμα αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερης μελέτης. Πάντως από τον πίνακα συμπεραίνεται ότι οι ενεργειακές ανάγκες των νησιών μπορούν τουλάχιστον κατά 25% να ικανοποιηθούν από μετατροπή αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω ανεμογεννητριών.

Στον ηπειρωτικό ελλαδικό χώρο όπου το εθνικό δίκτυο είναι διασυνδεδεμένο θα μπορούσε να γίνει δεκτό ότι ολόκληρη η δεσμευόμενη αιολική ενέργεια μπορεί να απορροφηθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο (αυτό βέβαια εξαρτάται και πάλι από την ελάχιστη απαίτησης ισχύος του δικτύου).

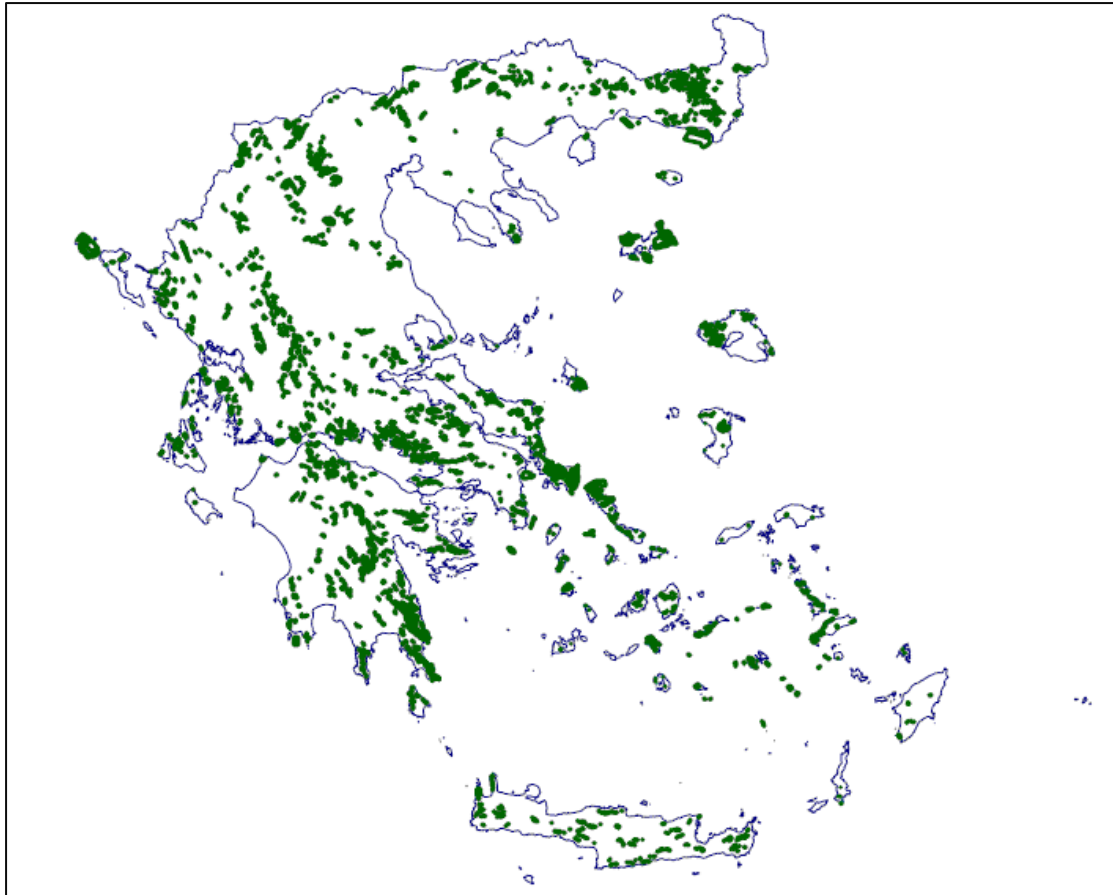
Στην περίπτωση αυτή η παρεχόμενη στο ηλεκτρικό δίκτυο αιολική ενέργεια ανέρχεται σε 1200 GWh το χρόνο που αποτελεί το 5% της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.

Θέση	Αριθμός μονάδων	(GWH)
Πελοπόννησο	200	190
Στερεά Ελλάδα	56	49
Θεσσαλία	104	64
Χαλκιδική	26	31
Κέρκυρα	14	12
Εύβοια	47	57
Σύνολο	447	403

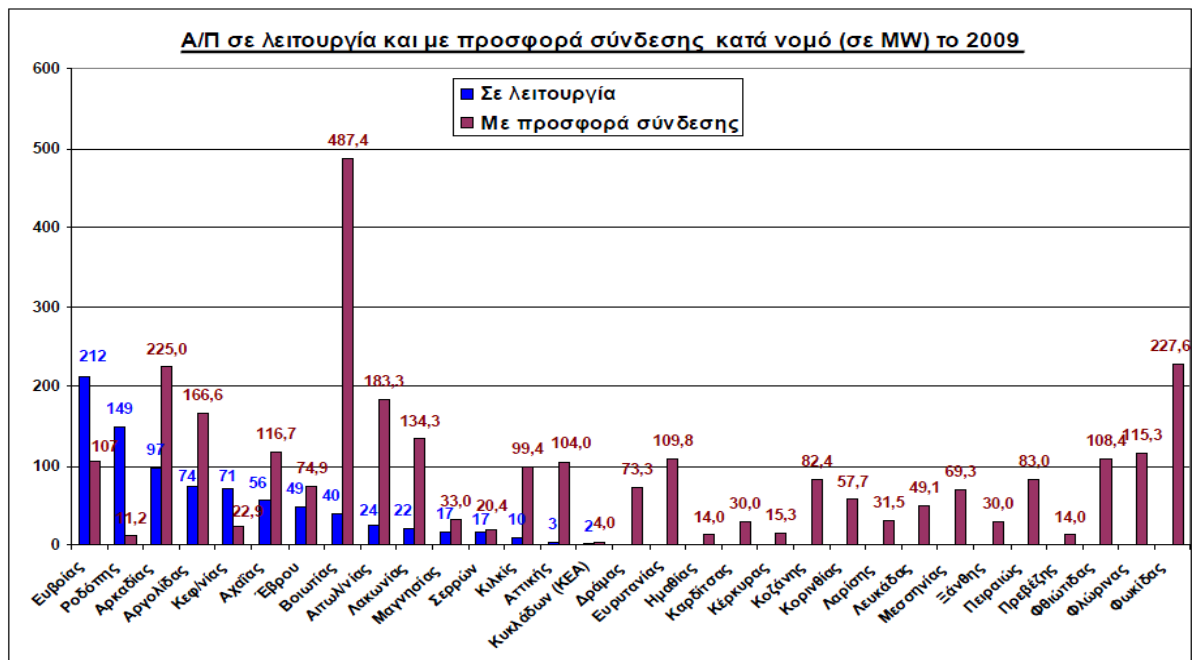
*Σχήμα 9.42 Θέσεις Α/Γ κοντά σε γραμμή της ΔΕΗ.*

Για τον ηπειρωτικό χώρο υπολογίστηκαν επίσης οι θέσεις εκείνες των ανεμογεννητριών που βρίσκονται πλησίον γραμμών μεταφοράς της ΔΕΗ μέσης τάσεως και οι οποίες απέχουν λιγότερο από 5 km. Οι θέσεις αυτές προσφέρονται οικονομικότερα για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας αφού μπορούν χωρίς μεγάλες δαπάνες διασύνδεσης να παρέχουν την ενέργειά τους στο διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα «τάδε».

Από τον πίνακα συμπεραίνεται ότι για την τυπική ανεμογεννήτρια διαμέτρου 50 m ισχύος 750 kW, η συνολική αιολική ισχύς ανέρχεται σε 447 MW δηλαδή ισχύς της τάξεως μεγέθους ενός μεγάλου θερμοηλεκτρικού σταθμού της χώρας με ετήσια παρεχόμενη στο ηλεκτρικό δίκτυο αιολική ενέργεια ίση με 403 GWH.



Σχήμα 9.43 Γεωγραφική αποτύπωση αιτήσεων για Α/Π.

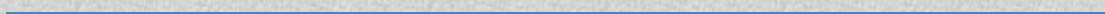


Υποψήφιοι Επενδυτές	Ισχύς σε MW	Θαλάσσια περιοχή
Κοινοπραξία Αιολική Πλατεία Μαρθακίου - EN.ΤΕ.ΚΑ. Αιολικά Πάρκα ΑΕ-ENORA Ε.Ε. - Κ. Φιλιππίδης	55(30+25) MW	Πλατειά Κέρκυρας
Πλειάδες Αιολική Α.Ε.	450 MW	Κόλπος Πεταλιών Αττικής
ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή Α.Ε. - Αιολική Προβατά - Τραιανουπόλεως Ο.Ε.	585 MW	Θρακικό Πέλαγος νότια της Αλεξανδρούπολης
Θρακική Αιολική Α.Ε.	216 MW	Θρακικό, νότια της Αλεξανδρούπολης
Κοινοπραξία Αιολική Καλυδώνος	141 MW	Όρμος Καλυδώνος Αιτωλοακαρνανίας
Κύων ΕΠΕ	300 MW	Κύμη Εύβοιας
Ελληνική Τεχνοδομική Ανεμος Α.Ε.	162 MW	Κέρκυρα
Διαπόντια Αιολική - Μ.Ε. Τζαβάρας και Σία	125 MW	Διαποντίων Νήσων Κέρκυρας
Venergia Ενεργειακή Α.Ε.	96 MW	Διαποντίων Νήσων Κέρκυρας
Νησιωτικός Ανεμος Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας ΑΕ	350 MW	Κως
Argos Aiolos ΑΕ	150 MW	Θαλάσσια περιοχή της Εύβοιας
ΤΖΑΣΠΕΡ Αιολική Ελλάδος Α.Ε. και Σία,	495 MW	θαλάσσια περιοχή Διαποντίων Νήσων Κέρκυρας
City Electric Α.Ε.	500 MW	Βορειοανατολικά της Λήμνου
ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή ΑΒΕΤΕ	320 MW	Βορειοανατολικά της Λήμνου
ΤΖΑΣΠΕΡ Αιολική Ελλάδος Α.Ε. και Σία	445 MW	Βορειοανατολικά του Αγίου Ευστρατίου Λέσβου
ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή	98 MW	Βορειοανατολικά του Αγίου Ευστρατίου Λέσβου
Ρόκας Αιολική Βόρειος Ελλάς ΑΒΕΕ	484 MW	Βορειοανατολικά της Λήμνου
Μινωικά Θαλάσσια Αιολικά Πάρκα Α.Ε.	350 MW	Θαλάσσια περιοχή Κάσου Καρπάθου
ΤΖΑΣΠΕΡ Αιολική Ελλάδος Α.Ε. και Σία	306 MW	Βορειοανατολικά της Ανδρου

**Σχήμα 9.44** Υπάρχουσες επενδυτικές προτάσεις για υπεράκτια αιολικά πάρκα.

Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*





## ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

### 10.1 Κατάταξη αιολικών μηχανών

Ο ανεμοκινητήρας από την εποχή της εμφάνισής του μέχρι σήμερα έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο του (οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα) όσο και ως προς τα υποσυστήματα του (πτερυγία, κιβώτιο ταχυτήτων, πύργος, αυτοματισμοί γεννήτρια κλπ). Εξελίξεις έχουν επίσης σημειωθεί και στον τρόπο δέσμευσης, αξιοποίησης, αποθήκευσης ή μεταφοράς της ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται από τον ανεμοκινητήρα σε άλλη «αναβαθμισμένη» μορφή ενέργειας.

Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμοκινητήρων ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Ως εκ τούτου, οι πλέον διαδεδομένοι τύποι ανεμοκινητήρων είναι οι ανεμογεννήτριες «**οριζόντιου**» και οι ανεμογεννήτριες «**κατακόρυφου**» άξονα.

Οι ανεμοκινητήρες οριζόντιου άξονα έχουν συνήθως τον άξονά τους παράλληλο προς την κατεύθυνση του ανέμου (head on), ενώ σε μερικές περιπτώσεις έχουμε ανεμογεννήτριες των οποίων ο άξονας είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης και κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου (cross – wind).

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα της αυτόματης προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου, δεδομένου ότι ο άξονάς τους είναι κάθετος σε αυτή, καθώς και στην επιφάνεια της γης. Επίσης, έχουν επινοηθεί και άλλοι τύποι ανεμοκινητήρων, όπως για παράδειγμα οι ανεμοκινητήρες τύπου μεταφοράς, αποτελούμενες από οχήματα που κινούνται σε μια καθορισμένη διαδρομή και είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρογεννήτριες.

Οι υφιστάμενες αιολικές μηχανές κατατάσσονται επίσης σε ταχύστροφες και σε αργόστροφες, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφή τους ή ακριβέστερα, ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου περιστροφής  $\lambda$ . Η ταχύτητα περιστροφής μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται εκτός από τις αεροδυναμικές παραμέτρους και από το μέγεθος των πτερυγίων της μηχανής, δεδομένου ότι πρέπει να ληφθούν υπόψιν λόγοι στατικής αντοχής, φαινόμενα δυναμικών καταπονήσεων και ταλαντώσεων, φυγόκεντρες δυνάμεις κτλ. Επιπλέον, καθοριστικό ρόλο παίζει και η διασύνδεση ή μη της εγκατάστασης με το ηλεκτρικό δίκτυο, δεδομένου ότι σε περιπτώσεις σύγχρονων ηλεκτρογεννητριών διασυνδεδεμένων με το δίκτυο, το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα πρέπει να έχει τη συχνότητα του κεντρικού δικτύου, δηλαδή 50 Hz για τη χώρα μας και τις υπόλοιπες χώρες τις Ε.Ε. και 60 Hz για τις ΗΠΑ.

Ένα μέγεθος που συνδέεται άμεσα με τη γωνιακή ταχύτητα μιας πτερωτής είναι η παράμετρος περιστροφής (tip – speed ratio) της μηχανής  $\lambda$ , η οποία εκφράζεται σαν:

$$\lambda = \frac{\omega_0 \cdot R}{V_W}$$

όπου R είναι η ακτίνα της πτερωτής  $\omega_0$  η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και  $V_W$  η ταχύτητα του ανέμου στον άξονα της μηχανής.

Ανάλογα με τη μηχανική ισχύ  $N_0$  που παρέχουν οι ανεμοκινητήρες στην έξοδό τους, κατατάσσονται από πλευράς μεγέθους σαν:

α. Μικροί, όταν για την ονομαστική ισχύ τους ισχύει ότι:

$$50W \leq N_0 \leq 30 KW$$

β. Μεσαίοι, όταν για την ονομαστική τους ισχύ έχουμε ότι:

$$30KW \leq N_0 \leq 300KW$$

γ. Μεγάλοι, όταν για την ονομαστική τους ισχύ έχουμε ότι:

$$300KW \leq N_0 \leq 5MW$$

Ο χαρακτηρισμός μιας ανεμογεννήτριας σε μικρή ή μεγάλη δεν ακολουθεί αυστηρά τις τιμές των εξισώσεων, δεδομένου ότι οι εν λόγω τιμές είναι ενδεικτικές, ενώ αλλάζουν από χρονική περίοδο, καθώς και από συγγραφέα σε συγγραφέα.

Τέλος, οι υφιστάμενες μηχανές κατατάσσονται και βάσει του αριθμού των πτερυγίων που διαθέτει η πτερωτή τους. Ως εκ τούτου, οι ανεμογεννήτριες διαχωρίζονται σε πολύπτερυγες, όπως οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι χαμηλών ταχυτήτων περιστροφής, και οι ολιγοπτέρυγοι που αποτελούν την πλειοψηφία των σύγχρονων ανεμογεννητριών οριζόντιου και καθέτου άξονα, με αριθμό πτερυγίων που κυμαίνεται από ένα έως τρία πτερύγια για κάθε πτερωτή.

Μια παράμετρος που χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό και ταξινόμηση των ανεμοκινητήρων είναι η παράμετρος **στιβαρότητας**  $\sigma$  (solidity) της κατασκευής, η οποία για μηχανές οριζόντιου άξονα ορίζεται σαν:

$$\sigma = \frac{z \cdot c \cdot R}{\pi \cdot R^2}$$

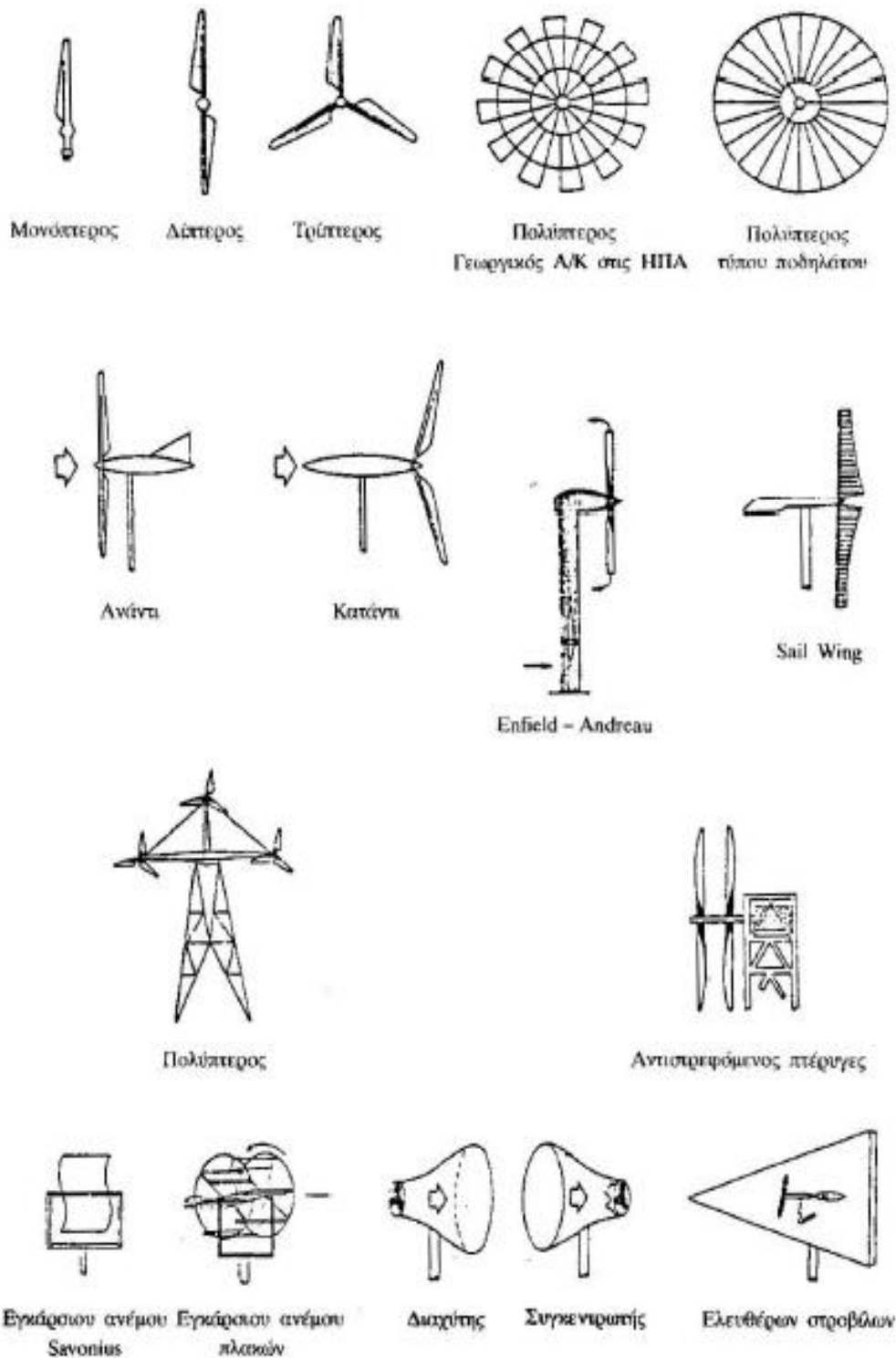
ενώ για μηχανές κατακόρυφου άξονα ορίζεται σαν:

$$\sigma = \frac{z \cdot c}{R}$$

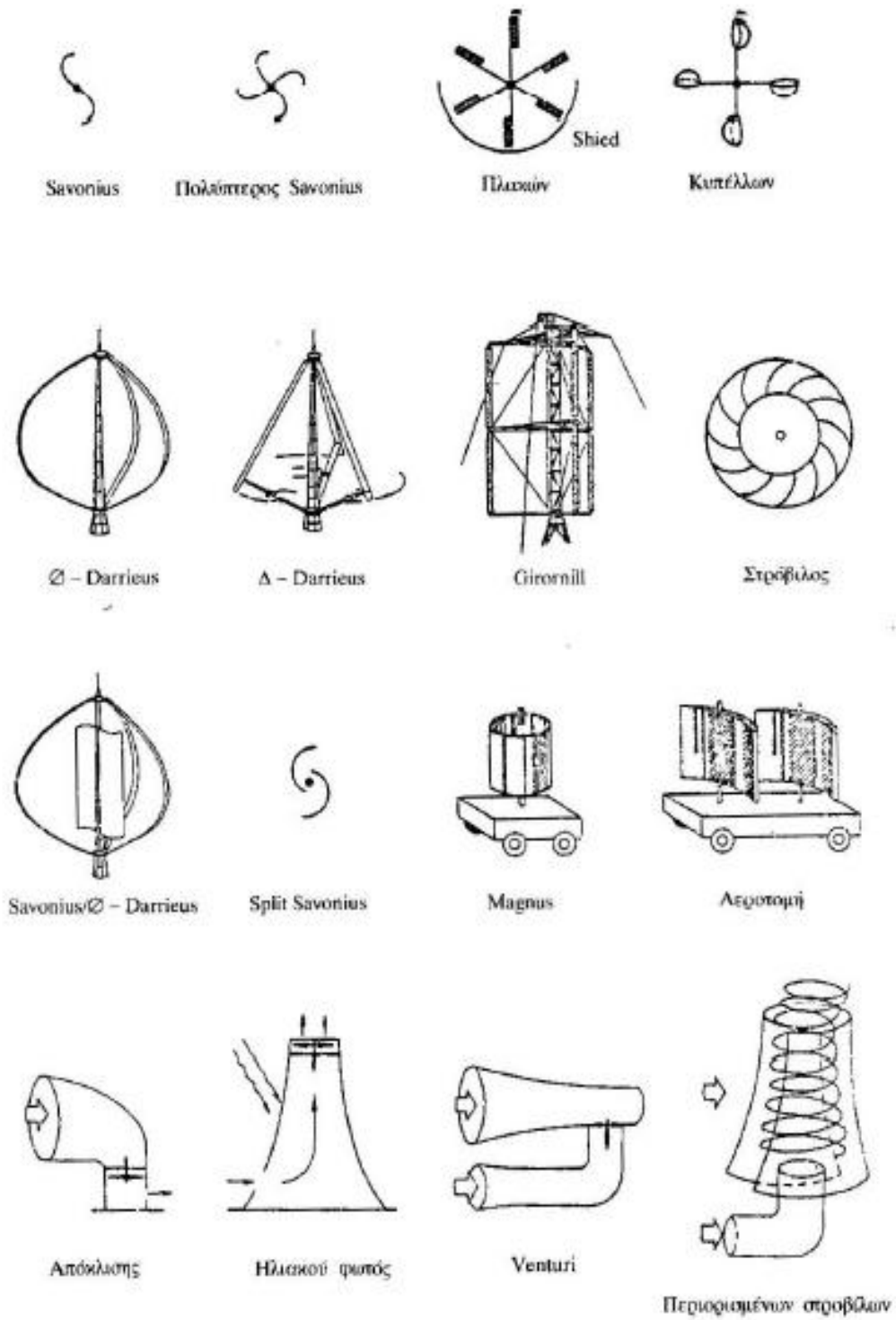
Όπου z αριθμός των πτερυγίων της πτερωτής, R η ακτίνα της πτερωτής και c η χορδή (πλάτος) των πτερυγίων της πτερωτής. Η παράμετρος στιβαρότητας δίνει το λόγο του εμβαδού όλως των πτερυγίων προς το εμβαδόν της επιφάνειας που διαγράφουν τα πτερύγια κατά την περιστροφή τους.

Κατά κανόνα οι ανεμογεννήτριες, αποδίδοντας τη μέγιστη ισχύ τους σε χαμηλές τιμές της παραμέτρου περιστροφής  $\lambda$ , έχουν σχετικά μικρό βαθμό απόδοσης,

ενώ είναι ανθεκτικές με ελάχιστες ανάγκες συντήρησης. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλες δυνάμεις στα πτερύγια και συνεπώς μεγάλη ροπή στον άξονα



Σχήμα 10.1 Τύποι ανεμοκινητήρων οριζόντιου άξονα.



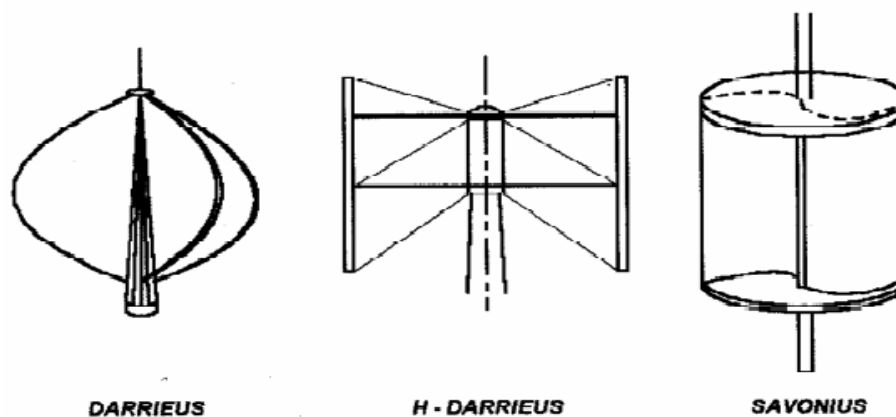
Σχήμα 10.2 Τύποι ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα.

περιστροφής, ξεκινούν μόνες τους, όταν αρχίζει να φυσάει ο άνεμος, είναι κατάλληλες για αγροτικές χρήσεις (πχ άντληση νερού) και στηρίζονται σε σχετικά απλή τεχνολογία.

Αντίθετα, οι ανεμογεννήτριες μικρής στιβαρότητας είναι μηχανές πολύστροφες, αποδίδοντας τη μέγιστη ισχύ τους σε μεγάλες τιμές της παραμέτρου  $\lambda$ , διαθέτουν σχετικά μεγάλο βαθμό απόδοσης, είναι πλέον ευπαθείς από τις μηχανές μεγάλης στιβαρότητας και χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρές δυνάμεις στα πτερύγια και περιορισμένη ροπή στον άξονά τους. Επίσης, οι μηχανές αυτές απαιτούν κάποτε σε ορισμένες περιπτώσεις εξωτερική βοήθεια για να ξεκινήσουν, είναι κατάλληλες για ηλεκτροπαραγωγή και θεωρούνται προϊόντα αρκετά υψηλής τεχνολογίας, ιδιαίτερα οι μεγαλύτερες από αυτές.

## 10.2 Μηχανές κατακόρυφου άξονα

Οι μηχανές κατακόρυφου άξονα εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα αυτόματης προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου, ως εκ τούτου αποτελούν και πιο απλές κατασκευές. Οι πλέον γνωστοί τύποι ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα είναι οι μηχανές τύπου Darrieus και οι μηχανές τύπου Savonius. Να σημειωθεί ότι οι μηχανές τύπου Darrieus αποτελούν έναν από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ανεμοκινητήρων στη διεθνή αγορά.



Σχήμα 10.3 Μηχανές κατακόρυφου άξονα.

Συνοπτικά, οι ανεμοκινητήρες κατακόρυφου άξονα περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα κάθετο τόσο στη διεύθυνση του ανέμου όσο και στο έδαφος. Οι αιολικές μηχανές του τύπου αυτού έχουν καλή αεροδυναμική απόδοση, ανεξαρτησία ως προς τη διεύθυνση του ανέμου, χαμηλό κόστος κατασκευής και σχετικά απλά συστήματα ελέγχου. Υπάρχει αρκετή ποικιλία δρομέων κατακόρυφου άξονα, όμως ο δρομέας τύπου Darrieus είναι ο περισσότερο εξελιγμένος και ως εκ τούτου και ο περισσότερο διαδεδομένος. Με τη χρήση μηχανών του τύπου αυτού δίνεται η δυνατότητα να

κατασκευασθούν μηχανές με ονομαστική ισχύ της τάξεως του ενός MW. Ένα άλλο πλεονέκτημα των μηχανών κατακόρυφου άξονα είναι ότι οι μηχανισμοί και η γεννήτρια βρίσκονται κατά κανόνα στο έδαφος, με αποτέλεσμα να απαιτείται ελαφρότερος πύλωνας και να διευκολύνεται η λειτουργία και η συντήρηση του όλου συστήματος.

Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης δε παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφορές σε σύγκριση με το αντίστοιχο σύστημα των μηχανών οριζόντιου άξονα, εκτός βέβαια από το γεγονός ότι τα εξαρτήματα είναι τοποθετημένα κατακορύφως. Ο δρομέας στηρίζεται σε κατάλληλο έδρανο στη βάση του, το οποίο ακόμα και σε σταθερή ταχύτητα ανέμου καταπονείται από εναλλασσόμενα φορτία. Επίσης, η μηχανή διατηρείται σε κατακόρυφη θέση με τη βοήθεια καλωδίων, τα οποία συνδέουν την κορυφή του άξονα της μηχανής με το έδαφος.

Τέλος, οι ανεμοκινητήρες τύπου Darrieus έχουν ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες εκκίνησης και για μεγάλα συστήματα χρησιμοποιείται βοηθητικός κινητήρας για την εκκίνηση. Επιπλέον, οι μηχανές του τύπου αυτού παρέχουν τελικά χαμηλότερο μέσο ετήσιο συντελεστή ισχύος. Συνοπτικά, είναι αποδεκτό ότι οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα τύπου Darrieus θεωρούνται συγκρίσιμες σε οικονομικοτεχνική ελκυστικότητα με τις πλέον σύγχρονες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.

Αντίστοιχα, οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή ισχύος, μικρή ακραία περιφερειακή ταχύτητα, περιορισμένο μέγεθος, αλλά και εξαιρετική απλότητα και οικονομικότητα κατασκευής. Η απλότητα κατασκευής σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν απαιτείται σύστημα προσανατολισμού ως προς τη διεύθυνση του ανέμου, αποτελούν σημαντικά κίνητρα για την μελέτη και βελτιστοποίηση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών παρόμοιων μηχανών, πχ λόγος ύψους προς διάμετρο, αριθμός και σχήμα πτερυγίων κλπ.

### 10.3 Βασικά μέρη αιολικών μηχανών κατακόρυφου άξονα

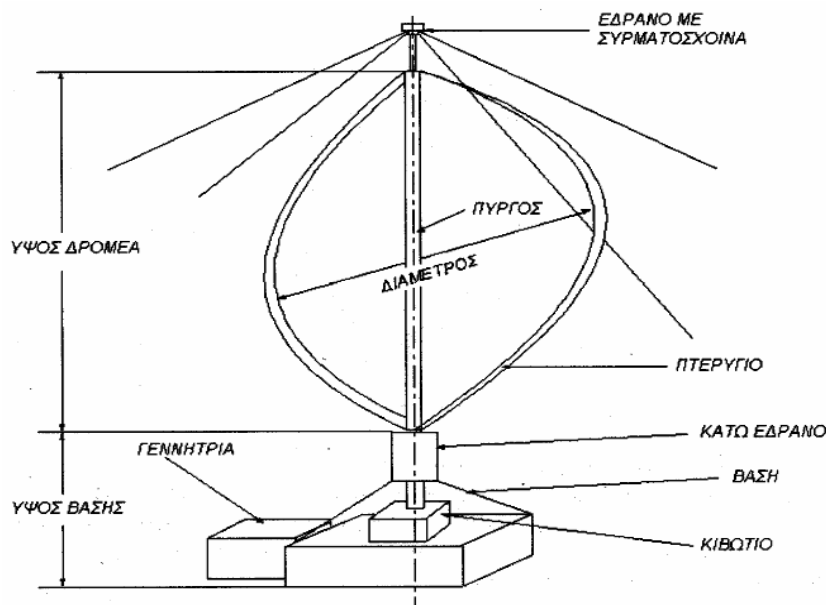
Στο σημείο αυτό θα επιχειρήσουμε να περιγράψουμε τους δύο κυριότερους αντιπροσώπους των ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα, οι οποίοι αποτελούν και τα πλέον διαδεδομένα μοντέλα αυτής της κατηγορίας, κατέχοντας περίπου το 16% με 82% της διεθνούς αιολικής αγοράς.

#### 10.3.1 Ανεμοκινητήρας τύπου Darrieus

Ο ανεμοκινητήρας τύπου Darrieus πρωτοεμφανίστηκε το 1925 και εφευρέτης του ήταν ο Γάλλος G.J.M.Darrieus, ενώ είχε εκτεταμένη εφαρμογή στον Καναδά μέχρι τη δεκαετία του 1970. Η έρευνα πάνω στην εξέλιξη του αρχικού αυτού ανεμοκινητήρα επαναλήφθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1970, με πρωτοβουλία του Εθνικού Συμβουλίου Ερευνών του Καναδά, ενώ ένα σημαντικό μέρος των ερευνών καλύπτεται από τα εργαστήρια Sandia των ΗΠΑ, στα πλαίσια του εθνικού

προγράμματος αιολικής ενέργειας της χώρας αυτής. Σήμερα έχουν σχεδιασθεί διάφορες μορφές ης εν λόγω ανεμογεννήτριας, όπως η  $\Phi$  – Darrieus, η  $\Delta$  – Darrieus, η  $Y$  – Darrieus και η  $o$  – Darrieus.

Η ανεμογεννήτρια τύπου Darrieus χαρακτηρίζεται από καμπτόμενα πτερύγια και λειτουργεί με τη χρήση των δυνάμεων άνωσης που εξασκούνται πάνω από τα πτερύγια. Οι εν χρήση ανεμοκινητήρες αποτελούνται από ένα, δύο, τρία ή και τέσσερα πτερύγια. Η μορφή των πτερυγίων δεν είναι σταθερή, δεδομένου ότι υπάρχουν και παραλλαγές του δρομέα με ευθύγραμμο κατακόρυφα πτερύγια. Λόγω όμως της περιστροφής οι φυγόκεντρες δυνάμεις δημιουργούν μεγάλες καμπτικές τάσεις στα πτερύγια. Αυτές οι καμπτικές τάσεις στα πτερύγια μειώνονται σημαντικά, εάν τα πτερύγια έχουν τη μορφή που αποκαλείται και σχοινοειδής. Αυτή είναι η μορφή που θα έπαιρνε κατά τη περιστροφή του ένα χαλαρό σχοινί ή ένα τελείως εύκαμπτο καλώδιο σταθερού μήκους με τα άκρα του προσαρμοσμένα, όπως και στην περίπτωση της υπό ανάλυση ανεμογεννήτριας, στον άξονα περιστροφής. Λόγω του σχήματος αυτού, τα πτερύγια καταπονούνται σε σταθερές εφελκυστικές μόνο δυνάμεις (εκμηδενίζονται σχεδόν οι καμπτικές τάσεις), με αποτέλεσμα τα πτερύγια του δρομέα Darrieus να έχουν λιγότερες κατασκευαστικές απαιτήσεις και το υλικό τους να υφίσταται μικρότερη κόπωση σε δυναμικές τάσεις.



Σχήμα 10.4 Ανεμοκινητήρας Darrieus, κατακόρυφου άξονα.

Τα άκρα των πτερυγίων του δρομέα είναι πακτωμένα στον άξονα περιστροφής, ενώ ο λόγος ύψους  $H$  προς διάμετρο  $D=2R$  του δρομέα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1 και 1,5. Η ακτίνα  $R$  του δρομέα καθορίζεται σαν η μέγιστη απόσταση των πτερυγίων από τον άξονα μηχανής. Με δεδομένο το σχήμα των πτερυγίων επιδιώκεται ο δρομέας να σαρώσει ένα ρεύμα αέρα μέγιστης επιφάνειας,

οπότε και επιδιώκεται να ισχύει  $H=D$ . Όμως, από την άλλη πλευρά, τεχνικοοικονομικοί λόγοι επιβάλλουν μεγαλύτερες τιμές του λόγου  $H/D$ .

Τα πτερύγια του δρομέα Darrieus δεν παρέχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας προσβολής και κατά συνέπεια βελτίωσης της αεροδυναμικής τους συμπεριφοράς, σε αντιδιαστολή με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα μεταβλητού βήματος. Οι μηχανές του τύπου αυτού έχουν κατά κανόνα δύο ή τρία πτερύγια σε διάταξη  $180^\circ$  ή  $120^\circ$ , αντίστοιχα. Για την επιλογή του πλήθους των πτερυγίων πρέπει να γνωρίζουμε ότι ο διπτέρυγος δρομέας παρουσιάζει έντονη κυκλική μεταβολή της αεροδυναμικής του ροπής, με έντονες αποκλίσεις από τη μέση τιμή (που φθάνουν μέχρι και το 100% από τη μέση τιμή) και οι οποίες μπορούν να περιορισθούν στο  $20 \div 25\%$  με κατάλληλη σχεδίαση του συστήματος κίνησης. Αντίθετα, η αεροδυναμική ροπή του τριπτέρυγου δρομέα είναι σχετικά σταθερή σε ολόκληρη σχεδόν την περιοχή λειτουργίας του. Επίσης, η αεροδυναμική απόδοση του τριπτέρυγου δρομέα είναι κατά κανόνα καλύτερη αυτής του διπτέρυγου, ο τελευταίος όμως είναι απλούστερος στην κατασκευή, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό στη μείωση του κόστους ίδρυσης και στη διευκόλυνση των εργασιών ανέγερσης στον τόπο εγκατάστασης.

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση του δρομέα μιας ανεμογεννήτριας τύπου Darrieus πρέπει να αναφέρουμε ότι τα πτερύγια που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως συμμετρικής διατομής, σταθερής χορδής και χωρίς συστροφή. Τα πτερύγια αυτά εργάζονται σε μεγάλες τιμές ( $4 \div 10$ ) της παραμέτρου περιστροφής  $\lambda$ , με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν υψηλή αεροδυναμική απόδοση. Ο πλέον χρησιμοποιούμενος τρόπος κατασκευής των πτερυγίων είναι η εξέλαση ειδικών κραμάτων αλουμινίου, ενώ η σχοινοειδής μορφή τους προσδίδεται στη συνέχεια με κάμψη των ευθύγραμμων τμημάτων.

Επειδή όπως προαναφέραμε ο δρομέας Darrieus δεν αναπτύσσει ικανοποιητική ροπή κατά την εκκίνηση, είναι απαραίτητη η ύπαρξη βοηθητικής πηγής ενέργειας για την εκκίνησή του. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται είτε η ηλεκτρική γεννήτρια σαν κινητήρας, είτε τοποθετούνται ένας ή δύο ομοαξονικοί δρομείς τύπου Savonius, οι οποίοι αναπτύσσουν υψηλή αεροδυναμική ροπή κατά την εκκίνηση. Μάλιστα στην τελευταία περίπτωση έχει αποδειχθεί ότι ο χρησιμοποιούμενος Savonius δεν επηρεάζει αρνητικά την αεροδυναμική απόδοση του Darrieus κατά την κανονική λειτουργία του συστήματος και το μόνο πρόβλημα που υπάρχει είναι το αυξημένο βάρος της κατασκευής.

Όπως και στην περίπτωση των μηχανών οριζόντιου άξονα, η πέδηση της πτερωτής του Darrieus σε περιπτώσεις υψηλών ταχυτήτων γίνεται και με αεροδυναμική πέδη, δηλαδή με τη φυγοκεντρική απελευθέρωση μιας επίπεδης πλάκας ή ενός τμήματος του δρομέα σε κάθετη θέση, αυξάνοντας σημαντικά της αεροδυναμική αντίσταση της πτερωτής και επιβραδύνοντάς την.

Το μηχανικό σύστημα κίνησης περιλαμβάνει τον άξονα του δρομέα και την έδρασή του, το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, ελαστικούς συνδέσμους για την απόσβεση των στρεπτικών ταλαντώσεων, το σύστημα πέδησης, την ηλεκτρική γεννήτρια με τη βάση και το κέλυφος προστασίας των μηχανισμών αυτών. Οι

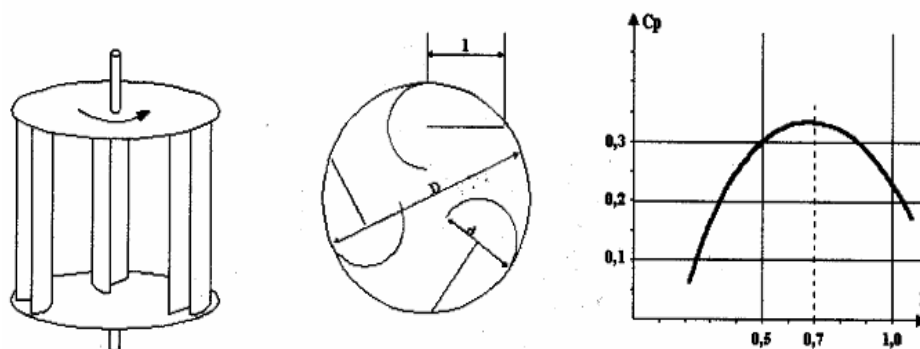


επιμέρους περιγραφές των τμημάτων αυτών δε διαφέρουν ιδιαίτερα από τις αντίστοιχες περιγραφές, που ισχύουν για ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα και η λεπτομερής παράθεσή τους ξεφεύγει από τους σκοπούς του κεφαλαίου αυτού.

Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά στα έδρανα στήριξης των ανεμοκινητήρων κάθετου άξονα σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούνται σε μηχανές οριζόντιου άξονα. Πράγματι, και εδώ ο άξονας της μηχανής στηρίζεται σε δύο έδρανα. Το άνω έδρανο παραλαμβάνει κυρίως τις ακτινικές δυνάμεις που αναπτύσσονται πάνω στα πτερύγια, ενώ το κάτω έδρανο παραλαμβάνει μεγάλες ωστικές δυνάμεις συμπεριλαμβανομένου και του βάρους του δρομέα. Για τους λόγους αυτούς, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη σχεδιάσή τους, ενώ ορισμένοι κατασκευαστές χρησιμοποιούν ειδικά κατασκευασμένα ωστικά υδροδυναμικά έδρανα, τα οποία λειτουργούν με βάση τις αρχές της υδραυλικής σχέσης και παρουσιάζουν ελάχιστη αντίσταση τριβής, στη θέση των συνηθισμένων ένσφαιρων ωστικών εδράνων.

### 10.3.2 Ανεμοκινητήρας τύπου Savonius

Η πτερωτή της ανεμογεννήτριας αυτής ονομάζεται συχνά τύπου "S" λόγω του σχήματος της κάτοψης των πτερυγίων της. Η περιστροφή της πτερωτής από τον άνεμο δεν οφείλεται μόνο στη διαφορετική αντίσταση του κοίλου και του κυρτού πτερυγίου αλλά και στην ύπαρξη του διακένου "X" (ανάμεσα στα δύο πτερύγια), λόγω του οποίου ο αέρας επιστρέφει και αυξάνει την πίεση στο πίσω μέρος του κυρτού πτερυγίου, αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό τη ροπή που αναπτύσσεται γύρω από τον άξονα της μηχανής. Το πεδίο ταχυτήτων γύρω από την πτερωτή του "Savonius" είναι χρονικά μεταβαλλόμενο με περίοδο μεταβολής διπλάσια της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα, και συνεπώς εμφανίζει ιδιαίτερη δυσκολία κατά τη μελέτη του.



Σχήμα 10.5 Παραλλαγές – εφαρμογές κινητήρα Savonius.

Οι μηχανές "Savonius", όπως όλες οι μηχανές κατακόρυφου άξονα, παρουσιάζουν συμμετρία και αυτόματο προσανεμισμό καταργώντας τις ακριβείς διατάξεις προσανατολισμού, που έχουν οι μηχανές οριζόντιου άξονα. Επίσης ο "Savonius" έχει όπως και ο "Darrieus" τα όργανα μετατροπής και μεταφοράς της

μηχανικής ενέργειας στο έδαφος, παρουσιάζοντας ένα σημαντικό πλεονέκτημα κόστους σε σχέση με τις μηχανές οριζοντίου άξονα. Παράλληλα και ο πύργος στήριξης είναι απλούστερος και συνεπώς οικονομικότερος.

Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα του "Savonius", σε σύγκριση με τον "Darrieus", είναι ότι ο πρώτος παρουσιάζει μεγάλη ροπή εκκίνησης και λειτουργίας, χρησιμοποιούμενος για το λόγο αυτό και σαν εκκινήτης του δεύτερου. Το πλεονέκτημα αυτό επιβεβαιώνεται γνωρίζοντας ότι το διάγραμμα της ροπής εκκίνησης του "Savonius" είναι θετικό σχεδόν για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης του ανέμου στην πτερωτή, πράγμα που εξασφαλίζει την αυτό-εκκίνηση της μηχανής.

Ένα δεύτερο πλεονέκτημα του "Savonius" είναι η απλότητα και συνεπώς η οικονομικότητα της κατασκευής του. Απλές μηχανές του τύπου αυτού κατασκευάζονται ακόμα και με διαίρεση σε δύο κομμάτια ενός βαρελιού και ενώνοντας τα κομμάτια σε σχήμα "S".

Στα μειονεκτήματα του "Savonius" περιλαμβάνεται ο χαμηλός βαθμός απόδοσής του, που δεν ξεπερνάει το 0.18, καθώς και η λειτουργία του σε μικρές τιμές της παραμέτρου περιστροφής, δηλαδή  $\lambda \approx 1.0$ . Τέλος ο "Savonius" έχει μεγάλο βάρος ανά μονάδα ονομαστικής ισχύος και η επιφάνεια των πτερυγίων του είναι έως και τριάντα φορές μεγαλύτερη από τους άλλους ανεμοκινητήρες με την ίδια ονομαστική ισχύ.

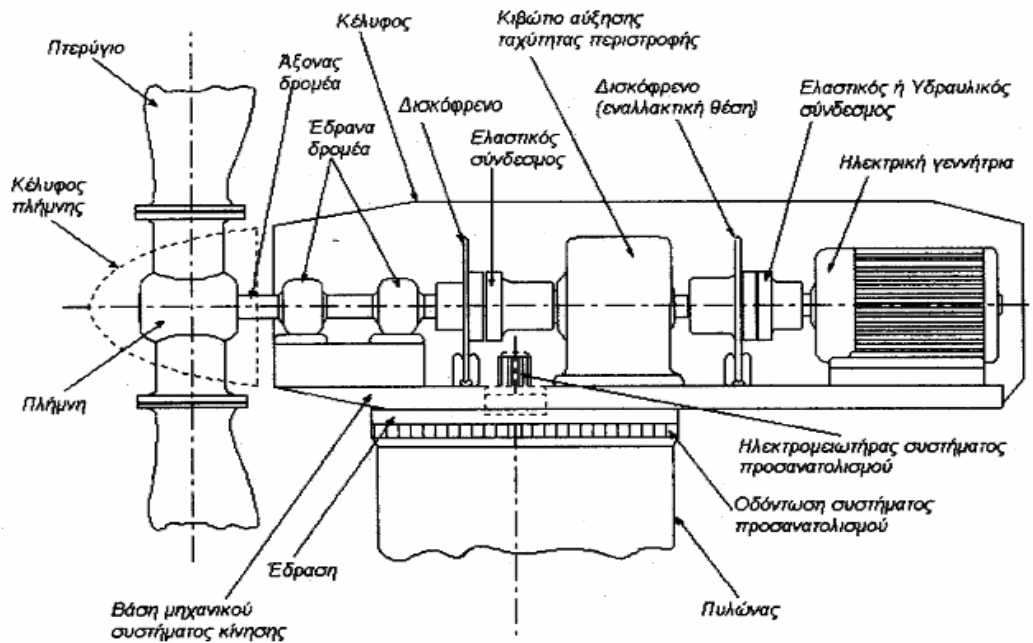
Συνοπτικά η ανεμογεννήτρια τύπου "Savonius", παρόλη τη χαμηλή της απόδοση, έχει σημαντικά πλεονεκτήματα με αποτέλεσμα να θεωρείται η ιδανική αιολική μηχανή για μικρές ισχύεις, για οικιακή χρήση αλλά και για παραγωγή ενέργειας σε φτωχές χώρες ή σε απομακρυσμένες περιοχές. Για το λόγο αυτό έχει δοθεί τελευταία αξιόλογη ώθηση στη μελέτη και βελτιστοποίηση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των εν λόγω μηχανών, συμπεριλαμβανομένων του λόγου ύψους προς τη διάμετρο της πτερωτής, του αριθμού και του σχήματος των πτερυγίων, καθώς και της μορφής του διακένου μεταξύ των πτερυγίων της μηχανής.

## 10.4 Μηχανές οριζοντίου άξονα

Όπως προαναφέραμε οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα έχουν τον άξονά τους παράλληλο προς την επιφάνεια της γης και συνήθως παράλληλο και με τη διεύθυνση του ανέμου (head on), αν και κάποτε η διεύθυνσή τους είναι κάθετη προς τη διεύθυνση του ανέμου (cross-wind). Επιπλέον οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα μπορούν να έχουν ένα, δύο, τρία ή ακόμα και πενήντα πτερύγια, ενώ η πτερωτή τους μπορεί να τοποθετηθεί είτε σε προσήνεμη διάταξη (up-wind), δηλαδή μπροστά από τον πύργο στήριξης, είτε σε υπήνεμη διάταξη (down-wind), δηλαδή πίσω από τον πύργο στήριξης σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου.

Ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα συγκαταλέγονται οι κλασσικοί παραδοσιακοί ανεμόμυλοι (π.χ. τύπου Μυκόνου) καθώς και οι αργές μηχανές πολλών πτερυγίων "αμερικανικού τύπου", οι οποίες λόγω των

περιορισμένων διαστάσεών τους και της χαμηλής περιφερειακής τους ταχύτητας έχουν εγκαταλειφθεί σήμερα, αν και εμφανίζουν σχετικά μεγάλες ροπές λειτουργίας. Στο παρελθόν κατασκευάστηκαν σε βιομηχανική κλίμακα αντίστοιχες μηχανές και βρήκαν ευρεία εφαρμογή για την άντληση νερού και άλλες γεωργικές χρήσεις.



Σχήμα 10.6 Τοπική μορφή ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.

Από την άλλη πλευρά στην κατηγορία των αιολικών μηχανών οριζόντιου άξονα περιλαμβάνονται και οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σήμερα (περίπου το 90% του συνόλου των εγκατεστημένων παγκοσμίως μηχανών), και οι οποίες ονομάζονται ανεμογεννήτριες τύπου "έλικας". Οι μηχανές αυτές εμφανίζουν σημαντικές περιφερειακές ταχύτητες, ενώ τα πτερύγιά τους, που είναι συνήθως ένα έως τρία, βασίζονται στην τεχνολογία των αεροπορικών ελίκων αλλά και σ' αυτή της έλικας των ελικοπτέρων. Ένα από τα βασικά τους χαρακτηριστικά είναι ο μεγάλος αεροδυναμικός βαθμός απόδοσής τους, αλλά και η βέλτιστη λειτουργία τους σε μεγάλες τιμές της παραμέτρου περιστροφής " $\lambda$ ", με αποτέλεσμα την αρκετά μεγάλη σχετική ταχύτητα προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο. Οι πρώτοι δρομείς που κατασκευάστηκαν είχαν πλατειά πτερύγια, ενώ σήμερα κατασκευάζονται μηχανές με αρκετά λεπτά πτερύγια.

Στις μηχανές τύπου "έλικας" γίνεται ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής της πτερωτής και για λόγους προστασίας της σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών ανέμων, είτε με τη χρήση ειδικών αεροδυναμικών βοηθημάτων (π.χ. "flaps") στην άκρη των πτερυγίων είτε με τη στροφή της πτερωτής υπό γωνία σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου. Η αιολική ισχύς από την πτερωτή μεταφέρεται είτε μέσω συστήματος μετάδοσης κίνησης (οδοντωτοί τροχοί) στη βάση του πύργου στήριξης, είτε από τον άξονα της πτερυγώσης στην ηλεκτρική γεννήτρια, που βρίσκεται συνήθως και αυτή

στον πύργο στήριξης. Οι μηχανές οριζοντίου άξονα συνεχίζουν να αναπτύσσονται και σήμερα, ενώ έχουν κατασκευασθεί ή κατασκευάζονται μονάδες με ισχύ, που κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες Watt έως και αρκετά MW.

Τέλος, έχουν επινοηθεί και προταθεί κατά καιρούς διάφορες μηχανές τύπου cross – wind, οι οποίες όμως δεν είναι περισσότερο αποτελεσματικές σε σύγκριση με τους άλλους τύπους. Αντίθετα, οι συγκεκριμένοι ανεμοκινητήρες παρουσιάζουν μειονεκτήματα, όσον αφορά τη συλλογή της παραγόμενης ενέργειας, καθώς και τη ρύθμιση της διεύθυνσης θέσης της πτερωτής σε περιπτώσεις έντονων μεταβολών της διεύθυνσης του ανέμου.

Ολοκληρώνοντας, πρέπει να κάνουμε μια αναφορά στα προβλήματα που αντιμετωπίζει η βιομηχανία κατασκευής ανεμοκινητήρων οριζόντιου άξονα και κυρίως οι μηχανές τύπου έλικας. Ανάμεσα στα προβλήματα που διερευνώνται σήμερα είναι:

i. Ο **βέλτιστος σχεδιασμός** του δρομέα, με σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας της μηχανής. Στόχος είναι να βρεθεί ένας βέλτιστος σχεδιασμός των παραμέτρων που συνθέτουν το δρομέα της ανεμογεννήτριας, δηλαδή του αριθμού πτερυγίων, της διανομής του πλάτους του πτερυγίου, της κατάλληλης αεροτομής που θα χρησιμοποιηθεί για τη σύνθεση του πτερυγίου, της συστροφής του πτερυγίου, της διανομής βήματος κλπ. Η υπάρχουσα εμπειρία στον τομέα των αιολικών μηχανών ενισχύεται με τα αποτελέσματα της σύγχρονης έρευνας, αν και θέμα βέλτιστου σχεδιασμού του δρομέα μιας μηχανής παραμένει και θα παραμείνει ανοιχτό για πολλά ακόμα χρόνια.

ii. Η **συμπεριφορά του δρομέα** σε ειδικές καταστάσεις, όπως η εκκίνηση, η επιτάχυνση, η επιβράδυνση, καθώς και άλλα δυναμικά φαινόμενα. Ένα κρίσιμο θέμα της κατηγορίας αυτής αποτελεί η ροπή εκκίνησης του δρομέα, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει και η συμπεριφορά της πτερωτής σε χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο ροής παρουσία τύρβης, αλλά και βάσει της διανομής της ταχύτητας τύπου οριακού στρώματος του ανέμου λόγω της επίδρασης του εδάφους.

iii. Η **ρύθμιση του βήματος** των πτερυγίων και οι αντίστοιχοι αυτοματισμοί, που σχετίζονται με την έναρξη και παύση λειτουργίας του ανεμοκινητήρα. Η ρύθμιση του βήματος γίνεται είτε σε ολόκληρο το πτερύγιο είτε σε μέρος του, με σκοπό αφενός το περιορισμό της ισχύος σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, αφετέρου τη διατήρηση σταθερών στρωφών της μηχανής. Επίσης, μεταβολή του βήματος γίνεται με σκοπό την επίτευξη του μέγιστου βαθμού απόδοσης της πτερωτής για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και για τη μεγιστοποίηση της ροπής για διευκόλυνση της εκκίνησης της μηχανής. Επιπλέον, τα συστήματα αυτοματισμών πρέπει να επιτρέπουν την εκκίνηση της πτερωτής για ταχύτητα ανέμου ίση με την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και να διακόπτουν την λειτουργία της πτερωτής για πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου ή σε περιπτώσεις που η παραγόμενη αιολική ισχύς δε γίνεται αποδεκτή από το δίκτυο.

iv. **Προσανεμισμός του άξονα** του δρομέα προς την κατεύθυνση του ανέμου, ο οποίος επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση καθοδηγητικού πτερυγίου, είτε με κατάλληλα αισθητήρια που καταγράφουν τη στιγμιαία διεύθυνση του ανέμου και προσανατολίζουν ηλεκτρονικά με τη χρήση σερβομηχανισμού την πτερωτή στη διεύθυνση του ανέμου.

v. **Προβλήματα αντοχής** των υλικών που αφορούν την κατασκευή και την έδραση των πτερυγίων. Τα προβλήματα αυτά αποτελούν ίσως τα βασικότερα προβλήματα εμπόδια κατασκευής ανεμοκινητήρων υψηλής αξιοπιστίας, δεδομένου ότι ο άνεμος εξασκεί πάνω στα πτερύγια και στις αντίστοιχες εδράσεις τους σημαντικές δυνάμεις, ιδιαίτερα για μεγάλων διαστάσεων μηχανές. Ένας επιπλέον κίνδυνος προέρχεται από το γεγονός ότι οι εξασκούμενες τάσεις είναι εναλλασσόμενες, ενώ υπάρχει αυξημένος κίνδυνος ιδιοσυντονισμού της πτερωτής λόγω των εμφανιζόμενων ταλαντώσεων. Επίσης, δεν πρέπει να παραλείπεται το γεγονός ότι ο δρομέας μιας ανεμογεννήτριας βρίσκεται εκτεθειμένος σε αρκετά δύσκολες καιρικές συνθήκες, με αποτέλεσμα να έχουμε επιταχυνόμενη φθορά των υλικών. Συνεπώς, το πρόβλημα του υπολογισμού των τάσεων, καθώς και της επιλογής των κατάλληλων υλικών, που συνδυάζουν χαμηλό κόστος και επιθυμητή αντοχή, είναι καθοριστικό στην επιτυχία κάθε ανεμοκινητήρα στην ενεργειακή αγορά.

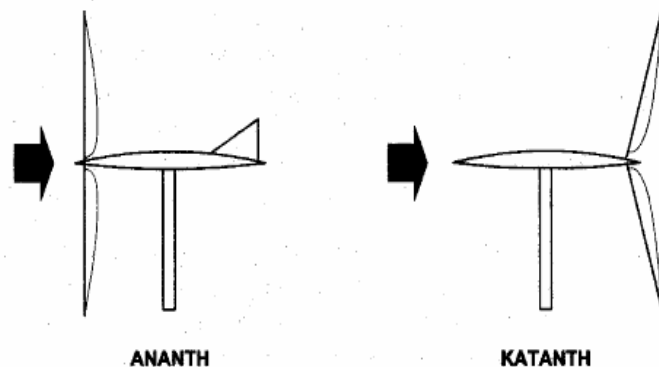
vi. **Καθορισμός του ύψους του δρομέα** επάνω από το έδαφος. Ο ακριβής καθορισμός του ύψους του δρομέα από το έδαφος πρέπει να συνεκτιμά τη μορφή του πεδίου ροής, που προσβάλλει τη πτερωτή (τραχύτητα εδάφους, εμπόδια κλπ.). Εν γένει, έχουμε αύξηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος, με παράλληλη όμως αύξηση και της δαπάνης κατασκευής της εγκατάστασης. Απαιτείται, συνεπώς, μια πλήρης οικονομικοτεχνική μελέτη για τον καθορισμό του βέλτιστου ύψους μιας ανεμογεννήτριας, αν και οι κατασκευάστριες εταιρίες σήμερα διαθέτουν τις μηχανές τους σε ένα ή δύο προκαθορισμένα ύψη, που ξεκινούν κατά κανόνα από την τιμή της διαμέτρου του δρομέα της μηχανής.

vii. **Κατασκευή του πύργου στήριξης** και θεμελίωσή του. Ο πύργος στήριξης πρέπει να συνδυάζει το κατάλληλο αεροδυναμικό σχήμα με την σταθερότητα και την αντοχή σε χρονικά μεταβαλλόμενες καταπονήσεις. Επιπλέον, πρέπει να μελετηθούν φαινόμενα αλληλεπίδρασης περιστρεφόμενων πτερυγίων και πύργου στήριξης, καθώς και η θεμελίωση ανεμοκινητήρων σε εδάφη περιορισμένης στερεότητας, όπως ο βυθός της θάλασσας. Τα προβλήματα αλληλεπίδρασης είναι πλέον σημαντικά για μηχανές με την πτερωτή τους σε υπήνεμη διάταξη.

viii. **Μελέτη του πεδίου ροής πίσω από την πτερωτή** και η επίδραση του ομόρου στο περιβάλλον καθώς και σε πιθανές επόμενες ανεμογεννήτριες. Στόχος της εν λόγω ανάλυσης είναι η μελέτη της αλληλεπίδρασης ανεμοκινητήρων σε διάφορες διατάξεις καθώς και ο καθορισμός της ελάχιστης επιτρεπτής απόστασης μεταξύ των μηχανών, με τον περιορισμό της χρήσης του ελάχιστου δυνατού εμβαδού, ώστε να μεγιστοποιείται η αξιοποίηση της γης.

## 10.5 Περιγραφή μηχανής οριζόντιου άξονα

Τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, είναι ο πύργος στηρίξεως, η πτερωτή, ο άξονας περιστροφής, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας, η ηλεκτρική γεννήτρια καθώς και το σύστημα προσανατολισμού της μηχανής.



*Σχήμα 10.7 Ανάντη και κατάντη διάταξη δρομέα ανεμογεννήτριας.*

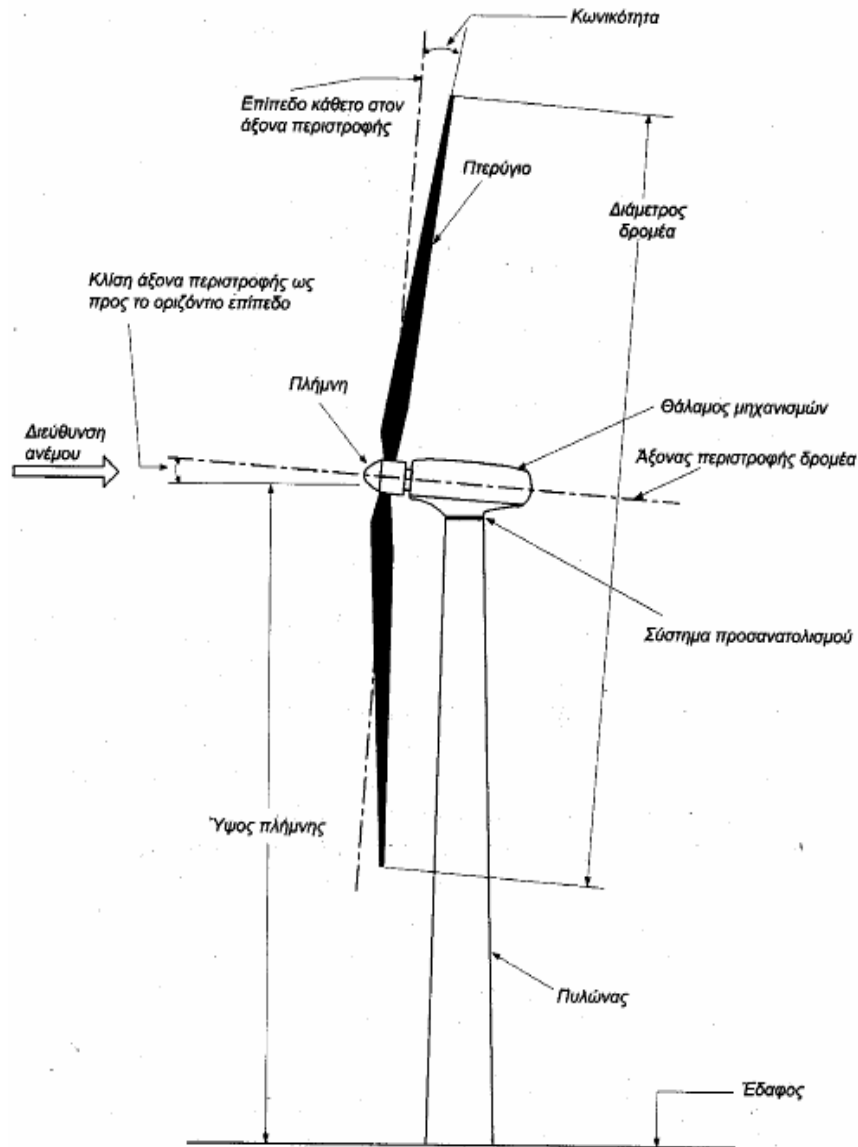
Στις περισσότερες περιπτώσεις, η πτερωτή της ανεμογεννήτριας αποτελείται από πτερύγια, των οποίων το σχήμα έχει προέλθει από αντίστοιχα πτερύγια αεροπορικών κινητήρων και είναι κατασκευασμένα συνήθως από ελαφρά κράματα μετάλλων, ενισχυμένο πολυεστέρα, αλλά και από ξύλο σε συνδυασμό με ειδικές ρητίνες. Μια τυπική μέθοδος κατασκευής πτερυγίων ανεμογεννήτριας βασίζεται στη συνδυασμένη χρήση χάλυβα και πλαστικού, όπου το κεντρικό χαλύβδινο τμήμα απορροφά τα καμπτικά και στρεπτικά φορτία, ενώ χρησιμοποιούνται πλαστικά κελύφη τα οποία προσδίδουν την επιθυμητή αεροδυναμική μορφή στα πτερύγια.

Όπως προαναφέραμε η πτερωτή τοποθετείται είτε στα ανάντη είτε στα κατάντη του πύργου στηρίξεως και τα πτερύγια καλύπτουν ένα μικρό ποσοστό (2% έως 10%) του εμβαδού της περιφέρειας που διαγράφουν. Όταν ο δρομέας λειτουργεί στα κατάντη του πύργου στηρίξεως έχουμε μεν αυξημένο επίπεδο αεροδυναμικού θορύβου, αλλά και αυτόματο προσανατολισμό της πτερωτής στη διεύθυνση του ανέμου. Στην ανάντη λειτουργία της πτερωτής εκλείπουν τα παραπάνω φαινόμενα, με αποτέλεσμα η διάταξη αυτή να προτιμάται σήμερα.

Η επιλογή του πλήθους των πτερυγίων σχετίζεται με την αεροδυναμική φόρτιση των πτερυγίων, με το βαθμό απόδοσής τους, με το κόστος κατασκευής της ανεμογεννήτριας καθώς και με θέματα αντοχής και συντονισμού λόγω ταλαντώσεων (πρόβλημα ιδιοσυχνοτήτων). Επιπλέον, θέματα που συνεκτιμούνται είναι η κυκλική μεταβολή της ροπής της μηχανής λόγω της καθ' ύψος μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και τα θέματα ζυγοστάθμισης των πτερυγίων. Για τον περιορισμό της κυκλικής μεταβολής του φορτίου των πτερυγίων δίνεται μια μικρή κλίση (έως και 10°) του άξονα περιστροφής ως προς το οριζόντιο. Τέλος, για λόγους περιορισμού

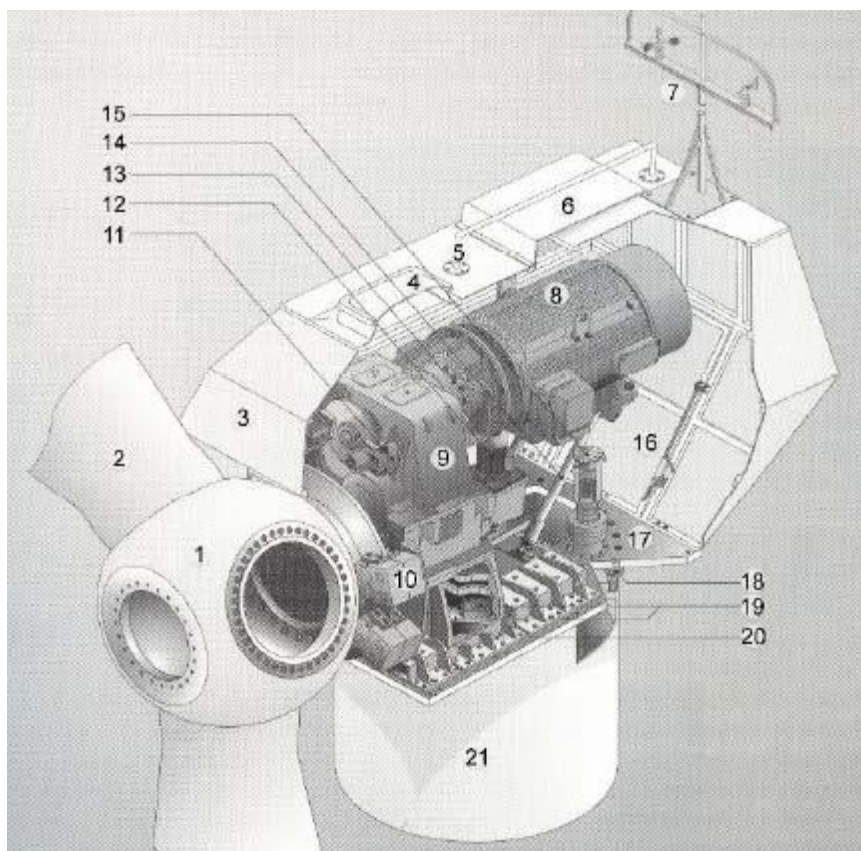
των καμπτικών τάσεων πάνω στα πτερύγια, επιβάλλεται συνήθως μια μικρή κωνικότητα αυτών που δεν ξεπερνά τις  $10^\circ$ .

Για λόγους ασφάλειας της ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια είναι συνήθως εφοδιασμένα με συστήματα αεροδυναμικής πέδησης (αερόφρενα), τα οποία διακόπτουν τη λειτουργία της μηχανής σε έκτακτες περιπτώσεις. Σε ειδικές κατασκευές εκτός από την παρουσία των αερόφρενων (π.χ. επίπεδες πλάκες κάθετες στην επιφάνεια του πτερυγίου) χρησιμοποιούνται και μικρά αλεξίπτωτα, που απελευθερώνονται φυγοκεντρικά μετά από κάποιο όριο στροφών και επιβραδύνουν



Σχήμα 10.8 Τοποθέτηση ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.

την ανεμογεννήτρια.



- |   |   |
|---|---|
| 1. Πλήμνη δρομέα                              | 12. Υδραυλικά                                   |
| 2. Πτερύγια δρομέα                            | 13. Ελαστικός σύνδεσμος                         |
| 3. Κάλυμμα ατράκτου                           | 14. Αναρτήσεις γεννήτριας                       |
| 4. Φωταγωγός                                  | 15. Σύστημα προσανατολισμού                     |
| 5. Ράβδος ασφαλείας                           | 16. Θυρίδα επισκόπησης                          |
| 6. Εξαγωγή αέρα                               | 17. Εξέδρα                                      |
| 7. Αλεξικέραυνο και μετρητής ταχύτητας ανέμου | 18. Στεφάνη ρουλεμάν συστήματος προσανατολισμού |
| 8. Γεννήτρια                                  | 19. Φρένο συστήματος προσανατολισμού            |
| 9. Κιβώτιο ταχυτήτων                          | 20. Αποζεύκτης θορύβου                          |
| 10. Δισκόφρενα δρομέα                         | 21. Πύργος                                      |
| 11. Εφεδρικό φρένο                            |   |

**Σχήμα 10.9** Κύρια μέρη ατράκτου ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα 600 kW.

Για τη βελτίωση της συνολικής συμπεριφοράς μιας περωτής, χρησιμοποιούνται περωτές μεταβλητού βήματος σε αντιδιαστολή με τις απλούστερες περιπτώσεις περωτών σταθερού βήματος. Η μεταβολή του βήματος μιας περωτής συνίσταται στην περιστροφή του περυγίου γύρω από το διαμήκη άξονά του, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της γωνίας προσβολής του από τον άνεμο. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η διατήρηση σταθερής ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας, η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης των περυγίων, ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος, ο περιορισμός των δυνάμεων που καταπονούν τα



πτερύγια κ.α.

Η πλήμνη αποτελεί το δεύτερο συστατικό της πτερωτής (δρομέα) και περιλαμβάνει εκείνο το μέρος της ανεμογεννήτριας πάνω στο οποίο προσαρμολάζονται τα πτερύγια. Η τελική της μορφή εξαρτάται τόσο από το είδος της πτερωτής όσο και από τους επιθυμητούς βαθμούς ελευθερίας στη θέση σύνδεσης πτερυγίων και άξονα.

Ο άξονας της ανεμογεννήτριας κατασκευάζεται από ειδικό ενισχυμένο χάλυβα, ώστε να δύναται να μεταφέρει ισχυρές μη μόνιμες στρεπτικές και καμπτικές ροπές, ενώ η έδραση του γίνεται συνήθως σε δύο ένσφαιρα έδρανα ικανά να παραλαμβάνουν τόσο το βάρος του άξονα όσο και τα ενασκούμενα φορτία.

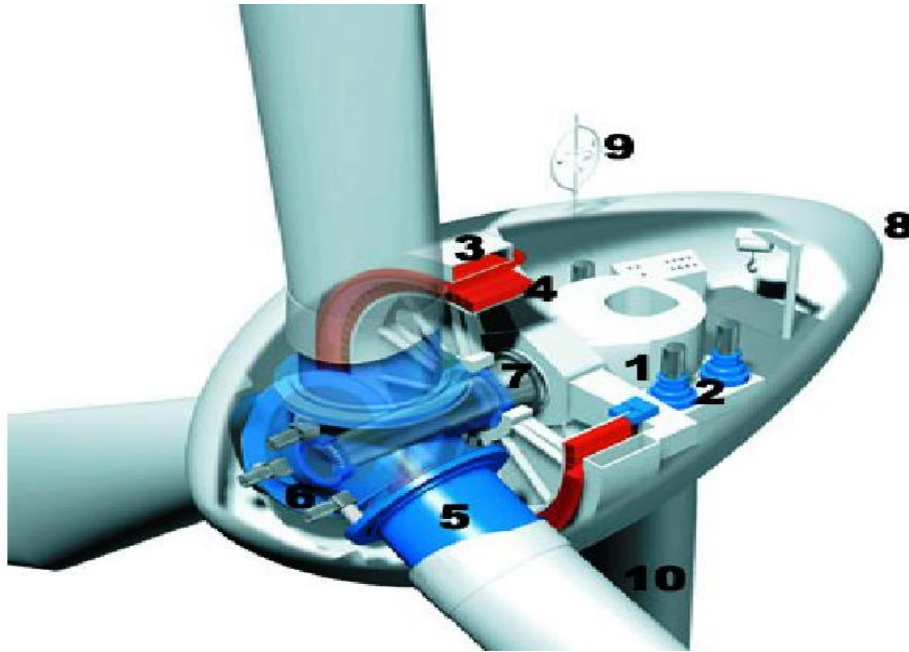
Η δυνατότητα περιστροφής του άξονα σε διεύθυνση παράλληλη προς αυτή του ανέμου εξασφαλίζεται με τη χρήση καθοδηγητικών πτερυγίων και ειδικών αυτοματισμών. Η πλέον σύγχρονη μέθοδος προσανατολισμού στηρίζεται στη χρήση ειδικού αισθητηρίου και σερβομηχανισμού, που περιστρέφει την άτρακτο της μηχανής( υπερκατασκευή) με τη βοήθεια οδόντωσης περιστροφής.

Ένα από τα σπουδαιότερα μέρη της ανεμογεννήτριας είναι το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, που περιλαμβάνει διβάθμιο ή τριβάθμιο κιβώτιο μετασχηματισμού της χαμηλής ταχύτητας περιστροφής της πτερωτής (συνήθως 20 έως 110rpm) σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής (άνω των 1000rpm), στις οποίες λειτουργούν συνήθως οι ηλεκτρικές γεννήτριες. Ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός διβάθμιου συστήματος μετάδοσης είναι περίπου 96%, ενώ για λόγους ασφαλείας η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας.

Το σύστημα κίνησης περιλαμβάνει επίσης, υδραυλικό ή μηχανικό φρένο και ελαστικούς συνδέσμους απορρόφησης στρεπτικών ταλαντώσεων. Το μηχανικό φρένο της ανεμογεννήτριας τοποθετείται είτε στον άξονα υψηλής ταχύτητας περιστροφής, οπότε απαιτείται μικρή σχετικά δύναμη πέδησης, αλλά δεν προστατεύεται η πτερωτή από απώλεια φορτίου ή θραύση του συστήματος μετάδοσης κίνησης, είτε στον άξονα χαμηλής ταχύτητας περιστροφής. Στην τελευταία περίπτωση λόγω της μεγάλης ροπής πέδησης απαιτείται φρένο αυξημένων διαστάσεων, βάρους και κόστους. Στην περίπτωση όμως αυτή προστατεύεται καλύτερα η πτερωτή και το κιβώτιο μετάδοσης, για αυτό και αποτελεί τη βέλτιστη τεχνικά λύση. Τέλος, για λόγους πρόσθετης ασφάλειας, απαιτείται η αυτόματη ενεργοποίηση του φρένου με τη βοήθεια ελατηρίου, στην περίπτωση πτώσης της υδραυλικής πίεσης ή της ηλεκτρικής τάσης για την περίπτωση ηλεκτρομαγνητικού συστήματος πέδησης.

Για την προστασία των τμημάτων της ανεμογεννήτριας από τις καιρικές συνθήκες χρησιμοποιείται ειδικό κέλυφος από σύνθετο υλικό, π.χ. ειδικά κράματα χάλυβα ή αλουμινίου, που στην περιοχή της πλήμνης πρέπει να έχει και αεροδυναμική μορφή. Επιπλέον, το κέλυφος της ανεμογεννήτριας πρέπει να έχει αντιδιαβρωτική προστασία.

Ο πύργος στηρίζεται της ανεμογεννήτριας αποτελείται συνήθως είτε από ένα μεταλλικό δικτύωμα, είτε από μια στήλη από μπετόν ή μεταλλικό σωλήνα για μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες. Στην τελευταία περίπτωση υπάρχει ειδική μέριμνα για εσωτερική σκάλα, ενώ για ανεμογεννήτριες μεγάλων διαστάσεων υπάρχει πρόσθετη



*Σχήμα 10.10 Τα κύρια μέρη μιας ανεμογεννήτριας τεχνολογίας Enercon.*

1. Γεννήτρια
2. Στάτης γεννήτριας
3. Ρότορας γεννήτριας
4. Κύριος άξονας
5. Πτερωτές
6. Φλάτσα – βάση πτερωτής
7. Κινητήρας έλεγχου του Pitch Control
8. Κύριος φορέας (Yaw drive)
9. Ανεμόμετρο
10. Πύργος



*Σχήμα 10.11 Δρομέας και άτρακτος τοπικής ανεμογεννήτριας.*

μέριμνα για εγκατάσταση ανελκυστήρα. Το ελάχιστο ύψος του πύργου στηρίζεως είναι συνήθως ίσο με τη διάμετρο της πτερωτής, ενώ κατά την εκλογή του πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο το αυξημένο κόστος κατασκευής και θεμελίωσης για μεγάλα ύψη όσο και η δυνατότητα αξιοποίησης υψηλότερων ταχυτήτων του ανέμου, με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης της πτερωτής.

Ολοκληρώνοντας τη σύντομη περιγραφή των βασικών τμημάτων μιας ανεμογεννήτριας πρέπει να αναφέρουμε και την ύπαρξη των **ηλεκτρικών γεννητριών**, που χρησιμοποιούνται για μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, καθώς και των **συστημάτων αυτοματισμού**. Εν συντομία αναφέρουμε ότι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κυρίως σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσομένου ρεύματος και σπανιότερα ηλεκτρικές γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. Σχετικά πρόσφατα ορισμένοι κατασκευαστές υιοθέτησαν τη χρήση ηλεκτρικών γεννητριών μεταβλητών στροφών, η έξοδος των οποίων, αφού ανορθωθεί, οδηγείται σε κατάλληλο μετατροπέα συχνότητας, ο οποίος και αποδίδει στην κατανάλωση ηλεκτρική ενέργεια επιθυμητών χαρακτηριστικών.

## 10.6 Χαρακτηριστικά ανεμοκινητήρων οριζόντιου άξονα

### 10.6.1 Δρομέας

Ο σχεδιασμός του δρομέα είναι ίσως το πιο βασικό ζήτημα στη σχεδίαση του όλου συστήματος. Στόχος είναι να βρεθεί ένας βέλτιστος συνδυασμός των διαφόρων παραμέτρων που συνθέτουν τον δρομέα: ταχύτητα περιστροφής, διάμετρος δρομέα, αριθμός πτερυγίων, κατανομή πλάτους πτερυγίου, κατάλληλη αεροτομή ή αεροτομές, συστροφή, μέσο γεωμετρικό βήμα. Τα κριτήρια επιλογής είναι η μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής της. Η διάμετρος του δρομέα θα εξαρτηθεί από την απαιτούμενη ονομαστική ισχύ της μηχανής και το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης του ανεμοκινητήρα. Η γωνιακή ταχύτητα λειτουργίας του δρομέα επιλέγεται έτσι ώστε ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου προς την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται στην περιοχή της βέλτιστης τιμής συντελεστή ισχύος του ανεμοκινητήρα. Η κατανομή του πλάτους των πτερυγίων θα προκύψει από τη βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης του δρομέα ενώ το πλήθος των πτερυγίων (η στερεότητα του δρομέα) θα εξαρτηθεί από το είδος της εφαρμογής του ανεμοκινητήρα. Ανάλογα με τη μορφή του δρομέα διακρίνουμε δύο διαφορετικούς τύπους:

#### (α) Δρομείς με πολλά λεπτά πτερύγια (πολυπτέρυγους)

Χαρακτηριστικό των δρομέων αυτών είναι η μικρή διάμετρος, η μικρή περιφερειακή ταχύτητα και η μεγάλη ροπή. Στο παρελθόν κατασκευάστηκαν σε



*Σχήμα 10.12* Αμερικανικός πολυπτερυγος ανεμοκινητήρας.

βιομηχανική κλίμακα (οι γνωστοί Αμερικανικοί πολυπτερυγοί ανεμόμυλοι) και βρήκαν πλατεία εφαρμογή για άντληση νερού. Η κατασκευή τέτοιων ανεμοκινητήρων καθώς και η έρευνα προς την κατεύθυνση αυτή τείνουν να εγκαταληφθούν για πολλούς λόγους, όπως ο μικρός συντελεστής ισχύος και η μικρή διάμετρος που μπορούν να κατασκευαστούν.

### **(β) Δρομείς με λίγα πτερύγια**

Οι δρομείς αυτοί έχουν συνήθως δύο ή τρία πτερύγια (τελευταία κατασκευάστηκαν δρομείς με ένα πτερύγιο, μονόπτερος). Έχουν τη μορφή των πτερυγίων των ελίκων των αεροσκαφών με αρκετή συστροφή από τη βάση μέχρι το ακροπτερύγιο.



*Σχήμα 10.13* Ανεμογεννήτρια με τρία πτερύγια.

Η τεχνολογία κατασκευής του είναι παρόμοια με εκείνη των ελίκων αεροπλάνων, δανείζεται δε και μερικά στοιχεία από εκείνη του δρομέα των ελικοπτέρων. Τα βασικά χαρακτηριστικά του δρομέα είναι ο μεγάλος συντελεστής ισχύος και η βέλτιστη λειτουργία του σε μεγάλο σχετικά λόγο ταχυτήτων

ακροπτερυγίου λ. Οι παλαιότεροι δρομείς είχαν πλατειά πτερύγια, ενώ οι σύγχρονοι δρομείς, λόγω αεροδυναμικής βελτιστοποίησης, έχουν λεπτά πτερύγια. Οι αεροτομές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πτερυγίων είναι σύγχρονες αεροτομές που παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή άνωσης σε μικρές σχετικά γωνίες πρόσπτωσης ενώ συγχρόνως διατηρούν χαμηλό συντελεστή αντίστασης σε ευρεία περιοχή γωνιών πρόσπτωσης. Τυπικός εκπρόσωπος τέτοιων αεροτομών είναι η αεροτομή NACA 4412.

Οι δρομείς αυτοί είναι πιο ταχύστροφοι από τους παλαιότερους δρομείς και ελαφρώς οικονομικότεροι, παρουσιάζουν δε ευκολία στην επιτόπου συναρμολόγηση του ανεμοκινητήρα. Γενικά ο τρίπτερος δρομέας είναι κατά 5% περισσότερο αποδοτικός από τον δίπτερο και τα φορτία που ενεργούν σε κάθε πτερύγιο είναι μικρότερα, είναι όμως ακριβότερος. Αντίθετα ο μονόπτερος δρομέας είναι φθηνότερος, έχει 10% μικρότερη ενεργειακή απόδοση από τον δίπτερο, αλλά έχει θορυβώδη λειτουργία και η ζυγοστάθμιση του παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα.

### **(γ) Μέγεθος ανεμοκινητήρα**

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα κατασκευάζονται από ισχείς μερικών εκατοντάδων W μέχρι και πάνω από 3 MW. Διακρίνουμε μικρά μεγέθη (έως λίγα KW, διάμετρος έως 10 μέτρα), μεσαία μεγέθη (50 – 250 KW, διάμετρος έως 25 μέτρα), και μεγάλα μεγέθη (500 – 2500 KW). Είναι γενικά δύσκολο να ξεπεράσουμε την ισχύ των 2500 KW, γιατί απαιτείται κατασκευή δρομέων πολύ μεγάλης διαμέτρου (άνω των 80 m) κατασκευή που συνεπάγεται μεγάλα προβλήματα.

### **(δ) Υλικά πτερυγίων**

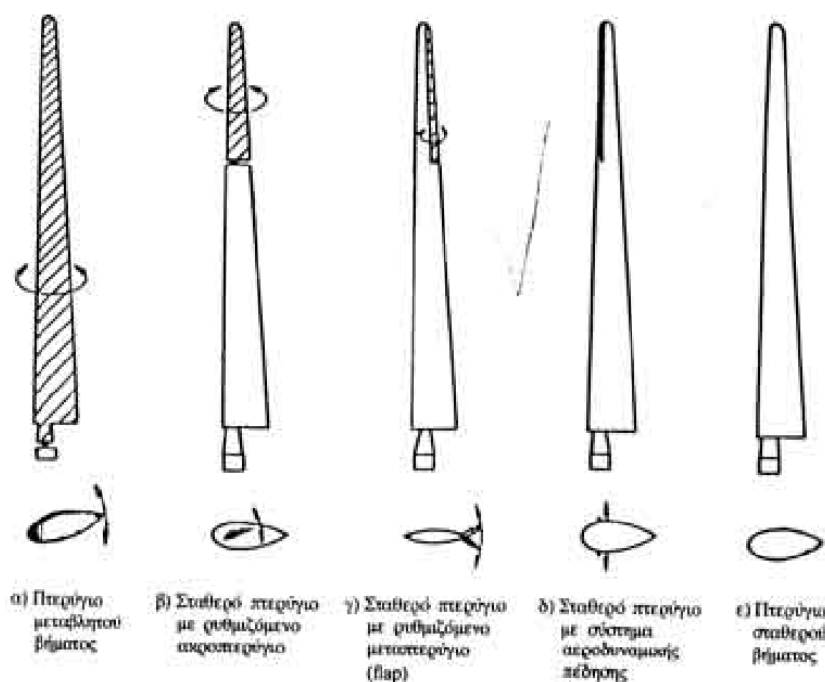
Τα υλικά κατασκευής των πτερυγίων των δρομέων δεν έχουν ακόμα ξεκαθαρίσει εντελώς. Στους μικρούς ανεμοκινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως πολυουρεθάνη, υαλόνημα και ξύλο, υλικά που δεν υποφέρουν από διάβρωση αλλά έχουν όμως άγνωστη συμπεριφορά σε εναλλασσόμενη φόρτιση, φόρτιση που οδηγεί σε πρόωρη γήρανση του υλικού. Στους μεσαίου μεγέθους δρομείς χρησιμοποιούνται υαλονήματα με εναλλαγή της κατεύθυνσης των υαλονημάτων σε πολλαπλές στρώσεις ενώ στους μεγάλου μεγέθους ανεμοκινητήρες χρησιμοποιείται η τεχνολογία των ελίκων των αεροσκαφών (ανθρακόνημα με μηχανές αυτόματου τυλίγματος – Hamilton Standard) ή ακόμα και ξύλο ή και τεχνολογία πτερυγίων αεροσκαφών.

### **(ε) Το βήμα του πτερυγίου**

Υπάρχουν δρομείς με πτερύγια:

- Μεταβλητού βήματος
- Σταθερού βήματος

Η μηχανική ρύθμιση ισχύος σε μια ανεμογεννήτρια έχει ως σκοπό να εξισορροπεί, για ταχύτερες ανέμους μεγαλύτερες από την ονομαστική, την ισχύ την παραγόμενη από την πτερυγίωση με την ονομαστική ισχύ της εγκατάστασης (πχ γεννήτριας), ώστε η εγκατάσταση να μην υπερφορτίζεται.



**Σχήμα 10.14** Πτερόγια με αεροδυναμική πέδη. Η χρήση τους είναι και για τη ρύθμιση του βήματος πτερυγίου και κατ' επέκταση της ισχύος.

### (ζ) Τρόποι μηχανικής ρύθμισης ισχύος

- Είναι δυνατόν να μειωθεί το μέγεθος της παραγόμενης από την περυγώση ισχύος με την αλλαγή του προσανατολισμού ολόκληρου του πτερυγίου ή μέρους του (ακροπτερόγιο) ως προς την διεύθυνση του ανέμου. Ο τρόπος αυτός απαιτεί την ύπαρξη σερβομηχανισμού και έχει εφαρμογή στις ανεμογεννήτριες μικρής αλλά κυρίως μεγάλης ισχύος.
- Ρύθμιση με τη βοήθεια αεροδυναμικών φρένων στα άκρα των πτερυγίων. Η διάταξη αυτή αποτελεί περισσότερο μέσον προστασίας της ανεμογεννήτριας έναντι υπερτάχυνσης της και τίθεται σε λειτουργία όταν η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα υπερβεί την επιτρεπόμενη τιμή. Αυτό μπορεί να συμβεί σε περίπτωση υπερβολικής ταχύτητας ανέμου (μεγαλύτερης της ταχύτητας ανέμου στην οποία η ανεμογεννήτρια σταματάει,  $V_F$ ) ή όταν ο δρομέας παράγει έργο, ενώ δεν υπάρχει κατανάλωση.

Οι ανεμογεννήτριες με σύστημα ρύθμισης του βήματος του πτερυγίου παρουσιάζουν τεχνολογική πολυπλοκότητα στο ρυθμιστικό μηχανισμό και τα πτερόγια είναι σαφώς ακριβότερα και βαρύτερα. Παρουσιάζουν όμως καλή ρύθμιση ισχύος, μειωμένα αεροδυναμικά φορτία, ευκολία στην εκκίνηση της ανεμογεννήτριας και συγχρόνως μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για πέδηση.

Οι ανεμογεννήτριες που δεν έχουν μηχανική ρύθμιση ισχύος (πτερόγιο σταθερού βήματος) είναι απλούστερες τεχνολογικά και φυσικά φθηνότερες, έχουν όμως περίπου 5 – 10% μικρότερη παραγωγή ενέργειας, μεγαλύτερα φορτία καταπόνησης και απαιτούν δισκόφρενα ασφάλειας αστοχίας ή αεροπέδες.

Ανεμογεννήτριες σταθερού βήματος πτερυγίου είναι σχεδόν όλες οι ανεμογεννήτριες κατασκευής Δανίας μεσαίου μεγέθους.

### 10.6.2 Σύστημα αύξησης στροφών (Σ.Α.Σ)

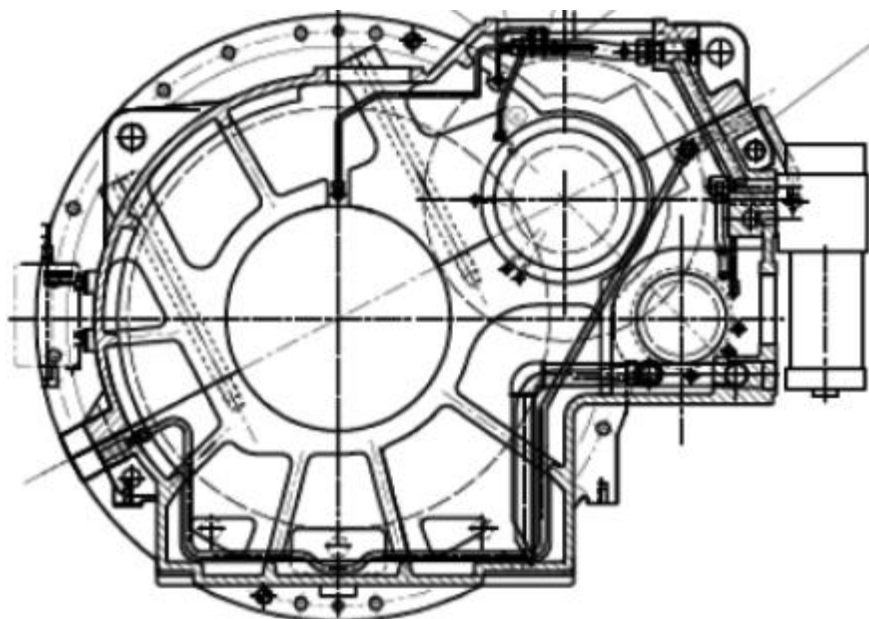
Η σχεδίαση του συστήματος αύξησης των στροφών του δρομέα για να προσαρμοστεί ο δρομέας στις στροφές της γεννήτριας ή της αντλίας δεν αφορά άμεσα τη σχεδίαση της ανεμογεννήτριας. Η τεχνολογική εξέλιξη των ΣΑΣ, λόγω απαιτήσεων της βιομηχανίας, έχει δώσει πολλούς και καλούς τύπους κιβωτίου ταχυτήτων από άποψη αντοχής υλικού, φθοράς, μεταφερόμενης ισχύος και διαστάσεων.



*Σχήμα 10.15 Φωτογραφία του κιβωτίου ταχυτήτων του κύριου άξονα και του συστήματος φρένων.*

Βασικά κριτήρια επιλογής του είναι η διάρκεια ζωής του, ο βαθμός απόδοσής του και ο θόρυβος λειτουργίας του. Λόγω της συνεχούς μεταβολής της ισχύος του ανέμου, το κιβώτιο ταχυτήτων λειτουργεί συνεχώς με κρουστικά φορτία τα οποία οδηγούν σε πρόωρη φθορά υλικού και μείωση της διάρκειας ζωής του κιβωτίου. Για το λόγο αυτό, το κιβώτιο ταχυτήτων της ανεμογεννήτριας επιλέγεται να έχει ονομαστικό μέγεθος ισχύος πολύ μεγαλύτερο από το ονομαστικό μέγεθος της μηχανής, ακόμα και ονομαστική ροπή 200% μεγαλύτερη της ονομαστικής ροπής της μηχανής. Διακρίνονται δύο είδη κιβωτίων. Το κιβώτιο με παράλληλες οδοντώσεις γραναζιών (κιβώτιο παραλλήλων αξόνων) και το κιβώτιο στο οποίο οι οδοντωτοί τροχοί που χρησιμοποιούνται έχουν ελικοειδή οδόντωση (συνήθως κιβώτιο με πλανητικό σύστημα οδοντωτών τροχών). Το πρώτο είδος κιβωτίου είναι απλούστερο κατασκευαστικά και έχει χαμηλότερο κόστος συντήρησης. Το κιβώτιο με ελικοειδή οδόντωση έχει υψηλότερο κόστος αγοράς και συντήρησης αλλά και καλύτερο βαθμό

απόδοσης και χαμηλότερη στάθμη θορύβου.



*Σχήμα 10.16 Βασικό μηχανολογικό σχέδιο κιβωτίου ταχυτήτων ανεμογεννήτριας.*

Για την αύξηση της ζωής του κιβωτίου και τη μείωση των κρουστικών φορτίων λειτουργίας, σε ορισμένες περιπτώσεις το κιβώτιο ταχυτήτων στηρίζεται πάνω σε ελατήρια απόσβεσης κραδασμών.

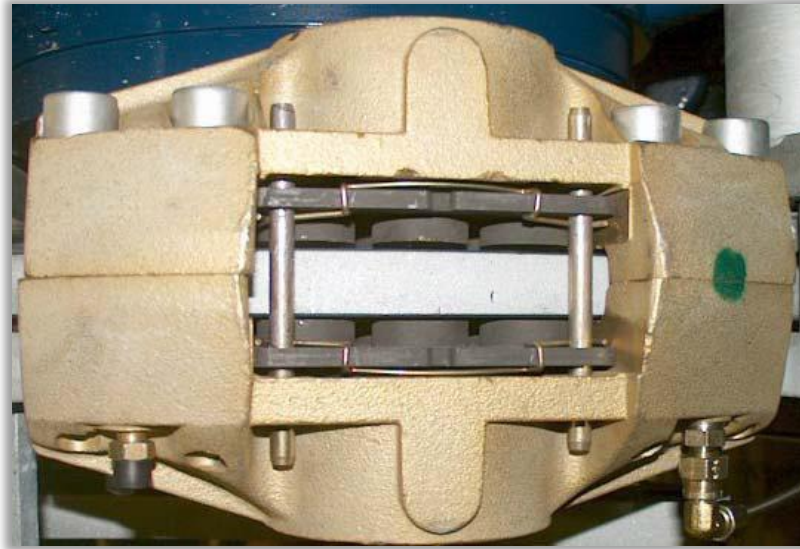
### **10.6.3 Σύστημα πέδησης άξονα δρομέα**

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ακινητοποίησης του δρομέα του ανεμοκινητήρα.

- Μεταβολή του βήματος του πτερυγίου ή του ακροπτερυγίου ή και ενεργοποίησης της αεροπέδης στο ακροπτερύγιο.
- Στροφή του ίδιου του δρομέα ώστε να γυρίσει παράλληλα προς τον άνεμο.
- Αύξηση της αεροδυναμικής αντίστασης του πτερυγίου με την ενεργοποίηση αεροπέδης (τύπου spoiler).
- Πέδηση του άξονα

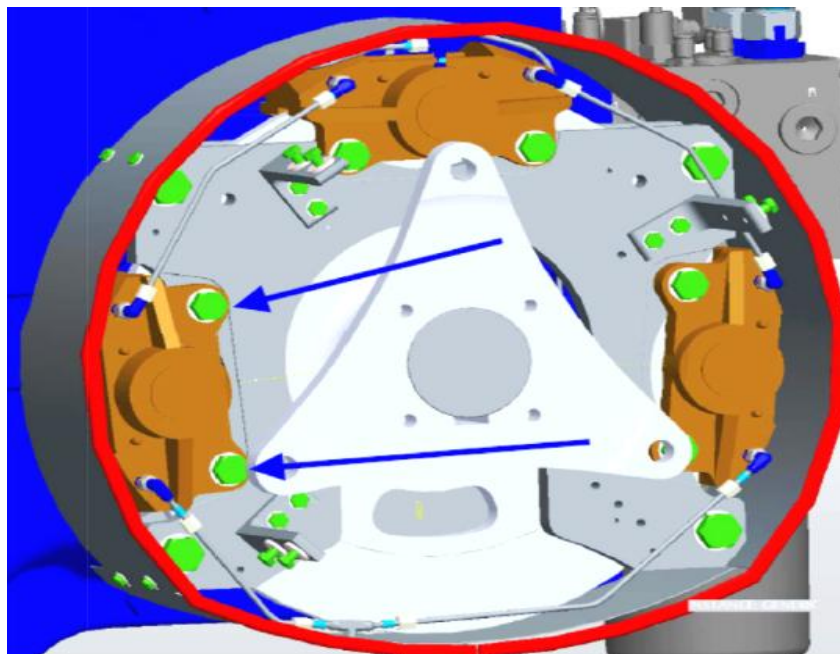
Είναι φανερό ότι ο προτιμότερος τρόπος ακινητοποίησης της μηχανής είναι η σταδιακή μείωση των αεροδυναμικών φορτίων στη μηχανή με παράλληλη αύξηση της αντιρροπής. Με τον τρόπο αυτό δεν αναπτύσσονται κρουστικά φορτία στη φάση πέδησης της μηχανής. Σε περίπτωση αστοχίας όμως των μηχανισμών ρύθμισης του βήματος του πτερυγίου ή των άλλων μεθόδων ρύθμισης ισχύος απαιτείται η πέδηση του άξονα του δρομέα. Η πέδηση αυτή γίνεται συνήθως με δισκόφρενο τύπου ασφαλείας αστοχίας που ενεργεί αυτόματα στον άξονα. Το δισκόφρενο αυτό συνήθως





*Σχήμα 10.17* Φωτογραφία της μιας δαγκάνας του μηχανικού φρένου.

τοποθετείται στον υψηλόστροφο άξονα της μηχανής (μετά το κιβώτιο ταχυτήτων) διότι έτσι η απαιτούμενη ροπή πέδησης είναι πολύ μικρή λόγω υψηλής γωνιακής ταχύτητας) και κατά συνέπεια το δισκόφρενο είναι μικρού κόστους. Συνήθως η πέδη αυτή είναι ηλεκτρομαγνητικού τύπου που ενεργοποιείται αυτόματα με τη διακοπή του ρεύματος, δηλαδή η πέδη παραμένει πάντα ανοικτή με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητών και σε περίπτωση διακοπής ρεύματος ενεργοποιείται από ελατήρια.



*Σχήμα 10.18* 3D σχέδιο ολόκληρου του συστήματος φρένου τοποθετημένου στον άξονα σύνδεσης της γεννήτριας.

Τοποθετώντας όμως την πέδη στον υψηλόστροφο άξονα υπερφορτίζουμε το κιβώτιο ταχυτήτων στη διάρκεια της πέδησης (η ακινητοποίηση της μηχανής γίνεται εντός 2 ή 3 πλήρων στροφών του δρομέα) ενώ συγχρόνως η αντικατάσταση, συντήρηση του κιβωτίου ή και η επισκευή του γίνεται προβληματική. Τοποθέτηση του δισκόφρενου στον χαμηλόστροφο άξονα απαιτεί ογκώδες δισκόφρενο και υψηλού κόστους. Το δισκόφρενο αυτό είναι συνήθως υδραυλικού τύπου ασφαλείας αστοχίας. Στην περίπτωση χρήσης υδραυλικού δισκόφρενου αντιμετωπίζονται προβλήματα διαρροής λαδιού, λειτουργίας αισθητηρίων μέτρησης στάθμης και θερμοκρασίας λαδιού κλπ.

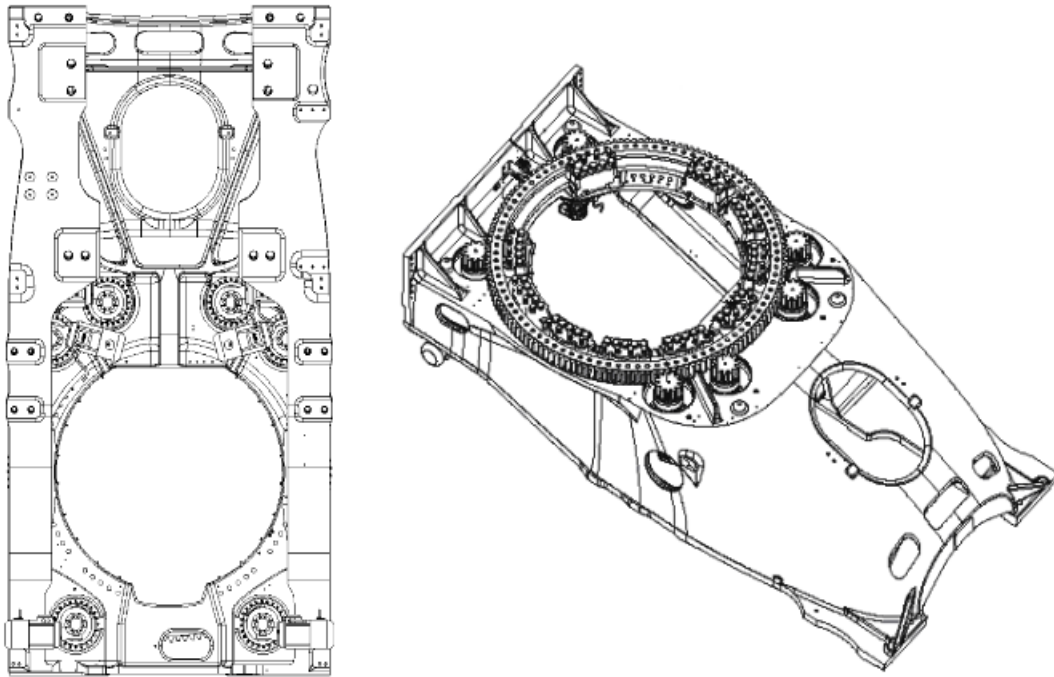
#### 10.6.4 Ελαστικοί σύνδεσμοι

Για τη σύνδεση αξόνων μεταξύ τους (πχ άξονας δρομέα με κιβώτιο ή δισκόφρενο με γεννήτρια κλπ) απαιτείται ελαστικός σύνδεσμος απορρόφησης κραδασμών. Συνήθως οι σύνδεσμοι αυτοί βασίζονται στην απορροφητική ικανότητα του καουτσούκ. Σε ακριβές κατασκευές χρησιμοποιείται και υδραυλικού τύπου συμπλέκτης ο οποίος συγχρόνως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μέσο προσαρμογής των στροφών του δρομέα στις στροφές της γεννήτριας και έτσι η μηχανή να δουλεύει σε σταθερές σύγχρονες στροφές ή σε στροφές μέγιστου συντελεστή ισχύος.

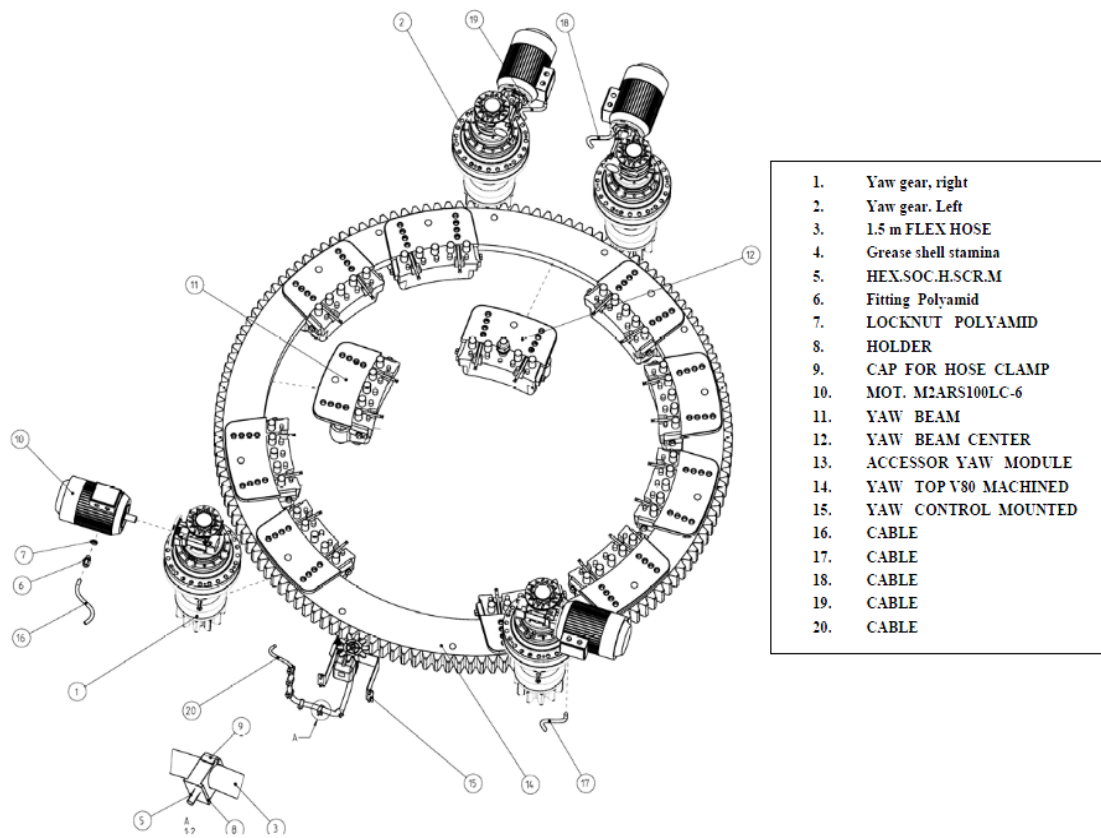
#### 10.6.5 Σύστημα προσανατολισμού

Όπως αναφέρθηκε, ο δρομέας μπορεί να βρίσκεται πριν από τον πύργο ή μετά από αυτόν (ανάντι και κατάντι μηχανές). Στους ανεμοκινητήρες με ανάντι τοποθέτηση του δρομέα απαιτείται σύστημα προσανατολισμού του δρομέα. Στις μικρού μεγέθους ή και σε μεσαίου μεγέθους ανεμογεννήτριες για τον προσανατολισμό χρησιμοποιείται καθοδηγητικό πτερύγιο (ουρά) που τόσο η επιφάνεια της ουράς όσο και η θέση της ως προς τον άξονα του πύργου επιλέγονται έτσι ώστε σε απόκλιση του ανέμου κατά το πολύ  $10^\circ$  να εξασκείται ροπή επαναπροσανατολισμού του δρομέα στον άνεμο ικανή να υπερνικήσει την αντιροπή λόγω γυροσκοπικού φαινομένου.

Στις ανεμογεννήτριες μεγάλου μεγέθους χρησιμοποιείται σερβοκινητήρας ο οποίος ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου και που προσανατολίζει το δρομέα κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου. Η τοποθέτηση του δρομέα κατάντι φαινομενικά τουλάχιστον φαίνεται να οδηγεί σε απλούστερη κατασκευή ανεμοκινητήρα γιατί δεν απαιτείται σύστημα προσανατολισμού, αλλά στην περίπτωση αυτή ο ανεμοκινητήρας είναι περισσότερο θορυβώδης στη λειτουργία του λόγω της σκίασης του πύργου πάνω στον δρομέα και επίσης δημιουργούνται αυξημένες καταπονήσεις στα πτερύγια λόγω της περιοδικότητας φορτίσεων του πτερυγίου καθώς αυτό σε κάθε περιστροφή σκιάζεται από τον πύργο. Τέλος απαιτείται κάποιο είδος αποσβεστήρα για τον περιορισμό των άσκοπων μετακινήσεων του κουβουκλίου λόγω πλευρικής «τύρβης» του ανέμου.



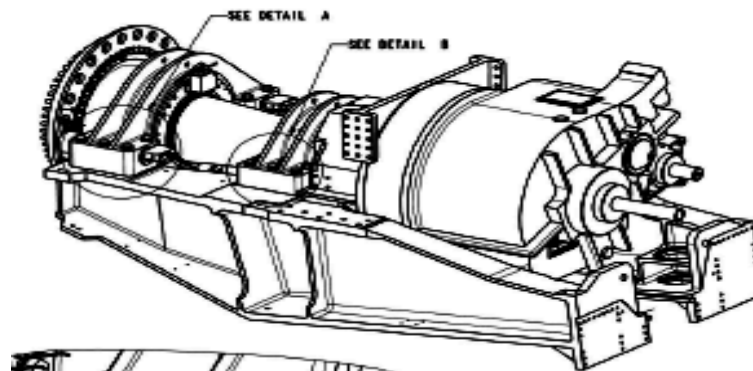
Σχήμα 10.19 Σύστημα προσανατολισμού



Σχήμα 10.20 Απεικόνιση του συστήματος προσανατολισμού μαζί με τα μοτέρ.

### 10.6.6 Κύριος άξονας

Ο κύριος άξονας είναι αυτός που μεταβιβάζει την ενέργεια από τον ρότορα στο σασμάν. Εσωτερικά από αυτόν περνάει ο άξονας του pitch. Ο κύριος άξονας στηρίζεται και περιστρέφεται συνήθως σε δύο σφαιρικά κυλινδρικά ρουλεμάν.



Σχήμα 10.21 Κύριος άξονας ανεμογεννήτριας.

### 10.6.7 Σύστημα γείωσης A/Γ

Σε κάθε A/Γ θα τοποθετηθεί θεμελιακή γείωση, η οποία θα συνδεθεί με τον οπλισμό της βάσης έτσι, ώστε να δράσει σαν ισοδυναμικό πλέγμα, κατά Φ.Ε.Κ. 8/1525/31-12-73. Το σύστημα της γείωσης αποτελείται ενδεικτικά από ένα ηλεκτρόδιο δακτυλίου και χάλκινα ηλεκτρόδια γείωσης (Ράβδοι 6 m (min.Ø16)). Τα πλεονεκτήματα που επιτυγχάνονται με αυτόν τον τρόπο είναι:

α) Γείωση προστασίας:

Το ηλεκτρόδιο δακτυλίου περιορίζει τις επικίνδυνες τάσεις επαφής για το προσωπικό που βρίσκεται κοντά στη βάση του πυλώνα, σε περίπτωση πλήξης κεραυνού στην A/Γ.

β) Γείωση λειτουργίας:

Τα χάλκινα ηλεκτρόδια εξασφαλίζουν σταθερή και χαμηλή αντίσταση γείωσης για ολόκληρο το σύστημα γείωσης.

### 10.6.8 Αντικεραυνική προστασία της A/Γ

Πάνω στην άτρακτο και στα πτερύγια της A/Γ υπάρχουν αλεξικέραυνα, τα οποία συνδέονται με τη γεννήτρια, το Μ/Σ, τον πίνακα και όλα τα μεταλλικά μέρη της A/Γ (κατά I.E.C 61024-1). Ο αγωγός που συνδέει όλα τα παραπάνω, καταλήγει στη θεμελιακή γείωση – ενιαία γείωση του αιολικού πάρκου. Για την προστασία της A/Γ από κάθε είδους υπερτάσεις θα συνδεθούν αντικεραυνικά στοιχεία στον πίνακα Μ/Τ (σύμφωνα με over voltage category III DIN VDE 0110-1:1997-04).

### 10.6.9 Πύργος

Κριτήρια επιλογής του είδους του πύργου είναι, εκτός από το κόστος του, η ευκολία μεταφοράς του στον τόπο εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας και η ευκολία ανέγερσής του. Συνυφασμένο με το τελευταίο είναι και η διαδικασία στησίματος της μηχανής, ιδιαίτερα σε μεγάλες μονάδες, πράγμα που εξαρτάται από την ευκολία οδικής πρόσβασης στη θέση, την ύπαρξη ικανοποιητικού ανυψωτικού μέσου τόσο σε ανυψωτική ικανότητα όσο και σε ύψος ανύψωσης. Δύο είναι κυρίως οι τύποι πύργων που έχουν επικρατήσει, ο σωληνωτός και ο τύπου δικτυώματος.

Ο πύργος τύπου δικτυώματος είναι ευκολότερος στη επιτόπου συναρμολόγηση και ανάρτηση, ελαφρότερος και φθηνότερος. Επειδή έχει πολλά μικρά κομμάτια είναι ευκολότερο να υποστεί ψυχρό γαλβάνισμα σε μικρά γαλβανιστήρια.



*Σχήμα 10.22 Εσωτερική σκάλα πρόσβασης σε σωληνωτό πύργο ανεμογεννήτριας – ειδικός γερανός ανέγερσης πύργου ανεμογεννήτριας*

Ο σωληνωτός πύργος είναι αισθητικά καλύτερος, το εσωτερικό του πύργου μπορεί να αποτελεί και το θάλαμο στέγασης όλων των οργάνων της ανεμογεννήτριας και να έχει εσωτερική σκάλα ή και ασανσέρ πρόσβασης στο κουβούκλιο στην

κορυφή του. Παρουσιάζει όμως δυσκολία στη μεταφορά του, ιδίως από κάποιο ύψος και πάνω, δυσκολία στην ανέγερσή του (απαιτείται οπωσδήποτε γερανός), και αν είναι μεγάλος πρέπει να γαλβανισθεί σε κομμάτια και να συγκολληθεί επί τόπου, αλλά τότε καταστρέφεται το γαλβάνισμα τοπικά.

Ο σωληνωτός πύργος έχει χαμηλή ιδιοσυχνότητα (μικρότερη από τη ιδιοσυχνότητα του δρομέα) γι' αυτό κατά την εκκίνηση του δρομέα η περιοχή ιδιοσυχνότητας του πύργου πρέπει να περνιέται γρήγορα για αποφυγή φαινομένων συντονισμού. Αντίθετα ο δικτυωτός πύργος έχει υψηλή ιδιοσυχνότητα ως προς την ιδιοσυχνότητα ή και τις πρώτες αρμονικές του δρομέα.

#### 10.6.10 Έδρανα κύλισης

Τα έδρανα που συναντά κανείς σε μια ανεμογεννήτρια είναι τα έδρανα βήματος πτερυγίων (blade pitch bearing), το κύριο αξονικό έδρανο κύλισης (main shaft bearing), τα έδρανα του κιβωτίου ταχυτήτων (gearbox bearings), το έδρανο αλλαγής κατεύθυνσης (yaw bearing), και τα έδρανα της γεννήτριας (generator bearings). Τα έδρανα βήματος πτερυγίων και τα έδρανα αλλαγής κατεύθυνσης είναι στάσιμα ή αργά περιστρεφόμενα σε αντίθεση με τα έδρανα του κιβωτίου ταχυτήτων, της γεννήτριας και του κύριου αξονικού εδράνου που περιστρέφονται γρήγορα.



**Σχήμα 10.23** (α) Κύριο έδρανο κύλισης, (β) έδρανο κύλισης της γεννήτριας, (γ) έδρανο βήματος πτερυγίων, (δ) έδρανο συστήματος κλίσης.

### 10.6.11 Ηλεκτρικός ηλεκτρονικός πίνακας

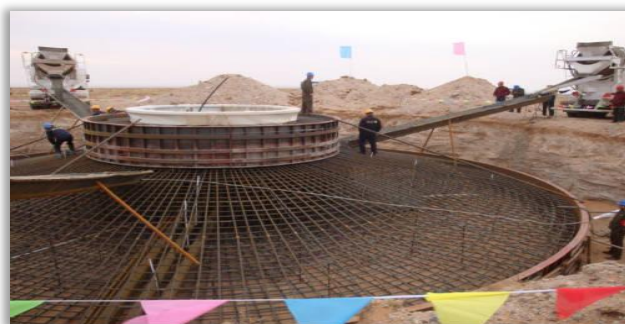
Τοποθετείται συνήθως στη βάση του πύργου και με τις κατάλληλες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές διατάξεις, παρακολουθεί, ελέγχει και συντονίζει με ασφάλεια όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας.



*Σχήμα 10.24 Πίνακες ελέγχου ανεμογεννητριών τοποθετημένοι στη βάση (αριστερά) και στην άτρακτο (δεξιά).*

### 10.6.12 Βάση στήριξης (θεμελίωση)

Η βάση κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσα στο οποίο εγκιβοτίζεται ο κορμός του πύργου στήριξης. Το μέγεθος της βάσης στήριξης, (εξωτερικές διαστάσεις, διαστάσεις οπλισμού και κατηγορία σκυροδέματος) καθορίζεται μετά από προσεκτική μελέτη μηχανικού.



*Σχήμα 10.25 Κατασκευή βάσης στήριξης ανεμογεννήτριας από οπλισμένο σκυρόδεμα.*

## 10.7 Θεμελίωση - τοποθέτηση - στήριξη Α/Γ

Για την τοποθέτηση των Α/Γ απαιτείται προσεκτική στατική μελέτη τόσο για την κατασκευή της θεμελίωσης όσο και για τη συνολική στήριξη. Για αυτό το λόγο ακολουθούμε τα παρακάτω στάδια:

- α. Κατασκευή της θεμελίωσης. Η κατασκευή της βάσης θεμελίωσης γίνεται από οπλισμένο σκυρόδεμα, σύμφωνα με τη μελέτη θεμελίωσης.



*Σχήμα 10.26 Θεμελίωση πύργου ανεμογεννήτριας.*

- β. Ανύψωση του πύργου της Α/Γ. Ο πύργος ανυψώνεται και τοποθετείται τμηματικά πάνω στα θεμέλια.



*Σχήμα 10.27 Τμηματική τοποθέτηση πύργου ανεμογεννήτριας.*



Τα τμήματα του πύργου μεταφέρονται με μεγάλα οχήματα στο χώρο εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας.



*Σχήμα 10.28* Μεταφορά τμημάτων ανεμογεννήτριας.



*Σχήμα 10.29* Μεταφορά πύργου ανεμογεννήτριας με ειδικά διαμορφωμένα φορτηγά.



*Σχήμα 10.30* Μεταφορά τμημάτων ανεμογεννητριών με ειδικά διαμορφωμένα πλοία.

Η τοποθέτηση των τμημάτων γίνεται από εξειδικευμένα συνεργεία με τη βοήθεια ειδικού γερανού ανύψωσης. Η ύπαρξη σωστής και άνετης οδοποιίας αποτελεί τη βασική προϋπόθεση για την μεταφορά των τμημάτων του πύργου, της ατράκτου και των πτερυγίων του ρότορα στο σημείο εγκατάστασης της Α/Γ.



*Σχήμα 10.31 Τοποθέτηση εξαρτημάτων στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας.*

γ. Τοποθέτηση ατράκτου. Η άτρακτος ανυψώνεται και τοποθετείται στην κορυφή του πύργου.



*Σχήμα 10.32 Τοποθέτηση της ατράκτου στην κορυφή της ανεμογεννήτριας με τη βοήθεια ειδικού γερανού ανύψωσης.*

δ. Τοποθέτηση ρότορα. Ο ρότορας (συνήθως δίπτερος ή τρίπτερος) συναρμολογείται στη βάση του πύργου και στη συνέχεια ανυψώνεται και συνδέεται με την άτρακτο.



*Σχήμα 10.33 Τοποθέτηση ρότορα στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας.*

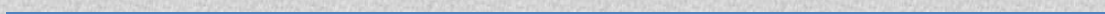
Τα αιολικά πάρκα στη θάλασσα αποτελούν την μοναδική διέξοδο για χώρες με υψηλό πληθυσμό και έλλειψη χώρου. Στα θαλάσσια αιολικά πάρκα έχουμε μεγαλύτερο κόστος κατασκευής αλλά και μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας.



*Σχήμα 10.34 Θαλάσσιο αιολικό πάρκο στο Horns Rev της Δανίας.*

Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*



## 11.1 Ηλεκτρικό σύστημα - Τύποι γεννητριών

Το ηλεκτρικό σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει τη γεννήτρια, το διακοπτικό εξοπλισμό, τον εξοπλισμό προστασίας, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς καθώς και ένα σύστημα εποπτείας και ελέγχου. Η πρόοδος στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος, προσφέρει τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε διαφορετικές τοπολογίες ελέγχου ισχύος των ανεμογεννητριών, ανάλογα με την εφαρμογή. Οι δύο κύριες κατηγορίες των τοπολογιών αυτών είναι:

- οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας (fixed speed wind turbines)
- οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας (variable speed wind turbines).

Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών σταθερής συχνότητας, ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου, η ταχύτητα του ρότορα είναι σταθερή και καθορίζεται από τη συχνότητα του συνδεδεμένου δικτύου, τη σχέση του κιβωτίου ταχυτήτων και το σχεδιασμό της γεννήτριας. Σχεδιάζονται ώστε να παρουσιάζουν βέλτιστη αεροδυναμική απόδοση σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας αποτελούνται από μια επαγωγική γεννήτρια που συνδέεται κατευθείαν στο δίκτυο με μια διάταξη ομαλής εκκίνησης (soft starter) και μια συστοιχία πυκνωτών, για τη μείωση της κατανάλωσης έργου ισχύος. Είναι απλές κατασκευαστικά, στιβαρές και αξιόπιστες. Επίσης το κόστος των ηλεκτρικών της μερών είναι χαμηλό. Τα μειονεκτήματά της είναι η έλλειψη ελέγχου της έργου ισχύος, οι μηχανικές καταπονήσεις και τα προβλήματα ποιότητας ισχύος. Επειδή λειτουργούν σε σταθερή ταχύτητα, όλες οι ταλαντώσεις της ταχύτητας του ανέμου μεταδίδονται ως ταλαντώσεις στη μηχανική ροπή και στη συνέχεια ως ταλαντώσεις στην ηλεκτρική ισχύ στο συνδεδεμένο δίκτυο.

Για τους παραπάνω λόγους επικρατεί η τοπολογία της λειτουργίας των ανεμογεννητριών με μεταβλητές στροφές. Αυτές σχεδιάζονται ώστε να επιτυγχάνουν βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου. Μέσω της λειτουργίας με μεταβλητές στροφές γίνεται εφικτό να προσαρμόζεται η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα της ανεμογεννήτριας σε κάθε ταχύτητα ανέμου. Με τον τρόπο αυτό, ο λόγος ταχύτητας ακροπερυγίου  $\lambda$  διατηρείται σταθερός σε μία προκαθορισμένη τιμή που αντιστοιχεί στον συντελεστή μέγιστης αεροδυναμικής απόδοσης. Σε αντίθεση με τη διάταξη σταθερών στροφών, η διάταξη μεταβλητών στροφών διατηρεί τη ροπή της γεννήτριας σχεδόν σταθερή και οι διακυμάνσεις του ανέμου αποσβένονται μέσω της αλλαγής της ταχύτητας της γεννήτριας. Το ηλεκτρικό σύστημα μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών είναι πιο πολύπλοκο από το αντίστοιχο των σταθερών στροφών. Συνήθως αποτελείται από μια επαγωγική ή σύγχρονη γεννήτρια που συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ισχύος.

Τα πλεονεκτήματά αυτής της διάταξης είναι η αυξημένη απομάστευση ισχύος, η βελτιωμένη ποιότητα ισχύος και η μειωμένη καταπόνηση των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας. Τα μειονεκτήματά της είναι οι απώλειες στους μετατροπείς ισχύος, η πολυπλοκότητα και το αυξημένο κόστος.

## 11.2 Τύποι γεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να περιέχουν διάφορους τύπους γεννητριών, σύγχρονες ή ασύγχρονες (επαγωγικές).

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη ανεμογεννήτρια είναι η **ασύγχρονη**. Πλεονεκτήματά της είναι η στιβαρότητα, η κατασκευαστική απλότητα και το χαμηλό κόστος. Το κύριο μειονέκτημά της είναι ότι ο στάτης χρειάζεται ένα άεργο ρεύμα μαγνήτισης. Η ασύγχρονη μηχανή δεν περιέχει μόνιμους μαγνήτες και κύκλωμα διέγερσης. Το απαιτούμενο ρεύμα διέγερσης το λαμβάνει από μια άλλη πηγή, απορροφώντας άεργο ισχύ. Η άεργος ισχύς μπορεί να παρέχεται από το δίκτυο ή από μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος. Το μαγνητικό πεδίο της γεννήτριας αναπτύσσεται μόνο όταν συνδέεται με ένα ενεργό δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος. Στην περίπτωση που υπάρχει τέτοια διέγερση, το δημιουργούμενο μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με μια ταχύτητα που καθορίζεται από τον αριθμό των πόλων στα τυλίγματα και τη συχνότητα του ρεύματος, τη σύγχρονη ταχύτητα. Έτσι αν ο ρότορας περιστρέφεται με μια ταχύτητα που ξεπερνά τη σύγχρονη ταχύτητα, ένα ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται ανάμεσα στο πεδίο του ρότορα και το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, ανάλογο με τη σχετική ταχύτητα (ολίσθηση), που προκαλεί τα ρεύματα στα τυλίγματα του ρότορα. Η αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου του ρότορα με αυτό του στάτη έχει σαν αποτέλεσμα τη ροπή που ασκείται στο ρότορα. Οι ασύγχρονες γεννήτριες μπορεί να είναι:

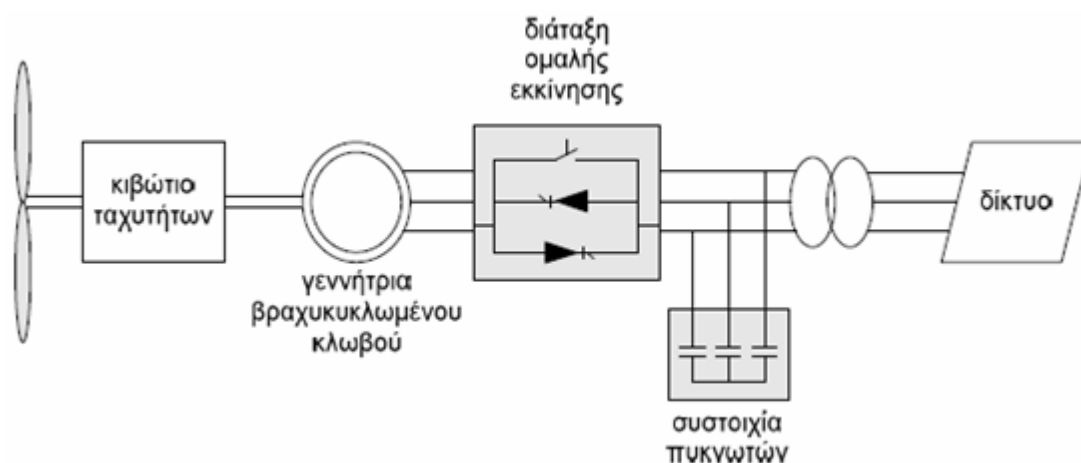
- βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel cage)
- δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor)

### 11.2.1 Ασύγχρονες γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού

Οι γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού επιλέγονται συχνά για αιολικές εφαρμογές, επειδή εμφανίζουν μηχανική απλότητα, υψηλή απόδοση και μικρές απαιτήσεις σε συντήρηση. Χρησιμοποιούνται σε διατάξεις είτε σταθερών είτε μεταβλητών στροφών. Σε διατάξεις σταθερών στροφών συνδέονται κατευθείαν στο δίκτυο όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Σε αυτήν την περίπτωση η ταχύτητά τους αλλάζει μόνο κατά ένα μικρό ποσοστό στις αλλαγές του ανέμου. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου μεταδίδονται κατευθείαν στο δίκτυο. Αυτές οι διακυμάνσεις είναι ιδιαίτερα κρίσιμες κατά τη διάρκεια της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο, όπου το ρεύμα εκκίνησης είναι περίπου 7-8 φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού. Σε ένα ασθενές δίκτυο αυτό το μεγάλο ρεύμα εκκίνησης μπορεί να προκαλέσει σοβαρές διαταραχές στην τάση. Για το λόγο αυτό η σύνδεση μιας τέτοιας γεννήτριας στο δίκτυο θα πρέπει να γίνεται σταδιακά ώστε να περιοριστεί το ρεύμα εκκίνησης.

Στις γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού, υπάρχει μια μοναδική αναλογία ανάμεσα στην πραγματική ισχύ, την άεργο ισχύ, την τερματική τάση και την ταχύτητα του ρότορα. Αυτό σημαίνει ότι σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου η ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει παραπάνω πραγματική ισχύ μόνο αν η γεννήτρια

τραβήξει από το δίκτυο παραπάνω άεργο ισχύ. Για τη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού που είναι απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο, η ποσότητα της απορροφούμενης άεργου ισχύος είναι ανεξέλεγκτη διότι ποικίλει ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Αν δεν υπάρχουν ηλεκτρικά στοιχεία για να παρέχουν την άεργο ισχύ, αυτή θα πρέπει να απορροφηθεί από το δίκτυο. Η άεργος ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο προκαλεί επιπρόσθετες απώλειες μεταφοράς και σε μερικές περιπτώσεις αστάθεια στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστοιχίες πυκνωτών και σύγχρονοι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος για τη μείωση της απορρόφησης άεργου ισχύος από το δίκτυο. Στην περίπτωση που η γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών, τα εναλλασσόμενα μεγέθη μεταβλητής συχνότητας που παράγονται από τη γεννήτρια, μετατρέπονται στα αντίστοιχα της επιθυμητής, σταθερής συχνότητας του δικτύου με τη χρήση μετατροπέων ισχύος.



Σχήμα 11.1 Γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο.

### 11.2.2 Ασύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα

Στην περίπτωση των γεννητριών δακτυλιοφόρου δρομέα τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ρότορα μπορούν να ελεγχθούν εξωτερικά και με τον τρόπο αυτό να επηρεαστεί η τάση του ρότορα. Τα τυλίγματα του ρότορα μπορούν να συνδεθούν εξωτερικά μέσω δακτυλιδιών και ψηκτρών ή μέσω εξοπλισμού ηλεκτρονικών ισχύος, ο οποίος μπορεί να απαιτεί ή όχι δακτυλίδια και ψηκτρες. Τα κύρια μειονεκτήματά της είναι το κόστος και η όχι και τόσο στιβαρή κατασκευή.

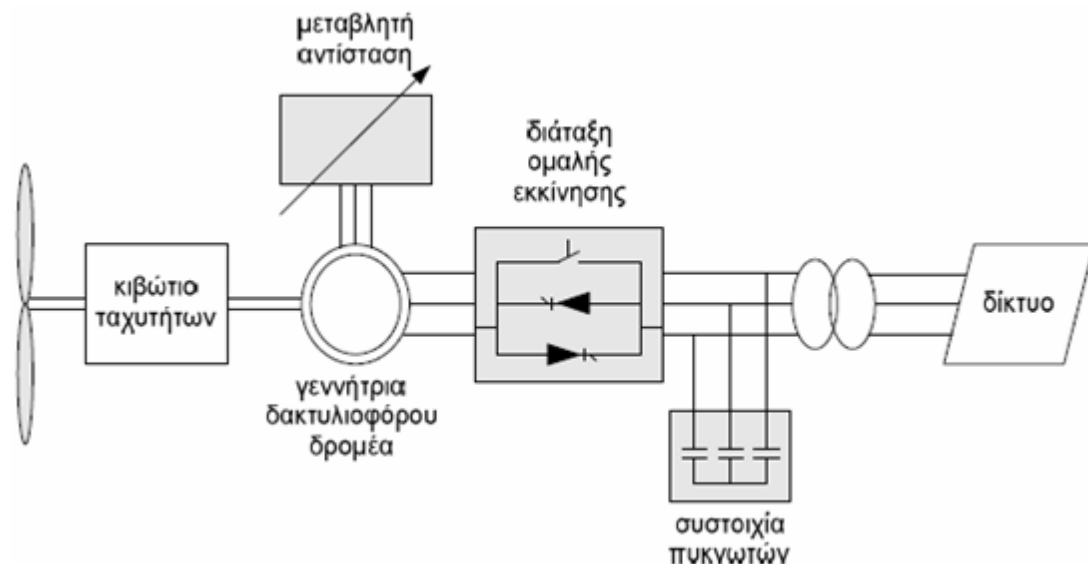
Οι κύριοι τύποι γεννητριών δακτυλιοφόρου δρομέα που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι:

- οι γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (σύστημα optislip)
- οι γεννήτριες διπλής τροφοδότησης (double fed).

Οι γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα έχουν ως σκοπό να ελαχιστοποιηθεί το φορτίο στις ανεμογεννήτριες κατά τη διάρκεια ριπών

ανέμου. Με τον τρόπο αυτό, η γεννήτρια έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει την ολίσθησή της (σε ένα μικρό εύρος τιμών) και να οδηγηθεί στη βέλτιστη ολίσθηση, εξασφαλίζοντας μικρότερες ταλαντώσεις στη ροπή εισόδου και στην ισχύ εξόδου. Οι γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα είναι γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα με μια μεταβλητή εξωτερική αντίσταση που συνδέεται στα τυλίγματα του δρομέα (Σχήμα 3.4). Η ολίσθηση του δρομέα αλλάζει μεταβάλλοντας τη συνολική αντίσταση του ρότορα μέσω ενός μετατροπέα, ο οποίος συνδέεται στον άξονα του ρότορα. Ο στάτης της γεννήτριας συνδέεται κατευθείαν στο δίκτυο. Η μεταβλητή ολίσθηση είναι ένας απλός, αξιόπιστος και οικονομικός τρόπος για να μειωθεί το φορτίο στην περίπτωση ριπών.

Τα μειονεκτήματά της είναι ότι το εύρος στο οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα περιορίζεται στο 0-10%, καθώς εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης του στάτη και ότι ο έλεγχος πραγματικής και άεργου ισχύος που επιτυγχάνεται δεν είναι αρκετά ικανοποιητικός. Επίσης ένα ποσοστό ισχύος καταναλώνεται στη μεταβλητή αντίσταση του ρότορα.



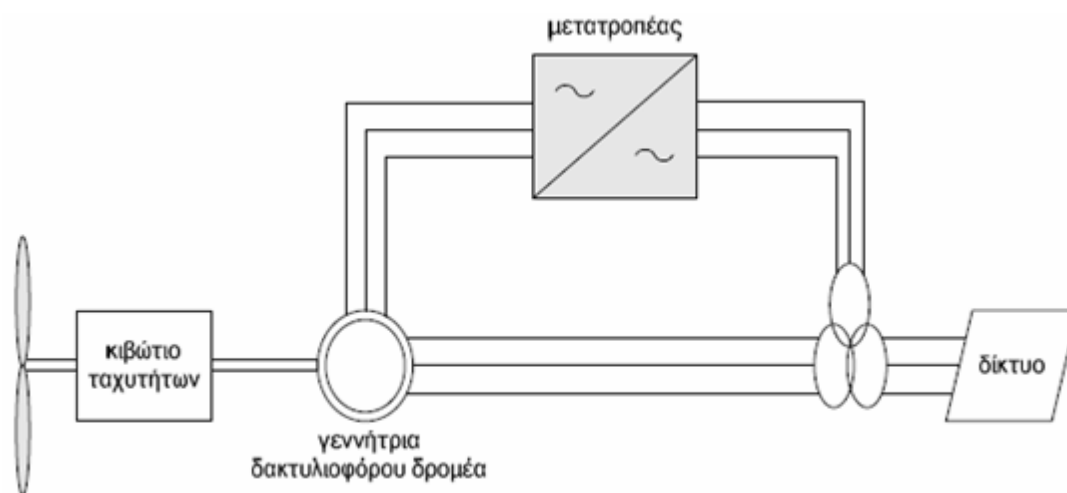
Σχήμα 11.2 Γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα.

Η γεννήτρια διπλής αποτελείται από μια γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με τα τυλίγματα του στάτη απευθείας συνδεδεμένα στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος και τα τυλίγματα του ρότορα συνδεδεμένα σε μια διάταξη διασύνδεσης Εναλλασσόμενου Ρεύματος /Συνεχούς Ρεύματος /Εναλλασσόμενου Ρεύματος (EP/ΣΡ/EP) με μετατροπείς πηγής τάσης (Σχήμα 3.5). Ο όρος «διπλής τροφοδότησης» αναφέρεται στο γεγονός ότι η τάση στο στάτη εφαρμόζεται από το δίκτυο και η τάση στο ρότορα εφαρμόζεται από τον μετατροπέα ισχύος. Αυτό το σύστημα επιτρέπει τη λειτουργία υπό μεταβλητή ταχύτητα σε ένα μεγάλο, αλλά περιορισμένο, εύρος. Ο μετατροπέας αντισταθμίζει τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική συχνότητα εκχύνοντας στο ρότορα ένα ρεύμα με μεταβλητή συχνότητα. Έτσι, κατά την κανονική λειτουργία αλλά και κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, η συμπεριφορά της γεννήτριας ελέγχεται από τον μετατροπέα



ισχύος και τους ελεγκτές του. Η διάταξη των μετατροπέων αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης, ο ένας στην πλευρά του ρότορα και ο άλλος στην πλευρά του δικτύου, οι οποίοι ελέγχονται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Ο μετατροπέας που βρίσκεται στην πλευρά του ρότορα ελέγχει την πραγματική και την άεργο ισχύ ελέγχοντας τις συνιστώσες του ρεύματος του ρότορα, ενώ ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση ΣΡ ώστε η άεργος ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο να είναι ίση με μηδέν.

Ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας στο σύστημα οδήγησης, η ισχύς τροφοδοτείται στο ρότορα ή απορροφάται από αυτόν. Σε μια υπερσύγχρονη κατάσταση λειτουργίας, η ισχύς οδηγείται από το ρότορα μέσω του μετατροπέα στο δίκτυο, ενώ στην υποσύγχρονη κατάσταση λειτουργίας η κατεύθυνση της ισχύος είναι από το δίκτυο προς το ρότορα. Και στις δύο καταστάσεις ο στάτης τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο.



Σχήμα 11.3 Γεννήτρια διπλής τροφοδότησης.

Η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Έχει την ιδιότητα να ελέγχει ανεξάρτητα την πραγματική από την άεργο ισχύ μέσω του ρεύματος στο ρότορα. Δεν είναι αναγκαίο να μαγνητιστεί από το δίκτυο, καθώς μπορεί να μαγνητιστεί και από το δίκτυο του ρότορα. Έχει επίσης την ικανότητα να παράγει άεργο ισχύ, η οποία τροφοδοτείται στο δίκτυο μέσω του μετατροπέα που βρίσκεται προς την πλευρά του δικτύου. Παρόλα αυτά αυτός ο μετατροπέας υπό κανονικές συνθήκες λειτουργεί υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και δεν εμπλέκεται σε ανταλλαγή άεργου ισχύος ανάμεσα στην ανεμογεννήτρια και το δίκτυο. Στην περίπτωση που το δίκτυο είναι ασθενές με διακυμάνσεις στην τάση, η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να παράγει ή να καταναλώνει ένα ποσό άεργου ισχύος με σκοπό τον έλεγχο της τάσης. Το μέγεθος του μετατροπέα δεν σχετίζεται με τη συνολική ισχύ της γεννήτριας, αλλά με το επιλεγμένο εύρος ταχυτήτων και άρα με την ολίσθηση. Η επιλογή του εύρους ταχυτήτων βασίζεται στην οικονομική βελτιστοποίηση και στην αυξημένη απόδοση.

Η **σύγχρονη** γεννήτρια είναι πιο πολύπλοκη και ακριβότερη σε σχέση με μια αντίστοιχη επαγωγική. Το σπουδαίο της πλεονέκτημα έναντι της επαγωγικής είναι ότι δεν απαιτεί άεργο ρεύμα μαγνήτισης. Το μαγνητικό πεδίο στη σύγχρονη μηχανή δημιουργείται μέσω μόνιμων μαγνητών ή με ένα συμβατικό τύλιγμα πεδίου. Δύο τύποι σύγχρονων μηχανών χρησιμοποιούνται σήμερα στις ανεμογεννήτριες:

- σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα
- σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών.

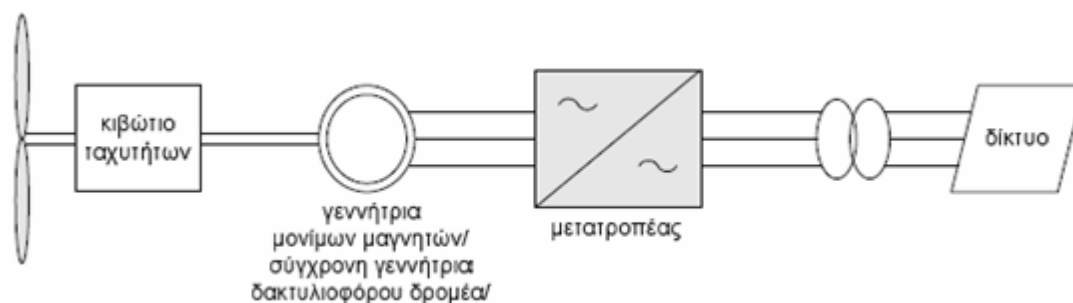
### **11.2.3 Σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα**

Τα τυλίγματα του στάτη της σύγχρονης γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα συνδέονται κατευθείαν στο δίκτυο με αποτέλεσμα η ταχύτητα περιστροφής της να ορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου. Το τύλιγμα του ρότορα διεγείρεται με συνεχές ρεύμα. Αντίθετα με την επαγωγική γεννήτρια, η σύγχρονη γεννήτρια δεν χρειάζεται επιπλέον αντιστάθμιση άεργου ισχύος. Το τύλιγμα του ρότορα μέσα από το οποίο ρέει το συνεχές ρεύμα παράγει το πεδίο διέγερσης, το οποίο στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Η ταχύτητα της σύγχρονης γεννήτριας καθορίζεται από τη συχνότητα του στρεφόμενου πεδίου και από το πλήθος των ζευγών πόλων στο ρότορα.

Συνήθως συνδέονται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα (Σχήμα 3.6), μέσω του οποίου επιτυγχάνεται λειτουργία με μεταβλητές στροφές και ομαλότερη σύνδεση με το δίκτυο. Το κύριο μειονέκτημά της είναι το αυξημένο κόστος λόγω της κατασκευαστικής πολυπλοκότητας και του μεγάλου μετατροπέα ισχύος.

### **11.2.4 Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών**

Οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών στις ανεμογεννήτριες, έχουν τη ιδιότητα να αυτοδιεγείρονται και έτσι μπορούν να λειτουργούν υπό υψηλό συντελεστή ισχύος και υψηλή απόδοση. Παρόλα αυτά τα υλικά που χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστούν αυτές οι μηχανές είναι ακριβά και παρουσιάζουν δυσκολία στην επεξεργασία τους κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Επίσης, ο μετατροπέας ισχύος που απαιτείται για τη μετατροπή της τάσης και συχνότητας που παράγεται από τη μηχανή στην τάση και συχνότητα του δικτύου, συνεισφέρει στην αύξηση του κόστους. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι τα μαγνητικά υλικά της μηχανής είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό, επιβάλλεται η επίβλεψη της θερμοκρασίας του ρότορα και η χρήση ενός συστήματος ψύξης.



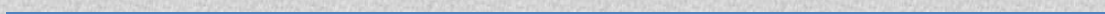
*Σχήμα 11.4* Σύνδεση σύγχρονης γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα ή γεννήτριας μονίμων μαγνητών με το δίκτυο.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένας άλλος τύπος γεννήτριας που χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες, οι γεννήτριες **υψηλής τάσης**.

Συνήθως, η ονομαστική τάση των ανεμογεννητριών είναι τα 690 V και για το λόγο αυτό απαιτούν ένα μετασχηματιστή στην άτρακτο ή στη βάση του πύργου. Το κύριο κίνητρο για την αύξηση της τάσης της γεννήτριας είναι η μείωση των ρευμάτων το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των απωλειών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στη μείωση του μεγέθους της γεννήτριας και στην αύξηση της απόδοσής της ειδικά σε μεγάλα φορτία. Αν η τάση της μηχανής συμπίπτει με την τάση του δικτύου η σύνδεση του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί χωρίς μετασχηματιστή. Οι γεννήτριες υψηλής τάσης μπορεί να είναι είτε σύγχρονες είτε ασύγχρονες. Είναι μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση για τις μεγάλες ανεμογεννήτριες που ξεπερνούν τα 3 MW. Τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι το υψηλό κόστος του συνολικού συστήματος, η αβεβαιότητα σχετικά με τη μακροχρόνια επίδοσή τους και οι απαιτήσεις ασφαλείας, οι οποίες είναι πιο σύνθετες από τις απαιτήσεις μηχανών χαμηλότερης τάσης.

Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*



## 12.1 Καθορισμός της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ

Η ονομαστική ισχύς  $P_{nom}$  της Α/Γ, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_n = \frac{1}{2} \rho_\alpha \cdot A \cdot C_p \cdot V_n^3 \cdot \eta_m$$

όπου,

$\rho_\alpha$  = πυκνότητα του αέρα σε  $\text{Kg/m}^3$ .

$C_p$  = συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας (καθαρός αριθμός).

$V_n$  = ονομαστική ταχύτητα του ανέμου, που υπολογίζεται από τη σχέση

$V_n = (1,5 \text{ έως } 1,9)$  του  $V_\mu$  και στην πράξη συνήθως λαμβάνεται  $V_n = 1,8V_\mu$ .

$\eta_m$  = μηχανικός βαθμός απόδοσης της Α/Γ που εξαρτάται από τις απώλειες κενού φορτίου, οι οποίες λαμβάνονται στο 100% περίπου της ονομαστικής ισχύος ( $P_{K\cdot\Phi} = 10\% P_n = 0,1P_n$ ).

$$\eta_m = \frac{P_n}{P_n + P_{K\cdot\Phi}}$$

και

$$\eta_m = \frac{P_n}{P_n + 0,1P_n} = 0,90$$

$P_n$  = ονομαστική ισχύς της Α/Γ σε W.

Μπορούμε να υπολογίσουμε τη διάμετρο της φτερωτής του δρομέα αν θεωρήσουμε ότι η ονομαστική ταχύτητα είναι  $V_n = 1,8 V_\mu$ , απ' τη σχέση:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

όπου

$$A = \frac{2P_n}{\rho_\alpha \cdot C_p \cdot \eta_m \cdot (1,8V_\mu)^3}$$

Στους υπολογισμούς λαμβάνουμε:

$C_p = 0,385$ ,  $\rho_\alpha = 1,25 \text{ Kg/m}^3$  και  $\eta_m = 0,9$ .

## 12.2 Καθορισμός της ταχύτητας στην οποία η Α/Γ αρχίζει να λειτουργεί

Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της Α/Γ  $V_{mi}$  εξαρτάται από τις απώλειες κενού φορτίου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{K\cdot\Phi} = \frac{1}{2} \rho_{\alpha} \cdot C_p \cdot A \cdot V_{mi}^3$$

οπότε,

$$V_{mi} = \sqrt[3]{\frac{P_{K\cdot\Phi}}{\frac{1}{2} \rho_{\alpha} \cdot C_p \cdot A}}$$

Και επειδή

$$P_{K\cdot\Phi} = 0,1 \cdot P_n$$

θα έχουμε:

$$V_{mi} = \sqrt[3]{\frac{0,2P_n}{\rho_{\alpha} \cdot C_p \cdot A}}$$

όπου,

$\rho_{\alpha}$  = πυκνότητα αέρα σε  $\text{Kg/m}^3$  (συνήθως λαμβάνεται  $\rho_{\alpha} = 1,25 \text{ Kg/m}^3$ ).

$C_p$  = συντελεστής ισχύος (συνήθως λαμβάνεται  $C_p = 0,385$ ).

$A$  = επιφάνεια σάρωσης της φτερωτής της Α/Γ σε  $\text{m}^2$ .

$P_n$  = ονομαστική ισχύς της Α/Γ σε  $\text{W}$ .

$V_{mi}$  = ταχύτητα έναρξης λειτουργίας σε  $\text{m/sec}$ .

## 12.3 Καθορισμός της ταχύτητας διακοπής λειτουργίας της Α/Γ

Η ταχύτητα διακοπής της λειτουργίας της Α/Γ,  $V_{mo}$ , καθορίζεται για το ύψος αναφοράς των 10m και κυμαίνεται από 22 μέχρι 25m/sec. Οι κατασκευαστές στα χαρακτηριστικά στοιχεία της Α/Γ μας δίνουν την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας, την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας και την ταχύτητα διακοπής. Στην πράξη για Α/Γ μέσης ισχύος, συνήθως έχουμε:

- Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας 3 – 5 m/sec.
- Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας 20 – 25 m/sec.

- Ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας 12 – 15 m/sec.

## 12.4 Ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος

Οι ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος κατασκευάζονται για ισχύ από 100W μέχρι 30KW. Είναι τρίπτερες και έχουν τη δυνατότητα εκμετάλλευσης ασθενούς αιολικού δυναμικού (χαμηλής ταχύτητας ανέμου). Οι ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος χρησιμοποιούνται σε αυτόνομα ή υβριδικά συστήματα για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και έχουν τη δυνατότητα σύνδεσης στο κεντρικό δίκτυο για τη διοχέτευση της ηλεκτρικής ενέργειας που πλεονάζει.

Έχουν γίνει αποδεκτές από το κοινωνικό σύνολο, τοποθετούνται σε αγροικίες (σε κήπους ή σε οροφές κατοικιών), ακόμη και σε οικιστικές ζώνες, παρέχοντας πράσινη ενέργεια (αποφυγή της έκλυσης περίπου δύο κιλών διοξειδίου του άνθρακα για κάθε KWh που παράγεται).

Τα βασικότερα μέρη μιας ανεμογεννήτριας μικρής ισχύος είναι ο δρομέας, η ηλεκτρογεννήτρια, το δισκόφρενο, το σύστημα προσανεμισμού, ο πυλώνας και το σύστημα λειτουργίας και ελέγχου.

Το βασικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας μικρού μεγέθους είναι η καμπύλη ισχύος, την οποία ο κατασκευαστής μας δίνει μαζί με τα υπόλοιπα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά, που είναι:

- Η ονομαστική ισχύς σε W ή σε KW
- Η ταχύτητα εκκίνησης της ανεμογεννήτριας σε m/sec
- Η ταχύτητα στην οποία έχουμε την ονομαστική ισχύ σε m/sec
- Η μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας σε m/sec
- Η ονομαστική τάση
- Ο αριθμός των πτερυγίων
- Η διάμετρος του ρότορα
- Το ύψος του ιστού
- Το σύστημα λειτουργίας και ασφάλειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την αιολική ενέργεια γίνεται πλέον αποδεκτή από την κοινωνία. Σε πολλές περιπτώσεις έχουμε τοποθέτηση Α/Γ μικρής ισχύος με χαμηλή όχληση μέσα σε κατοικημένες περιοχές.

Ο άνεμος είναι μια καθαρή και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος και είναι πλέον επιτακτική ανάγκη η χρήση του. Για τη χώρα μας είναι αναγκαία η συστηματική εκμετάλλευση του αξιόλογου αιολικού δυναμικού.

Για τη σωστή και ασφαλή λειτουργία της Α/Γ υπάρχει μια σειρά από όργανα και διατάξεις κατάλληλα συνδεδεμένα και τοποθετημένα στο εσωτερικό ηλεκτρικού πίνακα αυξημένης προστασίας (IP54). Στο εσωτερικό του πίνακα είναι τοποθετημένοι

και οι μετατροπείς (inverter) για τη μετατροπή του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος σε εναλλασσόμενο με στοιχεία 230V/50Hz ή 3·400V/50Hz.

## 12.5 Βασικές προϋποθέσεις για την εγκατάσταση αιολικού συστήματος μικρής ισχύος

1. Η σωστή εκτίμηση των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής που πρόκειται να γίνει η εγκατάσταση.
2. Η σωστή επιλογή του τύπου και του μεγέθους της ανεμογεννήτριας, με βάση τα υπάρχοντα ή μετρούμενα ανεμολογικά στοιχεία. Θα πρέπει να γίνεται σύγκριση των στοιχείων των προδιαγραφών της ανεμογεννήτριας με παραμέτρους όπως η μέση και η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου, η ένταση του ανέμου, η τραχύτητα και τα χαρακτηριστικά του εδάφους.
3. Η σωστή επιλογή της θέσης τοποθέτησης της Α/Γ, με βάση τη μορφολογία του εδάφους και της γύρω περιοχής.
4. Ο σωστός υπολογισμός του πύργου (πυλώνα) εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας. Ο υπολογισμός θα πρέπει να γίνεται με βάση τα ακραία στατικά και κοπωτικά φορτία. Οι χαλύβδινοι πυλώνες να μελετηθούν και να κατασκευαστούν σύμφωνα με τα αναγνωρισμένα διεθνή πρότυπα. Οι χαλύβδινοι πυλώνες με τα συρματόσχοινα να προστατεύονται επαρκώς από τη διάβρωση.
5. Ο σωστό υπολογισμός της θεμελίωσης του πύργου (πυλώνα) της εγκατάστασης.
6. Αξιόπιστο σύστημα ελέγχου και ασφάλειας της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Το σύστημα αυτό θα πρέπει να καθορίζει με ακρίβεια τις συνθήκες κάτω από τις οποίες θα μπορεί να λειτουργεί ή να τίθεται εκτός λειτουργίας με ασφάλεια μια Α/Γ.

Δεν πρέπει να γίνεται εγκατάσταση Α/Γ χωρίς να συνοδεύεται από προδιαγραφές που να είναι σύμφωνες με τα διεθνή πρότυπα και κανονισμούς. Ακόμη δεν πρέπει να γίνεται εγκατάσταση Α/Γ χωρίς την εκτίμηση των ανεμολογικών στοιχείων και των χαρακτηριστικών της περιοχής.



## 12.6 Αιολικά συστήματα ανεμογεννητριών μικρής ισχύος

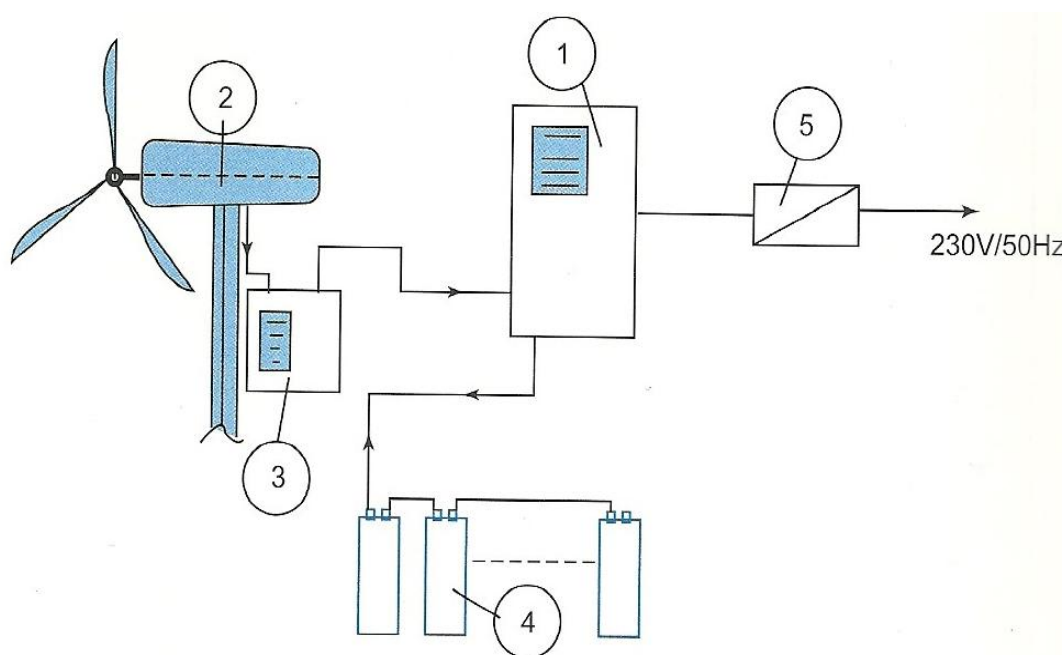
Τα αιολικά συστήματα, όπως και τα φωτοβολταϊκά, στην πράξη μπορούν να λειτουργήσουν:

- α. Ως αυτόνομα αιολικά συστήματα
- β. Ως διασυνδεδεμένα με το δίκτυο χαμηλής τάσης

### 12.6.1 Αυτόνομα αιολικά συστήματα

Τα αυτόνομα αιολικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε απομονωμένες κατοικίες ή αγροικίες, σε τηλεπικοινωνιακούς σταθμούς, σε γεωτρήσεις, σε κτηνοτροφικές μονάδες, τροχόσπιτα αναμεταδότες κλπ.

Θα πρέπει να συνδέονται με συστοιχία συσσωρευτών, για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που περισσεύει και να συνδέονται μέσω ειδικών μετατροπέων συσσωρευτών COMPACT (με ενσωματωμένο φορτιστή και ρυθμιστή φόρτισης) με την κατανάλωση.



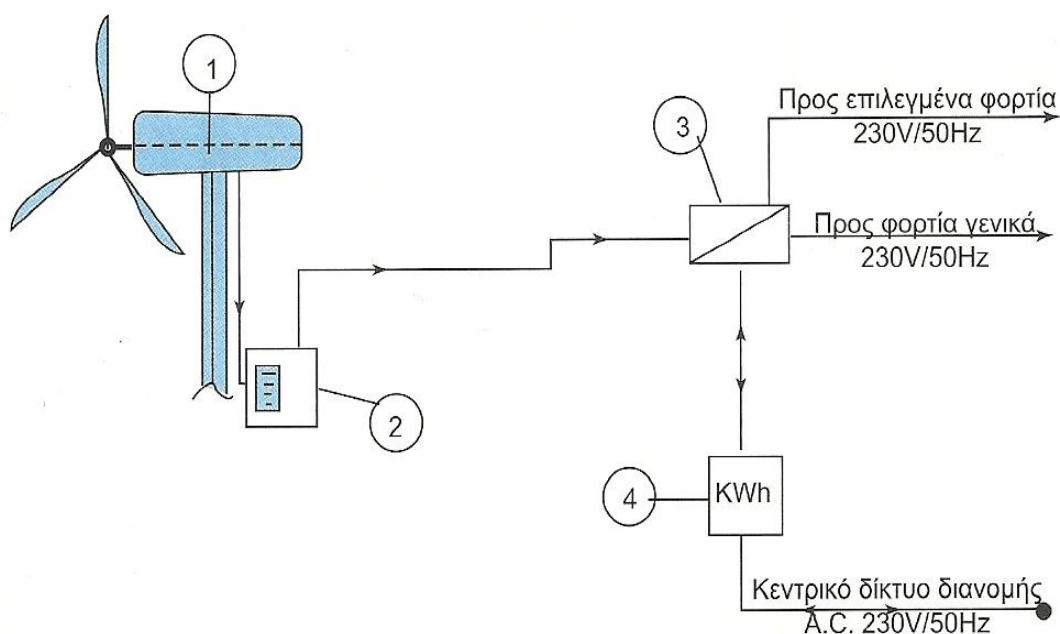
Σχήμα 12.1 Αυτόνομο αιολικό σύστημα.

1. Μετατροπέας COMPACT (με ενσωματωμένο φορτιστή και ρυθμιστή φόρτισης).
2. Ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος.
3. Πίνακας ελέγχου και λειτουργίας της Α/Γ.
4. Συσσωρευτές αποθήκευσης.

## 5. Πίνακας τροφοδοσίας καταναλώσεων 230V/50Hz.

## 12.6.2 Διασυνδεδεμένα αιολικά συστήματα

Τα διασυνδεδεμένα, με το δίκτυο χαμηλής τάσης, αιολικά συστήματα, μπορούν μέσω ειδικού πίνακα ελέγχου και λειτουργίας να τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τις καταναλώσεις και να στέλνουν την ενέργεια που περισσεύει ή εξολοκλήρου στο δίκτυο χαμηλής τάσης, μέσω διπλού ψηφιακού μετρητή.



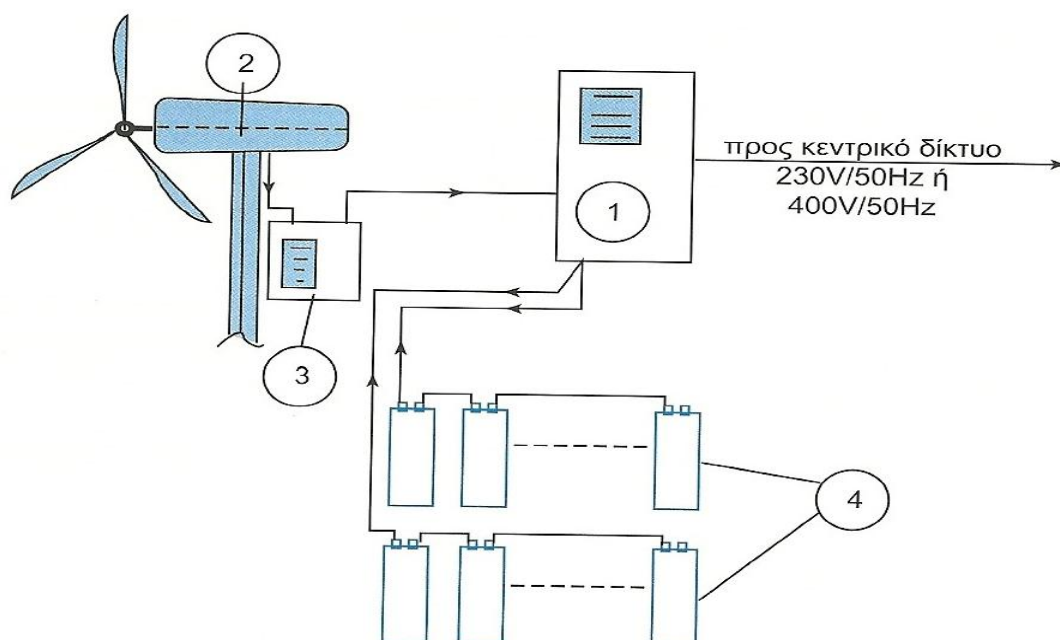
*Σχήμα 12.2 Διασυνδεδεμένο αιολικό σύστημα.*

1. Ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος.
2. Πίνακας ελέγχου και λειτουργίας Α/Γ.
3. Πίνακας λειτουργίας και ελέγχου της εγκατάστασης με δυνατότητα επιλογής φορτίων, δυνατότητα διοχέτευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που πλεονάζει, προς το κεντρικό δίκτυο διανομής και αυτόματης διακοπής της σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο διανομής, σε περίπτωση διακοπής ρεύματος.
4. Μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας διπλής εγγραφής.

## 12.6.3 Διασυνδεδεμένα αιολικά συστήματα με δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το κεντρικό δίκτυο διανομής γίνεται μέσω ενός ειδικού πολυμορφικού σταθμού στον οποίο συνδέονται και οι συσσωρευτές αποθήκευσης. Το σύστημα αυτό αυξάνει το συντελεστή διαθεσιμότητας του συστήματος, έχει τη δυνατότητα να παράγει ισχύ την περίοδο που η ανεμογεννήτρια

τίθεται εκτός λειτουργίας λόγω χαμηλής ή λόγω πολύ υψηλής ταχύτητας, έχει πολύ όμως αυξημένο κοστολόγιο λόγω των συσσωρευτών αποθήκευσης και της ειδικής πολυμορφικής μονάδας.



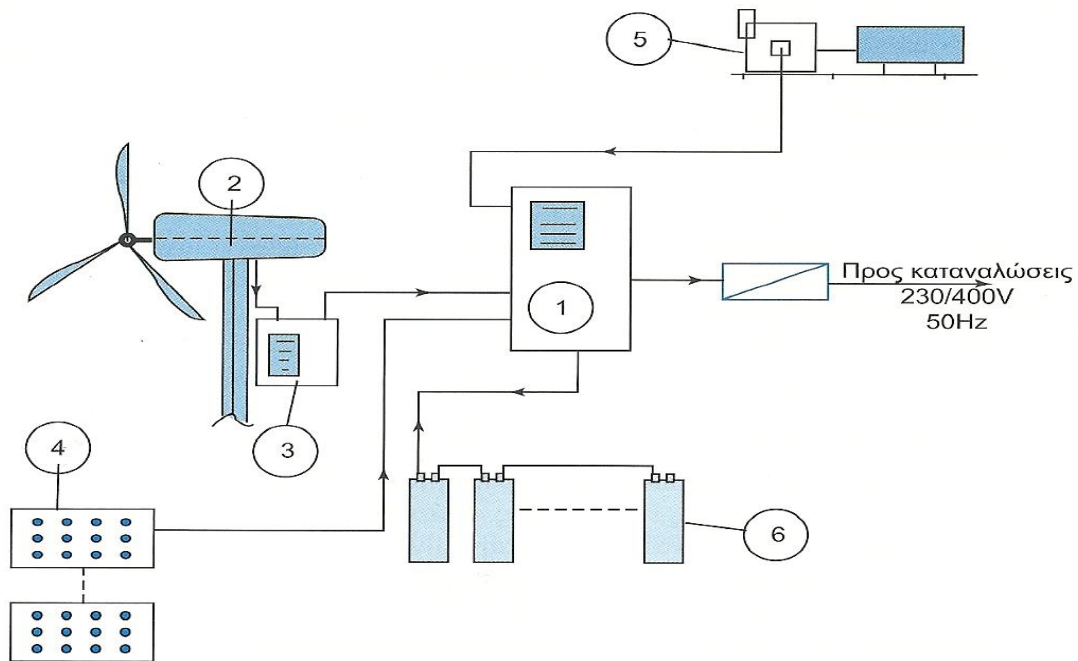
**Σχήμα 12.3** Διασυνδεδεμένο αιολικό σύστημα με συσσωρευτές αποθήκευσης.

1. Ειδικός πολυμορφικός σταθμός ελέγχου και μετατροπή ισχύος.
2. Ανεμογεννήτρια μέσης ισχύος 230V/50Hz ή 400V/50Hz.
3. Πίνακας ελέγχου και λειτουργίας ανεμογεννήτριας.
4. Συστοιχίες συσσωρευτών αποθήκευσης.

#### 12.6.4 Υβριδικά συστήματα με ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος

Για εγκαταστάσεις που πρέπει να λειτουργούν αδιάλειπτα, αλλά βρίσκονται πολύ μακριά από το δίκτυο διανομής, έχουμε συνδυασμό ανεμογεννήτριας, φωτοβολταϊκών συλλεκτών και ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (H/Z).

Σε ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις επιμέρους μονάδες, ελέγχεται από μια κεντρική μονάδα (πολυμορφικός σταθμός μετατροπής ισχύος και αδιάλειπτης λειτουργίας) η οποία δίνει εντολή στην ντιζελογεννήτρια να λειτουργήσει, όταν η παραγόμενη από τις άλλες μονάδες ή η αποθηκευμένη ενέργεια δεν επαρκεί.



Σχήμα 12.4 Υβριδικό σύστημα με ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος.

1. Πολυμορφικός σταθμός μετατροπής ισχύος και αδιάλειπτης λειτουργίας.
2. Ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος.
3. Πίνακας ελέγχου και λειτουργίας Α/Γ.
4. Φ/Β συλλέκτες.
5. Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (Η/Ζ).
6. Συστοιχία συσσωρευτών αποθήκευσης.
7. Πίνακας τροφοδοσίας καταναλώσεων (μονοφασικός ή τριφασικός).

### 12.6.5 Κατάταξη ανεμογεννητριών μικρής ισχύος

Ανάλογα με το εύρος της ισχύος οι ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες.

- α. Κατηγορία 1<sup>η</sup> με ισχύ από 0,1 μέχρι 1KW. Βασικό χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας είναι η παραγόμενη συνεχή τάση (12, 24, 48V) και η σύνδεση με συσσωρευτές αποθήκευσης μέσω ενός μετατροπέα συσσωρευτών.
- β. Κατηγορία 2<sup>η</sup> με ισχύ από 1 μέχρι 5KW. Βασικό χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας είναι η παραγόμενη μονοφασική τάση (1×230V/50Hz). Μπορούν να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια και τις καταναλώσεις αλλά και στο κεντρικό δίκτυο, όταν υπάρχει περίσσειμα ενέργειας. Στον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας των ανεμογεννητριών αυτής της κατηγορίας υπάρχουν μικροεπεξεργαστές για τη ρύθμιση της στρέψης των πτερυγίων του δρομέα, τον έλεγχο των στροφών της γεννήτριας κλπ. Όταν

εξυπηρετούν εγκαταστάσεις αδιάλειπτης λειτουργίας συνδέονται και με συστοιχία συσσωρευτών αποθήκευσης. Η σύνδεση με το δίκτυο γίνεται μέσω ειδικού μετατροπέα δικτύου.

- γ. Κατηγορία 3<sup>η</sup> με ισχύ από 5 μέχρι 30KW. Βασικό χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας είναι η παραγόμενη τριφασική τάση (3×400V/50Hz). Συνδέονται κατά κύριο λόγο με το κεντρικό δίκτυο διανομής μέσω ειδικών ηλεκτρονικών διατάξεων. Στον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας της μονάδας, υπάρχουν μικροεπεξεργαστές μεγάλων υπολογιστικών δυνατοτήτων, παρέχοντας υψηλής πιστότητας ρυθμίσεις στα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη της Α/Γ. Σε ειδικές περιπτώσεις μπορούν να συνδεθούν και με συσσωρευτές αποθήκευσης, μέσω ενός ειδικού πολυμορφικού σταθμού ελέγχου και μετατροπής ισχύος, αυξάνοντας τον συντελεστή διαθεσιμότητας της εγκατάστασης.

## 12.7 Ανεμογεννήτριες μέσης και μεγάλης ισχύος

Οι ανεμογεννήτριες χαρακτηρίζονται μέσης ισχύος όταν κατασκευάζονται για ισχύ από 30 μέχρι 200KW και μεγάλης όταν κατασκευάζονται πάνω από τα 200KW. Είναι συνήθως σύγχρονες, οριζόντιου άξονα και ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων του ρότορα διακρίνονται σε:

- Μονόπτερες
- Δίπτερες
- Τρίπτερες

Οι ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος τοποθετούνται κατά κύριο λόγο σε αιολικά πάρκα, τα οποία αποτελούν την πιο οικονομική εφαρμογή αιολικής ενέργειας, λόγω σημαντικής μείωσης του κόστους κατασκευής και συντήρησης.

Επειδή η αιολική ενέργεια σε μια Α/Γ, είναι ανάλογη του μήκους των πτερυγίων που θα χρησιμοποιηθούν, η τοποθέτηση μεγάλων Α/Γ, βελτιώνει την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής. Το κύριο κατασκευαστικό στοιχείο που καθορίζει το μέγεθος μιας Α/Γ είναι το εμβαδόν της φτερωτής ή διαφορετικά η επιφάνεια σάρωσης, καθώς απ' αυτό εξαρτάται η διαθέσιμη αιολική ενέργεια την οποία πρέπει να αξιοποιήσει η Α/Γ.

Η Α/Γ μεγάλης ισχύος τοποθετείται σε μεγάλο ύψος από το έδαφος (πύργος ή πυλώνας με μεγάλο ύψος) στο οποίο η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη και επομένως και η ισχύς που παράγεται (είναι ανάλογη της ταχύτητας στον κύβο) είναι αρκετά μεγαλύτερη.

Επειδή η χώρα μας χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα σύνθετη τοπογραφία με μεγάλες υψομετρικές εναλλαγές, υπάρχουν περιοχές με αξιόλογο αιολικό δυναμικό όπου δεν ευνοείται η χρήση μεγάλων Α/Γ και είναι προτιμότερη η τοποθέτηση μηχανών με ονομαστική ισχύ από 300 μέχρι 600KW περίπου.

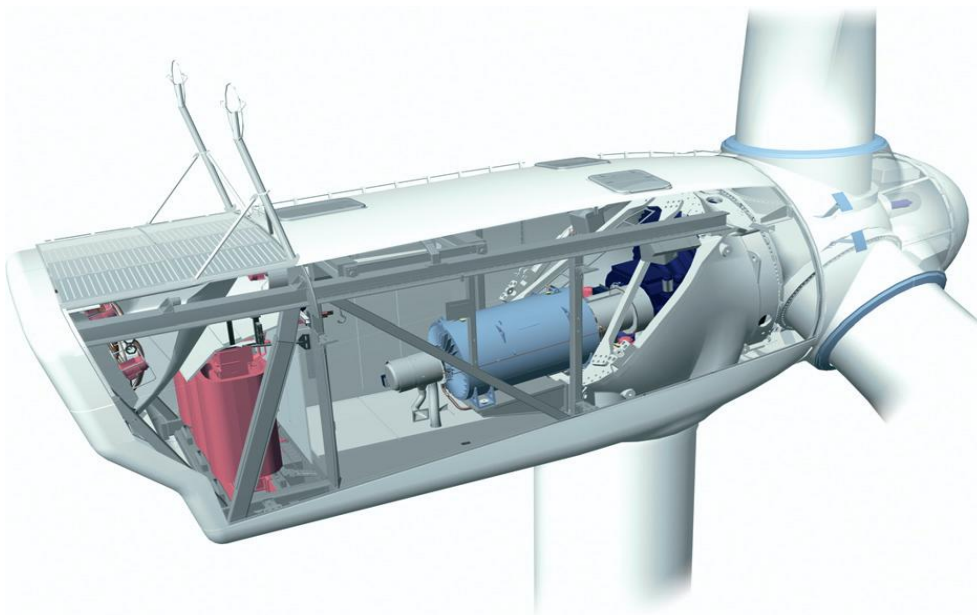
Θα πρέπει να τονιστεί ότι για τις περιοχές όπου η μορφολογία του εδάφους το

επιτρέπει (ιδίως στις κορυφογραμμές) είναι επιτακτική η ανάγκη τοποθέτησης Α/Γ με ισχύ πάνω από 1MW.

Αν θελήσουμε να συγκρίνουμε τη μέγιστη ενεργειακή αξιοποίηση μιας κορυφογραμμής μήκους 2km με υποτιθέμενη μέση ταχύτητα ανέμου 8,5m/sec, χρησιμοποιώντας δύο μεγέθη Α/Γ, θα έχουμε:

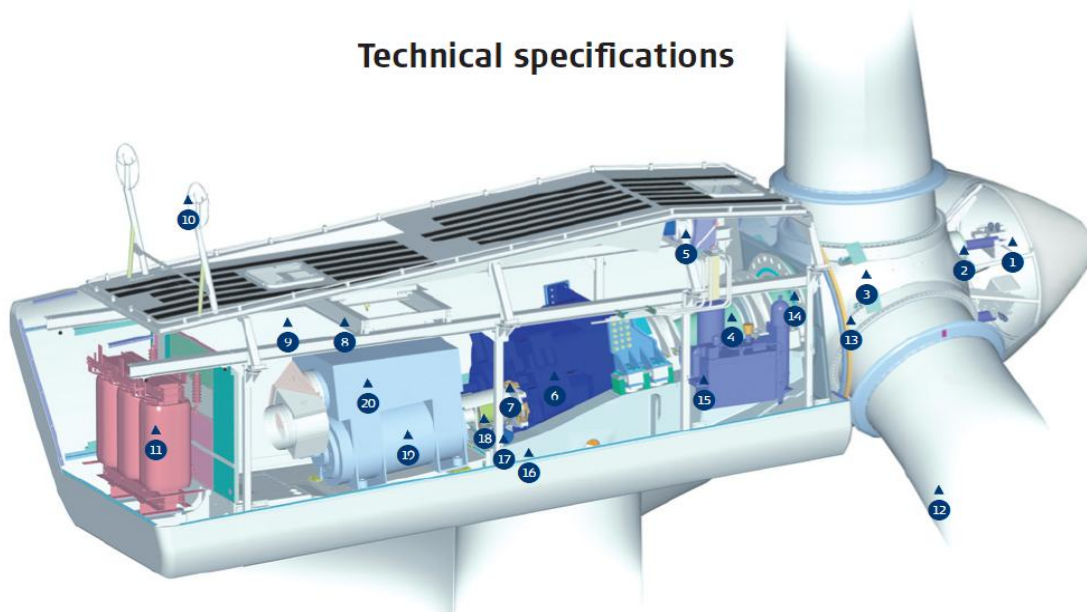
- α. Ανεμογεννήτρια με μήκος πτερυγίων  $r = 23,5\text{m}$  με το οποίο έχουμε ονομαστική ισχύ περίπου 660KW. Αριθμός Α/Γ στο μήκος των 2km για ελάχιστη απόσταση  $l \geq 3D$ ,  $N = (L/3D)+1 = (L/6r)+1 \rightarrow N = (2000/6 \cdot 23,5) + 1 = 15,18$  και  $N = 15$ . Από τη χαρακτηριστική της ενεργειακής παραγωγής μιας Α/Γ των 660KW, για μέση ταχύτητα 8,5m/sec, έχουμε μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας  $E = 2,3\text{GWh}$ , και συνολικά  $E_{\text{ολ}} = 15 \cdot E = 34,5 \text{ GWh}$ .
- β. Ανεμογεννήτρια με μήκος πτερυγίων  $r = 45\text{m}$  με το οποίο έχουμε ονομαστική ισχύ περίπου 3MW. Αριθμός Α/Γ στο μήκος των 2km,  $N = (2000/6 \cdot 45) + 1 = 8,4$  και  $N = 8$ . Από τη χαρακτηριστική της ενεργειακής παραγωγής μιας Α/Γ των 3MW, για μέση ταχύτητα 8,5m/sec, έχουμε μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας  $E = 9,7\text{GWh}$  και συνολικά  $E_{\text{ολ}} = 8 \cdot E = 77,6\text{GWh}$ .

Επομένως στην ίδια κορυφογραμμή με Α/Γ των 3MW, σε ετήσια βάση, έχουμε 2,25 φορές περισσότερη ενέργεια.



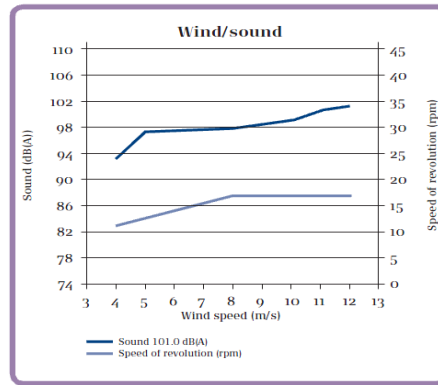
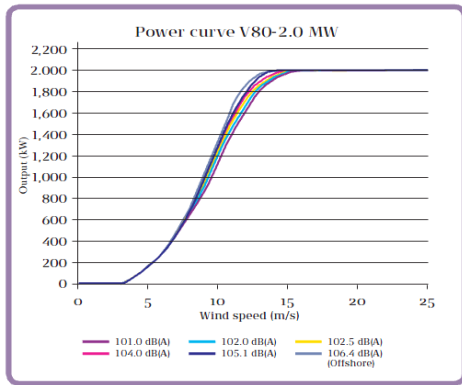
Εσωτερική διάταξη εξαρτημάτων και συσκευών Α/Γ V90 – 3,0MW/Vestas

## Technical specifications



Εσωτερική διάταξη εξαρτημάτων και συσκευών Α/Γ V80 – 2,0MW/Vestas

1. Σύστημα ελέγχου κεντρικού τμήματος ρότορα
2. Επιφάνεια βήματος γραναζιών
3. Κεντρικός βραχίονας ρότορα
4. Κύριος άξονας μετάδοσης κίνησης
5. Ψυγείο λαδιού
6. Κιβώτιο μετάδοσης κίνησης με γρανάζια
7. Μηχανικό δισκόφενο
8. Μηχανισμός διατήρησης και ρύθμισης ισχύος
9. Έλεγχος αέρα οροφής με μηχανισμό ρύθμισης ανοίγματος
10. Υπερηχητικός αισθητήρας
11. Μετασχηματιστής υψηλής τάσης
12. Πτερύγιο ρότορα
13. Βραχίονας πτερυγίου ρότορα
14. Σύστημα διάταξης (σύνδεσης) του ρότορα
15. Υδραυλική μονάδα
16. Βάση μηχανής
17. Σύστημα περιστροφής οδοντοτών τροχών
18. Σύνθετος δίσκος σύνδεσης
19. Σύστημα “optiSpeed” γεννήτριας
20. Σύστημα ψύξης γεννήτριας



Χαρακτηριστικές καμπύλες ανεμογεννήτριας V80 – 2,0MW/Vestas (στοιχεία κατασκευαστή).



## 12.8 Βασικές προϋποθέσεις για την εγκατάσταση αιολικού συστήματος με Α/Γ μέσης ή μεγάλης ισχύος

Επειδή η τοποθέτηση Α/Γ, μέσης και ιδιαίτερα μεγάλης ισχύος, κοστίζει πάρα πολύ και οι απαιτήσεις για υψηλές αποδόσεις είναι πολλές, η μελέτη για την εγκατάσταση και λειτουργία απαιτεί πολλά και προσεκτικά βήματα καθώς και υπολογισμούς μεγάλης ακρίβειας.

### **A. Επιλογή της θέσης εγκατάστασης της Α/Γ**

Σε ένα αιολικό σύστημα για να γίνει προσδιορισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή το κατά προσέγγιση κόστος αυτής, θα πρέπει να είναι γνωστή η ακριβής θέση εγκατάστασης των Α/Γ. Οι παράμετροι που καθορίζουν την επιλογή της θέσης εγκατάστασης των Α/Γ, είναι:

## 1. Το αιολικό δυναμικό

Η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού γίνεται από στοιχεία που έχουμε:

- Από τυχόν αιολικούς χάρτες της περιοχής
- Από τους υφιστάμενους ανεμογράφους της περιοχής
- Από πιθανούς δείκτες εκτίμησης του αιολικού δυναμικού της περιοχής

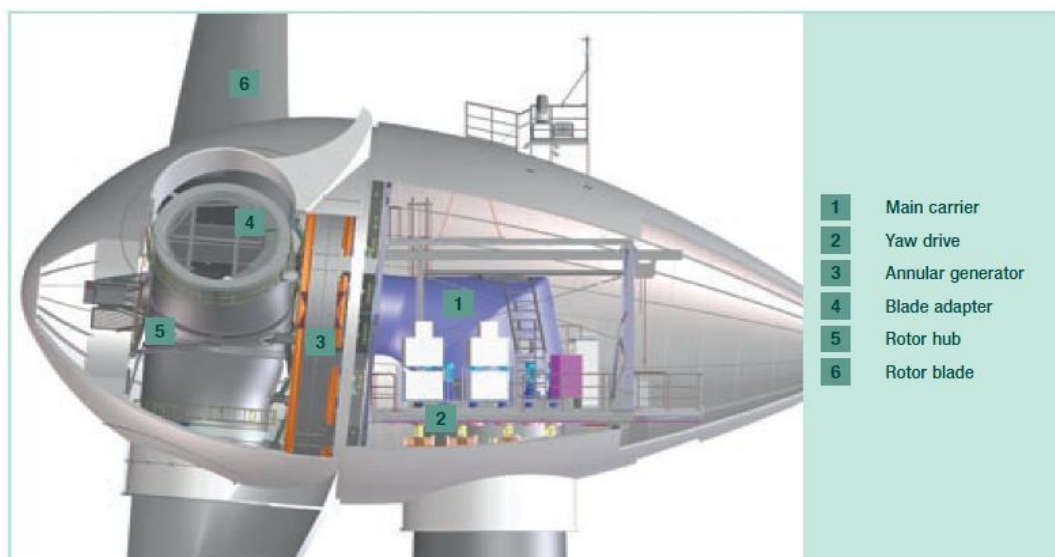
Για να είναι ακριβής η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, εκτός από τη μέση ταχύτητα του ανέμου, θα πρέπει να έχουμε και αναλυτικές πληροφορίες για την κατανομή της πιθανότητας εμφάνισης των διάφορων τιμών ταχύτητας του ανέμου, στη διάρκεια του έτους.

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στα χρονικά διαστήματα που έχουμε τιμές ταχυτήτων για τις οποίες η Α/Γ δεν εργάζεται (χαμηλές ταχύτητες), καθώς και διαστήματα με εμφάνιση πολύ ισχυρών ανέμων (πολύ υψηλές ταχύτητες), για τις οποίες, για λόγους ασφαλείας, θα πρέπει η Α/Γ να μην λειτουργεί. Για αυτά τα χρονικά διαστήματα πρέπει να υπάρξουν εναλλακτικές λύσεις (συσσωρευτές αποθήκευσης ή άλλα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας).

Με βάση όλα τα διαθέσιμα ανεμολογικά στοιχεία, πρέπει να γίνει στατική επεξεργασία και να δημιουργηθεί το διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας και διάρκειας των ανέμων.

Όταν σε μια περιοχή δεν υπάρχουν μακροχρόνιες μετρήσεις (αξιόπιστα ανεμολογικά στοιχεία), για την αποφυγή του μεγάλου χρονικού διαστήματος που απαιτούν οι αναλυτικές μετρήσεις, μπορούμε να κάνουμε χρήση των ημιεμπειρικών αναλυτικών μοντέλων που μπορούν να περιγράψουν το αιολικό δυναμικό της περιοχής, βάση μικρού αριθμού παραμέτρων. Θα πρέπει να τονισθεί ότι η χρήση ημιεμπειρικών αναλυτικών μοντέλων παρουσιάζει στην πράξη προβλήματα ακρίβειας και σε ορισμένες περιπτώσεις, σε τοπικό επίπεδο, και προβλήματα αξιοπιστίας.

Όπως αναφέρθηκε, η διανομή Weibull περιγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά της εύκρατης ζώνης, στην οποία ανήκει η χώρα μας, για ύψος από το έδαφος μέχρι 100m. Η διανομή Weibull με τη χρήση μόνο δύο παραμέτρων (C και K) προσδιορίζει τη πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται σε μια περιοχή της ταχύτητας V. Εκτός των παραπάνω χαρακτηριστικών, που αφορούν τη δύναμη του ανέμου, βασικό επίσης στοιχείο είναι να γνωρίζουμε τις κύριες διευθύνσεις που πνέουν οι άνεμοι, επειδή βάση αυτών γίνεται ο προσανατολισμός των Α/Γ για να αποφύγουμε συχνές και απότομες μεταβολές της διεύθυνσης, που μειώνουν την απόδοση.



Σχήμα 12.5 Ανεμογεννήτρια Enercon E – 126 7,5MW.

## 2. Η δυνατότητα πρόσβασης και τα απαιτούμενα έργα υποδομής

Για την δυνατότητα πρόσβασης και τα απαιτούμενα έργα υποδομής, θα πρέπει να γίνει:

- Προεκτίμηση της ευκολίας πρόσβασης στην περιοχή, μελετώντας προσεκτικά τους υπάρχοντες, σχετικούς με το θέμα, χάρτες της περιοχής.
- Προεκτίμηση του κόστους των τεχνικών έργων που απαιτούνται για να έχουμε πρόσβαση στην περιοχή.
- Προεκτίμηση της διαδρομής που θα ακολουθηθεί κατά τη μεταφορά του εξοπλισμού στον τόπο εγκατάστασης.

Η εγκατάσταση στο συγκεκριμένο μέρος θα πρέπει να μην έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και να πληρεί τις αποστάσεις από τους πλησιέστερους οικισμούς και τα αεροδρόμια.

## 3. Τα υφιστάμενα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή που εξετάζουμε.

Για τη μελέτη των υφιστάμενων δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να ζητηθούν στοιχεία από τη δημόσια επιχείρηση ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), όπως χάρτες ή άλλα τεχνικά δεδομένα και αφού μελετηθούν προσεκτικά, θα πρέπει να γίνει:

- Προεκτίμηση της θέσης σύνδεσης της αιολικής εγκατάστασης (αιολικό πάρκο), με το υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς.
- Προεκτίμηση του τρόπου σύνδεσης, με το υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς

## 4. Οι πιθανές εμπλοκές στη διαδικασία που απαιτείται για την αδειοδότηση της εγκατάστασης.

Πρέπει να μελετηθούν προσεκτικά χάρτες της περιοχής που έχουν στοιχεία για αρχαιολογικούς χώρους, στρατιωτικές εγκαταστάσεις, τουριστικές εγκαταστάσεις κλπ. Οι υπηρεσίες από τις οποίες θα ζητηθούν εγκρίσεις είναι:

- Πολεοδομία
- Γενικό Επιτελείο Εθνικής Άμυνας
- Διεύθυνση δασών
- Οι εφορίες αρχαιοτήτων (Κλασσικών, Βυζαντινών, Νεωτέρων Μνημείων)
- Πολιτική αεροπορία
- Εθνικός Οργανισμός Τουρισμού (ΕΟΤ)
- Οργανισμός τηλεπικοινωνιών Ελλάδος



Σχήμα 12.6 Ανεμογεννήτρια Enercon E – 101 3MW.

**5. Η ιδιοκτησία των εδαφικών εκτάσεων που απαιτούνται για την εγκατάσταση και η δυνατότητα χρήσης γης.**

Οι υπηρεσίες από τις οποίες θα πρέπει να ζητηθούν στοιχεία για το ιδιοκτησιακό καθεστώς της περιοχής όπου θα γίνει η εγκατάσταση των Α/Γ (αιολικό πάρκο), είναι:

- Η διεύθυνση Γεωργίας
- Η διεύθυνση Δασών
- Πολεοδομία
- Εφορίες Αρχαιοτήτων

Θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν κανονισμούς και νόμους που πιθανόν να εμποδίζουν τη χρησιμοποίηση γης για εγκατάσταση Α/Γ. Τέτοιοι νόμοι μπορεί να είναι σχετικοί με την προστασία του περιβάλλοντος, με την προστασία ιστορικών μνημείων και άλλων αρχαιολογικών χώρων.

**Β. Ονομαστική ισχύς ανεμογεννητριών.**

Για να γίνει σωστή επιλογή του τύπου και του μεγέθους των Α/Γ, θα πρέπει να γίνει σύγκριση των χαρακτηριστικών στοιχείων και της καμπύλης ισχύος με τα υπάρχοντα ή τα μετρούμενα ανεμολογικά στοιχεία (μέση και μέγιστη ταχύτητα ανέμου, ένταση ανέμου, τραχύτητα και χαρακτηριστικά εδάφους). Για περιπτώσεις τοποθέτησης σε κορυφογραμμές και με δεδομένα τα χαρακτηριστικά στοιχεία των Α/Γ, θα πρέπει να γίνει επιλογή όσο το δυνατόν

μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος. Βασικό στοιχείο επίσης για το μέγεθος των Α/Γ είναι το κόστος και η δυνατότητα σύνδεσης με το δίκτυο της μέσης τάσης. Η επιλογή του τύπου και του μεγέθους των Α/Γ θα πρέπει να αποτελεί οικονομικά βιώσιμη λύση.

### Γ. Πλήθος ανεμογεννητριών – Χωροθέτηση

Ο αριθμός των Α/Γ που θα τοποθετηθούν έχει σχέση με τη διαθέσιμη έκταση, στην οποία υπάρχουν ευνοϊκά σημεία εγκατάστασης, με τους περιορισμούς για την αποφυγή της σκίασης. Η διαθέσιμη έκταση θα πρέπει να ανήκει μέσα σε περιοχή που πληρεί τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Έχει επαρκές αιολικό δυναμικό, ώστε να έχουμε οικονομική βιωσιμότητα
- Έχει σταθερούς ανέμους σε θέσεις χωρίς εμπόδια (φυσικά ή τεχνητά)
- Έχει ομογενή τοπογραφικά χαρακτηριστικά

Για να προσδιορισθούν τα σημεία τοποθέτησης των Α/Γ, μέσα στη διαθέσιμη έκταση της ευρύτερης περιοχής, θα πρέπει: α) Να εξετάσουμε προσεκτικά τη διαθέσιμη έκταση, παίρνοντας υπόψιν όλα τα στοιχεία που έχουμε. β) Να προσδιορίσουμε τις τοποθεσίες με τα υψηλότερα αιολικά δυναμικά μέσα στη διαθέσιμη έκταση. γ) Να επιλέξουμε τα σημεία εγκατάστασης για κάθε τοποθεσία. Για κάθε σημείο τοποθέτησης θα πρέπει να προσδιοριστούν:

- Οι συντεταγμένες  $\chi$  και  $\psi$
- Το υψόμετρο
- Το ύψος του πύργου (πυλώνα) της Α/Γ
- Η ταχύτητα του ανέμου για το ύψος του πύργου

Όταν έχουμε περιοχές στις οποίες οι καλές αιολικές ζώνες αποτελούν ένα μικρό τμήμα, θα πρέπει πρώτα να προσδιορισθούν οι ζώνες και στη συνέχεια να γίνει έρευνα για τους περιορισμούς από τη χρήση της γης κλπ. Όταν έχουμε περιοχές με το αιολικό δυναμικό να είναι παντού σχεδόν το ίδιο, θα πρέπει πρώτα να γίνει έρευνα για τους περιορισμούς από τη χρήση γης κλπ. Για να αποφύγουμε, όσο το δυνατόν περισσότερο, τις απώλειες που έχουμε από την επίδραση στην ομαλή ροή του αέρα, στα πτερύγια μιας Α/Γ, λόγω της λειτουργίας των άλλων Α/Γ (ομόρους Α/Γ), θα πρέπει:

- α. Όταν τοποθετούνται σε σειρά και ο άνεμος σε ετήσια βάση, φυσάει μόνο από μια διεύθυνση, η απόσταση ανάμεσά τους να είναι περίπου τριπλάσια της διαμέτρου της φτερωτής ( $l_a = 3D$ ). Όταν ο άνεμος φυσάει σε περισσότερες διευθύνσεις, η απόσταση ανάμεσά τους να είναι περίπου δεκαπλάσια της διαμέτρου της φτερωτής ( $l_b = 10D$ ).
- β. Όταν τοποθετούνται σε διαφορετικές σειρές, η απόσταση ανάμεσα στις σειρές να είναι περίπου δεκαπλάσια της διαμέτρου της φτερωτής ( $l_b = 10D$ ).



Σχήμα 12.7 Ανεμογεννήτρια Enercon E –82 E3, 3MW.

**Δ. Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.**

Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε μια Α/Γ, θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{A/\Gamma} = P_{\mu} \cdot t$$

όπου:

$P_{\mu}$  = η μέση ισχύς της Α/Γ

t = ο χρόνος σε ώρες (t =8760)

Η ετήσια διαθέσιμη στο δίκτυο ηλεκτρική ενέργεια, για κάθε Α/Γ, θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{\Delta A/\Gamma} = P_{\mu} \cdot t \cdot h$$

όπου

$$\eta = \eta_{γρ} \cdot \eta_{\Delta} \cdot \eta_{\Lambda} \cdot \eta_{ικ}$$

**Ε. Επιλογή του βασικού εξοπλισμού**

Η επιλογή του βασικού εξοπλισμού γίνεται με βάση:

- α. Τη συνολική ονομαστική ισχύ των Α/Γ (ισχύς αιολικού πάρκου)
- β. Το μέγεθος των Α/Γ και τη δυνατότητα μεταφοράς και εγκατάστασης στα σημεία που έχουν καθοριστεί
- γ. Τις τεχνικές προδιαγραφές των Α/Γ και τη δυνατότητα εναρμόνισης με το δίκτυο
- δ. Τις οικονομικές προσφορές των εταιριών για τις Α/Γ και τις πρόσθετες παροχές

### **ΣΤ. Έργα υποδομής**

Τα έργα υποδομής που απαιτούνται για την εγκατάσταση και λειτουργία των Α/Γ είναι:

1. Οδοποιία
2. Πλατείες ανέγερσης Α/Γ
3. Θεμελίωση Α/Γ (βάσεις από οπλισμένο σκύροδεμα)
4. Κτίριο ελέγχου (κύριοι, βοηθητικοί και αποθηκευτικοί χώροι)

### **Ζ. Ηλεκτρολογικά έργα**

Τα ηλεκτρολογικά έργα που απαιτούνται για την εγκατάσταση και λειτουργία των Α/Γ είναι:

1. Υποσταθμός χαμηλής τάσης/μέσης τάσης (Χ.Τ./Μ.Τ.) για κάθε Α/Γ, που τοποθετείται δίπλα ή εσωτερικά στη βάση του πυλώνα.
2. Υπόγειες γραμμές, μέσης τάσης (20KV), από κάθε υποσταθμό της Α/Γ προς τον κεντρικό υποσταθμό στο χώρο του κτιρίου ελέγχου.
3. Κεντρικός υποσταθμός μέσης τάσης (20KV) στο κτίριο ελέγχου.
4. Τηλεπικοινωνίες και συστήματα τηλεπαρακολούθησης.
5. Εναέρια γραμμή διασύνδεσης μέσης τάσης 20KV (αφορά τη ΔΕΗ).

### **Η. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις**

Οι βασικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στις οποίες πρέπει να γίνει αναφορά είναι:

1. Εκπομπές θορύβου
2. Επιδράσεις στα πουλιά
3. Ηλεκτρομαγνητικά κύματα
4. Εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο
5. Οπτική αρμονία

*Σχήμα 12.8 Ανεμογεννήτρια Enercon E-82 E2 2,3MW.*

## **12.9 Διάταξη Α/Γ αιολικού πάρκου**

Η διάταξη των Α/Γ στο έδαφος (θέσεις και αποστάσεις) είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών σημείων με τα ευνοϊκότερα ανεμολογικά στοιχεία και του διαθέσιμου για την τοποθέτηση χώρου.

Στην πράξη, όταν υπάρχει διαθέσιμος χώρος και η περιοχή χαρακτηρίζεται από τα ίδια ανεμολογικά στοιχεία, τοποθετούμε τις Α/Γ σε απόσταση μεταξύ τους τουλάχιστον ίση με το δεκαπλάσιο της διαμέτρου του ρότορα ( $l \geq 10D$ ).

Η απόσταση από τα άκρα του αιολικού πάρκου (όρια αιολικού πάρκου), για



*Σχήμα 12.9* Διάταξη Α/Γ αιολικού πάρκου στο Πυργάρι Εύβοιας.

λόγους ασφαλείας και σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία για περιοχές εκτός της οικιστικής ζώνης, θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τη διάμετρο του ρότορα ( $l \geq D$ ).

Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση ανάμεσα στις Α/Γ τόσο μικρότερη είναι η σκίαση. Πολλές φορές, για λόγους οικονομίας χώρου, η απόσταση ανάμεσα στις Α/Γ είναι μικρότερη από  $10D$  και συνήθως έχει τιμή  $l \geq 6D$ . Στην πράξη αυτό συμβαίνει όταν η διαθέσιμη έκταση είναι μοναδική και έχει συγκεκριμένες διαστάσεις.

Όταν οι Α/Γ είναι τοποθετημένες σε περιοχή με σταθερή τη διεύθυνση του ανέμου κατά τη διάρκεια του έτους, η μία απόσταση ανάμεσα στις Α/Γ μπορεί να κυμαίνεται από 2 έως 3 φορές τη διάμετρο του ρότορα ( $l_a \geq 2$  ή  $3D$  και  $l_b \geq 10D$ ).

## 12.10 Μετρήσεις θορύβου στην ανεμογεννήτρια

Οι μετρήσεις στην πηγή του θορύβου (ανεμογεννήτρια) γίνονται για να διαπιστωθούν τα επίπεδα του θορύβου που παράγονται από μια ανεμογεννήτρια νέου τύπου προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία πιστοποίησης της ή να επιβεβαιωθεί η εγγύηση ακουστικών εκπομπών τις οποίες δίνει ο κατασκευαστής και οι τιμές της οποίας χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των αναμενόμενων επιπέδων θορύβου στη γύρω περιοχή.

Η διαδικασία αυτών των μετρήσεων περιλαμβάνει εκτός των ακουστικών, τη μέτρηση μετεωρολογικών μεγεθών (ταχύτητα, διεύθυνση ανέμου, θερμοκρασία, βαρομετρική πίεση) και μεγεθών της ανεμογεννήτριας (παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, ταχύτητα περιστροφής ρότορα).

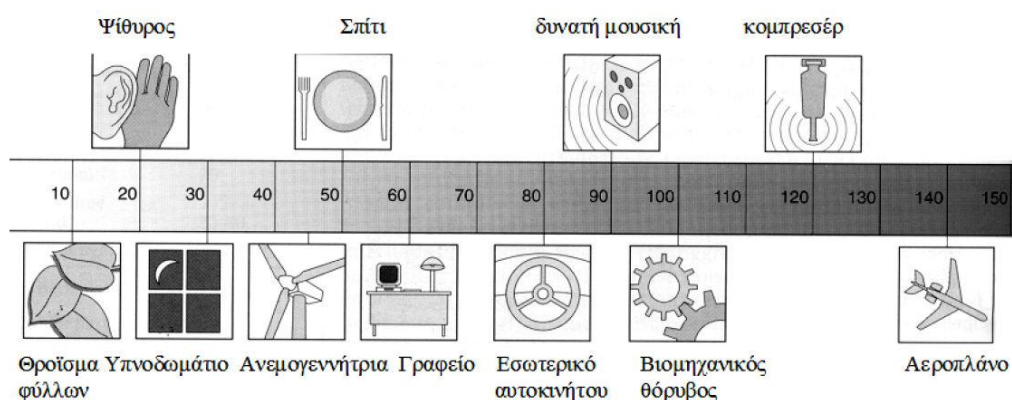
Η μέτρηση γίνεται σύμφωνα με τα πρότυπα:



- MEASNET: Acoustic Noise Measurement Procedure, Version 2, January 2005.
- IEC 61400 – 11: “Wind turbine generator systems – Part 11:Acoustic noise measurement techniques” (2<sup>nd</sup> edition, 12/2002).
- IEC 61400 – 11, 2002: Amendment 1 (05/2006).

## 12.11 Μετρήσεις θορύβου από Α/Γ στη θέση του αποδέκτη

Η μέτρηση του θορύβου της ανεμογεννήτριας στη θέση του αποδέκτη, είναι μία διαδικασία η οποία επιτρέπει την καταγραφή των επιπέδων του θορύβου, που εκπέμπεται από μία ή περισσότερες ανεμογεννήτριες και γίνεται αντιληπτός σε μία συγκεκριμένη θέση στο γύρω χώρο. Η διαδικασία αυτή γίνεται κυρίως για να ελεγχθεί, αν ο θόρυβος που παράγεται από την ανεμογεννήτρια ή το πάρκο, είναι εντός των αποδεκτών επιπέδων θορύβου, που ορίζονται από τη σχετική νομοθεσία.



*Σχήμα 12.10* Στάθμες θορύβου από καθημερινές δραστηριότητες.

Η μέτρηση της ηχοστάθμης του θορύβου, που εκπέμπεται από τη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας ή αιολικού πάρκου στη θέση του αποδέκτη, σχετίζεται με τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του πνέοντος ανέμου στην περιοχή. Η μέτρηση γίνεται σύμφωνα με τα πρότυπα:

- ISO 1996 – 1: 2003, Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1:Basic quantities and assessment procedures.
- ISO 1996 – 2: 2007, Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels.
- IEA Recommendations, part 10 (1997), Recommended practices for wind turbine testing. Part 10: Measurement of noise immission from wind turbines at noise receptor locations.

## Κεφάλαιο 1

# Εισαγωγή



## Επιλογή θέσης εγκατάστασης ανεμογεννήτριας

Σε γενικές γραμμές η επιλογή θέσης εγκατάστασης Α/Γ παρουσιάζει τα ίδια προβλήματα με την επιλογή θέσης εγκατάστασης οποιουδήποτε συστήματος παραγωγής ενέργειας. Διαφέρει όμως σε ένα βασικό σημείο: είναι αδύνατο να προσδιορισθεί η καθαρή παραγωγή ενέργειας ή το κατά προσέγγιση κόστος αυτής, αν δεν είναι γνωστή η ακριβής θέση εγκατάστασης της Α/Γ. Ανεμογεννήτριες τοποθετημένες σε βιώσιμες θέσεις πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Η παραγωγή ενέργειας να είναι συμφέρουσα οικονομικά (το κόστος της παραγόμενης KWh να είναι μικρό).
- Η εγκατάσταση να μην έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.
- Η λειτουργία της Α/Γ να είναι συμβατή με τη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου.
- Να έχουν ληφθεί υπόψιν κατά το σχεδιασμό της Α/Γ οι πιθανές ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες της συγκεκριμένης θέσης (παγετοί, εξαιρετικά ισχυροί άνεμοι κλπ)
- Η επιλεγμένη θέση να είναι αποδεκτή από το κοινό

Το να προσδιορίσουμε μια τοποθεσία στην οποία πνέουν δυνατοί άνεμοι, δεν σημαίνει ότι βρήκαμε και τη βέλτιστη θέση για την εγκατάσταση της Α/Γ. Πολλές και σημαντικές είναι οι επιμέρους παράμετροι, που πρέπει να έχει υπόψιν του ο μηχανικός, προκειμένου να καταλήξει στην επιλογή της οριστικής θέσης εγκατάστασης. Και η επιλογή αυτή θα είναι η βέλτιστη, μόνον εφόσον γίνει σωστή και λεπτομερής αξιολόγηση των παρακάτω παραμέτρων:

### 13.1 Οικονομική αξία

Ο σημαντικότερος στόχος μιας Α/Γ είναι να μειώσει το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας γι' αυτό και η οικονομική βιωσιμότητα είναι η πρωταρχική ιδιότητα για την αποδοχή ή όχι μιας θέσης. Επειδή η Α/Γ παράγει ηλεκτρική ενέργεια μόνο όταν φυσάει άνεμος, χρησιμοποιείται συνήθως σαν εξοικονομητής καυσίμου. Ένας άλλος οικονομικός παράγοντας πρωταρχικού ενδιαφέροντος είναι το κόστος εγκατάστασης. Τούτο είναι αισθητά μειωμένο αν η εγκατάσταση γίνει κοντά σε υπάρχοντες δρόμους και γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

### 13.2 Επιδράσεις στο περιβάλλον

Γενικά, οι επιδράσεις των Α/Γ στο περιβάλλον είναι πολύ μικρές. Ωστόσο, σε ορισμένες μεμονωμένες περιπτώσεις μπορεί η Α/Γ να έχει αρνητικές επιδράσεις στο περιβάλλον. Οι επιδράσεις που ενδιαφέρουν περισσότερο είναι:

### 13.3 Οπτικοαισθητική επίδραση

Η εγκατάσταση μιας τεράστιας ανεμογεννήτριας σε μια όχι και τόσο ανοιχτή περιοχή δημιουργεί άσχημη οπτική εντύπωση. Αντίθετα η εγκατάσταση της ίδιας Α/Γ σε μια αχανή έκταση περνάει σχεδόν απαρατήρητη.

### 13.4 Επιδράσεις στα πουλιά

Καλό είναι να αποφεύγεται η εγκατάσταση Α/Γ σε μέρη που είναι νυκτερινά περάσματα αποδημητικών πουλιών.

### 13.5 Ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση

Το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης δημιουργείται από την ανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πάνω στα περιστρεφόμενα πτερύγια της πτερωτής. Στις ΗΠΑ έχουν λάβει ευρεία δημοσιότητα τελευταία οι παρεμβολές στις τηλεοπτικές μεταδόσεις.

### 13.6 Γενικοί κανονισμοί και περιορισμοί στη χρησιμοποίηση της γης

Όταν προσπαθούμε να βρούμε κατάλληλες θέσεις για την εγκατάσταση Α/Γ, πρέπει να έχουμε υπόψιν μας κανονισμούς και νόμους που πιθανόν να εμποδίζουν τη χρησιμοποίηση γης για εγκατάσταση μεγάλων Α/Γ. Τέτοιοι νόμοι μπορεί να είναι σχετικοί με την προστασία του περιβάλλοντος, την προστασία ιστορικών μνημείων, με τη γειτνίαση σε αεροδρόμια ή στρατιωτικές εγκαταστάσεις.

### 13.7 Μετεωρολογικά προβλήματα

Κατά την επιλογή των θέσεων για την εγκατάσταση Α/Γ πρέπει να ληφθούν υπόψιν πιθανές ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες. Ορισμένες απ' αυτές μπορεί πράγματι να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές στην κατασκευή. Άλλες πάλι απλώς επηρεάζουν, το κόστος συντήρησης και τη διάρκεια ζωής της μηχανής.

### 13.8 Παγετός

Η δημιουργία παγετού μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία της Α/Γ με διαφορετικούς τρόπους. Πρώτα απ' όλα η επικάθηση στις κατασκευές αυξάνει τα στατικά και δυναμικά τους φορτία. Όταν επικάθηνται σημαντικές ποσότητες πάγου στα πτερύγια, εκτός του ότι αυξάνεται το φορτίο τους, υπάρχει και ο κίνδυνος να εκτοξευτεί κάποιο κομμάτι πάγου καθώς τα πτερύγια περιστρέφονται. Ακόμα υπάρχει ο κίνδυνος, με το πάγωμα των ανεμομέτρων, να χαλάσουν τα συστήματα ελέγχου της Α/Γ. Καλό είναι λοιπόν κατά την εκλογή θέσης της Α/Γ να εκτιμάται από μετεωρολόγο η πιθανότητα και η συχνότητα εμφάνισης παγετών.



*Σχήμα 13.1 Χιονοσκέπαστο αιολικό πάρκο στον Πατριάρχη Θράκης.*

### 13.9 Υπερβολικά ισχυροί άνεμοι

Η συχνότητα με την οποία παρουσιάζονται θυελλώδεις άνεμοι σε μια περιοχή, καθώς και η έντασή τους, μπορεί να υπολογιστεί από υπάρχοντα κλιματολογικά δεδομένα. Αυτή η πληροφορία είναι χρήσιμη για το σχεδιασμό κατάλληλης Α/Γ που να λειτουργεί όταν επικρατούν τέτοιοι θυελλώδεις άνεμοι. Βλέπουμε λοιπόν ότι ανάλογα με τη θέση που επιλέγουμε μεταβάλλεται και ο τύπος της ανεμογεννήτριας που θα εγκαταστήσουμε. Επομένως μεταβάλλεται και το κόστος κατασκευής αλλά και το κόστος της παραγόμενης ενέργειας.

### 13.10 Τύρβη

Η τύρβη μπορεί να επηρεάσει τη διάρκεια ζωής ή το κόστος συντήρησης της μηχανής. Οι επιστήμονες γνωρίζουν ότι η τύρβη σε ροή πάνω από τραχύ, ανώμαλο έδαφος (βουνά, κοιλάδες, λόφοι κλπ) είναι διαφορετική από αυτήν που παρατηρείται στη ροή πάνω από επίπεδο, ομαλό έδαφος. Ωστόσο υπάρχουν ελάχιστα δεδομένα που να αποσαφηνίζουν αυτές τις διαφορές. Προς το παρόν, θα ήταν επιθυμητό, να διαλέγουμε θέσεις με όσο το δυνατόν χαμηλότερο επίπεδο τύρβης.

### 13.11 Υλικά μεταφερόμενα από τον αέρα

Ανεμογεννήτριες που πρόκειται να εγκατασταθούν σε παραθαλάσσιες περιοχές υπόκεινται σε διάβρωση επειδή ο αέρας σ' αυτές τις περιοχές περιέχει σημαντικές ποσότητες αλάτων. Πρέπει λοιπόν ορισμένα τμήματα της κατασκευής να προστατευθούν ώστε να διαθέτουν αντισκωριακή προστασία.

Αν μια Α/Γ είναι τοποθετημένη σε άγονη περιοχή, είναι πιθανόν ο αέρας να μεταφέρει επάνω της σκόνη, άμμο, ψιλό χαλίκι κλπ. Τέτοια τραχιά υλικά μπορούν να προξενήσουν ζημιές στα πτερύγια, τα προστατευτικά καλύμματα, τα λιπαντικά και αλλού. Προκειμένου να επιτύχουμε ικανοποιητική συντήρηση της μηχανής κάτω από

τέτοιες συνθήκες, απαιτούνται σχεδιαστικές τροποποιήσεις και ειδικές διαδικασίες συντήρησης. Όλα τα παραπάνω αυξάνουν το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

### **13.12 Η σταθερότητα των ανέμων**

Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου κατά το χρονικό διάστημα μιας ώρας, σαφώς επηρεάζουν τη λειτουργία της μηχανής, ενώ μπορούν να επιδράσουν και στη διάρκεια ζωής της. Αλλά και οι αλλαγές στην κατεύθυνση του ανέμου, στη διάρκεια μιας ώρας, επηρεάζουν τη λειτουργία και τη συμπεριφορά της μηχανής. Μια μελέτη της NASA πάνω στο μοντέλο Α/Γ Clayton MOD – ΟΑ έδειξε ότι με την περιστροφή της μηχανής γύρω από τον κατακόρυφο άξονά της (yawing), προκειμένου αυτή να παρακολουθεί τις αλλαγές της κατεύθυνσης του ανέμου, αναπτύσσονται σημαντικά καμπτικά φορτία στα πτερύγια της μηχανής. Είναι επομένως φανερό ότι η λειτουργία μιας μηχανής σε μια θέση που παρουσιάζει συχνές αλλαγές στην διεύθυνση του ανέμου θα είναι μειονεκτικότερη μιας άλλης που είναι τοποθετημένη σε περιοχή με σταθερούς ανέμους.

### **13.13 Αξιοπιστία αιολικών δεδομένων – διάρκεια παρατηρήσεων**

Τα αιολικά δεδομένα που διαθέτουμε για ένα τόπο πρέπει να είναι αξιόπιστα. Δηλαδή να έχουν προκύψει έπειτα από μακροχρόνιες μετρήσεις.

### **13.14 Αποδοχή από τη πλευρά του κοινού**

Σε τελευταία ανάλυση, η επιτυχής επιλογή μιας τοποθεσίας για την εγκατάσταση Α/Γ εξαρτάται από την κοινή γνώμη. Το κοινό πρέπει να νιώσει ότι τα έργα υποδομής που θα γίνουν για την εγκατάσταση της Α/Γ δεν θα αλλοιώσουν το τοπίο και η ανεμογεννήτρια που θα εγκατασταθεί θα ταιριάζει με το σκηνικό των γύρω περιοχών. Η στάση του κοινού επηρεάζεται τόσο από τις αντιλήψεις του για τις Α/Γ γενικά, όσο και από τις αντιλήψεις του για τα οικονομικά οφέλη που θα προκύψουν από την εγκατάσταση Α/Γ στη συγκεκριμένη θέση.

### 13.15 Υπολογισμός της Μέσης Ετησίως Παραγόμενης Ενέργειας

Η μέση ετησίως παραγόμενη ενέργεια από μια αιολική μηχανή ονομαστικής ισχύος  $N_0$  μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$E = 8760 \cdot \Omega \cdot N_0 \quad (13.2)$$

όπου με  $\Omega$  συμβολίζουμε το μέσο ετήσιο συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης, ο οποίος ορίζεται σαν:

$$\Omega = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{N(V)}{N_0} \cdot \delta(t) \cdot dt$$

ενώ η παράμετρος  $T$  αναφέρεται στη χρονική περίοδο ενός έτους, δηλαδή 8760 h ή 31.536.000 sec. Ένας πλέον εύχρηστος τρόπος για τον υπολογισμό του μέσου συντελεστή ισχύος, ιδιαίτερα χρήσιμος για ενεργειακές προβλέψεις και προκαταρκτικούς υπολογισμούς, προκύπτει, εάν χρησιμοποιήσουμε τη μέση ετήσια διαθεσιμότητα  $\Delta$  της εγκατάστασης, καθώς και τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας εμφάνισης ανέμων,  $f(V)$ , για μια περιοχή. Με τη χρήση των παραπάνω μεγεθών η εξίσωση 13.2 γράφεται σαν:

$$E = 8760 \cdot \Delta \cdot \omega \cdot N_0 \quad (13.3)$$

όπου

$$\omega = \int_0^{\infty} \frac{N(V)}{N_0} \cdot f(V) \cdot dV \quad (13.4)$$

Επειδή όμως η παραγόμενη ενέργεια εκ μέρους της ανεμογεννήτριας είναι μηδενική για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ταχύτητας ενάρξεως λειτουργίας  $V_c$  και μεγαλύτερες της ταχύτητας διακοπής λειτουργίας  $V_F$ , η εξίσωση 13.4 γράφεται:

$$\omega = \int_{V_c}^{V_F} \frac{N(V)}{N_0} \cdot f(V) \cdot dV \quad (13.5)$$

Τέλος υπενθυμίζεται ότι:

$$\int_0^{\infty} f(V) \cdot dV = 1.0$$

Βάσει των εξισώσεων (13.3) και (13.5) η ακριβής τιμή του μέσου συντελεστή ισχύος είναι συνάρτηση αφενός του τοπικού αιολικού δυναμικού μιας περιοχής

αφετέρου των λειτουργικών χαρακτηριστικών μιας υπό μελέτη ανεμογεννήτριας.

Επιπλέον, κάνοντας χρήση της εξίσωσης (13.5), είναι δυνατή η εκτίμηση της συνεισφοράς μέρους του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, πχ για  $V \leq V_0$ , στη μέση ενεργειακή παραγωγή μιας αιολικής μονάδος. Είναι δηλαδή δυνατόν να γραφεί ότι:

$$\omega(V_0) = \int_{V_c}^{V_0} \frac{N(V')}{N_0} \cdot f(V') \cdot d'V$$

### 13.16 Διάρκεια ζωής ανεμογεννήτριας

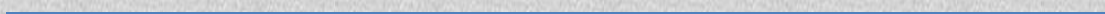
Όλοι οι ανεμοκινητήρες σήμερα σχεδιάζονται για διάρκεια ζωής τουλάχιστον 20 ετών και ίσως και 30. Με την τεχνολογική βελτίωση των υλικών, τη μεγαλύτερη αντοχή τους σε κόπωση, τη βελτίωση των μηχανουργικών επεξεργασιών, την αύξηση των γνώσεων σχετικά με την αλληλεπίδραση ανέμου και αιολικής μηχανής σε συνδυασμό με τη χρήση κωδίκων ηλεκτρονικού υπολογιστή που επιτρέπουν την ακριβή γνώση των φορτίων σε μεταβαλλόμενες ανεμολογικές συνθήκες, είναι περισσότερο από σίγουρο ότι οι αιολικές μηχανές θα επιτύχουν διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 20 έτη.

Δεδομένου ότι η διάρκεια ζωής του ανεμοκινητήρα έχει άμεση επίδραση στην οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης η παραδοχή ως διάρκεια ζωής του ανεμοκινητήρα 20 έτη αποτελεί συντηρητική εκτίμηση.



Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*



## Η γεννήτρια Diesel

### 14.1 Ιστορική αναδρομή

Πρόδρομος του βενζινοκινητήρα θεωρείται η ατμομηχανή, που πρωτοεμφανίστηκε τον 18ο αιώνα. Η μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), που ακολούθησε τον 19<sup>ο</sup> αιώνα ως βελτίωση για πολλές εφαρμογές δεν μπορεί να αποδοθεί μόνο σε έναν εφευρέτη διότι γίνονταν πολλές παράλληλες προσπάθειες κατασκευής μιας ΜΕΚ. Η κεντρική ιδέα του κινητήρα εσωτερικής καύσης ήταν να πυροδοτηθεί ένα μίγμα εύφλεκτων αερίων ή υγρών, το οποίο θα εκρήγνυται μέσα σε ένα κύλινδρο και θα κινούσε ένα έμβολο. Το 1820 στην Αγγλία ένας κινητήρας λειτουργούσε με βάση την έκρηξη μίγματος αέρα-υδρογόνου.

Έτσι το 1816 παρουσιάστηκε ως ευρεσιτεχνία ο παλαιότερος κινητήρας εσωτερικής καύσης, γνωστός ως κινητήρας Stirling που λειτουργεί με υπέρθερμο αέρα και μπορεί να αξιοποιήσει οποιοδήποτε καύσιμο μέχρι και την ηλιακή ενέργεια. Υστερεί βέβαια έναντι των άλλων για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους. Το 1824, ο Γάλλος φυσικός Santi Carnot δημοσίευσε το κλασικό πλέον σύγγραμμα "Σκέψεις πάνω στην Ωστική δύναμη της θερμότητας" στο οποίο περιέγραψε τις βασικές αρχές της θεωρίας εσωτερικής καύσης.

Το έτος 1860 ο Γάλλος εφευρέτης Jean-Joseph-Etienne-Lenoir (1822-1900) κατασκεύασε τον πρώτο πρακτικά χρησιμοποιούμενο κινητήρα από τον οποίο προέρχονται όλοι οι άλλοι κινητήρες εσωτερικής καύσης. Τη χρονιά εκείνη παρουσιάστηκε ένα μικρό όχημα το οποίο εκκινείτο με τη μηχανή του. Το καύσιμο που χρησιμοποιούσε ήταν το φωταέριο το οποίο εισάγεται στον κύλινδρο αναμεμιγμένο με αέρα στο πρώτο στάδιο λειτουργίας, κατά το πρώτο μισό της διαδρομής του εμβόλου. Το μίγμα αυτό πυροδοτείται με ηλεκτρικό σπινθήρα και ωθεί το έμβολο στο υπόλοιπο κομμάτι της διαδρομής του. Κατά την επιστροφή του εμβόλου, στη μία πλευρά του απωθούνται τα καυσαέρια, ενώ στην άλλη επαναλαμβάνονταν η διαδικασία εισαγωγής του μίγματος φωταερίου-αέρα. Όμως ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα του Lenoir ήταν πολύ χαμηλός, αφού το προς καύση μείγμα συμπιεζόταν ελάχιστα πριν την ανάφλεξη πράγμα που δυσκόλεψε την οικονομική του αξιοποίηση.

Μια σημαντική εξέλιξη πραγματοποιήθηκε στο Παρίσι το 1862, όταν δημοσιεύτηκε η περιγραφή του ιδανικού κύκλου λειτουργίας μιας μηχανής εσωτερικής καύσης από τον Alphonse Eugene Beau de Rochas(1815-1893), ο οποίος ήταν και ο πρώτος που διατύπωσε τις συνθήκες για την άριστη απόδοση. Ο κινητήρας προέβλεπε τετράχρονο κύκλο, σε αντίθεση με το δίχρονο κύκλο (είσοδος- ανάφλεξη και ισχύς- έξοδος) του Lenoir. Όμως στα επόμενα 14 χρόνια ο τετράχρονος κινητήρας έμεινε στα χαρτιά.

Το 1876 από τη μηχανή του ξεκίνησε ο Γερμανός Nikolaus August Otto (1832- 1891) και κατασκεύασε ένα τετράχρονο βενζινοκινητήρα, αφού προηγουμένως είχε κατασκευάσει έναν ατμοσφαιρικό δίχρονο κινητήρα με ελεύθερο έμβολο. Το 1867 ο δίχρονος αυτός κινητήρας παρουσιάστηκε στην έκθεση του

Παρισιού και πήρε το χρυσό βραβείο γιατί είχε κατά 60% μειωμένη κατανάλωση καυσίμου. Το 1892 από τον Γερμανό μηχανικό Rudolf Christian Karl Diesel (1858-1913) ανακοινώθηκε ως ευρεσιτεχνία ο ομώνυμος κινητήρας και μελετήθηκε από το 1893 μέχρι το 1897.

Στον κινητήρα ντίζελ διαχέεται το καύσιμο με ισχυρό περίσσειμα αέρα, το οποίο συμπυκνώνεται σε μία σχέση 25:1 και αυτοαναφλέγεται σε θερμοκρασία 700 με 900° C.

Από περιβαντολογικής άποψης τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν υψηλές εκπομπές ρύπων, ιδιαίτερα σε οξειδία του αζώτου. Οι εκπομπές αυτές μπορούν να περιοριστούν με την εφαρμογή καταλυτικών μετατροπών ή με την τροποποίηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της ΜΕΚ. Και οι δύο όμως αυτές τεχνικές έχουν σαν αποτέλεσμα την ελάττωση του συντελεστή απόδοσης. Η χρήση παγίδων αιθάλης είναι επίσης υποχρεωτική σε κινητήρες ντίζελ ή άλλων βαρέων κλασμάτων πετρελαίου. Στα μειονεκτήματα των συστημάτων αυτών πρέπει να συμπεριληφθεί επίσης το υψηλό κόστος συντήρησης και τα υψηλά επίπεδα θορύβου, ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες.

Μια παγκόσμια έρευνα της ΙΕΑ για παραγγελίες σε συστήματα ηλεκτροπαραγωγής στο διάστημα από 6/2000 μέχρι 5/2001 έδειξε ότι έγιναν παραγγελίες συστημάτων ΜΕΚ 1 MW-30 MW για συνολική ισχύ 16,2 MW. Το 80% των παραγγελιών αυτών προέρχεται από χώρες του ΟΟΣΑ, ενώ πάνω από τα μισά συστήματα προορίζονται για εφαρμογές εφεδρικής ισχύος.

## 14.2 Υπάρχουσες Τεχνολογίες

Οι συμβατικοί θερμικοί σταθμοί χρησιμοποιούν καύσιμα όπως οι λιθάνθρακες, ο λιγνίτης, η τύρφη, το πετρέλαιο (ντίζελ και μαζούτ) και το φυσικό αέριο. Οι θερμικοί σταθμοί κατατάσσονται ανάλογα με το μέσο και τις μηχανές που χρησιμοποιούν για το θερμοδυναμικό τους κύκλο. Στην προκειμένη περίπτωση οι ντιζελοηλεκτρικοί κάνουν χρήση εμβολοφόρων μηχανών. Οι εμβολοφόρες ΜΕΚ, γνωστές και σαν ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, αποτελούν την πιο διαδεδομένη τεχνολογία διανεμημένης παραγωγής. Πρόκειται για μια παραδοσιακή και δοκιμασμένη τεχνολογία που συνδυάζει χαμηλό κόστος προμήθειας ανά εγκατεστημένο kW, μεγάλη διαθεσιμότητα σε μεγέθη, δυνατότητα γρήγορης εκκίνησης, υψηλούς συντελεστές απόδοσης και υψηλή λειτουργική αξιοπιστία. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με την ικανότητα των συστημάτων αυτών να εκκινούν χωρίς ηλεκτρική τροφοδότηση από το δίκτυο, το καθιστούν πρωταρχική επιλογή σε εφαρμογές εφεδρικής ισχύος (emergency stand-by-power). Επιπλέον αποτελούν σήμερα την πιο διαδεδομένη μορφή συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής για ισχείς μικρότερες από 1MW. Οι κινητήριες μηχανές λειτουργούν με αέρια ή υγρά καύσιμα. Οι μηχανές υγρών καυσίμων χρησιμοποιούν συνήθως πετρέλαιο αν και υπάρχουν συστήματα βενζίνης ή βαρέων κλασμάτων πετρελαίου (τα βαρύτερα

χρησιμοποιούνται για τους μεγαλύτερους κινητήρες) και βιοκαυσίμων.

Η ταξινόμηση των μηχανών ντίζελ μπορεί να γίνει ανάλογα με το μέγιστο αριθμό στροφών που αναπτύσσονται ανά λεπτό, διακρίνονται σε αργόστροφες, μέχρι 350 σ.α.λ, σε μεσαίων στροφών, μέχρι 1200 σ.α.λ και σε πολύστροφες που φτάνουν τις 5000 σ.α.λ. Ανάλογα με την ισχύ που αποδίδουν στις κανονικές στροφές λειτουργίας τους τις διακρίνουμε σε μηχανές μικρής ισχύος (μέχρι 25 ίππους ανά κύλινδρο), σε μηχανές μέσης ισχύος (από 25-200 ίππους ανά κύλινδρο) και σε μηχανές υψηλής ισχύος 9 πάνω από 200 ίππους ανά κύλινδρο. Επιπλέον ανάλογα με τον αριθμό των κυλίνδρων διακρίνονται σε μηχανές μονοκύλινδρες μέχρι και 24κύλινδρες. Ακόμη ανάλογα με τον αριθμό των χρόνων του κύκλου λειτουργίας τους χωρίζονται σε τετράχρονες και δίχρονες.

### 14.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Στις μηχανές ντίζελ η σχέση συμπίεσης είναι συνήθως 17:1 μέχρι 24:1. Λόγω της υψηλής συμπίεσης η πίεση στο χώρο καύσης των κυλίνδρων της μηχανής ντίζελ φτάνει τις 30-50 ατμόσφαιρες, ενώ η θερμοκρασία στους 700-900° C. Από την υψηλή πίεση του αέρα στους κυλίνδρους αυξάνεται η ισχύς του κινητήρα ντίζελ, ενώ από την υψηλή θερμοκρασία αναφλέγεται το μίγμα αέρα-καυσίμου. Επιπρόσθετα σε μία ντιζελομηχανή η αναλογία βάρους ανά ίππο είναι περίπου 2,8-3 κιλά/ίππο, η οποία είναι αρκετά υψηλή, συγκρινόμενη με μία βενζινομηχανή η οποία έχει αναλογία περίπου 1,3 κιλά/ίππο και οφείλεται στην αναγκαία αύξηση του κυβισμού της μηχανής ντίζελ και στη μεγαλύτερη αντοχή των μερών της στις υψηλές πιέσεις των κυλίνδρων της. Η μηχανή ντίζελ επιπλέον έχει αριθμό στροφών περίπου ίσο με τα 5/8 μιας βενζινομηχανής πράγμα που οφείλεται στη μικρή μέση ταχύτητα των εμβόλων της. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στη μηχανή ντίζελ το καύσιμο αυτοαναφλέγεται κατά το ψεκάσμο του στους κυλίνδρους από την υψηλή θερμοκρασία του πεπιεσμένου αέρα χωρίς τη βοήθεια του σπινθήρα.

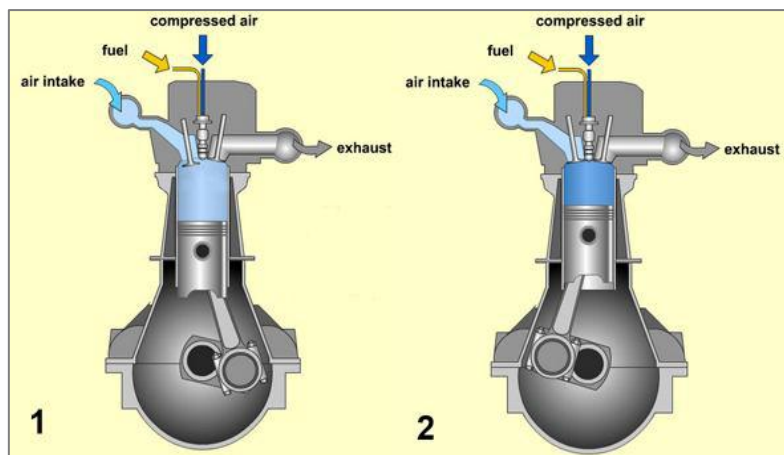
Η μηχανή ντίζελ ακολουθεί κατά τη λειτουργία της το θερμικό κύκλο του ντίζελ ο οποίος χρειάζεται τέσσερις ή δύο χρόνους για την ολοκλήρωση του και την επιτυχία μιας εκτόνωσης. Έχουμε λοιπόν τις φάσεις της: Εισαγωγής- Συμπίεσης- Εκτόνωσης- Εξαγωγής. Παρακάτω αναλύεται ο κύκλος λειτουργίας του τετράχρονου κινητήρα ντίζελ:

#### 1η φάση-εισαγωγής

Το έμβολο ακολουθεί καθοδική πορεία δημιουργώντας υποπίεση. Όση ώρα η βαλβίδα εισαγωγής παραμένει ανοικτή ο θάλαμος καύσης γεμίζει με ατμοσφαιρικό αέρα που μπορεί να περιέχει και καυσαέρια αν υπάρχει σύστημα επανακυκλοφορίας.

#### 2η φάση-συμπίεσης

Τη στιγμή που όλες οι βαλβίδες κλείνουν, το πιστόνι κινείται προς τα πάνω μέχρι να φτάσει στο άνω νεκρό σημείο. Η αυξημένη συμπίεση (25-55bar) προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα (600-900° C) η οποία είναι σχεδόν η διπλάσια από τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου.



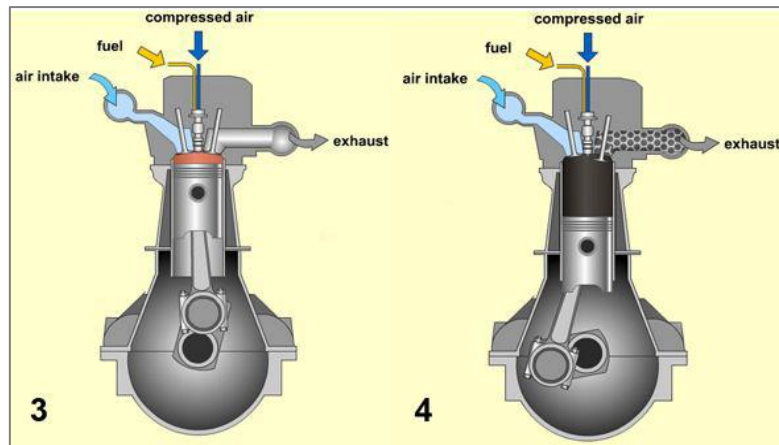
Σχήμα 14.1 Φάσεις εισαγωγής και συμπίεσης.

### 3η φάση-ανάφλεξη & εκτόνωση

Προς το τέλος του χρόνου συμπίεσης πραγματοποιούνται οι ψεκασμοί του καυσίμου στη μορφή ατμών οι οποίοι αναμειγνύονται με το θερμό αέρα. Τότε αυτοαναφλέγονται σε πύρινο περιβάλλον που φτάνει τους 2.500° C και σε πίεση μπορεί να αγγίξει και τα 100 bar. Από τη στιγμή που θα ψεκαστεί το καύσιμο, μέχρι την ανάφλεξη του, υπάρχει καθυστέρηση της αυτανάφλεξης που διαρκεί 0,5-2 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Για αυτό στα πρόσφατα συστήματα πραγματοποιείται από πριν ένας μικροψεκασμός που μειώνει και το χαρακτηριστικό κροτάλισμα των κινητήρων diesel.

### 4η φάση-εξαγωγή

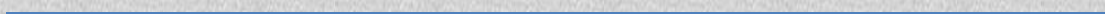
Όταν η φάση εκτόνωσης πλησιάζει στην ολοκλήρωση της και αφού το πιστόνι έχει αρχίσει να ξανανεβαίνει ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής ώστε να βγουν τα καυσαέρια. Η πίεση μειώνεται απότομα στα 3-4 bar και προοδευτικά αγγίζει την ατμοσφαιρική και η βαλβίδα εξαγωγής κλείνει με ένα μικρό βαθμό επικάλυψης με τις εισαγωγής (συνήθως 20 μοίρες).



Σχήμα 14.2 Φάσεις ανάφλεξης- εκτόνωσης και εξαγωγής.

Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*



## 15.1 Γενικά περί Καταφυγίων

Με βάση το νόμο 3105/2003 – Φ.Ε.Κ. 29 Α/10-2-2003, άρθρο 40 περί ορειβατικών καταφυγίων ορίζεται ότι:

1. Ορειβατικό καταφύγιο είναι κτιριακή εγκατάσταση με ογδόντα (80) το πολύ κλίνες, σε υψόμετρο πάνω από εννιακόσια (900) μέτρα που εξυπηρετεί την πεζοπορία, την ορειβασία και την αναρρίχηση. Τα ορειβατικά καταφύγια είναι εγκαταστάσεις ειδικής τουριστικής υποδομής κατά την έννοια της παρ. 3 του άρθρου 2του Ν. 2160/1993.
2. Ορειβατικά μονοπάτια θεωρούνται τα μονοπάτια που χαράσσονται και χρησιμοποιούνται για πεζοπορία είτε στην ελληνική επικράτεια (εθνικά μονοπάτια) είτε αποτελούν τμήματα διεθνών μονοπατιών που διέρχονται από διάφορες χώρες (όπως τα ευρωπαϊκά μονοπάτια Ε4 και Ε6).
3. Η πρόσβαση προς τα ορειβατικά καταφύγια γίνεται από δημόσια ή δασική οδό, όπου ήδη υπάρχουν, ή κυρίως από ορειβατικά μονοπάτια. Την ευθύνη οροσήμανσης και συντήρησης των μονοπατιών έχουν οι φορείς διαχείρισης των καταφυγίων σε συνεργασία με τις αρμόδιες δασικές υπηρεσίες και την Ελληνική Ομοσπονδία Ορειβασίας – Αναρρίχησης (Ε.Ο.Ο.Α.) υπό την εποπτεία του Ε.Ο.Τ.
4. Φορέας διαχείρισης του ορειβατικού καταφυγίου μπορεί να είναι σωματεία ορειβατών, πεζοπόρων, αναρριχητών, η Νομαρχιακή και η Τοπική Αυτοδιοίκηση. Με κοινή απόφαση των Υπουργών Γεωργίας και Ανάπτυξης καθορίζεται ο φορέας διαχείρισης κάθε ορειβατικού καταφυγίου.
5. Η εγκατάσταση και λειτουργία νέων ορειβατικών καταφυγίων είναι επιτρεπτή, εφόσον προβλέπεται σε σχέδια τουριστικής ανάπτυξης, σε σχέδια ανάπτυξης ορεινών περιοχών ή σε σχέδια διαχείρισης δασικών συγκροτημάτων.
6. Για την εγκατάσταση ή την επέκταση ορειβατικού καταφυγίου απαιτείται :
  - α. επ' αόριστον παραχώρηση κατά χρήση δημόσιας δασικής έκτασης εμβαδού από 4 μέχρι 6 στρέμματα με απόφαση του Υπουργείου Γεωργίας ή άδεια επεμβάσεως εάν πρόκειται για ιδιωτική δασική έκταση.
  - β. άδεια της αρμόδιας Διεύθυνσης Τουρισμού.
  - γ. μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων και άδεια οικοδομής.

Δεν επιτρέπεται η παραχώρηση ή η άδεια επέμβασης σε προστατευόμενες περιοχές του άρθρου 18 του Ν. 1650/1986, σε εθνικούς δρυμούς, σε αισθητικά δάση και σε μνημεία της φύσης, εκτός εάν στα σχέδια διαχείρισης αυτών των περιοχών υπάρχει πρόβλεψη για εγκατάσταση και λειτουργία ορειβατικού καταφυγίου.
7. Η παραχωρούμενη δημόσια δασική έκταση διατηρεί το δασικό της χαρακτήρα και δεν επιτρέπεται η χρήση της για άλλους σκοπούς. Ο ίδιος περιορισμός ισχύει και για τα ορειβατικά καταφύγια επί ιδιωτικών εκτάσεων. Σε περίπτωση εγκατάλειψης ή αχρηστίας των εγκαταστάσεων αίρεται η



- παραχώρηση ή η άδεια επεμβάσεως και η παραχωρηθείσα έκταση ανακτά το δασικό της χαρακτήρα και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλους σκοπούς.
8. Με κοινή απόφαση των Υπουργών Ανάπτυξης και Γεωργίας καθορίζονται οι προδιαγραφές των κτιριακών εγκαταστάσεων και ο κανονισμός λειτουργίας των ορειβατικών καταφυγίων.
  9. Νομιμοποιούνται όλα τα υφιστάμενα ορειβατικά καταφύγια που δεν έχουν άδεια οικοδομής, εφόσον χρησιμοποιούνται για τους ανωτέρω σκοπούς. Η νομιμοποίηση συντελείται με κοινή απόφαση των Υπουργών Γεωργίας και Ανάπτυξης, η οποία εκδίδεται μετά από διαπιστωτική πράξη του Ε.Ο.Τ. Στην απόφαση νομιμοποίησης περιλαμβάνεται η κατά χρήση παραχωρούμενη έκταση (εφόσον αυτή δεν υπάρχει), η τεχνική περιγραφή των εγκαταστάσεων και υποδομών και προσαρτάται το τοπογραφικό διάγραμμα της έκτασης.
  10. Στο άρθρο 21 του Ν. 998/1979 (Φ.Ε.Κ. 289 Α) προστίθεται παράγραφος 5 ως εξής : Επιτρέπεται, στα πλαίσια της ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης του κοινού σε θέματα δασοπροστασίας και φυσικού περιβάλλοντος, η δημιουργία «δασικών χωριών» με την εγκατάσταση από τις δασικές υπηρεσίες λύομενων οικημάτων σε επιλεγμένες θέσεις και περιορισμένο αριθμό, μη δυνάμενο να υπερβεί τα τριάντα, για την παροχή καταλυμάτων σε επισκέπτες των δασών. Η μελέτη και εκτέλεση των παραπάνω έργων, λόγω της φύσης και του προορισμού τους, γίνεται αποκλειστικά από τις ειδικές διατάξεις των παραγράφων 1 και 2 του άρθρου 237 του Ν. Δ. 86/1969. Τα «δασικά χωριά» προστίθενται ως ειδική κατηγορία στα μη κύρια ξενοδοχειακά καταλύματα της περίπτωσης Β' της παρ. 1 του άρθρου 2 του Ν. 2160/1993. Οι προδιαγραφές κατασκευής και λειτουργίας των δασικών χωριών καθορίζονται με κοινή απόφαση των Υπουργών Γεωργίας και Ανάπτυξης.
  11. Με κοινές αποφάσεις των Υπουργών Ανάπτυξης και Γεωργίας καθορίζονται οι τεχνικές προδιαγραφές χάραξης, σήμανσης, διάνοιξης και συντήρησης των ορειβατικών μονοπατιών και ρυθμίζεται κάθε ζήτημα που αφορά τις σχετικές τουριστικές δραστηριότητες.
  12. Με απόφαση του Υπουργού Ανάπτυξης καθορίζονται τα απαιτούμενα προσόντα των φυλάκων των ορειβατικών καταφυγίων.



## 15.2 Το ορειβατικό καταφύγιο Φλαμπούρι

Το ορειβατικό καταφύγιο Φλαμπούρι βρίσκεται στην Πάρνηθα στην ομώνυμη κορυφή Φλαμπούρι σε υψόμετρο 1158 μέτρα. Το καταφύγιο υπάγεται στον Ορειβατικό Σύλλογο Αχαρνών. Το κτίριο του καταφυγίου αρχικά εξυπηρετούσε φυλάκιο του στρατού. Μετά το πέρας της χρησιμοποίησής του από το στρατό εγκαταλείφθηκε και παρέμεινε αχρησιμοποίητο για αρκετά χρόνια έως ότου ζητήθηκε από τον Ορειβατικό Σύλλογο Αχαρνών η παραχώρησή του από το Γενικό Επιτελείο Στρατού πράγμα που έγινε.



Βρίσκεται σε απόσταση 1,7 km βόρεια των Θρακομακεδόνων σε περιοχή κατάφυτη από έλατα, σε πείσμα των καιρών αφού οι πυρκαγιές της Πάρνηθας το 2007 το άφησαν ανέπαφο. Το καταφύγιο βρίσκεται μέσα στον εθνικό δρυμό της Πάρνηθας και απ' το σημείο που βρίσκεται φαίνεται όλο το λεκανοπέδιο Αττικής καθώς και οι κορυφές της Εύβοιας και της Πελοποννήσου.



Το καταφύγιο αποτελείται από δύο κτίρια ένα κύριο και ένα βοηθητικό καθώς και από μια ξύλινη αποθήκη. Κάθε κτίριο διαθέτει και σοφίτα. Ο χώρος μπροστά από το καταφύγιο είναι ανοικτός και έχουν τοποθετηθεί παγκάκια για του επισκέπτες.



Το καταφύγιο τροφοδοτείται από συσσωρευτές οι οποίοι φορτίζουν από φωτοβολταϊκά πάνελ. Υπάρχει και γεννήτρια όταν παραστεί ανάγκη για τη συνέχιση της τροφοδοσίας. Η θέρμανση του γίνεται από θερμοδυναμικό τζάκι και σώματα καλοριφέρ προσπαθώντας για τη λιγότερο δυνατή ρύπανση της ατμόσφαιρας. Η τροφοδότηση με νερό γίνεται από παρακείμενη πηγή με τη βοήθεια αντλίας νερού.

Διαθέτει οργανωμένη κουζίνα και προσφέρει φρεσκομαγειρεμένα φαγητά, γλυκά και ροφήματα. Υπάρχει η δυνατότητα διανυκτέρευσης μέχρι 40 ατόμων ανά βραδιά, στον επάνω όροφο του κυρίως κτιρίου, σε ένα χώρο με ξύλινο πάτωμα και ξύλινη οροφή. Παρέχονται για αυτό το λόγο στρώματα, μαξιλάρια και κουβέρτες.



Το καταφύγιο παραμένει ανοικτό όλο το χρόνο από Παρασκευή απόγευμα και το Σαββατοκύριακο ενώ είναι ανοικτό και στις επίσημες αργίες.

Η πρόσβαση στο καταφύγιο γίνεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

## Πεζοπορώντας

Από Θρακομακεδόνες παίρνοντας το κίτρινο μονοπάτι σε ~2 ώρες φτάνετε στο Φλαμπούρι. Το κίτρινο μονοπάτι ξεκινάει από το τέλος της οδού Καστοριάς στους Θρακομακεδόνες. Από το πάρκινγκ του τελεφερίκ ακολουθείτε το μονοπάτι της Χούνης προς Φλαμπούρι. Στην μέση περίπου της διαδρομής (~1,15' ώρες από το σημείο εκκίνησης) κάνετε δεξιά στην διχάλα που συναντάτε ακολουθώντας την ταμπέλα προς Φλαμπούρι. Συνολική διάρκεια μέχρι το καταφύγιο ~2,30' ώρες. Στο Φλαμπούρι θα βρείτε ορειβατικούς χάρτες, με όλα τα μονοπάτια για την ευρύτερη περιοχή της Πάρνηθας.

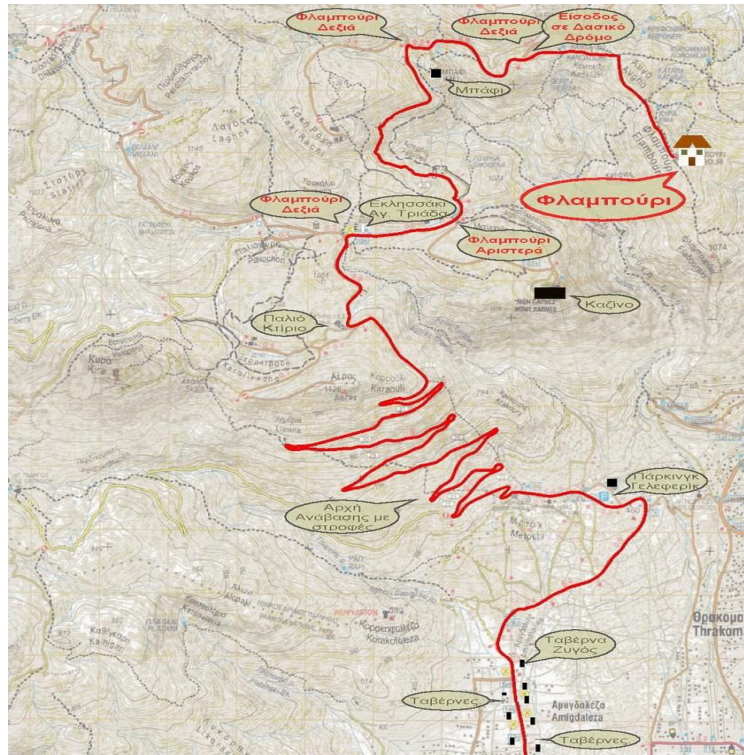


Με αυτοκίνητο ή μοτοσικλέτα.

Στην εθνική Αθηνών-Λαμίας βγαίνετε στην έξοδο προς Πάρνηθα - Μεταμόρφωση, στρίβετε με κατεύθυνση προς Πάρνηθα συνεχίζοντας σε όλες τις διασταυρώσεις ευθεία. Ο δρόμος από κάποιο σημείο και μετά λέγεται Λεωφ. Καραμανλή και στην συνέχεια Πάρνηθος. Μετά από μερικά χλμ. περνάτε την περιοχή με τις ταβέρνες και στην συνέχεια το πάρκινγκ του τελεφερίκ. Ο δρόμος πια αρχίζει και ανεβαίνει την Πάρνηθα για αρκετά χιλιόμετρα. Κάποια στιγμή περνάτε το παλιό ξενοδοχείο και στη επόμενη διασταύρωση κάνετε δεξιά, περνώντας μπροστά από το λευκό εκκλησάκι της Αγ.Τριάδας. Συνεχίζετε τον ασφαλτόδρομο και στην επόμενη διασταύρωση συναντάτε ταμπέλα για Φλαμπούρι όπου κάνετε λοξά αριστερά. Για την υπόλοιπη διαδρομή ακολουθείτε τις μεγάλες ταμπέλες προς Φλαμπούρι και όχι τις μικρές για τους πεζοπόρους. Η τελευταία ταμπέλα σας βάζει σε κατηφορικό βατό χωματόδρομο όπου σε 5'λεπτά με το αυτοκίνητο ή την μοτοσικλέτα και σε 20'λεπτά αν περπατήσετε, θα σας οδηγήσει στο Φλαμπούρι.

Με το τελεφερίκ.

Παίρνετε το τελεφερίκ και ανεβαίνετε στο πάρκινγκ του καζίνο. Από εκεί περνώντας από το ελικοδρόμιο και ακολουθώντας ταμπελίτσες για Φλαμπούρι, πεζοπορείτε σε μονοπάτι ή στον ασφαλτόδρομο και σε ~1.30' ώρα φτάνετε στο Φλαμπούρι.



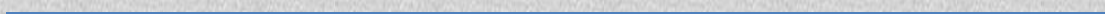
Σχήμα 15.1 Χάρτης πρόσβασης στο ορειβατικό καταφύγιο Φλαμπούρι.



Σχήμα 15.2 Θέα απ' το καταφύγιο.

Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*



## Μελέτη Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος για τη Τροφοδότηση του Ορειβατικού Καταφυγίου.

### 16.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί μελετάται το πρόβλημα της ηλεκτρικής τροφοδότησης του ορειβατικού καταφυγίου Φλαμπούρι Πάρνηθας. Το εν λόγω καταφύγιο βρίσκεται εντελώς απομακρυσμένο από το δίκτυο της ΔΕΗ και επομένως είναι απαραίτητη η εξασφάλιση της ηλεκτρικής ενέργειας που θα το τροφοδοτεί από άλλες πηγές. Η χρήση ντιζελογεννήτριας εκτός από το μεγάλο κόστος που επιφέρει λόγω της αυξημένης τιμής πετρελαίου που κατά κανόνα υπάρχει τα τελευταία χρόνια, έχει και μια σειρά άλλων μειονεκτημάτων όπως η υψηλή στάθμη θορύβου που δεν ταιριάζει στο χώρο του καταφυγίου, το οποίο προορίζεται για ξεκούραση και ανάπαυση ορειβατών και εκδρομέων. Το υψηλό κόστος συντήρησης της ντιζελογεννήτριας, ιδίως μετά την πάροδο κάποιων χρόνων είναι επίσης μεγάλο αφού τείνουν να χρειάζονται συχνά αλλαγή διαφόρων εξαρτημάτων τους, να εμφανίζουν τακτικά βλάβες ενώ πρέπει να συμπεριληφθεί στα προβλήματα που συνεπάγεται η χρήση τους και το πρόβλημα της συχνής μεταφοράς καυσίμων καθώς και της φύλαξής τους με ότι κινδύνους συνεπάγεται η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων εύφλεκτων υλικών.

Απ' την άλλη, η μεγάλη απόσταση που χωρίζει το ορειβατικό καταφύγιο με το δίκτυο διανομής της ΔΕΗ κάνει πολύ μεγάλο το κόστος επέκτασης του δικτύου προς τη μεριά του καταφυγίου και επομένως αυτή κρίνεται ως η πιο ασύμφορη λύση στο πρόβλημα της ηλεκτρικής τροφοδότησης.

Η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προσφέρει μια ικανοποιητική λύση στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του καταφυγίου. Η βελτίωση των τεχνολογιών στον τομέα των ΑΠΕ, η αύξηση του βαθμού απόδοσής τους και οι πιο προσιτές τιμές που υπάρχουν σήμερα δείχνουν πως αποτελεί μονόδρομο η χρησιμοποίησή τους. Σε αυτά όλα προστίθεται φυσικά και το μηδαμινό κόστος καυσίμου που έχουν αυτές οι τεχνολογίες.

Το πρόβλημα που ανακύπτει στην χρήση των ΑΠΕ είναι ότι μία πηγή από μόνη της δεν μπορεί να εξασφαλίσει αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή του καταφυγίου. Έτσι πχ. μια συστοιχία φωτοβολταϊκών θα παρείχε μεν ικανοποιητική ενέργεια κατά τους καλοκαιρινούς μήνες που υπάρχει μεγάλη ηλιοφάνεια, αλλά κατά την περίοδο του χειμώνα όπου ίσως και για εβδομάδες ο ήλιος δεν κάνει την εμφάνισή του θα υπήρχε παντελής έλλειψη ηλεκτρικού ρεύματος. Παρόμοια προβλήματα θα υπήρχαν και από τη χρήση κάποιας άλλης τεχνολογίας ΑΠΕ όπως πχ. μιας ανεμογεννήτριας όπου τους καλοκαιρινούς μήνες η ένταση των ανέμων πέφτει αρκετά.

Άρα η μόνη αξιόλογη λύση στο πρόβλημα της ηλεκτρικής τροφοδότησης είναι ο συνδυασμός περισσότερων της μιας πηγών ΑΠΕ ή αλλιώς η χρήση υβριδικού συστήματος. Με τη χρήση Υβριδικού συστήματος ξεπερνάμε τις προαναφερθείσες

δυσκολίες αφού η μία πηγή ενέργειας αλληλοσυμπληρώνει την άλλη παρέχοντας συνεχή ροή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην δικιά μας τη περίπτωση, το ορειβατικό καταφύγιο Φλαμπούρι Πάρνηθας, επιλέξαμε την εγκατάσταση ενός υβριδικού συστήματος το οποίο αποτελείται από Φωτοβολταϊκά – Ανεμογεννήτρια- Ντιζελογεννήτρια. Ο συνδυασμός των τριών αυτών διαφορετικών πηγών ενέργειας μας εξασφαλίζει μόνιμη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και χαμηλού κόστους λειτουργίας. Το βάρος της τροφοδότησης του καταφυγίου αναλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά και η ανεμογεννήτρια αναλόγως της πιο συμφέρουσας κατά περίπτωση λύσης. Όταν αδυνατεί η μία πηγή να ανταπεξέλθει στην ηλεκτρική τροφοδότηση αναλαμβάνει αυτομάτως η άλλη. Η ντιζελογεννήτρια θα υπάρχει μόνο σαν εφεδρική πηγή σε περίπτωση που κανένα από τα δύο άλλα μέσα δεν επαρκεί για την τροφοδότηση του καταφυγίου ή στην σπάνια περίπτωση ταυτόχρονης βλάβης και των δύο άλλων πηγών.

Το υβριδικό σύστημα θα περιλαμβάνει και συσσωρευτές αποθήκευσης της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας που θα αρκούν για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων του καταφυγίου για 24 ώρες. Έτσι μειώνονται και άλλο οι πιθανότητες χρησιμοποίησης της ντιζελογεννήτριας και επομένως του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται.

Το ορειβατικό καταφύγιο Φλαμπούρι αποτελείται από δύο κτίρια, ένα κύριο και ένα βοηθητικό. Κάθε κτίριο περιλαμβάνει και σοφίτα. Καθημερινά μπορεί να φιλοξενηθούν έως και 30 άτομα στο καταφύγιο πράγμα που σημαίνει ότι οι απαιτήσεις του για ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι ευκαταφρόνητες.

## 16.2 Ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης κατοικίας

Για να μπορέσουμε να προχωρήσουμε στην σχεδίαση του Υβριδικού συστήματος πρέπει να υπολογίσουμε την ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης του ορειβατικού καταφυγίου. Για το λόγο αυτό εργαζόμαστε ως εξής:

- α. Γίνεται λεπτομερής καταγραφή όλων των ηλεκτρικών συσκευών που προβλέπεται να τροφοδοτηθούν στο καταφύγιο, της ισχύος του καθενός από αυτά καθώς και του πιθανού χρόνου λειτουργίας τους σε διάστημα ενός εικοσιτετραώρου.
- β. Υπολογίζεται η ημερήσια ενέργεια κατανάλωσης του καταφυγίου. Για να γίνει αυτό πολλαπλασιάζουμε την ηλεκτρική ισχύ κάθε συσκευής ξεχωριστά με το χρόνο που αναμένεται να λειτουργήσει. Έτσι υπολογίζεται η ηλεκτρική της κατανάλωση σε διάστημα ενός εικοσιτετραώρου ( $E_K = P_K \cdot T$ ). Από το άθροισμα των καταναλώσεων προκύπτει η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης του καταφυγίου.
- γ. Εκτίμηση της μέγιστης ισχύος στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή καταγράφεται η πιθανότητα της ταυτόχρονης λειτουργίας περισσότερων συσκευών και υπολογίζεται η μέγιστη απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς.



Το αυτόνομο υβριδικό σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί όπως είδαμε έχει σαν στόχο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του ορειβατικού καταφυγίου Φλαμπούρι Πάρνηθας. Επειδή τα κτίρια είναι δύο και τα άτομα το χρησιμοποιούν καθημερινά είναι πολλά, είναι λογικό οι ενεργειακές απαιτήσεις να είναι πολύ υψηλές. Για αυτό θα πρέπει να ακολουθηθούν κάποιοι βασικοί κανόνες ώστε το σύστημά μας να είναι οικονομικότερο:

- Είναι ασύμφορο να επιδιώκεται η χρήση υβριδικού συστήματος για τροφοδότηση ηλεκτρικών συσκευών με μεγάλη θερμική κατανάλωση (ηλεκτρικές κουζίνες, ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες, ηλεκτρικά καλοριφέρ). Οι ανάγκες αυτές πρέπει να καλύπτονται από εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως υγραέριο, πετρέλαιο ήλιος κλπ. Στην δική μας τη περίπτωση χρησιμοποιήσαμε ενεργειακό καλοριφέρ για θέρμανση, ηλιακό θερμοσίφωνα και boiler για τη θέρμανση νερού και φούρνο υγραερίου.
- Χρησιμοποιούμε ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/Z) για την αντιμετώπιση αιχμών ζήτησης από το να επιδιώκεται η πλήρης ικανοποίηση των καταναλώσεων με αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μεγάλο βάρος και κόστος. Με το H/Z χρησιμοποιούμε συσσωρευτές μικρότερης χωρητικότητας και φωτοβολταϊκής συστοιχίας και ανεμογεννήτριας μικρότερης ισχύος.
- Χρησιμοποιούμε συσκευές υψηλής ενεργειακής απόδοσης, δηλαδή από ενεργειακή κλάση A και πάνω (A+, A++). Ειδικά για τους λαμπτήρες όπου είναι δυνατόν χρησιμοποιούνται τύπου LED, όπου έχουμε εξαιρετικά μικρή ισχύ κατανάλωσης.

Για να ξεκινήσει η μελέτη του υβριδικού μας συστήματος είναι απαραίτητο να γίνει καταγραφή των καταναλώσεων που λειτουργούν στο χώρο του καταφυγίου. Επειδή οι ενεργειακές ανάγκες του καταφυγίου κατά τη διάρκεια του έτους αλλάζουν σημαντικά από εποχή σε εποχή, όπως και οι συσκευές που λειτουργούν εντός αυτού είναι αναγκαίο να χωριστεί η μελέτη στις πιο χαρακτηριστικές περιόδους λειτουργίας του. Για το λόγο αυτό γίνεται μια λεπτομερής καταγραφή των ηλεκτρικών συσκευών του καταφυγίου, της ισχύος καθενός από αυτά καθώς και του πιθανού χρόνου λειτουργίας τους κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου. Η καταγραφή αυτή χωρίζεται σε ένα τυπικό χειμερινό και ένα καλοκαιρινό μήνα όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες αποκλίσεις στη λειτουργία του καταφυγίου. Τέλος υπολογίζεται η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των συσκευών που λειτουργούν, η εκτιμώμενη ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση κάθε συσκευής καθώς και όλου του καταφυγίου.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ	ΙΣΧΥΣ (kW)	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (kWh)
Εσωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου 1	0,196	7	1,372
Εσωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου 2	0,214	1,5	0,321
Εξωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου	0,043	1	0,043
Φωτισμός Βοηθητικού Κτιρίου	0,17	0,1	0,017
Κυκλοφορητής Τζακιού - Καλοριφέρ	0,1	16	1,6
Αντλία Πίεσης Νερού	0,65	1,2	0,78
Ψυγείο	0,09	9	0,81
Καταψύκτης	0,15	12	1,8
Απορροφητήρας Κουζίνας	0,1	1,3	0,13
Φως Απορροφητήρα	0,0038	0,2	0,00076
Καφετιέρα	0,7	0,5	0,35
Υπολογιστής (φορητός)	0,05	1,5	0,075
Εκτυπωτής	0,01	0,05	0,0005
Τηλεόραση (LED)	0,056	0,3	0,0168
DVD player	0,01	0,3	0,003
Στερεοφωνικό Συγκρότημα	0,12	1,5	0,18
Φούρνος Μικροκυμάτων	0,6	0,15	0,09
Τοστιέρα	0,75	0,3	0,225
Αναμκτήρας Τροφών	0,3	0,05	0,015
Φορτιστής Κινητού	0,012	1,3	0,0156
Άλλοι Υπολογιστές (φορητοί)	0,1	1	0,1
Άλλοι Φορτιστές Κινητών	0,048	1,3	0,0624
Έκτακτες Καταναλώσεις	0,2	0,3	0,06
<b>Σύνολο</b>	<b>4,673</b>		<b>8,067</b>

*Σχήμα 16.1* Χρησιμοποιούμενες ηλεκτρικές συσκευές, ισχύς και χρόνος λειτουργίας τους, ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωσή τους, συνολική εγκατεστημένη ισχύς τους και ολική κατανάλωση του καταφυγίου για ένα τυπικό χειμερινό μήνα.

**Συνολική Ενεργειακή Κατανάλωση:** 8,067 kWh

**Συνολική Ισχύς Φορτίων:** 4,673 kW

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ	ΙΣΧΥΣ	ΩΡΕΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ
-----------	-------	------	------------

ΣΥΣΚΕΥΗ	(kW)	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (kWh)
Εσωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου 1	0,196	4,5	0,882
Εσωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου 2	0,214	1,5	0,321
Εξωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου	0,043	2,3	0,0989
Φωτισμός Βοηθητικού Κτιρίου	0,17	0,1	0,017
Κυκλοφορητής Τζακιού - Καλοριφέρ	0	0	0
Αντλία Πίεσης Νερού	0,65	1,5	0,975
Ψυγείο	0,09	15	1,35
Καταψύκτης	0,15	15	2,25
Απορροφητήρας Κουζίνας	0,1	1,3	0,13
Φως Απορροφητήρα	0,0038	0,2	0,00076
Καφετιέρα	0,7	0,5	0,35
Υπολογιστής (φορητός)	0,05	1,5	0,075
Εκτυπωτής	0,01	0,05	0,0005
Τηλεόραση (LED)	0,056	0,3	0,0168
DVD player	0,01	0,3	0,003
Στερεοφωνικό Συγκρότημα	0,12	1,5	0,18
Φούρνος Μικροκυμάτων	0,6	0,15	0,09
Τοστιέρα	0,75	0,3	0,225
Αναμικτήρας Τροφών	0,3	0,05	0,015
Φορτιστής Κινητού	0,012	1,3	0,0156
Άλλοι Υπολογιστές (φορητοί)	0,1	1	0,1
Άλλοι Φορτιστές Κινητών	0,048	1,3	0,0624
Έκτακτες Καταναλώσεις	0,2	0,3	0,06
<b>Σύνολο</b>	<b>4,573</b>		<b>7,218</b>

*Σχήμα 16.2* Χρησιμοποιούμενες ηλεκτρικές συσκευές, ισχύς και χρόνος λειτουργίας τους, ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωσή τους, συνολική εγκατεστημένη ισχύς τους και ολική κατανάλωση του καταφυγίου για ένα τυπικό καλοκαιρινό μήνα.

**Συνολική Ενεργειακή Κατανάλωση:** 7,218KWh

**Συνολική Ισχύς Φορτίων:** 4,573 KW

Όπου

- Εσωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου 1 : Τραπεζαρία, Κουζίνα, Προθάλαμος κεντρικού κτιρίου.
- Εσωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου 2 : Ξενώνας, Τουαλέτα, Σκάλα – προθάλαμος ξενώνα, Υπόγεια αποθήκη, Κτίριο κολλητά κυρίως κτιρίου.
- Εξωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου : Φως έξω από πόρτα, Φώτα βεράντας.

Παρατηρώντας τους πίνακες διαπιστώνουμε ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι λίγο μεγαλύτερη τον χειμερινό μήνα. Αυτό οφείλεται στη λειτουργία του κυκλοφορητή ο οποίος απουσιάζει παντελώς κατά τους καλοκαιρινούς μήνες αφού δεν υπάρχουν ανάγκες για θέρμανση τότε. Κάτι ανάλογο παρατηρείται και με τη συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια η οποία είναι μεγαλύτερη τους χειμερινούς μήνες. Αποφασίσαμε συνεπώς η μελέτη της υβριδικής εγκατάστασης να γίνει για το μήνα Δεκέμβριο αφού τότε έχουμε τις υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις και παράλληλα τις δυσμενέστερες κλιματολογικές συνθήκες (πολύ μικρός χρόνος ηλιοφάνειας).

Το πρώτο βήμα στην μελέτη του υβριδικού συστήματος αποτελεί η επιλογή της κλίσης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών. Για τη επιλογή μας αυτή χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα **PV GIS**. Το πρόγραμμα αυτό λειτουργεί υπό της αιγίδα της European Commission και αποτελεί ένα εργαλείο για την σωστή εκτίμηση εγκατάστασης φωτοβολταϊκών και της ισχύος που παρέχουν με βάση τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής.

Αφού βρούμε το ορειβατικό καταφύγιο μέσω δορυφόρου και το μαρκάρουμε στο πρόγραμμα PV GIS αρχίζουμε να προσθέτουμε τις υπόλοιπες παραμέτρους για τον υπολογισμό της εγκατάστασής μας. Συγκεκριμένα ορίζουμε ως τεχνολογία φωτοβολταϊκών το κρυσταλλικό πυρίτιο, εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών συλλεκτών 4,3 KW όπως προέκυψαν από τους πίνακες ηλεκτρικών καταναλώσεων. Τρόπος τοποθέτησης των συλλεκτών στο έδαφος πάνω σε διαμορφωμένες βάσεις και αζιμούθιο μηδέν καθώς βρισκόμαστε στο βόρειο ημισφαίριο.

Μετά από διαδοχικές δοκιμές στο πρόγραμμα καταλήξαμε στην επιλογή της κλίσης των 55° για τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, διότι του χειμερινούς μήνες (κατά τους οποίους έχουμε την ελάχιστη παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια), η κλίση αυτή δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.



Σχήμα 16.3 Το ορειβατικό καταφύγιο Φλαμπούρι Πάρνηθας όπως φαίνεται απ' το δορυφόρο στο πρόγραμμα PV GIS.

A screenshot of the PV GIS software interface. The window title is "Radiation database: Classic PVGIS". The interface is organized into several sections:

- Radiation database:** Classic PVGIS (dropdown menu)
- PV technology:** Crystalline silicon (dropdown menu)
- Installed peak PV power:** 4.3 kWp
- Estimated system losses [0;100]:** 28.5 %
- Fixed mounting options:**
  - Mounting position: Free-standing (dropdown menu)
  - Slope [0;90]: 55 °
  - Optimize slope:
  - Azimuth: 0 °
  - Also optimize azimuth:
- Tracking options:**
  - Vertical axis:  Slope [0;90]: 0 ° Optimize:
  - Inclined axis:  Slope [0;90]: 0 ° Optimize:
  - 2-axis tracking:
- Horizon file:** Επιλογή αρχείου (button) Δεν έχει επιλεγεί κανένα αρχείο
- Output options:**
  - Show graphs:  Show horizon:
  - Web page:  Text file:  PDF:

At the bottom, there is a blue "Calculate" button and a "[help]" link. On the right side of the interface, there is a vertical scroll bar and a note: "(Azimuth angle from -180 to 180, East=-90, South=0)".

Σχήμα 16.4 Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα PV GIS.

### 16.3 Υπολογισμός Φωτοβολταϊκού Συστήματος

Στην προηγούμενη ενότητα επιλέξαμε με τη χρήση του προγράμματος PV GIS κλίση  $55^\circ$  για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και Νότιο προσανατολισμό. Επιπλέον, δείξαμε ότι η μικρότερη μέση ημερήσια ενέργεια ηλιακής ακτινοβολίας για την περιοχή του καταφυγίου σ' αυτή τη κλίση είναι:

$$E_{HA} = 2.83 \text{ kWh/m}^2/\text{day} \text{ (για το μήνα Δεκέμβριο)}$$

Η ισχύς αιχμής  $P_{\rho\Sigma}$  της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων μιας ημέρας αυτονομίας είναι:

$$P_{\rho\Sigma} = \frac{E_k \cdot P_{STC} \cdot N}{E_{HA} \cdot \sigma_{AS} \cdot \sigma_{\mu} \cdot (N - n)}$$

όπου,

$P_{STC} = 1 \text{ KW/m}^2$ , ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις πρότυπες συνθήκες STC.

$E_k = 8,067 \text{ KWh}$ , η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης το Χειμώνα.

$E_{HA} = 2.83 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$  (για το μήνα Δεκέμβριο), ημερήσια ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

$\sigma_{AS} = 0,95 \cdot \sigma_{\theta}$ , συντελεστής απωλειών συστοιχίας για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα

Συντελεστής θερμοκρασίας:

$$\sigma_{\theta} = 1 - [(t_a + 30) - 25] \cdot 0,004 = 0,94 \text{ με}$$

$t_a = 7,9^\circ\text{C}$ , μέση μηνιαία θερμοκρασία ημέρας αέρα για το μήνα Δεκέμβριο

$\sigma_{\mu} = n_{conv} \cdot n_w \cdot n_{inv} \cdot n_E = 0,9 \cdot 0,98 \cdot 0,94 \cdot 0,85 = 0,7$ , συντελεστής μεταφοράς απωλειών ενέργειας της εγκατάστασης, η οποία περιλαμβάνει ηλεκτρικό συσσωρευτή, ελεγκτή φόρτισης, γραμμές μεταφοράς και inverter

$N = 31$  ημέρες (χρονική περίοδος αναφοράς)

$n = 1$  ημέρα (αριθμός ημερών αυτονομίας)

Μετά τους απαραίτητους υπολογισμούς προκύπτει ότι:

$$P_{\rho\Sigma} = 4,33 \text{ KW}_p$$

Άρα η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων πρέπει να είναι κοντά σε αυτή την τιμή για την κάλυψη των ενεργειακών μας αναγκών για τους χειμερινούς μήνες.

Για τους καλοκαιρινούς μήνες ισχύει:

$$\sigma_{\theta} = 0,88 \text{ (αφού } t_a = 25,6 \text{ } ^\circ \text{C)}.$$

$$E_{\kappa} = 7,218 \text{ KWh.}$$

$$E_{HA} = 5,62 \text{ KWh/ m}^2 / \text{ day}$$

Άρα η απαιτούμενη ισχύς αιχμής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για το καλοκαίρι είναι:

$$P_{\rho\Sigma} = 2,693 \text{ KW}_p$$

Συνεπώς αρκεί η κάλυψη των αναγκών μας το μήνα Δεκέμβριο για να καλύψουμε όλο το έτος.

Επιλέγουμε τη χρήση Φωτοβολταϊκών πλαισίων της εταιρίας Luxor γερμανικής προέλευσης, σειράς Eco Line, μοντέλο LX-240P .Το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, αποτελείται από 60 κύτταρα, έχει ονομαστική τάση  $240W_p$  και βαθμό απόδοσης 14,89%.



Σχήμα 16.5 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο Luxor Eco Line LX-240P.

### Ηλεκτρικά δεδομένα LX-240P

🚦 Ονομαστική ισχύς  $P_{mp}$  [Wp] 240,00

- ✚ Εύρος  $P_{mp}$  241,50 – 246,49
- ✚ Ονομαστικό ρεύμα  $I_{mp}$  [A] 7,95
- ✚ Ονομαστική τάση  $V_{mp}$  [V] 30,40
- ✚ Ρεύμα βραχυκυκλώματος  $I_{sc}$  [A] 8,49
- ✚ Τάση άνευ φορτίου [V] 37,76
- ✚ Βαθμός απόδοσης σε STC 14,89 %
- ✚ Βαθμός απόδοσης σε 200 W/m<sup>2</sup> 14,18 %
- ✚ NOCT [°C] 47 ± 2°C

### **Οριακές τιμές LX-240P**

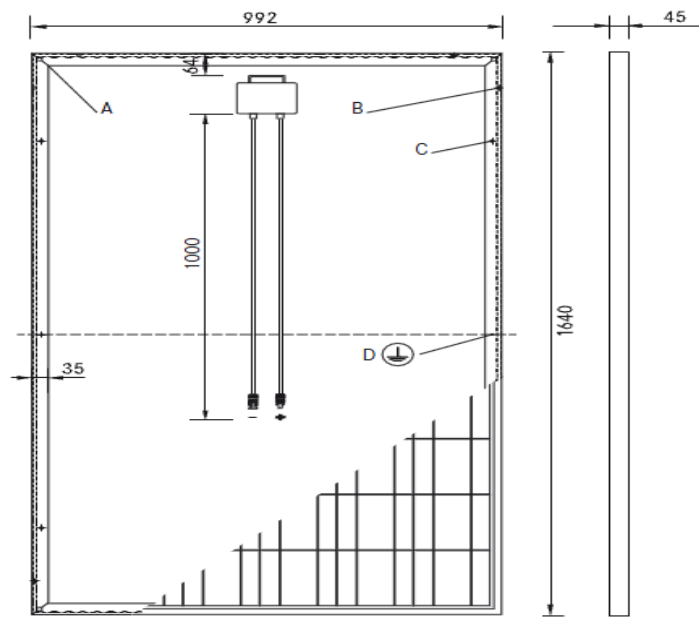
- ✚ Μέγιστη τάση συστήματος [V] 1000 V
- ✚ Μέγιστο ρεύμα επιστροφής [I] 15 A
- ✚ Εύρος θερμοκρασίας - 40 έως 85°C
- ✚ Ζώνη φορτίου χιονιού1 άδεια έως SLZ 3 (σύμφωνα με DIN 1055)
- ✚ Μέγιστο φορτίο πίεσης 5400 Pa
- ✚ Συντελεστής θερμοκρασίας LX-240P
- ✚ Συντελεστής θερμοκρασίας [U] | [I] | [P] - 0,32 % /°C | 0,05 % /°C | - 0,45 % /°C

### **Τεχνικές πληροφορίες LX-240P**

- ✚ Αριθμός κυψελών 6 x 10, τρία strings σε σειρά
- ✚ Μέγεθος κυψελών 156 χιλ. x 156 χιλ.
- ✚ Διαστάσεις πλαισίου (M x Π x Y)2 | Βάρος 1640 χιλ. x 992 χιλ. x 45 χιλ. | 21,0 κιλά
- ✚ Μπροστινό κάλυμμα 3,2 χιλ. σκληρυμένο, ηλιακό γυαλί με ελάχιστο ποσοστό σιδήρου
- ✚ Πλαίσιο ανθεκτικό, ανοδιωμένο αλουμινένιο πλαίσιο σε κατασκευή κοίλου θαλάμου
- ✚ Κουτί σύνδεσης πλαστικό (PPO) (Οξειδίο πολυφαινυλενίου), IP65, αεριζόμενο
- ✚ Καλώδια σύνδεσης 4 mm<sup>2</sup> ηλιακό καλώδιο, μήκος καλωδίου 1,0 μ.
- ✚ Σύνδεση υψηλής ποιότητας σύστημα σύνδεσης, (IP65) MC4 ή ισότιμο
- ✚ Τεστ χαλαζόπτωσης Ø 45 mm | Ταχύτητα 23 m/s
- ✚ Πυρασφάλιση στην περίπτωση BROOF(ti) κατά DIN EN 13501-5

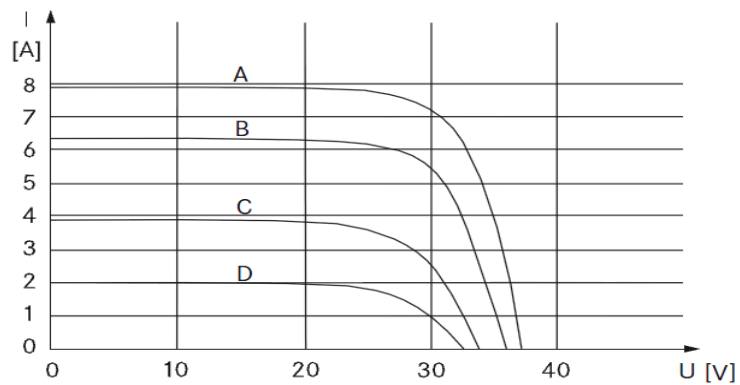


Πίσω όψη / Μπροστινή όψη / Πλαϊνή όψη<sup>2</sup>

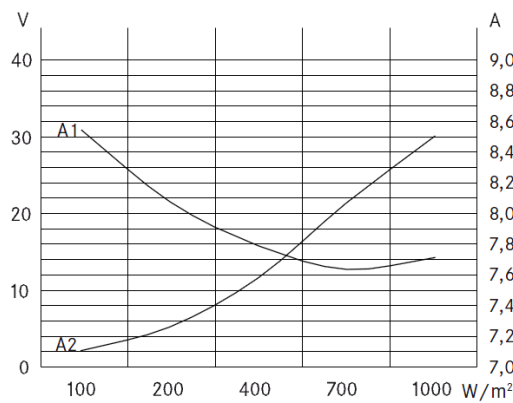


- A: 4 x Αποστράγγιση 10\*10 χιλ
- B: 8 x Άνοιγμα εξαερισμού 3\*7 χιλ
- C: 8 x Οπή συναρμολόγησης<sup>3</sup> d = 7 χιλ
- D: 2 x Γείωση d = 2 χιλ

Χαρακτηριστικές καμπύλες



- A: 1000 W/m<sup>2</sup> | B: 800 W/m<sup>2</sup>
- C: 500 W/m<sup>2</sup> | D: 250 W/m<sup>2</sup>



A1:  $I_{mpp}$  | A2:  $V_{mpp}$

Με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πίνακα το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων που απαιτούνται είναι:

$$N = \frac{P_{\rho\Sigma}}{P_{\rho\Pi}}$$

όπου:

$$P_{\rho\Sigma} = 4,33 \text{ KW}_p \text{ και } P_{\rho\Pi} = 240 \text{ W}_p$$

Επομένως

$$N \cong 18 \text{ περίπου φωτοβολταϊκά πλαίσια}$$

Στη συνέχεια για να υπολογίσουμε την συνδεσμολογία των φωτοβολταϊκών πλαισίων, πρέπει να ορίσουμε τη μέγιστη τάση  $V_{m\sigma}$  της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Η τάση  $V_{m\sigma}$  φροντίζουμε να υπερκαλύπτει τη μέγιστη επιτρεπτή τάση φόρτισης του συσσωρευτή, η οποία προσεγγιστικά ισούται με  $\sim 1,2V_B$ , όπου  $V_B$  η ονομαστική τάση του συσσωρευτή. Επομένως ισχύει:

$$V_{m\sigma} > 1,2 V_B$$

όπου,

$V_B$  ονομαστική τάση του ηλεκτρικού συσσωρευτή και με τιμή 24V.

Επομένως έχουμε:

$$V_{m\sigma} > 28,8V$$

Για να καλύπτουμε το περιορισμό της τάσης που θέσαμε νωρίτερα, επιλέξαμε τη δημιουργία 9 παράλληλων κλάδων, ο καθένας εκ των οποίων θα έχει 2 πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά. Με τη χρήση 18 πλαισίων 240W<sub>p</sub> το καθένα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι τελικά:

$$P_m = v \cdot P_{m1} = 18 \cdot 240 = 4,32 \text{ KW}_p$$

Στη συνέχεια καταχωρούμε τις τιμές που υπολογίσαμε δηλαδή την ισχύ αιχμής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, τον τύπο των πλαισίων, την κλίση των συλλεκτών καθώς και όλα τα κλιματικά και γεωγραφικά δεδομένα στο πρόγραμμα PV GIS, απ' το οποίο προκύπτει ο παρακάτω πίνακας. Σε αυτόν φαίνεται η μέση ημερήσια ενεργειακή απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε κλίση 55°.

## Performance of Grid-connected PV

### PVGIS estimates of solar electricity generation

Location: 38°9'41" North, 23°44'49" East, Elevation: 1143 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-classic

Nominal power of the PV system: 4.3 kW (crystalline silicon)

Estimated losses due to temperature: 9.3% (using local ambient temperature)

Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.8%

Other losses (cables, inverter etc.): 28.5%

Combined PV system losses: 37.0%

Fixed system: inclination=55 deg., orientation=0 deg.				
Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	9.38	291	3.28	102
Feb	10.60	297	3.76	105
Mar	12.90	400	4.61	143
Apr	14.50	434	5.27	158
May	14.20	441	5.34	165
Jun	14.30	428	5.48	165
Jul	14.50	449	5.62	174
Aug	15.00	465	5.80	180
Sep	15.30	458	5.75	173
Oct	12.50	388	4.61	143
Nov	9.44	283	3.39	102
Dec	8.06	250	2.83	87.6
Year	12.60	382	4.65	141
Total for year		4580		1700

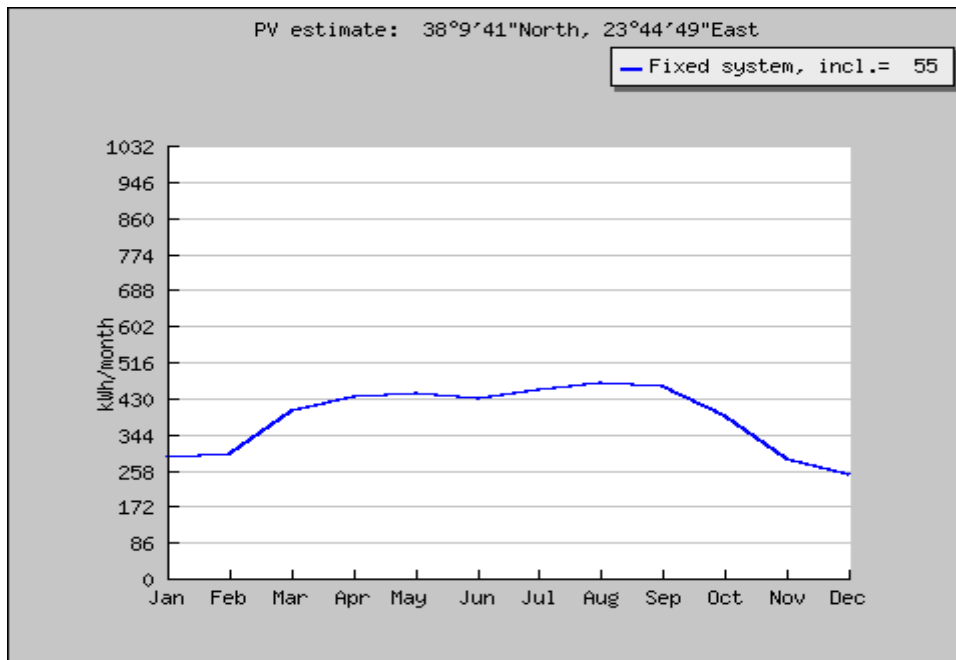
Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh)

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh)

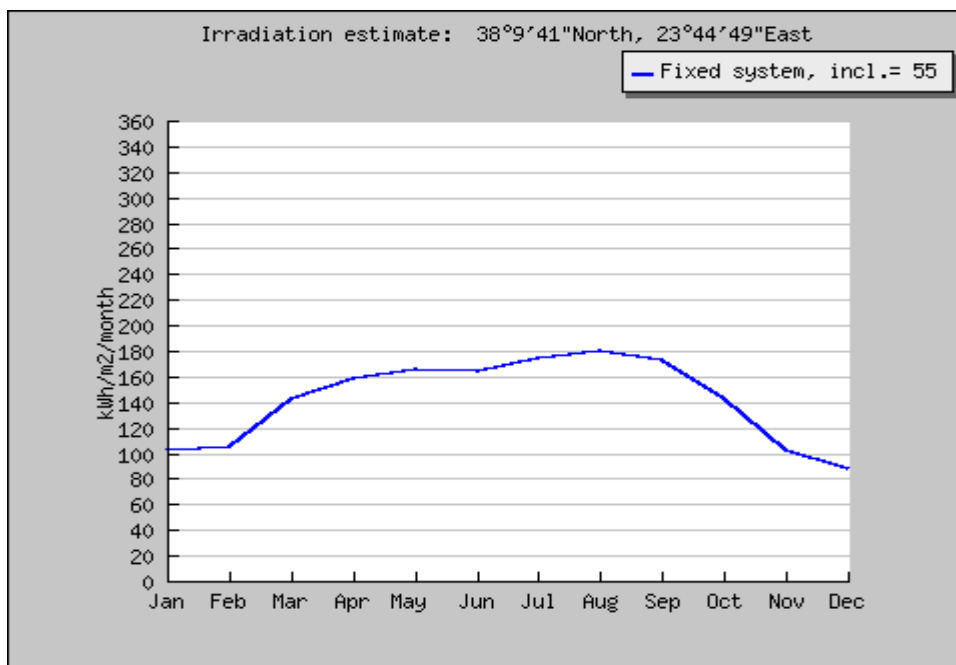
Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>)

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>)

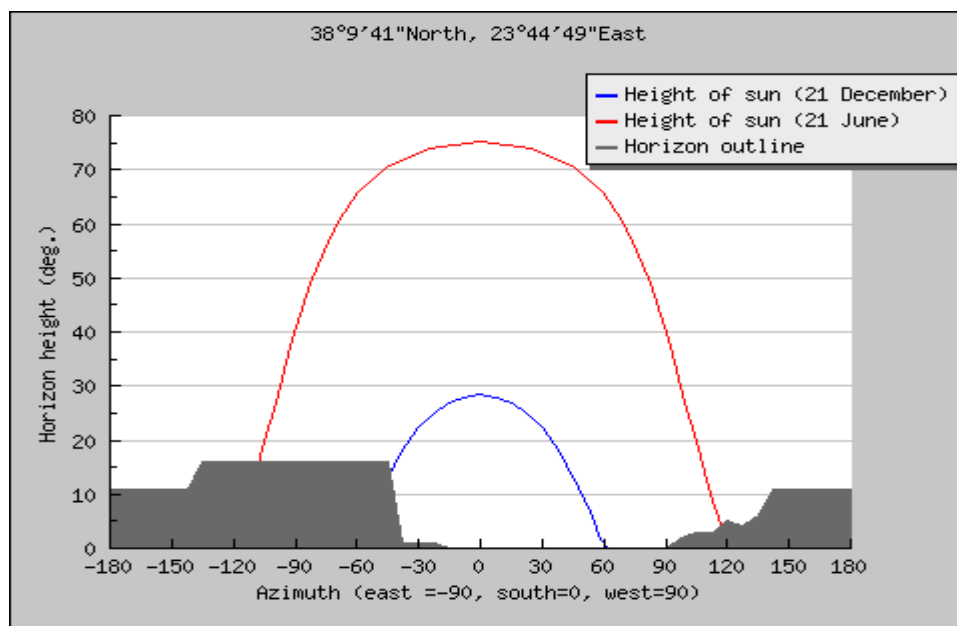
**Σχήμα 16.6** Ενεργειακές απολαβές της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής συστοιχίας στην περιοχή του καταφυγίου.



Σχήμα 16.7 Παραγωγή ενέργειας σε KWh απ' τη φωτοβολταϊκή συστοιχία για κάθε μήνα του έτους σε κλίση 55°.



Σχήμα 16.8 Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε KWh/m<sup>2</sup> για κλίση 55°.



**Σχήμα 16.9** Μεταβολή του ύψους του ορίζοντα στην περιοχή του καταφυγίου σε μοίρες στο θερινό ηλιοστάσιο και στο χειμερινό ηλιοστάσιο.

Απ' τα παραπάνω δεδομένα φαίνεται ότι η εγκατάσταση καλύπτει πλήρως τις ενεργειακές μας ανάγκες, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, και μάλιστα το μήνα Δεκέμβριο κατά τον οποίο έχουμε τις δυσμενέστερες συνθήκες, η ενέργεια που παράγεται είναι ακριβώς ίση με τις ενεργειακές μας απαιτήσεις. Επομένως δεν έχει γίνει υπερδιαστασιολόγηση του εν λόγω συστήματος και οι εφεδρικές πηγές που θα υπάρξουν θα έχουν στόχο να καλύψουν τις αιχμές ζήτησης μέσα στη μέρα και τις ημέρες αυτονομίας.

## 16.4 Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών συλλεκτών με βέλτιστη κλίση 55°, για όλο το χρόνο.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η ρύθμιση της κλίσης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών γίνεται δύο ή και τέσσερις φορές το χρόνο για βέλτιστη απόδοση, σε όλη τη διάρκεια του έτους. Εμείς θα υπολογίσουμε για όλο το χρόνο, την απόσταση ανάμεσα στις σειρές, για να μην έχουμε σκίαση, με σταθερή βέλτιστη κλίση 55°.

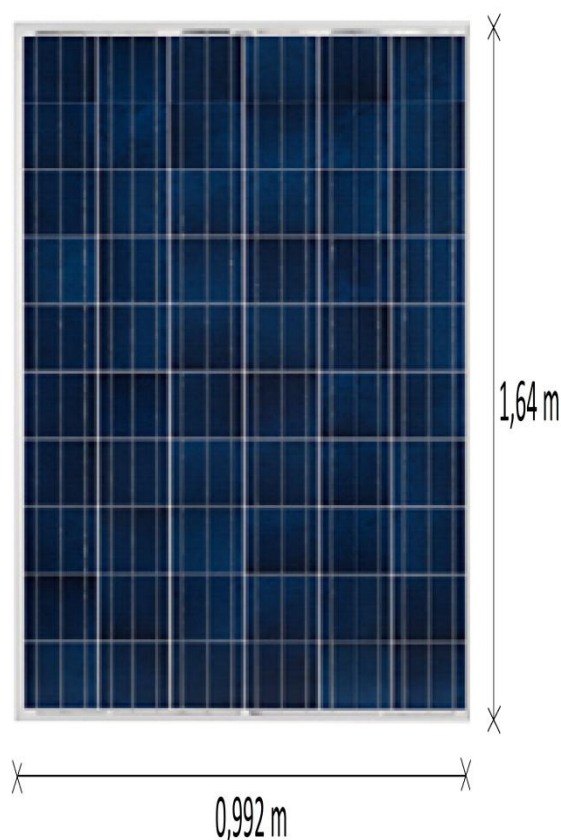
Τα δεδομένα μας είναι τα εξής :

$\delta = - 23,45^\circ$ , η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου).

$\Phi = 38^\circ$ , το γεωγραφικό πλάτος για την περιοχή του ορεινού καταφυγίου.

$B = 55^\circ$ , Η βέλτιστη κλίση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών για όλο τον χρόνο.

Διαστάσεις φωτοβολταϊκού συλλέκτη :



Σχήμα 16.10 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο Luxor Eco Line LX-240P.

Μήκος  $h = 1,64 \text{ m}$  – Πλάτος  $L = 0,992 \text{ m}$  – Πάχος  $v = 0,045 \text{ m}$ .

Όπως υπολογίσαμε παραπάνω θα χρησιμοποιήσουμε 18 τέτοια, φωτοβολταϊκά πλαίσια για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του ορεινού καταφύγιου. Κατά την τοποθέτηση στον ειδικά μελετημένο χώρο δίπλα από το ορεινό καταφύγιο, θα κατασκευάσουμε φωτοβολταϊκό πάνελ το οποίο θα αποτελείται από δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετημένα οριζόντια. Δηλαδή το ύψος του φωτοβολταϊκού πάνελ θα είναι  $2L = 1,984 \text{ m}$  και το πλάτος θα είναι  $h = 1,64 \text{ m}$ . Έτσι θα σχηματίσουμε δύο σειρές (συστοιχίες) με 5 στην πρώτη και 4 στην δεύτερη φωτοβολταϊκά πάνελ (σχήμα 16.12).

Έχουμε επίσης, γωνία  $\theta = \varphi - \delta = 38^\circ - (-23,45^\circ) \Rightarrow \theta = 61,45^\circ$ .

Το ύψος του Ήλιου κατά την ηλιακή μεσημβρία, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση,

$$n_n = 90^\circ - \theta = 90^\circ - 61,45^\circ \Rightarrow n_n = 28,55^\circ.$$

Η απόσταση ανάμεσα στις σειρές θα είναι:

$$x = 2L \left[ \frac{\eta\mu(n_n + B)}{\eta\mu n_n} \right] = 1,984 \left[ \frac{\eta\mu(28,55^\circ + 55^\circ)}{\eta\mu 28,55^\circ} \right] \Rightarrow$$

$$x = 1,984 \left[ \frac{\eta\mu 83,5^\circ}{\eta\mu 28,55^\circ} \right] = 1,984 \left[ \frac{0,99}{0,47} \right] \Rightarrow$$

$$x = 4,12 \text{ m.}$$

Η απόσταση στη βάση θα είναι :

Πλάτος βάσης :

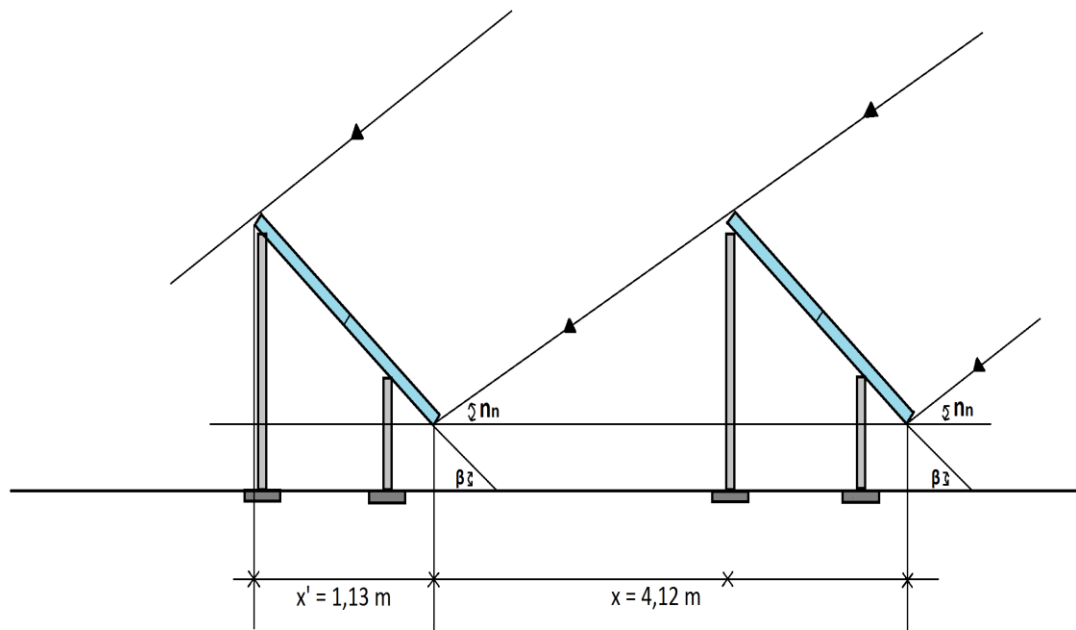
$$x' = 2L \cdot \sigma\upsilon\nu B = 1,984 \cdot \sigma\upsilon\nu 55^\circ \Rightarrow$$

$$\mathbf{x' = 1,13 \text{ m.}}$$

Το πλάτος  $Y'$  που καταλαμβάνουν στο έδαφος οι δύο σειρές θα είναι :

$$Y' = [(v-1) \cdot x + x'] = [(2-1) \cdot 4,12 + 1,13] \Rightarrow$$

$$\mathbf{Y' = 5,25 \text{ m.}}$$



**Σχήμα 16.11** Τρόπος στήριξης συλλεκτών στο έδαφος, πλάγια όψη, (τοποθέτηση μεταλλικών βάσεων) για μόνιμη κλίση, για γωνία  $55^\circ$ .

Το μήκος  $y_1$  της 1<sup>ης</sup> σειράς θα είναι :

$$y_1 = K \cdot h = 5 \cdot 1,64 \Rightarrow$$

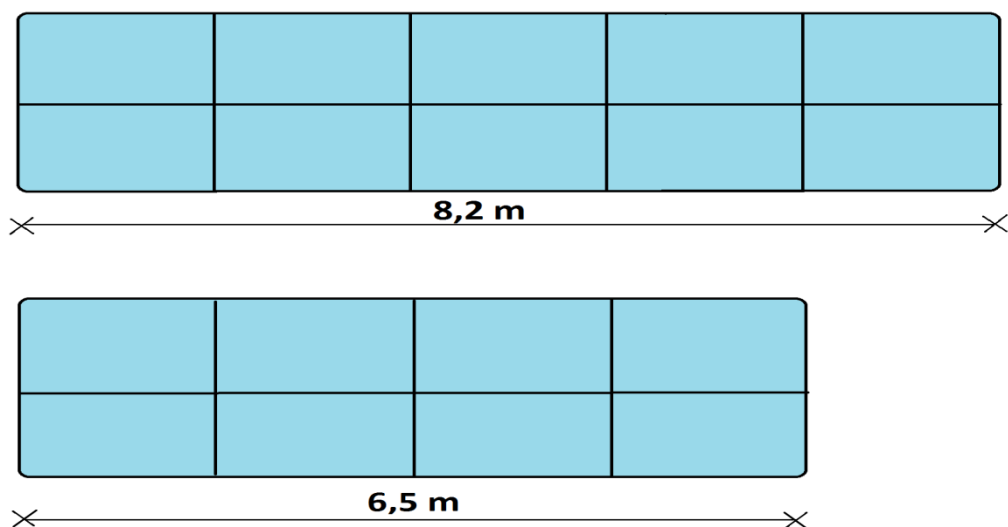
$$y_1 = \mathbf{8,2 \text{ m.}}$$

Το μήκος  $y_2$  της 2<sup>ης</sup> σειράς θα είναι :

$$Y_2 = K \cdot h = 4 \cdot 1,64 \Rightarrow$$

$$y_2 = \mathbf{6,5 \text{ m.}}$$





Σχήμα 16.12 Πρόσοψη φωτοβολταϊκών συλλεκτών.

Υπολογισμός εμβαδού 1<sup>ης</sup> σειράς (5 φωτοβολταϊκά πάνελ).

$$F_{s1} = y_1 \cdot x' = 8,2 \cdot 1,13 \Rightarrow$$

$$F_{s1} = 9,266 \text{ τμ.}$$

Υπολογισμός εμβαδού 2<sup>ης</sup> σειράς (4 φωτοβολταϊκά πάνελ).

$$F_{s2} = y_2 \cdot x' = 6,5 \cdot 1,13 \Rightarrow$$

$$F_{s2} = 7,345$$

Διαφορά μεταξύ 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> σειράς:

$$F_{s1-s2} = 9,266 - 7,345 = 1,921 \text{ τμ}$$

Η συνολική έκταση που απαιτείται για την τοποθέτηση των 9 φωτοβολταϊκών πάνελ (18 Φ/Β πλαίσια), σε 2 σειρές, χωρίς να έχουμε σκίαση, είναι :

$$F_s = y_1 \cdot y' = 8,2 \cdot 5,25 \Rightarrow$$

$$F_s = 43,05 \text{ τμ.}$$

Αφαιρόντας από το  $F_s$  το  $F_{s1-s2}$ , θα έχουμε τελικά το εμβαδόν που απαιτείται για την τοποθέτηση των 9 φωτοβολταϊκών πλαισίων :

$$F_{ES} = F_s - F_{s1-s2} = 43,05 - 1,921 \Rightarrow$$

$$F_{ES} = \mathbf{41,129 \text{ τμ.}}$$

## 16.5 Υπολογισμός χωρητικότητας συσσωρευτών

Κατόπιν υπολογίζεται η χωρητικότητα  $C$  του ηλεκτρικού συσσωρευτή. Ισχύει ο παρακάτω τύπος:

$$C = \frac{n \cdot E_k}{\sigma_{\gamma B} \cdot \sigma_{\epsilon K} \cdot \beta_{\epsilon K} \cdot V_B}$$

όπου,

$E_k = 8,067 \text{ KWh}$ , η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης για τους χειμερινούς μήνες.

$\sigma_{\gamma B} = 0,8$ , συντελεστής γύρασης συσσωρευτή.

$\sigma_{\epsilon K} = 0,91$ , συντελεστής μεταφοράς ενέργειας στο κύκλωμα εκφόρτισης

$\beta_{\epsilon K} = 0,6$ , βάθος εκφόρτισης συσσωρευτών για 1 ημέρα αυτονομίας

$n = 1$  ημέρα

$V_B = 24V$  η ονομαστική τάση συσσωρευτή

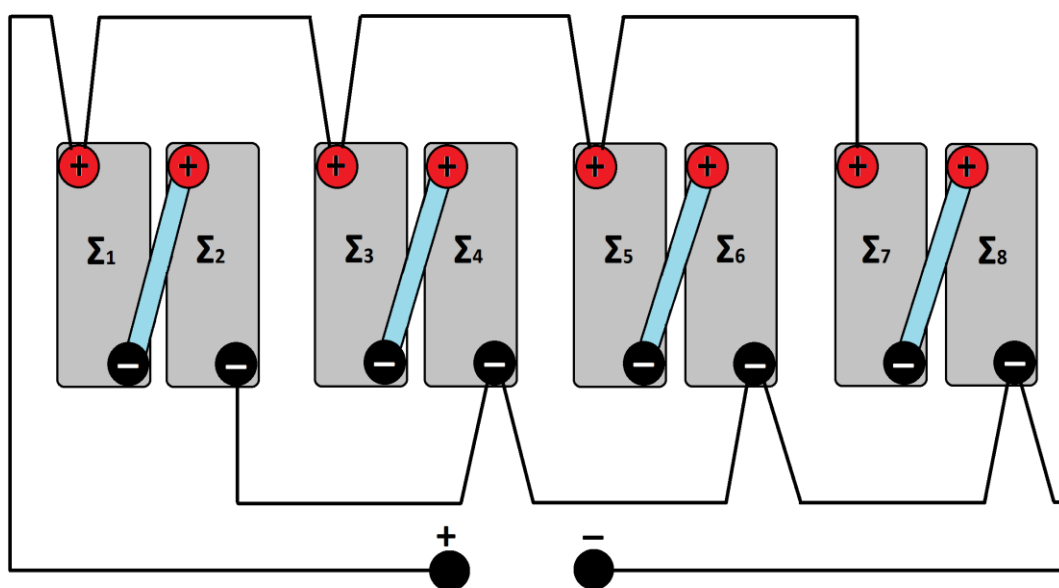
Από την παραπάνω σχέση η χωρητικότητα προκύπτει  $C = 769,53\text{Ah}$

Θα χρησιμοποιήσουμε στο σύστημά μας συσσωρευτές της εταιρίας Solar Systems τύπου AGM 200AH με τάση 12V και χωρητικότητα 200Ah/4h. Προτιμήθηκαν συσσωρευτές τύπου AGM διότι χρησιμοποιούν Boron-Silicate Glass Mat μεταξύ των πλακών. Ο ηλεκτρολύτης είναι μέσα στο Glass Mat και δεν υπάρχει κίνδυνος διαρροής σε περίπτωση σπασίματος της μπαταρίας. Επίσης δεν υπάρχει κίνδυνος παγώματος της μπαταρίας σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες αφού δεν υπάρχουν υγρά μέσα. Η τάση φόρτισης είναι η ίδια όπως για κάθε απλή μπαταρία και λόγω του ότι η εσωτερική αντίσταση είναι εξαιρετικά μικρή δεν υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης της μπαταρίας κάτω από συνθήκες γρήγορη φόρτισης ή εκφόρτισης. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι πολύ χαμηλός της τάξης του 1-3% μηνιαία που σημαίνει ότι μπορούν να μείνουν εκτός φόρτισης για περισσότερο χρονικό διάστημα χωρίς να πέσει ιδιαίτερα η απόδοση της. Οι πλάκες στην AGM είναι ιδιαίτερα συμπαγείς και αντέχουν περισσότερους κραδασμούς από κάθε άλλη μπαταρία. Έχουν διάρκεια ζωής 10-12 χρόνια ενώ είναι κατάλληλες για κυκλικές, πολλαπλές φορτίσεις με εφαρμογές σε φωτοβολταϊκά συστήματα.



*Σχήμα 16.13* Συσσωρευτής Solar Systems AGM 200AH τάσης 12V και χωρητικότητας 200Ah.

Η συστοιχία των συσσωρευτών θα περιλαμβάνει 4 παράλληλους κλάδους με 2 συσσωρευτές σε σειρά ανά κλάδο, δηλαδή συνολικά απαιτούνται 8 συσσωρευτές. Η σύνδεση σε σειρά καθορίζει την ονομαστική τάση ( $V_B = 2 \cdot 12 = 24V$ ) και η παράλληλη σύνδεση καθορίζει την ονομαστική χωρητικότητα ( $C = 4 \cdot 200 = 800Ah$ ). Τα καλώδια θα πρέπει να έχουν κατάλληλη διατομή για να μεταφέρουν με όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες (πτώση τάσης, ανάπτυξη θερμότητας κλπ) το ηλεκτρικό ρεύμα από τον αυτόματο ρυθμιστή – φορτιστή προς τους συσσωρευτές και από εκεί στον ηλεκτρονικό αντιστροφέα. Στα σημεία σύνδεσης με τους πόλους θα πρέπει να γίνεται χρήση ακροδεκτών – σφικτήρων και θα εξασφαλίζεται πολύ καλή ηλεκτρική σύνδεση. Οι πόλοι πριν από τη σύνδεση θα πρέπει να καθαρίζονται με βούρτσα και να πλένονται με διάλυμα σόδας. Πριν και μετά τη σύσφιξη των ακροδεκτών πρέπει να αλείφονται με αντιδιαβρωτικό γράσο ή βαζελίνη.



*Σχήμα 16.14* Τρόπος σύνδεσης συσσωρευτών υβριδικού συστήματος.

Η κάθε συστοιχία έχει μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης:

$$\frac{200Ah}{4h} = 50A$$

και συνολικά οι 4 συστοιχίες  $50 \cdot 4 = 200A$ . Η συνολική ισχύς που μας παρέχουν σ' αυτή την περίπτωση είναι:

$$P = V \cdot I \Rightarrow P = 24 \cdot 200 \Rightarrow P = 4800W$$

Επομένως υπερκαλύπτεται η ισχύς αιχμής των 4673W.

## 16.6 Επιλογή Ρυθμιστή Φόρτισης

Το επόμενο βήμα μας είναι η επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή – ρυθμιστή φόρτισης. Η τάση του ρυθμιστή φόρτισης πρέπει να είναι ίση με την ονομαστική τάση του συσσωρευτή, δηλαδή στην περίπτωσή μας 24V. Το μέγιστο ρεύμα εισόδου του ρυθμιστή φόρτισης προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε τη μέγιστη ένταση ρεύματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με το συντελεστή ασφαλείας 1,2. Ισχύει:

$$I_{m\Sigma} = I_{m\Pi} \cdot N_{\Pi} = 7,95 \cdot 9 = 71,55 \text{ A}$$

όπου

$I_{m\Sigma}$  η μέγιστη ένταση ρεύματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας .

$I_{m\Pi} = 7,95$  η μέγιστη ένταση ρεύματος του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

$N_{\Pi} = 9$ , ο αριθμός των παράλληλων κλάδων της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Άρα το μέγιστο ρεύμα εισόδου του ρυθμιστή φόρτισης είναι:  $1,2 \cdot I_{m\Sigma} = 85,86 \text{ A}$

Η ονομαστική τάση στην είσοδο του ρυθμιστή φόρτισης προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε την ονομαστική τάση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με το συντελεστή ασφαλείας 1,2. Ισχύει:

$$V_{m\Sigma} = V_{m\Pi} \cdot N_{\Sigma} = 30,4 \cdot 2 = 60,8 \text{ V}$$

όπου

$V_{m\Sigma}$  η ονομαστική τάση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας

$V_{m\Pi} = 30,4$  , η ονομαστική τάση του φωτοβολταϊκού πλαισίου

$N_{\Sigma} = 2$  , ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά

Άρα η ονομαστική τάση εισόδου του ρυθμιστή φόρτισης είναι:  $1,2 \cdot V_{m\Sigma} = 72,96 \text{ V}$

Αντίστοιχα προκύπτει και η τάση στη λειτουργία χωρίς φορτίο η οποία είναι 90,6 V.

Το ρεύμα εξόδου του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να μπορεί να δώσει το μέγιστο ρεύμα στα φορτία κατανάλωσης που λειτουργούν ταυτόχρονα. Θεωρούμε ότι η μέγιστη απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς για την ταυτόχρονη λειτουργία συσκευών είναι

$P_K = 4,673 \text{ KW}$ . Η τάση κατανάλωσης είναι  $V_K = 230 \text{ V}$ . Άρα το ρεύμα εξόδου θα είναι  $P_K/V_K = 20,3 \text{ A}$ . Επομένως το μέγιστο ρεύμα εξόδου είναι  $20,3 \cdot 1,2 = 24,36 \text{ A}$ .

Συνεπώς, θα πρέπει να επιλέξουμε ελεγκτή – ρυθμιστή φόρτισης με τα εξής χαρακτηριστικά:

- μέγιστο ρεύμα εισόδου: 85,86 A
- ονομαστική τάση εισόδου: 72,96 V
- τάση στη λειτουργία χωρίς φορτίο: 90,6 V
- μέγιστο ρεύμα εξόδου: 24,36 A

Επιλέγεται ο ρυθμιστής FM80-150VDC Charge Controller, της εταιρίας FLEXmax.



**Σχήμα 16.15** Ο ρυθμιστής φόρτισης FM80-150VDC Charge Controller, της εταιρίας FLEXmax.

<b>FLEXmax FM80-150VDC Specifications</b>	
<b>Max PV Input Current</b>	95 A
<b>Maximum Output Current</b>	80 A at 104° F (40°C) with adjustable current limit
<b>Maximum Solar Array STC Nameplate</b>	7500 Watts
<b>NEC Recommended Solar Array STC Nameplate</b>	5000 Watts
<b>PV Open Circuit Voltage (VOC)</b>	150 VDC absolute maximum coldest conditions / 145 VDC start-up and operating maximum
<b>Power Conversion Efficiency</b>	97.5% at 80 A in a 48 VDC System - Typical
<b>Charging Regulation</b>	Five Stages: Bulk, Absorption, Float, Silent and Equalization
<b>Voltage Regulation Set points</b>	10 to 60 VDC user adjustable with password protection
<b>Equalization Charging</b>	Programmable Voltage Setpoint and Duration - Automatic Termination when completed
<b>Battery Temperature Compensation</b>	Automatic with optional RTS installed / 5.0 mV per °C per 2V battery cell
<b>Voltage Step-Down Capability</b>	Can charge a lower voltage battery from a higher voltage PV array - Max 150 VDC input
<b>Programmable Auxilary Control Output</b>	12 VDC output signal which can be programmed for different control applications (Maximum of 0.2 amps DC)
<b>Status Display</b>	3.1" (8 cm) backlit LCD screen - 4 lines with 80 alphanumeric characters total
<b>Remote Display and Controller</b>	Optional Mate or Mate2 with RS232 Serial Communications Port
<b>Network Cabeling</b>	Proprietary network system using RJ 45 Modular Connectors with CAT 5e Cable (8 wires)
<b>Data Logging</b>	Last 128 days of Operation - Amp Hours, Watt Hours, Time in Float , Peak Watts, Amps, Solar Array Voltage, Max Battery Voltage Min Battery Voltage and Absorb for each day along with total Accumulated Amp Hours, and kW Hours of production
<b>Hydro Turbine Applications</b>	Consult factory for approved Turbines
<b>Positive Ground Applications</b>	Requires two Pole Breakers for switching both positive and Negative Conductors on both Solar Array and Battery Connections (HUB 4 and HUB 10 can not be used for use in positive ground applications)
<b>Operating Temperature Range</b>	Minimum -40° to maximum 60° C (Power capacity of the controller is automatically derated when operated above 40° C)
<b>Environmental Rating</b>	Indoor Type 1
<b>Conduit Knockouts</b>	One 1" (35mm) on the back; One 1" (35mm) on the left side; Two 1" (35mm) on the bottom
<b>Warranty</b>	Standard 5 year / Available 10 Year
<b>Weight</b>	15.75 lbs (7.10 kg)
<b>Dimensions</b>	21" x 10.5" x 9.75" (53 x 27 x 25 cm)
<b>Options</b>	Remote Temperature Sensor (RTS), HUB 4, HUB 10, MATE, MATE 2
<b>Certifications</b>	ETL Listed to UL1741, CSA C22.2 No. 107.1

Σχήμα 16.16 Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών του ρυθμιστή φόρτισης FLEXmax FM80-150VDC.

## 16.7 Επιλογή μετατροπέα τάσης (Inverter)

Στη συνέχεια, προχωρούμε στην επιλογή του κατάλληλου μετατροπέα τάσεως DC/AC (inverter). Ο μετατροπέας αυτός θα πρέπει να καλύπτει τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Τάση εισόδου ίση με την ονομαστική τάση των συσσωρευτών (δηλαδή 24 V).
- Η ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ  $P_k$  των φορτίων που λειτουργούν ταυτόχρονα (δηλαδή 4,673 KW όπως θεωρήσαμε νωρίτερα).
- Ο μετατροπέας θα πρέπει να έχει απόδοση τριπλάσιας ισχύος για τουλάχιστον 10sec.
- Η τάση εξόδου του μετατροπέα θα πρέπει να είναι ίση με την τάση των φορτίων κατανάλωσης, δηλαδή 230 V.
- Η κυματομορφή της εξόδου θα πρέπει να είναι τροποποιημένο ή διαμορφωμένο ημίτονο ή πλήρες ημίτονο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω επιλέγουμε τον inverter Quattro 24/3000/70-50/30. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του μετατροπέα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.



Σχήμα 16.17 Ο μετατροπέας τάσεως DC/AC (inverter) Quattro 24/3000/70-50/30.



<b>INVERTER QUATTRO 24/3000/70-50/30</b>	
<b>PowerControl / PowerAssist</b>	Yes
<b>Integrated Transfer switch</b>	Yes
<b>AC inputs (2x)</b>	Input voltage range: 187-265 VAC Input frequency: 45 – 65 Hz
<b>Maximum feed through current (A)</b>	2x100
<b>Input voltage range (V DC)</b>	19 – 33V
<b>Output</b>	Output voltage: 230 VAC $\pm$ 2% Frequency: 50 Hz $\pm$ 0,1%
<b>Cont. output power at 25 °C (W)</b>	7000
<b>Cont. output power at 40 °C (W)</b>	6300
<b>Peak power (W)</b>	16000
<b>Maximum efficiency (%)</b>	96
<b>Zero-load power (W)</b>	35
<b>Zero load power in AES mode (W)</b>	30
<b>Zero load power in Search mode (W)</b>	10
<b>GENERAL</b>	
<b>Auxiliary output (A)</b>	50
<b>Programmable relay</b>	3x
<b>Protection</b>	a-g
<b>VE.Bus communication port</b>	For parallel and three phase operation, remote monitoring and system integration
<b>General purpose com. port</b>	2x
<b>Characteristics</b>	Operating temp.: -20 to +50 °C Humidity (non condensing): max. 95%
<b>ENCLOSURE</b>	
<b>Characteristics</b>	Material & Colour: aluminium (blue RAL 5012) Protection category: IP 21
<b>Battery-connection</b>	Four M8 bolts (2 plus and 2 minus connections)
<b>230 V AC-connection</b>	Screw terminals 13 mm <sup>2</sup> (6 AWG)
<b>Weight (kg)</b>	45
<b>Dimensions (hxwx d in mm)</b>	470 x 350 x 280
<b>STANDARDS</b>	
<b>Safety</b>	EN 60335-1, EN 60335-2-29
<b>Emission, Immunity</b>	EN55014-1, EN 55014-2, EN 61000-3-3

*Σχήμα 16.18 Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών inverter Quattro 24/3000/70-50/30.*

### 16.8 Υπολογισμός διατομής καλωδίων.

(έλεγχος με βάση την πυκνότητα ρεύματος, πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384 και έλεγχος με βάση την επιτρεπόμενη πτώση τάσης που σύμφωνα με τους διεθνείς ηλεκτρικούς κανόνες National Electric Code, πρέπει να είναι μικρότερη του 5%.)

A) Διαδρομή από ομάδα φωτοβολταϊκών συλλεκτών μέχρι το μετατροπέα.

1. Έλεγχος με βάση την πυκνότητα ρεύματος.

$$I_{\Sigma} = 9 \cdot 7,95 = 71,55 \text{ A.}$$

Επειδή η θερμοκρασία του εδάφους κατά την καλοκαιρινή περίοδο είναι 25 °C περίπου, με βάση τα στοιχεία του πίνακα 52-Δ<sub>2</sub>, του προτύπου ΕΛΟΤ HD384, θα έχουμε συντελεστή διόρθωσης  $f_2 = 0,95$ .

Επίσης συντελεστής διόρθωσης λόγω διαφορετικής ειδικής θερμικής αντίστασης του εδάφους (3 k.m/W),  $f_6 = 0,96$  (πίνακας 52-Δ<sub>2</sub>).

Επομένως :

$$I'_{\Sigma} = I_{\Sigma} / f_2 \cdot f_6$$

$$I'_{\Sigma} = 71,55 / 0,95 \cdot 0,96 = 78,45 \text{ A.}$$

Από τον πίνακα 52-K<sub>3</sub>, βάση πρότυπου ΕΛΟΤ HD384, στήλη 3<sup>η</sup>, θα έχουμε διατομή καλωδίου 16 mm<sup>2</sup>. Το καλώδιο που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι HO7RN-F με μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση στα 95 A. Με βάση λοιπόν την πυκνότητα ρεύματος και τις συνθήκες λειτουργίας, έχουμε τύπο και διατομή καλωδίου:

$$\mathbf{HO7RN-F 2 \times 16 \text{ mm}^2}$$

2. Έλεγχος με βάση την επιτρεπόμενη πτώση τάσης ( $U_{\pi\pi\%} < 5\% U_{\text{nom}}$ ).

Η απόσταση από τους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες μέχρι το ηλεκτροστάσιο του καταφυγίου, είναι  $l = 15 \text{ m}$  και το συνολικό μήκος αγωγών καλωδίου,  $L = 2l = 2 \cdot 15 \text{ m} = 30 \text{ m}$ .

Η αντίσταση του καλωδίου θα είναι:

$$R = \rho \cdot L / S$$

$\rho$  : Ειδική αντίσταση αγωγών του χαλκού (0,018 Ω / mm<sup>2</sup>).

$L$  : συνολικό μήκος αγωγών καλωδίου.

$S$  : διατομή καλωδίου με βάση την πυκνότητα ρεύματος.

Επομένως :

$$R = \rho \cdot L / S = 0,018 \cdot 30 / 16 = 0,03 \Omega.$$

Η πτώση τάσης στην διαδρομή του καλωδίου θα είναι :

$$U_{\pi\tau} = I_{\Sigma} \cdot R = 71,55 \cdot 0,03 = 2,14 \text{ V}.$$

$$U_{\varepsilon\pi} < U_{\text{on}} \cdot 5\% \quad \rightarrow \quad U_{\varepsilon\pi} < 60,8 \cdot 0,05 \quad \rightarrow \quad U_{\varepsilon\pi} < 3,04 \text{ V}$$

Από τους υπολογισμούς προκύπτει  $U_{\pi\tau} < U_{\varepsilon\pi}$  δηλαδή,  $2,14\text{V} < 3,04\text{V}$ .

Επομένως με καλώδιο διατομής  $2 \times 16 \text{ mm}^2$ , έχουμε πτώση τάσης μικρότερη από την επιτρεπόμενη. Τελικά επιλέγουμε διατομή καλωδίου  $S = 16 \text{ mm}^2$  (καλώδιο HO7RN-F  $2 \times 16 \text{ mm}^2$ ).

### B) Διαδρομή από το μετατροπέα μέχρι τη συστοιχία των συσσωρευτών.

Η συνολική χωρητικότητα της συστοιχίας είναι :

$$Q = 800 \text{ Ah}.$$

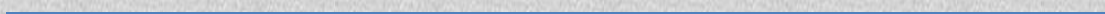
Για ταχεία φόρτιση ή εκφόρτιση (0,2C), θα έχουμε :

$$I_{\varphi} = 0,2 \cdot Q \Rightarrow I_{\varphi} = 0,2 \cdot 800 = 160 \text{ A}.$$

Με βάση τα στοιχεία του πίνακα 52-K<sub>2</sub>, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ HD384, για υλικό EPR και δύο φορτιζόμενους αγωγούς (στήλη 3) για ένταση 160 A, έχω διατομή αγωγών καλωδίου **S = 35 mm<sup>2</sup>**.

Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*



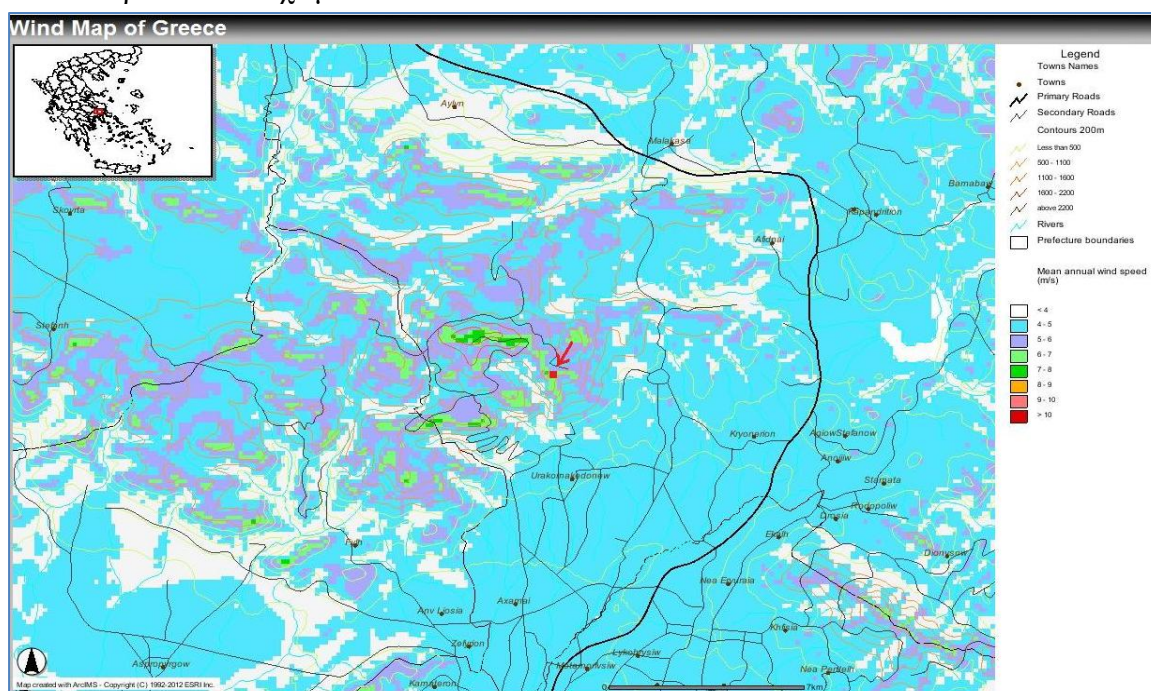
## 17.1 Διαστασιολόγηση Ανεμογεννήτριας

Στη συνέχεια προχωράμε στη μελέτη για τον υπολογισμό της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η καταγραφή των ανεμολογικών δεδομένων που επικρατούν στο χώρο του καταφυγίου. Τα στοιχεία που παραθέτουμε προέρχονται από τη βάση δεδομένων meteo.gr. Η εν λόγω βάση δεδομένων αντλεί στοιχεία από το δίκτυο αυτόματων σταθμών του ΕΑΑ και αποτελείται από σταθμούς τύπου Davis, οι οποίοι μετρούν όλες τις βασικές μετεωρολογικές παραμέτρους, δηλαδή πίεση θερμοκρασία, υγρασία, βροχόπτωση, διεύθυνση και ένταση του ανέμου. Όλες οι καταγραφές (ανά δέκα λεπτά) συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο.

Οι μετρήσεις της έντασης του ανέμου για το ορειβατικό καταφύγιο πάρθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό της Πάρνηθας (LGK3). Σημειωτέον ότι τα δεδομένα που παραθέτουμε καταγράφηκαν στο διάστημα το 2,5 τελευταίων χρόνων καθώς ο σταθμός εγκαταστάθηκε και ξεκίνησε να παρέχει δεδομένα από το Δεκέμβριο του 2009.

Πληροφορίες σταθμού:

- Όνομα: Πάρνηθα (LGK3)
- Υψόμετρο: 1230 m
- Θέση: Βάση Ναυτικού (ΣΔΑΜ)
- Ύψος αισθητήρων θερμ/υγρ : 2 m
- Ύψος ανεμομέτρου: 5 m
- Βρίσκεται σε χώμα



**Σχήμα 17.1** (προηγούμενης σελίδας) Η θέση του ορειβατικού καταφυγίου Φλαμπούρι (κόκκινη κουκίδα-βελάκι) πάνω στον αιολικό χάρτη της Ελλάδας. Όπως φαίνεται απ' το χάρτη το καταφύγιο βρίσκεται σε σημείο που πνέουν ισχυροί άνεμοι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η μέση ημερήσια ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή του καταφυγίου σε m/sec.

Ημ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ
1	3,16	5,22	0,22	11,14	4,64	2,47	4,25	2,47	3,97	10,33	2,11	3,27
2	4,97	10,1	1,97	9,33	5,8	3,25	3,5	5,55	2,5	7,05	9,83	11,44
3	5	11,2	4,25	3,88	5,89	3,25	4,39	6,47	5	8,86	11,97	11,01
4	6,61	5,27	8	5,14	6,22	4,19	5,55	4,61	9,53	8,53	9,33	11,56
5	2,27	4,17	2,58	4,97	5,8	4,17	3,58	5,42	8,5	5,72	3,08	4,89
6	3,75	6	6,08	9,25	10,8	4,97	4,39	7,11	3,97	4,42	1,55	3,87
7	4,83	9,91	8,97	12,08	6,61	2,58	3,83	7,05	8,05	4,25	1,42	2,66
8	5,08	7,55	8,86	6,69	4,78	3,89	6,47	6,47	8,19	6,3	1,19	3,33
9	3,66	4,28	3,25	5,64	5,94	5,78	11,14	4,97	3,3	6,92	2,91	2,43
10	1,3	9,08	5,42	6,69	14,39	7,5	12,17	4,55	5,36	9,03	2,91	7,88
11	3,25	5,08	7,5	7,72	10,14	5,44	11,44	9,11	7,78	12,19	13,14	14,89
12	3,08	7,55	2,5	5,64	5,94	6,17	10,33	5,14	9,03	6,47	12,08	11,21
13	5,88	4,39	1,03	5,14	4,55	6,22	8,19	5,22	9,17	3,03	11,94	8,41
14	6,38	1,83	2,8	6,83	3,44	3,25	6,52	4,53	8,5	8,67	10,47	12,12
15	6,11	1,61	3,22	1,66	2,8	6,97	6,8	2,92	5,72	10,25	0	3,39
16	11,5	4,64	4,25	4,11	4,47	6,97	5,78	3,44	10,5	11,75	3,3	6,7
17	13,64	4,83	5,22	10,28	2,94	5,58	5,22	8,08	9,61	9,78	8,67	6,7
18	9,02	9,75	4,33	10,58	3,72	3,22	4,69	10,58	8,89	5,58	11,36	12,82
19	2,92	8,97	3,39	3,83	5,8	3,17	3,03	8,44	4,86	2,92	7,03	9,52
20	2,27	5,63	6,36	7,25	7,02	3,17	4,69	9,97	4,47	1,47	4,33	7,58
21	3,88	2,69	13,72	10,72	6,03	7,92	6	11,36	5,14	2,5	2,19	4,03
22	6	5,13	11,97	10,5	10,05	11,94	5,14	13,5	7,64	3,53	2	2,73
23	6,17	6,47	12,08	7,05	9,97	12,92	4,83	12,08	8,94	10,72	2,94	5,98
24	4,92	8,14	6,8	6,66	7,69	11,22	2,42	12,47	6,83	10,33	13,55	13,655
25	6,25	7,92	4,92	8,88	7,64	6,11	4,75	12,33	10,8	11,05	13,5	13,88
26	3,25	0,8	6,08	5,72	9,83	9,55	4,97	13,94	11,67	13,55	9,22	9,47
27	3,72	-	7,19	3,25	9,97	5,78	3,67	13,64	13,14	16,3	11,89	12,03
28	12,3	-	3,72	5,66	7,72	3,36	5	11,44	12,17	14,67	6,67	7,43
29	0,44	-	5,33	5,78	3,67	3,25	4,19	10,05	12,55	16,5	12,83	13,57
30	-	-	3,58	3,25	4,64	4,25	4,25	3,5	8,64	14,36	7,64	3,56
31	-	-	4,33	-	3,14	-	2,94	4,61	-	6,58	-	-

**Σχήμα 17.2** Μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου (m/sec) στην περιοχή της Πάρνηθας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες ταχύτητες ανέμων σε μέρες το μήνα.

m/s	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ
0÷1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1÷2	1	2	2	1	0	0	0	0	0	1	3	0
2÷3	3	1	3	0	2	2	2	2	1	2	6	3
3÷4	8	0	5	4	4	9	5	2	3	2	2	5
4÷5	3	5	5	2	5	4	10	5	2	2	1	2
5÷6	3	5	3	7	6	4	5	4	4	2	0	1
6÷7	6	2	4	4	3	5	4	2	1	3	1	2
7÷8	0	3	2	3	4	2	0	2	2	1	2	3
8÷9	0	2	3	1	0	0	1	2	7	3	1	1
9÷10	1	3	0	2	3	1	0	2	4	2	3	2
10÷11	0	1	0	4	3	0	1	2	2	4	1	0
11÷12	1	1	1	1	0	2	2	2	1	2	4	4
12÷13	1	0	1	1	0	1	1	3	2	1	2	3
13÷14	1	0	1	0	0	0	0	3	1	1	3	3
14÷15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	1
15÷16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16÷17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0

**Σχήμα 17.3** Οι μέσες ταχύτητες ανέμων σε μέρες το μήνα για τη περιοχή του καταφυγίου.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες ταχύτητες ανέμων σε ώρες το μήνα.

m/s	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ
<b>0÷1</b>	24	24	24	0	0	0	0	0	0	0	24	0
<b>1÷2</b>	24	48	48	24	0	0	0	0	0	24	72	0
<b>2÷3</b>	72	24	72	0	48	48	48	48	24	48	144	72
<b>3÷4</b>	192	0	120	96	96	216	120	48	72	48	48	120
<b>4÷5</b>	72	120	120	48	120	96	240	120	48	48	24	48
<b>5÷6</b>	72	120	72	168	144	96	120	96	96	48	0	24
<b>6÷7</b>	144	48	96	96	72	120	96	48	24	72	24	48
<b>7÷8</b>	0	72	48	72	96	48	0	48	48	24	48	72
<b>8÷9</b>	24	48	72	24	0	0	24	48	168	72	24	24
<b>9÷10</b>	0	72	0	48	72	24	0	48	96	48	72	48
<b>10÷11</b>	0	24	0	96	72	0	24	48	48	96	24	0
<b>11÷12</b>	24	24	24	24	0	48	48	48	24	48	96	96
<b>12÷13</b>	24	0	24	24	0	24	24	72	48	24	48	72
<b>13÷14</b>	24	0	24	0	0	0	0	72	24	24	72	72
<b>14÷15</b>	0	0	0	0	24	0	0	0	0	48	0	24
<b>15÷16</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>16÷17</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0

*Σχήμα 17.4* Οι μέσες ταχύτητες ανέμων σε ώρες το μήνα για την περιοχή του καταφυγίου.

Όπως προκύπτει τόσο από τον αιολικό χάρτη όσο και από τους πίνακες με τις μετρήσεις της εντάσεως των ανέμων το ορειβατικό καταφύγιο βρίσκεται σε μια κορυφή του βουνού της Πάρνηθας όπου πνέουν αρκετά ισχυροί άνεμοι καθ' όλη τη διάρκεια τους έτους. Επίσης οι άνεμοι παρατηρούμε πως έχουν και διάρκεια και δεν πρόκειται απλώς για ριπές ανέμων οι οποίες κάνουν την εμφάνισή τους και σταματούν μετά από λίγα δευτερόλεπτα. Ορισμένοι μήνες του έτους μάλιστα έχουν ιδιαίτερα μεγάλη μέση τιμή εντάσεως ανέμου που φτάνει μέχρι τα 16 m/sec. Ακόμα το γεγονός πως το καταφύγιο βρίσκεται σε κορυφή υψώματος και δεν παρεμβάλλονται διάφορα φυσικά εμπόδια μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως η περιοχή ενδείκνυται για εγκατάσταση ανεμογεννήτριας. Εξάλλου σε απόσταση 2,7 km νοτιοδυτικά του καταφυγίου βρίσκεται ήδη εγκατεστημένο αιολικό πάρκο με 3 ανεμογεννήτριες που επιβεβαιώνει το αξιοποιήσιμο του αιολικού δυναμικού της περιοχής.

## 17.2 Μεθοδολογία καθορισμού της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας

Για να υπολογίσουμε την ονομαστική ισχύ της καταλληλότερης Α/Γ για μια συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτούνται:

- A. Οι ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής, στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο χρήσης. Συνήθως, καταγράφονται οι ενεργειακές καταναλώσεις σε κάθε ιδιαίτερη χρονική περίοδο μέσα στο έτος και τελικά προσδιορίζονται οι μέσες ημερήσιες τιμές ανά έτος και ανά μήνα.
- B. Ανεμολογικά στοιχεία για τη συγκεκριμένη θέση εγκατάστασης, με βάση το τυπικό μετεωρολογικό έτος του τόπου. Συνήθως καταγράφονται οι ταχύτητες του ανέμου, σε βραχεία χρονικά διαστήματα, πχ ανά 20 sec. Μετά από επεξεργασία των δεδομένων αυτών προσδιορίζονται οι μέσες τιμές ταχυτήτων ανέμου καθώς και η κατανομή της πιθανότητας εμφάνισής τους, ανά μήνα και ετησίως.
- Γ. Χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος Α/Γ, που δίδονται από τους κατασκευαστές. Απαιτούνται στοιχεία για τους τύπους και τα μεγέθη ανεμογεννητριών, που μπορούν να λειτουργήσουν στην περιοχή ταχυτήτων της θέσης εγκατάστασης.

Ο προσδιορισμός της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας βασίζεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας, δηλαδή:

$$\bar{P}_k = \bar{P}_{A/\Gamma}$$

με

$$\bar{P}_k = \frac{E_k}{T}$$

(η μέση ημερήσια ισχύς κατανάλωσης)

και

$$\bar{P}_{A/\Gamma} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{A/\Gamma}(t) dt = \int_0^\infty P_{A/\Gamma}(u) \cdot f(u) du$$

(η μέση ημερήσια ισχύς)

με  $P_{A/\Gamma}$  την στιγμιαία ηλεκτρική ισχύ που παρέχεται από την ανεμογεννήτρια και η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και με  $f(u)$  την συνάρτηση πυκνότητας κατανομής στο χώρο των ταχυτήτων του ανέμου. Εδώ χρησιμοποιούμε πιο συχνά τον συντελεστή ισχύος  $n_{A/\Gamma}$  που ορίζεται σαν την παροχή ηλεκτρικής ισχύος προς την  $P_R$  (όπου  $P_R$  η ονομαστική ισχύς της ΑΓ):

$$n_{A/\Gamma} = \frac{P_{A/\Gamma}}{P_R}$$

Η παραπάνω σχέση σε συνδυασμό με τη σχέση (1) δημιουργούν μια καινούργια:



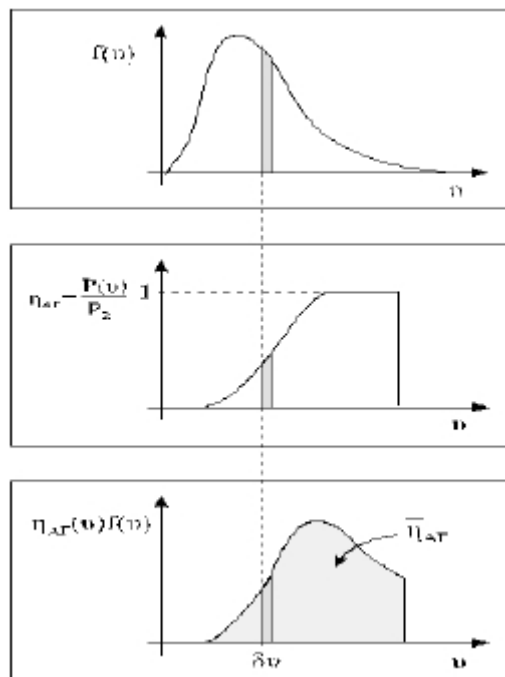
$$\bar{P}_{AG,i} = \left( \int_0^{\infty} \frac{P_{AG}(u)}{P_R} f_i(u) du \right) \cdot P_R = \bar{n}_{AG,i} \cdot P_R$$

με  $\bar{n}_{AG,i}$  τον μέσο συντελεστή ισχύος της ΑΓ για το συγκεκριμένο μήνα:

$$\bar{n}_{AG,i} = \int_0^{\infty} n_{AG,i} \cdot f_i(u) du$$

Αν τώρα γνωρίζουμε τις κατανομές του συντελεστή ισχύος σε συνάρτηση με την ταχύτητα και η συνάρτηση κατανομής της πυκνότητας πιθανότητας εμφάνισης ανέμων,  $f(u)$ , σε κάθε ταχύτητα  $u$ , μπορούμε να υπολογίσουμε τον μέσο συντελεστή ισχύος για το διάστημα  $du$ .

Έτσι για να υπολογίσουμε την ονομαστική ισχύ της καταλληλότερης ανεμογεννήτριας χρειαζόμαστε το ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ της παρεχόμενης από την ανεμογεννήτρια μέσης (ημερήσιας, μηνιαίας ή ετήσιας) ηλεκτρικής ισχύος και της αντίστοιχης μέσης ισχύος κατανάλωσης της συγκεκριμένης εφαρμογής.



**Σχήμα 17.5** Σχηματική παράσταση που περιγράφει τον υπολογισμό του συντελεστή ισχύος, για ένα ορισμένο μήνα. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη  $AG(u)f(u) - u$ , αποτελεί τον μέσο συντελεστή, για το μήνα αυτό. Τα διαγράμματα αυτά, για λόγους απλότητας, δίδονται με τη μορφή συνεχών ομαλών καμπυλών. Στην πράξη, έχουν τη μορφή ιστογράμματος, με βήμα  $du$ .

Δημιουργούμε έτσι για κάθε μήνα ένα πίνακα με 4 στήλες όπου για ορισμένο βήμα  $du$  καταγράφουμε τα παρακάτω:

- A. Τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου
- B. Τις αντίστοιχες τιμές της συνάρτησης κατανομής της πυκνότητας πιθανότητας  $f(u)$ , του ανέμου, η οποία προκύπτει με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής. Συγκεκριμένα το  $f(u) = dp/du = dt/(T \cdot du)$  όπου  $dp = dt/T$  η πιθανότητα εμφάνισης ανέμων με ταχύτητα, της οποίας το μέτρο βρίσκεται μέσα στην περιοχή ταχυτήτων  $u$  και  $u+du$ , όπου  $du$ , το βήμα ταχυτήτων ανέμου και  $dt$  το χρονικό διάστημα μέσα στο συνολικό χρόνο  $T$ , στο οποίο έπνεαν άνεμοι με ταχύτητα στο συγκεκριμένο διάστημα  $u$  και  $u+du$ .
- Γ. Τις τιμές του συντελεστή ισχύος,  $n_{AG}$ , σε κάθε ταχύτητα του ανέμου, με βάση τα στοιχεία του κατασκευαστή.
- Δ. Σε κάθε ταχύτητα  $u$ , υπολογίζεται το γινόμενο  $n_{AG} \cdot f(u) \cdot du$ .
- Ε. Το άθροισμα των γινομένων αυτών αποτελεί τον ζητούμενο  $\bar{n}_{AG}$ , για το μήνα αυτό.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι πίνακες για κάθε μήνα του έτους.

### Ιανουάριος

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Πυκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,0422	0,00
2	0,00	0,0738	0,00
3	0,034	0,1261	0,0043
4	0,092	0,0843	0,0077
5	0,186	0,0953	0,0177
6	0,2926	0,11219	0,0328
7	0,4	0,0128	0,005
8	0,6	0,0611	0,0366
9	0,864	0,0217	0,00187
10	1,00	0,0195	0,0195
11	1,00	0,0173	0,0173
12	1,00	0,0672	0,0672
13	1,00	0,0648	0,0648
14	1,00	0,012	0,012
15	1,00	0,0064	0,0064
16	1,00	0,0068	0,0068
17	1,00	0,0087	0,0087
18	1,00	0,001	0,001
19	1,00	0,00082	0,00082
20	1,00	0,003	0,003
21	0,98	0,00219	0,00215
22	0,84	0,0003	0,00025
23	0,6	0,00043	0,000258
24	0,4	0,00006	0,000024
25	0,00	0,00007	0,00
26	0,00	0,00001	0,00

$$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,316172$$

## Φεβρουάριος

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Πυκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,0739	0,00
2	0,00	0,0475	0,00
3	0,034	0,0211	0,000717
4	0,092	0,1038	0,00955
5	0,186	0,1108	0,0206
6	0,2926	0,0849	0,0248
7	0,4	0,1086	0,04344
8	0,6	0,0826	0,04956
9	0,864	0,1057	0,09132
10	1,00	0,0442	0,0442
11	1,00	0,0439	0,0439
12	1,00	0,0321	0,0321
13	1,00	0,0318	0,0318
14	1,00	0,0201	0,0201
15	1,00	0,02	0,02
16	1,00	0,019	0,019
17	1,00	0,01917	0,01917
18	1,00	0,01826	0,01826
19	1,00	0,0199	0,0199
20	1,00	0,00187	0,00187
21	0,98	0,001538	0,0015
22	0,84	0,00149	0,00125
23	0,6	0,0015	0,0009
24	0,4	0,001002	0,0004
25	0,00	0,0007	0,00
26	0,00	0,00022	0,00

$$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,514337$$

## Μάρτιος

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Πυκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,0526	0,00
2	0,00	0,0749	0,00
3	0,034	0,1056	0,00359
4	0,092	0,0988	0,00908
5	0,186	0,0873	0,01623
6	0,2926	0,1065	0,03116
7	0,4	0,0519	0,02076
8	0,6	0,0941	0,05646
9	0,864	0,0242	0,0209
10	1,00	0,0276	0,0276
11	1,00	0,0528	0,0528
12	1,00	0,0439	0,0439
13	1,00	0,0451	0,0451
14	1,00	0,0273	0,0273

15	1,00	0,0167	0,0167
16	1,00	0,0138	0,0138
17	1,00	0,0186	0,0186
18	1,00	0,00974	0,00974
19	1,00	0,00851	0,00851
20	1,00	0,007	0,007
21	0,98	0,00697	0,00683
22	0,84	0,00584	0,0049
23	0,6	0,001433	0,00085
24	0,4	0,001032	0,00041
25	0,00	0,00067	0,00
26	0,00	0,00084	0,00

$$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,4422$$

### Απρίλιος

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Πυκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,0453	0,00
2	0,00	0,0264	0,00
3	0,034	0,0948	0,00322
4	0,092	0,0643	0,0059
5	0,186	0,1362	0,02533
6	0,2926	0,1053	0,0308
7	0,4	0,0845	0,0338
8	0,6	0,0478	0,02868
9	0,864	0,0772	0,0667
10	1,00	0,0929	0,0929
11	1,00	0,0499	0,0499
12	1,00	0,0525	0,0525
13	1,00	0,0267	0,0267
14	1,00	0,00271	0,00271
15	1,00	0,00231	0,00231
16	1,00	0,0149	0,0149
17	1,00	0,00195	0,00195
18	1,00	0,00976	0,00976
19	1,00	0,0054	0,0054
20	1,00	0,0033	0,0033
21	0,98	0,003	0,00294
22	0,84	0,0019	0,001596
23	0,6	0,0017	0,00102
24	0,4	0,0011	0,00044
25	0,00	0,0006	0,00
26	0,00	0,0003	0,00

$$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,4627$$

**Μάιος**

<b>u m/sec</b>	<b>n<sub>ΑΓ</sub>(u)</b>	<b>Ποκνότητα πιθανότητας, f(u)</b>	<b>n<sub>ΑΓ</sub>(u)·f(u)·d(u)</b>
1	0,00	0,0004	0,00
2	0,00	0,0053	0,00
3	0,034	0,0958	0,00326
4	0,092	0,1036	0,00953
5	0,186	0,1073	0,01995
6	0,2926	0,0954	0,0279
7	0,4	0,0731	0,02924
8	0,6	0,0432	0,0259
9	0,864	0,0849	0,0733
10	1,00	0,0751	0,0751
11	1,00	0,0596	0,0596
12	1,00	0,0422	0,0422
13	1,00	0,0413	0,0413
14	1,00	0,0987	0,0987
15	1,00	0,0351	0,0351
16	1,00	0,0299	0,0299
17	1,00	0,011	0,011
18	1,00	0,0103	0,0103
19	1,00	0,0009	0,0009
20	1,00	0,00077	0,00077
21	0,98	0,00064	0,00062
22	0,84	0,00065	0,00055
23	0,6	0,00039	0,000234
24	0,4	0,00031	0,000124
25	0,00	0,00006	0,00
26	0,00	0,00004	0,00

$$\bar{n}_{ΑΓ} = \sum n_{ΑΓ}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,5954$$
**Ιούνιος**

<b>u m/sec</b>	<b>n<sub>ΑΓ</sub>(u)</b>	<b>Ποκνότητα πιθανότητας, f(u)</b>	<b>n<sub>ΑΓ</sub>(u)·f(u)·d(u)</b>
1	0,00	0,0004	0,00
2	0,00	0,0981	0,00
3	0,034	0,1745	0,0059
4	0,092	0,1983	0,0182
5	0,186	0,1042	0,01938
6	0,2926	0,0967	0,02829
7	0,4	0,0439	0,01756
8	0,6	0,0322	0,01932
9	0,864	0,0378	0,03265
10	1,00	0,0261	0,0261
11	1,00	0,0643	0,0643
12	1,00	0,0584	0,0584

13	1,00	0,0219	0,0219
14	1,00	0,0176	0,0176
15	1,00	0,0112	0,0112
16	1,00	0,0157	0,0157
17	1,00	0,0113	0,0113
18	1,00	0,0119	0,0119
19	1,00	0,005	0,005
20	1,00	0,005	0,005
21	0,98	0,0006	0,000588
22	0,84	0,00055	0,00046
23	0,6	0,00031	0,000186
24	0,4	0,0003	0,00012
25	0,00	0,00007	0,00
26	0,00	0,00003	0,00

$$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,3859$$

### Ιούλιος

<b>u m/sec</b>	<b>n<sub>AG</sub>(u)</b>	<b>Πυκνότητα πιθανότητας, f(u)</b>	<b>n<sub>AG</sub>(u)·f(u)·d(u)</b>
1	0,00	0,0003	0,00
2	0,00	0,0047	0,00
3	0,034	0,0958	0,00325
4	0,092	0,0971	0,0089
5	0,186	0,0846	0,01573
6	0,2926	0,1063	0,0311
7	0,4	0,0837	0,033
8	0,6	0,0644	0,03864
9	0,864	0,0781	0,0675
10	1,00	0,0659	0,0659
11	1,00	0,0732	0,0732
12	1,00	0,0769	0,0769
13	1,00	0,0549	0,0549
14	1,00	0,0431	0,0431
15	1,00	0,0382	0,0382
16	1,00	0,0175	0,0175
17	1,00	0,011	0,011
18	1,00	0,0103	0,0103
19	1,00	0,0008	0,0008
20	1,00	0,00066	0,00066
21	0,98	0,00053	0,0005194
22	0,84	0,00041	0,000344
23	0,6	0,00049	0,000294
24	0,4	0,0003	0,00012
25	0,00	0,00005	0,00
26	0,00	0,00002	0,00

$$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,5918$$

## Αύγουστος

<b>u m/sec</b>	<b><math>n_{AG}(u)</math></b>	<b>Πυκνότητα πιθανότητας, <math>f(u)</math></b>	<b><math>n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)</math></b>
1	0,00	0,000012	0,00
2	0,00	0,00379	0,00
3	0,034	0,00421	0,000143
4	0,092	0,0549	0,00505
5	0,186	0,0629	0,001169
6	0,2926	0,0638	0,0638
7	0,4	0,0452	0,01808
8	0,6	0,0673	0,04
9	0,864	0,0757	0,0065
10	1,00	0,0981	0,0981
11	1,00	0,0988	0,0988
12	1,00	0,10034	0,10034
13	1,00	0,0817	0,0817
14	1,00	0,0429	0,0429
15	1,00	0,0586	0,0586
16	1,00	0,0341	0,0341
17	1,00	0,0218	0,0218
18	1,00	0,01004	0,01004
19	1,00	0,00934	0,00934
20	1,00	0,00629	0,00629
21	0,98	0,0005	0,00049
22	0,84	0,00049	0,000277
23	0,6	0,00033	0,000198
24	0,4	0,00028	0,000112
25	0,00	0,00005	0,00
26	0,00	0,00001	0,00

$$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,6977$$

## Σεπτέμβριος

<b>u m/sec</b>	<b><math>n_{AG}(u)</math></b>	<b>Πυκνότητα πιθανότητας, <math>f(u)</math></b>	<b><math>n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)</math></b>
1	0,00	0,000027	0,00
2	0,00	0,041	0,00
3	0,034	0,0531	0,0018
4	0,092	0,0398	0,00366
5	0,186	0,0217	0,004
6	0,2926	0,0374	0,0109
7	0,4	0,0367	0,01468
8	0,6	0,1196	0,07176
9	0,864	0,0943	0,0818
10	1,00	0,0802	0,0802
11	1,00	0,0949	0,0949
12	1,00	0,0736	0,0736

13	1,00	0,0517	0,0517
14	1,00	0,0441	0,0441
15	1,00	0,0376	0,0376
16	1,00	0,0341	0,0341
17	1,00	0,02	0,02
18	1,00	0,01008	0,01008
19	1,00	0,00741	0,00741
20	1,00	0,00329	0,00329
21	0,98	0,00044	0,00043
22	0,84	0,00017	0,0001428
23	0,6	0,00032	0,000192
24	0,4	0,00019	0,000076
25	0,00	0,00011	0,00
26	0,00	0,00007	0,00

$$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,6464$$

### Οκτώβριος

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Πυκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,000013	0,00
2	0,00	0,0678	0,00
3	0,034	0,0763	0,00259
4	0,092	0,0659	0,00606
5	0,186	0,0519	0,00965
6	0,2926	0,0937	0,0274
7	0,4	0,0359	0,01436
8	0,6	0,0904	0,05424
9	0,864	0,0943	0,0814
10	1,00	0,1056	0,1056
11	1,00	0,0783	0,0783
12	1,00	0,0418	0,0418
13	1,00	0,0477	0,0477
14	1,00	0,0761	0,0761
15	1,00	0,0376	0,0376
16	1,00	0,0742	0,0742
17	1,00	0,0308	0,0308
18	1,00	0,0172	0,0172
19	1,00	0,00619	0,00619
20	1,00	0,00392	0,00392
21	0,98	0,00051	0,00016
22	0,84	0,00017	0,00014
23	0,6	0,00029	0,000174
24	0,4	0,00007	0,000028
25	0,00	0,00022	0,00
26	0,00	0,00003	0,00

$$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,7136$$



## Νοέμβριος

<b>u m/sec</b>	<b><math>n_{AG}(u)</math></b>	<b>Ποκνότητα πιθανότητας, <math>f(u)</math></b>	<b><math>n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)</math></b>
1	0,00	0,0634	0,00
2	0,00	0,1114	0,00
3	0,034	0,0517	0,00175
4	0,092	0,02317	0,00313
5	0,186	0,03	0,00558
6	0,2926	0,03014	0,0088
7	0,4	0,0572	0,02288
8	0,6	0,0284	0,01704
9	0,864	0,0943	0,0814
10	1,00	0,00218	0,00218
11	1,00	0,0913	0,0913
12	1,00	0,0719	0,0719
13	1,00	0,0971	0,0971
14	1,00	0,0256	0,0256
15	1,00	0,0137	0,0137
16	1,00	0,00477	0,00477
17	1,00	0,023	0,023
18	1,00	0,01029	0,01029
19	1,00	0,01083	0,01083
20	1,00	0,00469	0,00469
21	0,98	0,00039	0,000196
22	0,84	0,0002	0,000168
23	0,6	0,00017	0,000102
24	0,4	0,00049	0,000196
25	0,00	0,00005	0,00
26	0,00	0,00004	0,00

$$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,4964$$

## Δεκέμβριος

<b>u m/sec</b>	<b><math>n_{AG}(u)</math></b>	<b>Ποκνότητα πιθανότητας, <math>f(u)</math></b>	<b><math>n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)</math></b>
1	0,00	0,0043	0,00
2	0,00	0,0638	0,00
3	0,034	0,1083	0,00368
4	0,092	0,0472	0,004342
5	0,186	0,036	0,00669
6	0,2926	0,0456	0,01334
7	0,4	0,0671	0,02684
8	0,6	0,0375	0,0225
9	0,864	0,0431	0,0372
10	1,00	0,0219	0,0219
11	1,00	0,1067	0,1067
12	1,00	0,0642	0,0642

13	1,00	0,0657	0,0657
14	1,00	0,0299	0,0299
15	1,00	0,0265	0,0265
16	1,00	0,0194	0,0194
17	1,00	0,0183	0,0183
18	1,00	0,0108	0,0108
19	1,00	0,01	0,01
20	1,00	0,00375	0,00375
21	0,98	0,00022	0,00021
22	0,84	0,0002	0,000168
23	0,6	0,00012	0,000072
24	0,4	0,00032	0,00032
25	0,00	0,00004	0,00
26	0,00	0,00003	0,00
$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,49251$			

### 17.3 Διαδοχικά βήματα προσδιορισμού της ονομαστικής ισχύος ΑΓ για πλήρη κάλυψη φορτίου.

Μελετώντας τα παραπάνω συστήματα συνήθως αναφερόμαστε σε μηνιαία ή ετήσια μέση ημερήσια ισχύ. Αν πάρουμε ως  $\bar{P}_{L,i}$  τη μηνιαία μέση ισχύ κατανάλωσης για μήνα και  $\bar{P}_{AG,i}$  την αντίστοιχη μηνιαία μέση ισχύ που παράγεται από την ΑΓ, θα έχουμε την παρακάτω σχέση:

$$\bar{P}_{AG,i} \geq \frac{\bar{P}_{L,i}}{n_{μετ}}$$

Η παραπάνω σχέση επιβάλλεται από την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων με  $n_{μετ}$  τον συντελεστή μεταφοράς ενέργειας από την έξοδο της ανεμογεννήτριας μέχρι την έξοδο του αιολικού συστήματος. Ο συνδυασμός της παραπάνω σχέσης δίνει:

$$P_{R,i} = \frac{\bar{P}_{L,i}}{n_{μετ} \cdot \bar{n}_{AG,i}}$$

Η σχέση αυτή οδηγεί στον υπολογισμό της ονομαστικής ισχύος της καταλληλότερης ανεμογεννήτριας για πλήρη κάλυψη των ενεργειακών καταναλώσεων της εφαρμογής.

Έτσι μπορούμε να προσδιορίσουμε 12 τιμές (όσοι και οι μήνες) ονομαστικής ισχύος ΑΓ. Μεταξύ αυτών των τιμών θα επιλέξουμε τη μέγιστη ονομαστική ισχύ έτσι ώστε να έχουμε πλήρη κάλυψη φορτίου. Τα βήματα που ακολουθούμε είναι τα παρακάτω:

- A. Η ημερήσια τιμή για κάθε μήνα του έτους για ισχύ κατανάλωσης  $\bar{P}_{L,i}$  καθορίζεται με βάση τα υπάρχοντα στοιχεία ενεργειακών απαιτήσεων ή με πρόβλεψη κατανάλωσης φορτίων.
- B. Υπολογίζουμε τις τιμές των δώδεκα μηνιαίων μέσων τιμών του συντελεστή ισχύος,  $\bar{n}_{AG}$ . Για να υπολογιστούν πρέπει να αξιοποιήσουμε τα παρακάτω:
- Δεδομένα για την εξάρτηση της αποδιδόμενης ισχύος από την ταχύτητα του ανέμου, για εκείνους τους τύπους ΑΓ με υψηλή απόδοση στη χαρακτηριστική για τον τόπο εγκατάστασης, περιοχή ταχυτήτων ανέμου.
  - Ανεμολογικά δεδομένα του τόπου εγκατάστασης της ΑΓ από τα οποία προσδιορίζεται η συνάρτηση κατανομής της πιθανότητας εμφάνισης ανέμων ταχύτητας  $u$ , για κάθε μήνα του έτους.
- Γ. Αφού συλλέξουμε τα στοιχεία των δώδεκα μηνών εφαρμόζουμε τη σχέση. Έπειτα επιλέγουμε εκείνη την ανεμογεννήτρια η οποία έχει τη μέγιστη ονομαστική ισχύ μεταξύ των δώδεκα τιμών  $P_R$ .

Κάνοντας του υπολογισμούς για κάθε μήνα του έτους με βάση τα στοιχεία των πινάκων παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη τιμή προκύπτει τον μήνα Ιανουάριο και είναι ίση με 9,73 KW. Επομένως και η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριάς μας για πλήρη κάλυψη των φορτίων της κατανάλωσης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους είναι  $9,73 \approx 10$  KW. Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς επιλέγουμε την ανεμογεννήτρια **Hummer Wind Turbine – 10KW**.



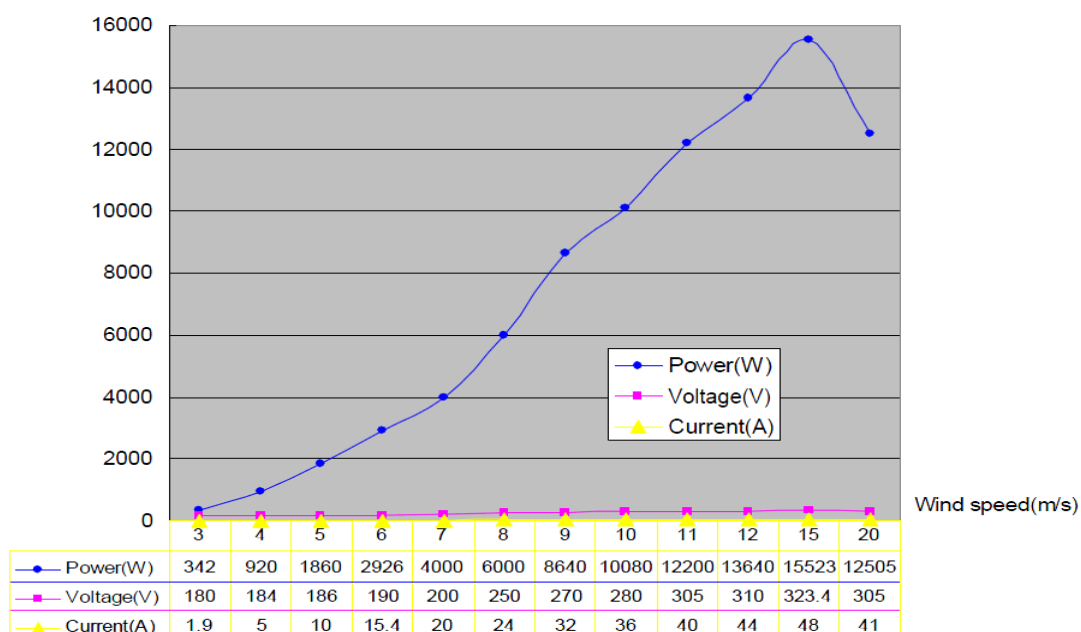
Σχήμα 17.6 Η ανεμογεννήτρια Hummer Wind Turbine – 10KW.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εν λόγω ανεμογεννήτριας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

#### Technical Parameters

Rated power (W)	<b>10000</b>
-----------------	--------------

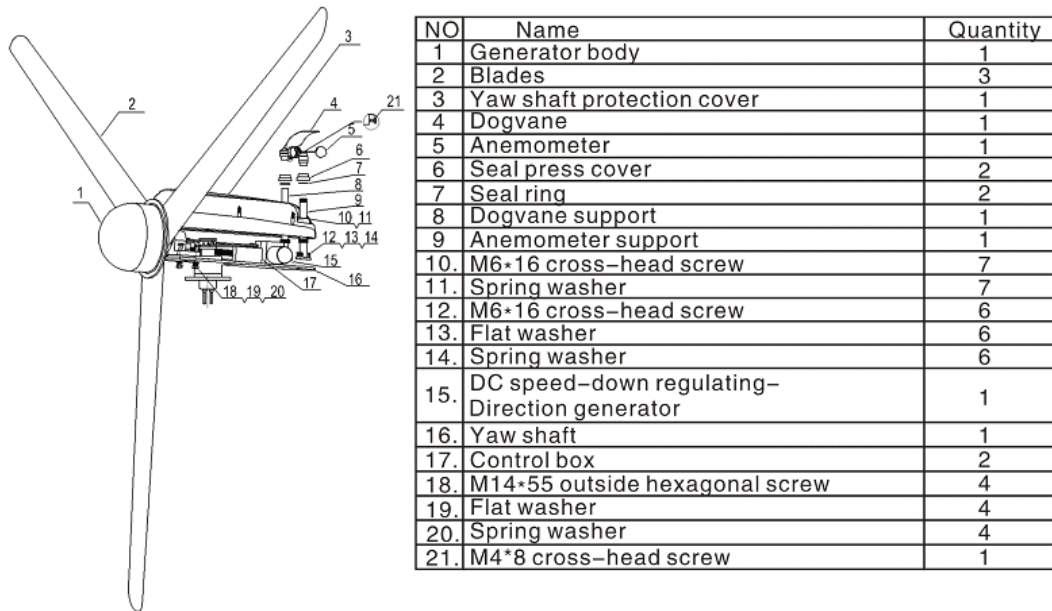
Maximum output power (W)	15000
Charging voltage (V)	DC 300V
Blade quantity	3
Rotor blade material	GRP
Rotor blade diameter (m)	Ø8.0
Start-up wind speed (m/s)	2,5
Rated wind speed (m/s)	10
Rated rotating rate (r/min)	180
Wind energy utilizing ratio (Cp)	0.42
Generator output	180 ÷ 323,4 V AC
Rated charging current (A)	33
The maximum charging current (in a short time) (A)	65
Output AC frequency (Hz)	0~360
Generator efficiency	>0.8
Wireless tower diameter (mm)	Ø 530×Ø 370×12000 (3pcs)
Guy tower diameter (mm)	Ø360×3000 (4pcs)
Tower height (m)	12m
The weight of generator (kg)	150kg



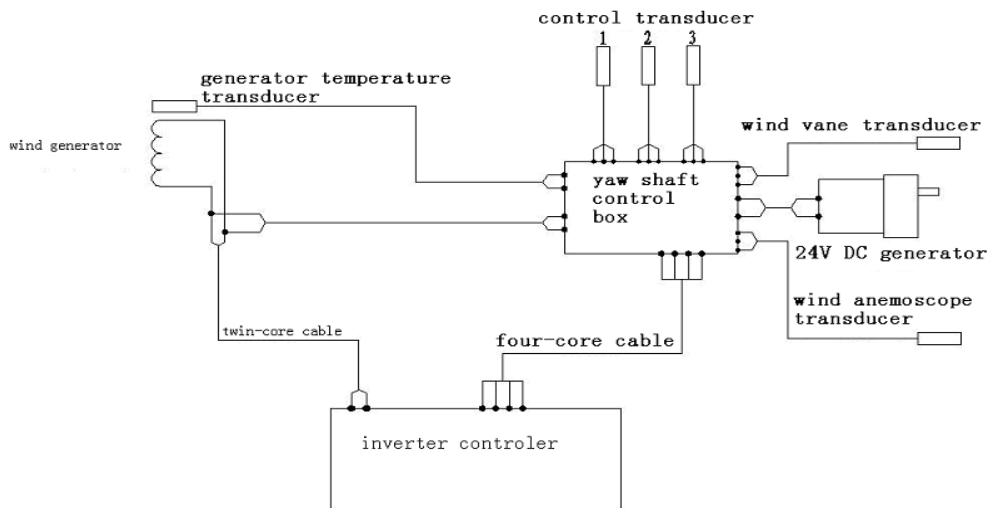
Σχήμα 17.7 Καμπύλη ισχύος ΑΓ Hummer Wind Turbine – 10KW.

Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια παίρνει κίνηση κατευθείαν από τα περύγια του ρότορα χωρίς να παρεμβάλλεται άλλος μηχανισμός ρύθμισης της ταχύτητας. Η γεννήτρια η οποία είναι υψηλής απόδοσης, εδράζεται μπροστά από τα περύγια του ρότορα πράγμα το οποίο βοηθά να ακτινοβολείται θερμότητα προς το περιβάλλον και

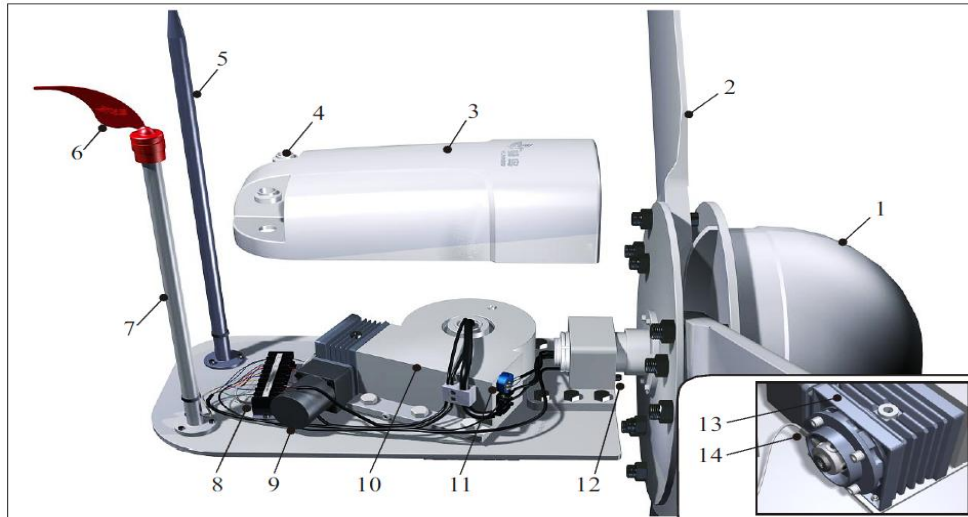
άρα να μειώνεται η θερμοκρασία που αναπτύσσει η ίδια. Το όλο σύστημα αποτελείται από τη γεννήτρια, τον άξονα περιστροφής (συμπεριλαμβανομένου του ανεμομέτρου, του κουτιού ελέγχου περιστροφής, DC γεννήτρια για ρύθμιση της κατεύθυνσης), πύργο και inverter.



Σχήμα 17.8 Τα βασικά εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας.

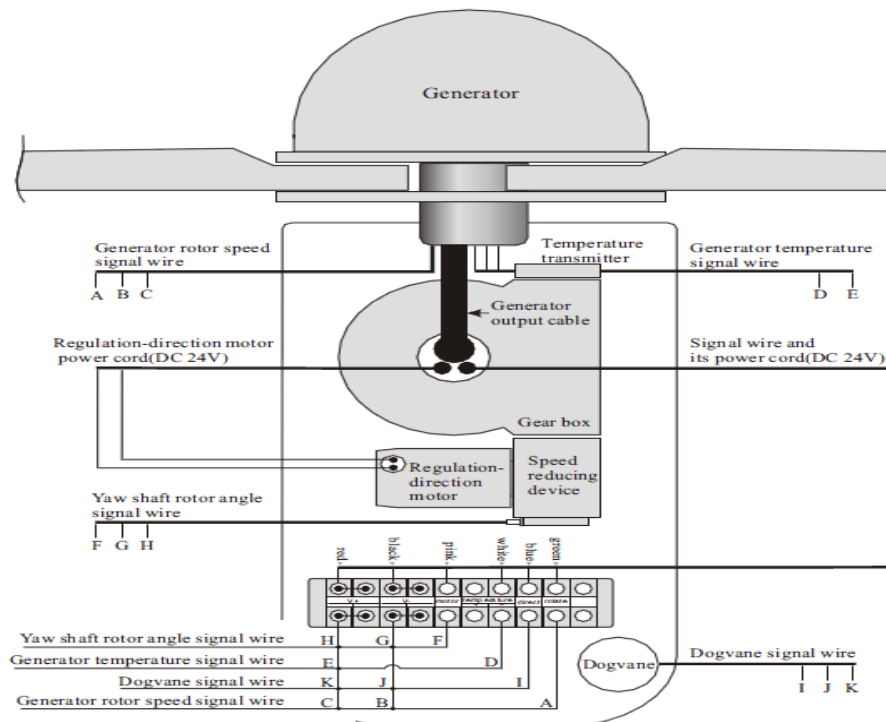


Σχήμα 17.9 Το βασικό κύκλωμα της ανεμογεννήτριας.

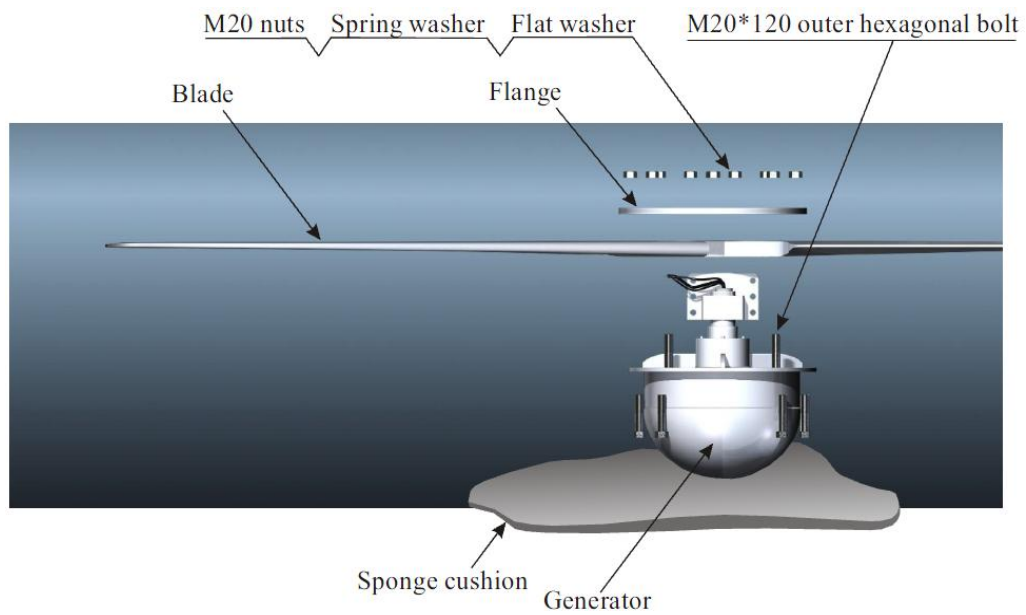


NO	Name	NO	Name
1	Generator	8	Signal wire terminal block
2	Rotor blade	9	DC 24V regulating-direction motor
3	Yaw shaft protection cover	10	Gear box
4	Gland cover	11	Generator temperature transmitter
5	A lighting rod (selection match)	12	Wind generator rotor speed probe
6	Dogvane	13	Speed-reduction device
7	Support of dogvane	14	Measurement probe for yaw shaft revolving

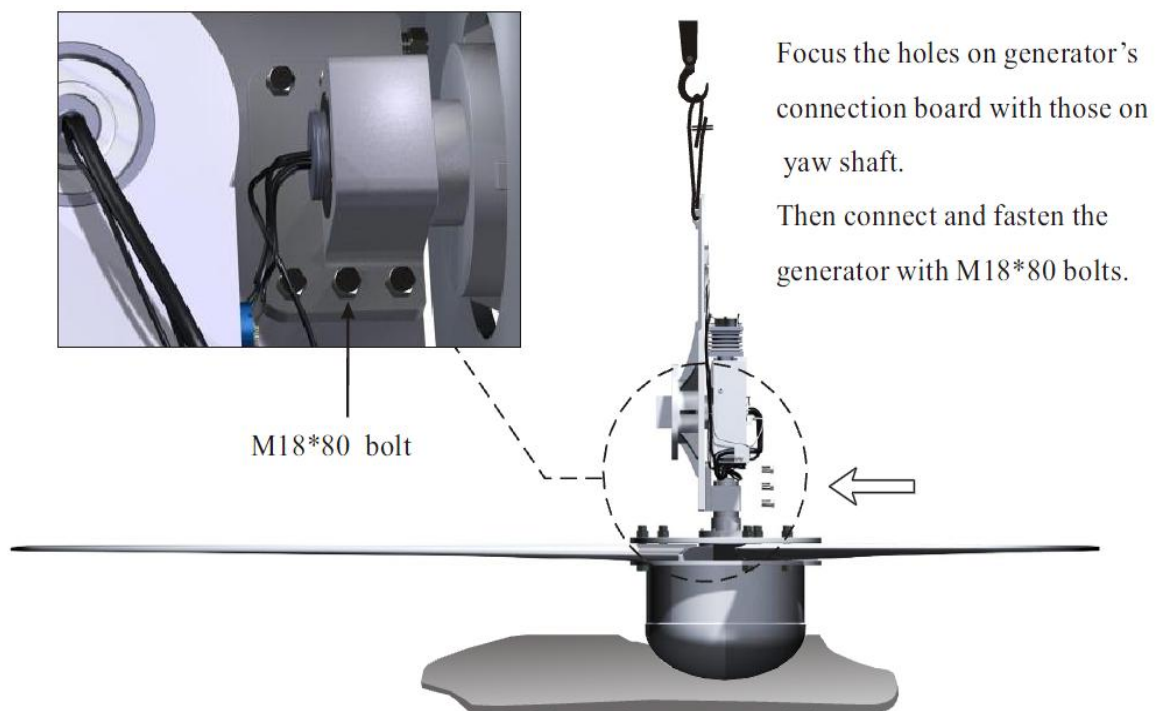
Σχήμα 17.10 Τα εξαρτήματα απ' τα οποία αποτελείται η ΑΓ.



Σχήμα 17.11 Διάγραμμα σύνδεσης καλωδίων του άξονα περιστροφής και της γεννήτριας.



Σχήμα 17.12 Τρόπος σύνδεσης των πτερυγίων με το κύριο σώμα της ΑΓ.



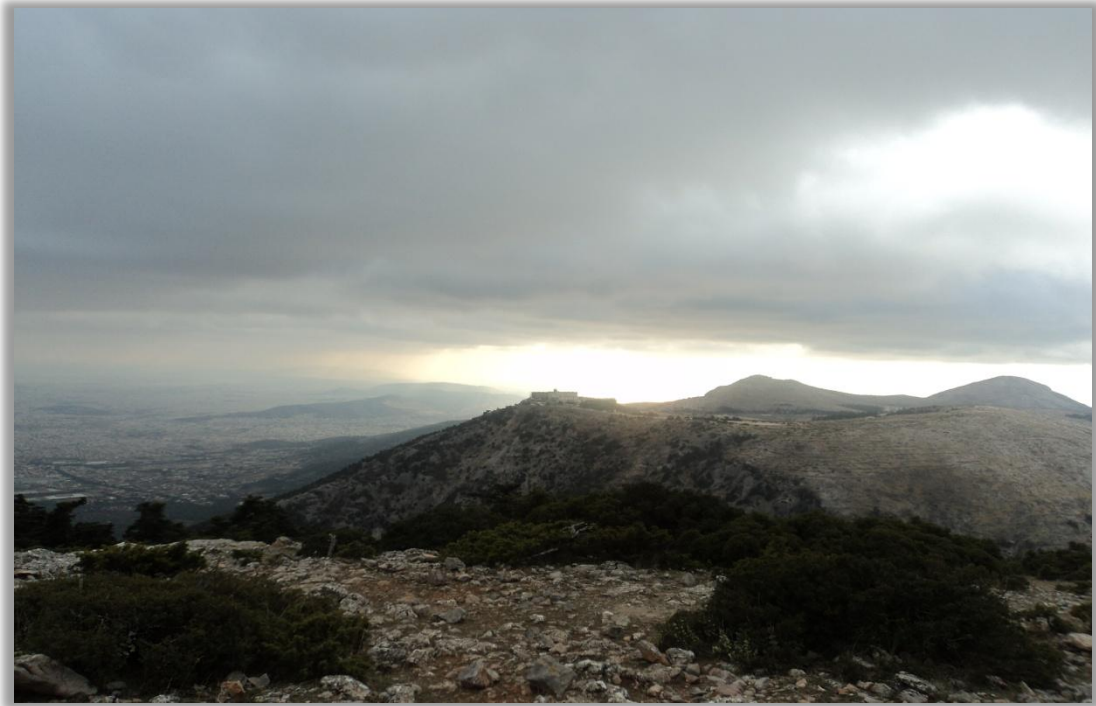
Σχήμα 17.13 Τρόπος σύνδεσης του άξονα περιστροφής με τη γεννήτρια.



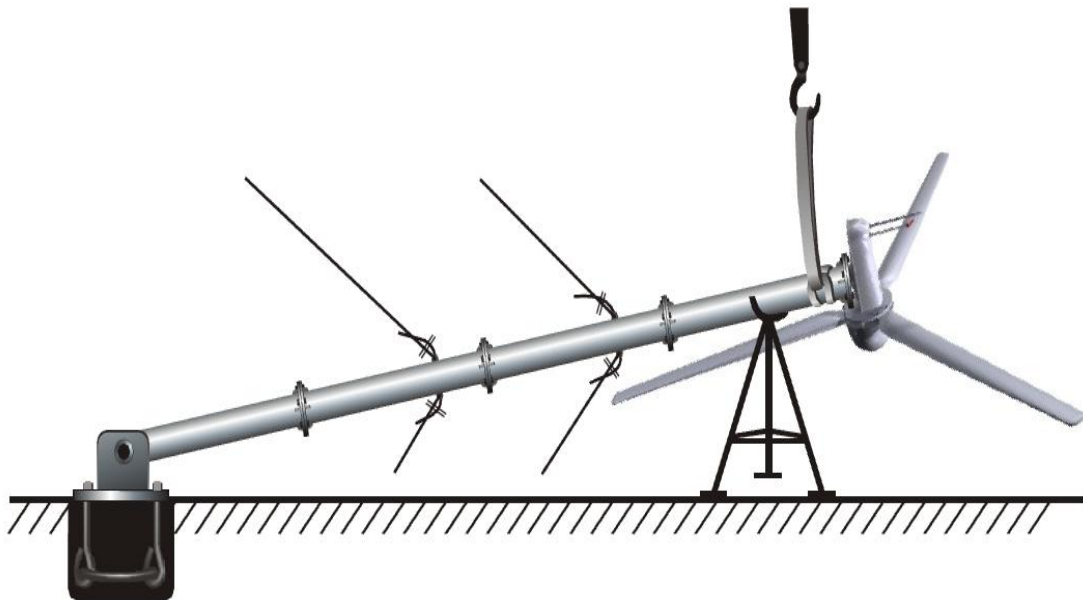
*Σχήμα 17.14 Τοποθέτηση του προστατευτικού κελύφους του άξονα περιστροφής μέσω των ράβδων του ανεμομέτρου.*

Η τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας θα γίνει σε ανοικτό χώρο μπροστά από το από το κεντρικό κτίριο του καταφυγίου. Ο χώρος βρίσκεται στην άκρη της κορυφής Φλαμπούρι της Πάρνηθας χωρίς κανένα φυσικό εμπόδιο γύρω από αυτή.

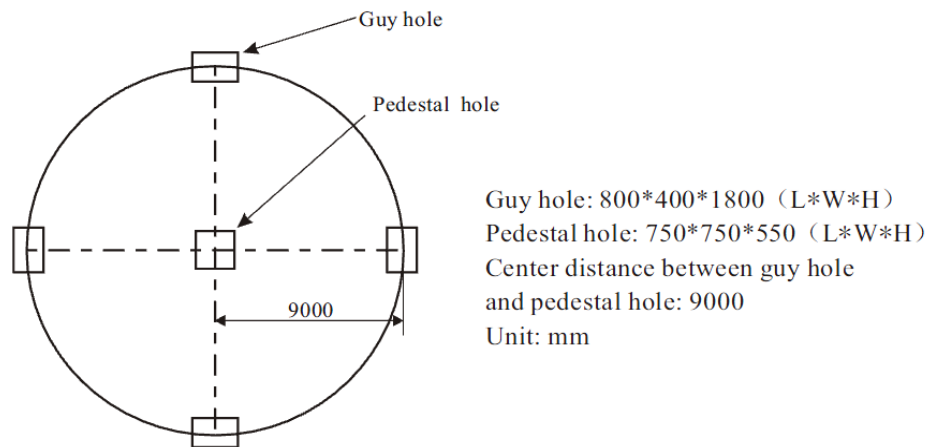




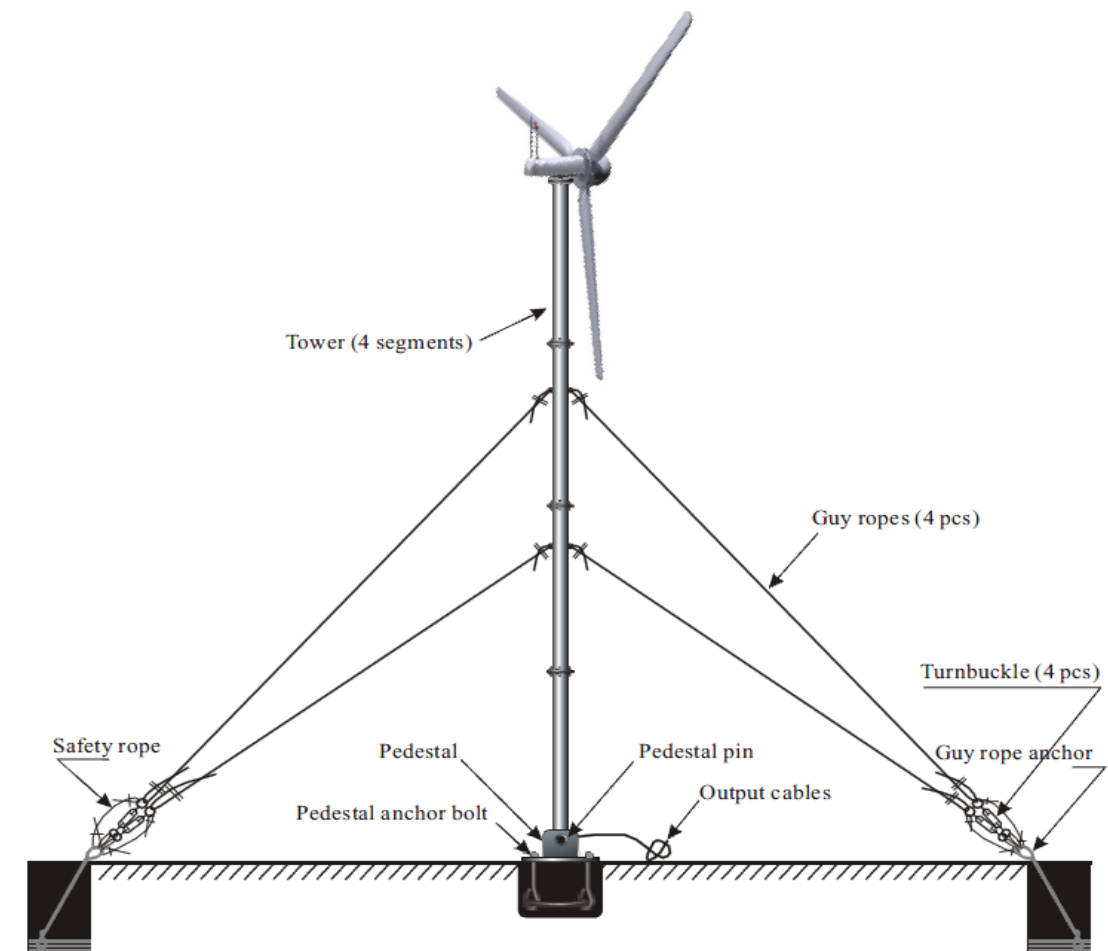
*Σχήμα 17.15 Χώρος τοποθέτησης της ανεμογεννήτριας των 10 KW.*



*Σχήμα 17.16 Σωστός τρόπος ανύψωσης της ανεμογεννήτριας.*



Σχήμα 17.17 Διαστάσεις θεμελίωσης του πύργου της ΑΓ.



Σχήμα 17.18 Τελική μορφή της ΑΓ πάνω στον πύργο στήριξης.

Η ανεμογεννήτριά μας θα τοποθετηθεί πάνω σε πύργο ύψους 12m σωληνωτό. Ο πύργος αποτελείται από τέσσερα επί μέρους κομμάτια τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ειδικά μπουλόνια. Για μεγαλύτερη στατικότητα ο πύργος θα είναι συνδεδεμένος

με 6 συρματόσκοινα τα οποία θα εδράζονται σε ειδικές βάσεις στήριξης από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα συρματόσκοινα συγκρατούν το πύργο σε δύο διαφορετικά ύψη. Στα σημεία σύνδεσης των συρματόσκοινων με τις βάσεις στήριξης υπάρχουν ειδικοί σφικτήρες ρυθμιζόμενοι. Οι διαστάσεις της θεμελίωσης του πύργου καθώς και των βάσεων έδρασης των συρματόσκοινων φαίνονται στα σχέδια των προηγούμενων σελίδων.

Τέλος προχωράμε στην επιλογή του κατάλληλου ανορθωτή – ρυθμιστή φόρτισης για την ανεμογεννήτριά μας. Επιλέγουμε τον **AC/DC 24V/40A modular converter της εταιρίας Siemens**. Ο μετατροπέας αυτός ανορθώνει το εναλλασσόμενο ρεύμα που παράγεται απ' την ανεμογεννήτρια σε συνεχές για την φόρτιση των συσσωρευτών.

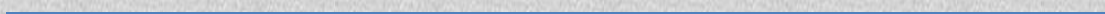


*Σχήμα 17.19 Ο 24V/40A modular converter της εταιρίας Siemens.*

Ο συγκεκριμένος ανορθωτής καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις της εφαρμογής μας καθώς δέχεται στην είσοδό του τάσεις έως και 304 V AC και ρεύμα μεγαλύτερο από 80A, ενώ στην έξοδο του δίνει πλήρως ανορθωμένα μεγέθη με τάση κατάλληλη για φόρτιση συσσωρευτών 24V, όσο δηλαδή και οι συσσωρευτές μας και ένταση ρεύματος 40A. Υπερκαλύπτει επομένως τα ζητούμενα μεγέθη. Παράλληλα με την ανόρθωση κάνει και έλεγχο στη διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών επιτηρώντας την τάση και την ένταση ρεύματος καθώς και τη κατάσταση των συσσωρευτών διακόπτοντας την τροφοδοσία όταν οι συσσωρευτές είναι πλήρως φορτισμένοι. Είναι σχεδιασμένος να δέχεται έως και δύο φάσεις στην είσοδό του, έχει μεγάλο βαθμό απόδοσης, μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας αφού μπορεί να λειτουργεί και σε θερμοκρασίες έως και 70°C .

Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*



## 18.1 Επιλογή Ηλεκτροπαραγωγού Ζεύγους (H/Z)

Το τελευταίο στάδιο της μελέτης του Υβριδικού μας συστήματος είναι η επιλογή του κατάλληλου H/Z. Η γεννήτρια αποτελεί μονάδα εφεδρείας στο σύστημά μας και συνεπώς καλείται να καλύψει την αδυναμία επαρκούς ηλεκτροδότησης του καταφυγίου και τις πιθανές βλάβες που μπορεί να προκύψουν. Ως εκ τούτου το H/Z δεν τοποθετείται με σκοπό τη συνεχή λειτουργία του αλλά εφόσον χρειαστεί θα πρέπει να ανταποκριθεί πλήρως στις ανάγκες του συστήματος μας.

Πρώτο μέλημά μας είναι να μπορεί το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος να καλύψει τις ισχύεις αιχμής που πιθανώς να υπάρξουν. Με δεδομένο ότι τόσο η ανεμογεννήτρια όσο και τα φωτοβολταϊκά έχουν υπολογιστεί να καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες του καταφυγίου αλλά σε πιθανή ζήτηση ισχύος αιχμής οι κλιματολογικές συνθήκες πρέπει να είναι οι βέλτιστες, όλο το βάρος πέφτει στους συσσωρευτές και το H/Z.

Η ισχύς αιχμής του καταφυγίου όπως υπολογίστηκε στις προηγούμενες σελίδες είναι 4,673 KW. Επομένως το H/Z που θα επιλεγεί θα πρέπει να αποδώσει τουλάχιστον αυτή την ισχύ. Ακόμη θα πρέπει να συνοδεύεται από σύστημα παρακολούθησης των φορτίων ζήτησης και να τίθεται εκτός όταν τα φορτία θα καλύπτονται από τις άλλες πηγές. Με αυτά τα δεδομένα επιλέγουμε την γεννήτρια Diesel DHY6000SE-3 της εταιρίας HYUNDAI.

Η γεννήτρια αυτή διαθέτει:

- Ηλεκτρονικό πίνακα ελέγχου.
- Ενσωματωμένο μετρητή ωρών για ειδοποίηση service.
- Μεταλλικό πλαίσιο 32mm.
- Σύστημα ειδοποίησης χαμηλής στάθμης λαδιού με συνέπεια την αυτόματη διακοπή λειτουργίας της γεννήτριας.
- Τετράχρονο αερόψυκτο κινητήρα με προθέρμανση.
- Πίνακα ασφαλείας.
- Ισχυρό αντιδονητικό σύστημα
- Δυνατότητα σύνδεσης με μεταγωγικό πίνακα για την έναρξη λειτουργίας της γεννήτριας σε περίπτωση διακοπής ρεύματος.
- Επιτηρητής τάσης AVR.
- Ρόδες για εύκολη μετακίνηση.



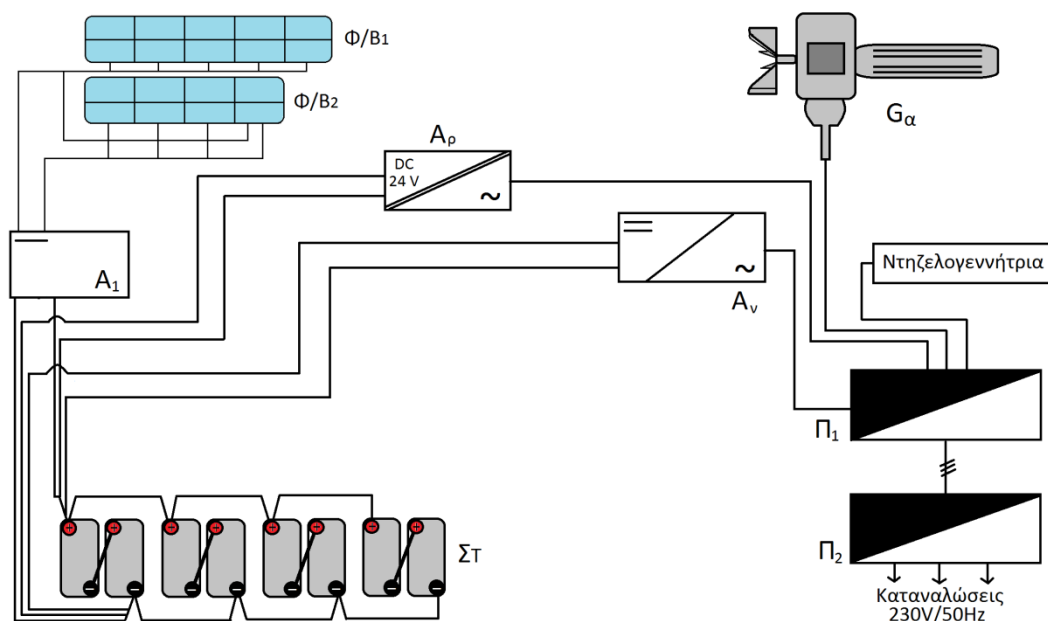
Σχήμα 18.1 Η γεννήτρια πετρελαίου DHY6000SE-3.

SKU	DHY6000SE
Κατασκευαστής	HYUNDAI
Εγγύηση	1 Έτος
Υλικά Παράδοσης	ΡΟΔΕΣ
Κνα (max)/hp	7,00/10
Κνα (normal)	6,25
Βαρος	160 kg
Εκκίνηση	ΜΙΖΑ
Εξοδος (dc)	ΝΑΙ
Καυσίμο	ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ
Κινητήρας	ΑΕΡΟΨΥΚΤΟΣ ΜΟΝΟΚΥΛΙΝΔΡΟΣ
Ρεζερβουαρ (lt)	17
Σταθμη θορυβου (db)	72,6
Συνεχης λειτουργια (hr)	16
Συχνοτητα (Hz)	50
Ταση	230
Επιτηρητής τάσης	ΝΑΙ

Σχήμα 18.2 Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών της γεννήτρια πετρελαίου DHY6000SE-3.

## 18.2 Τελικό Υβριδικό Σύστημα

Αφού ολοκληρώθηκε η επιλογή όλων των επιμέρους τμημάτων του υβριδικού συστήματός μας, προχωράμε στην ολοκληρωμένη σχεδίασή του. Το σκαρίφημα συνδεσμολογίας του συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 18.3 Τελική μορφή του υβριδικού συστήματος για το ορειβατικό καταφύγιο.

Όπου

$\Phi/B_1, \Phi/B_2$  = Ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων.

$A_1$  = Αυτόματος φορτιστής – ρυθμιστής.

$A_\nu$  = Ηλεκτρονικός αντιστροφέας (inverter).

$A_\rho$  = Ανορθωτής – φορτιστής.

$\Sigma_T$  = Συστοιχία συσσωρευτών βιομηχανικού τύπου.

$G_\alpha$  = Ανεμογεννήτρια.

$\Pi_1$  = Πίνακας αυτοματισμού, ελέγχου και παρακολούθησης.

$\Pi_2$  = Πίνακας διανομής ηλεκτρικού ρεύματος 230V/ 50 Hz AC.

### 18.3 Λειτουργία του συστήματος

Τα Φ/Β πλαίσια παράγουν ηλεκτρική ενέργεια η οποία μέσω του φορτιστή – ρυθμιστή  $A_1$  οδηγείται προς τους συσσωρευτές  $\Sigma_T$  για αποθήκευση ή προς τον ηλεκτρονικό αντιστροφέα  $A_v$  για μετατροπή από την DC σε 230V/50 Hz AC. Από τον αντιστροφέα το ηλεκτρικό ρεύμα ελέγχεται από τον πίνακα αυτοματισμού  $\Pi_1$  και εφόσον καλύπτει τις ανάγκες ζήτησης της κατανάλωσης διοχετεύεται προς τον πίνακα  $\Pi_2$  για διανομή.

Όταν τα φορτία ζήτησης αυξηθούν ο πίνακας αυτοματισμού  $\Pi_1$  δίνει εντολή στην ανεμογεννήτρια  $G_a$  να ξεκινήσει και να αναλάβει τα φορτία της κατανάλωσης, διακόπτοντας την τροφοδοσία από τον ηλεκτρονικό αντιστροφέα. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας γίνεται φόρτιση των συσσωρευτών αποθήκευσης  $\Sigma_T$  δια μέσου του ανορθωτή – φορτιστή  $A_p$ .

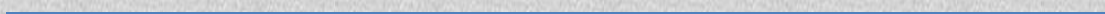
Αν υπάρξει περαιτέρω αύξηση των φορτίων κατανάλωσης ή η ανεμογεννήτρια αδυνατεί να ανταπεξέλθει στην τροφοδότηση του συστήματος με ηλεκτρική ενέργεια, ο πίνακας αυτοματισμού  $\Pi_1$  δίνει εντολή στην ντιζελογεννήτρια να ξεκινήσει αυτή τη φορά και να αναλάβει τα φορτία της κατανάλωσης, διακόπτοντας την τροφοδοσία από την ανεμογεννήτρια  $G_a$ .

Αν κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ντιζελογεννήτριας, μειωθούν τα φορτία ζήτησης και καλύπτονται από τα Φ/Β πλαίσια ή από τους συσσωρευτές αποθήκευσης, ο πίνακας αυτοματισμού  $\Pi_1$  δίνει εντολή για σταμάτημα της ντιζελογεννήτριας και σύνδεση με τον ηλεκτρονικό αντιστροφέα.



Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

### Monthly Solar Irradiation

#### PVGIS Estimates of long-term monthly averages

Location: 38 ° 9'41 "N, 23 ° 44'49" East, Elevation: 1143 m a.s.l.

Solar radiation database used: PVGIS-classic

Nominal power of the PV system: 4.3 kW (crystalline silicon)

Estimated losses due to temperature: 9.3% (using local ambient emperature)

Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.8%

Other losses (cables, inverter etc.): 28.5%

Combined PV system losses: 37.0%

#### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 10° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	1.97	61.1	2.44	75.7
Feb	2.51	70.4	3.14	88.0
Mar	3.44	107	4.36	135
Apr	4.40	132	5.72	172
May	4.88	151	6.54	203
Jun	5.25	157	7.20	216
Jul	5.17	160	7.17	222
Aug	4.78	148	6.59	204
Sep	4.16	125	5.58	167
Oct	3.01	93.2	3.92	122
Nov	2.06	61.7	2.62	78.5
Dec	1.67	51.9	2.09	64.8
Yearly average	3.61	110	4.79	146
<b>Total for year</b>	<b>1320</b>		<b>1750</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

## Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 15° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.10	65.3	2.60	80.6
Feb	2.63	73.6	3.29	92.1
Mar	3.53	109	4.49	139
Apr	4.45	133	5.79	174
May	4.87	151	6.54	203
Jun	5.21	156	7.16	215
Jul	5.15	160	7.15	222
Aug	4.82	149	6.66	206
Sep	4.27	128	5.74	172
Oct	3.14	97.2	4.10	127
Nov	2.18	65.5	2.77	83.1
Dec	1.79	55.5	2.23	69.1
Yearly average	3.68	112	4.88	149
<b>Total for year</b>	<b>1340</b>		<b>1780</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

## Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 15° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.22	68.9	2.75	85.1
Feb	2.73	76.3	3.42	95.7
Mar	3.61	112	4.60	143
Apr	4.47	134	5.84	175
May	4.84	150	6.51	202
Jun	5.14	154	7.07	212
Jul	5.10	158	7.09	220
Aug	4.83	150	6.68	207
Sep	4.36	131	5.86	176
Oct	3.25	101	4.25	132
Nov	2.29	68.7	2.91	87.3
Dec	1.89	58.7	2.35	73.0
Yearly average	3.73	114	4.95	151
<b>Total for year</b>	<b>1360</b>		<b>1810</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 25° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.32	72.1	2.87	89.1
Feb	2.81	78.6	3.53	98.8
Mar	3.66	114	4.68	145
Apr	4.48	134	5.86	176
May	4.79	149	6.44	200
Jun	5.05	152	6.95	209
Jul	5.03	156	6.99	217
Aug	4.81	149	6.67	207
Sep	4.42	133	5.96	179
Oct	3.34	104	4.38	136
Nov	2.38	71.5	3.03	91.0
Dec	1.98	61.5	2.47	76.4
Yearly average	3.76	114	4.99	152
<b>Total for year</b>	<b>1370</b>		<b>1820</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 30° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Μήνας	Ed	Em	Hd	Hm
Ιαν	2,41	74,7	2,99	92,6
Φεβρουάριος	2,87	80,5	3,62	101
Μαρ	3,70	115	4,73	147
Απρίλιος	4,46	134	5,84	175
Μάιος	4,72	146	6,34	197
Ιούνιος	4,94	148	6,80	204
Ιούλιος	4,93	153	6,85	212
Αύγουστος	4,77	148	6,62	205
Σεπτέμβριος	4,45	134	6,01	180
Οκτώβριο	3,42	106	4,49	139
Νοέμβριος	2,46	73,9	3,14	94,2
Δεκέμβριος	2,06	63,9	2,56	79,5

<b>Ετήσιος μέσος όρος</b>	3,77	115	5,01	152
<b>Συνολικά για το έτος</b>	<b>1380</b>		<b>1830</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 35° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.48	77.0	3.08	95.6
Feb	2.92	81.9	3.69	103
Mar	3.72	115	4.76	148
Apr	4.43	133	5.79	174
May	4.62	143	6.21	192
Jun	4.80	144	6.61	198
Jul	4.80	149	6.68	207
Aug	4.71	146	6.53	202
Sep	4.47	134	6.04	181
Oct	3.47	108	4.57	142
Nov	2.53	75.9	3.23	96.8
Dec	2.12	65.9	2.65	82.1
<b>Yearly average</b>	3.76	114	4.99	152
<b>Total for year</b>	<b>1370</b>		<b>1820</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 40° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.54	78.7	3.16	98.0
Feb	2.96	82.8	3.74	105
Mar	3.72	115	4.77	148
Apr	4.37	131	5.71	171
May	4.49	139	6.04	187

<b>Jun</b>	4.64	139	6.37	191
<b>Jul</b>	4.65	144	6.46	200
<b>Aug</b>	4.62	143	6.40	198
<b>Sep</b>	4.46	134	6.02	181
<b>Oct</b>	3.51	109	4.62	143
<b>Nov</b>	2.58	77.4	3.30	98.9
<b>Dec</b>	2.18	67.4	2.72	84.3
<b>Yearly average</b>	3.73	113	4.95	151
<b>Total for year</b>	<b>1360</b>		<b>1810</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

#### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 42° για την περιοχή της Πάρνηθας.

<b>Month</b>	<b>Ed</b>	<b>Em</b>	<b>Hd</b>	<b>Hm</b>
<b>Jan</b>	2.56	79.3	3.19	98.8
<b>Feb</b>	2.97	83.1	3.76	105
<b>Mar</b>	3.71	115	4.76	148
<b>Apr</b>	4.33	130	5.67	170
<b>May</b>	4.44	138	5.96	185
<b>Jun</b>	4.56	137	6.27	188
<b>Jul</b>	4.58	142	6.37	197
<b>Aug</b>	4.58	142	6.34	197
<b>Sep</b>	4.44	133	6.00	180
<b>Oct</b>	3.52	109	4.64	144
<b>Nov</b>	2.59	77.8	3.32	99.6
<b>Dec</b>	2.19	68.0	2.74	85.0
<b>Yearly average</b>	3.71	113	4.92	150
<b>Total for year</b>	<b>1350</b>		<b>1800</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

## Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 43° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.57	79.6	3.20	99.1
Feb	2.97	83.2	3.76	105
Mar	3.71	115	4.75	147
Apr	4.32	130	5.64	169
May	4.41	137	5.92	184
Jun	4.53	136	6.22	187
Jul	4.55	141	6.32	196
Aug	4.55	141	6.31	195
Sep	4.44	133	5.99	180
Oct	3.52	109	4.64	144
Nov	2.60	78.0	3.33	99.9
Dec	2.20	68.2	2.75	85.3
Yearly average	3.70	113	4.91	149
<b>Total for year</b>	<b>1350</b>		<b>1790</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

## Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 44° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.58	79.8	3.21	99.5
Feb	2.97	83.3	3.77	105
Mar	3.71	115	4.75	147
Apr	4.30	129	5.62	169
May	4.38	136	5.88	182
Jun	4.49	135	6.17	185
Jul	4.51	140	6.27	194
Aug	4.53	140	6.27	194
Sep	4.43	133	5.98	179
Oct	3.52	109	4.64	144
Nov	2.61	78.2	3.34	100
Dec	2.21	68.4	2.76	85.6
Yearly average	3.69	112	4.89	149
<b>Total for year</b>	<b>1350</b>		<b>1790</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 45° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.58	80.1	3.22	99.8
Feb	2.98	83.4	3.77	106
Mar	3.70	115	4.74	147
Apr	4.28	128	5.59	168
May	4.35	135	5.84	181
Jun	4.45	133	6.11	183
Jul	4.48	139	6.22	193
Aug	4.51	140	6.24	193
Sep	4.42	133	5.97	179
Oct	3.52	109	4.65	144
Nov	2.61	78.4	3.35	100
Dec	2.21	68.6	2.77	85.9
Yearly average	3.68	112	4.88	148
<b>Total for year</b>	<b>1340</b>		<b>1780</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 46° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.59	80.3	3.23	100
Feb	2.98	83.4	3.77	106
Mar	3.69	115	4.73	147
Apr	4.26	128	5.57	167
May	4.32	134	5.79	180
Jun	4.41	132	6.05	182
Jul	4.44	138	6.16	191
Aug	4.48	139	6.20	192
Sep	4.41	132	5.95	179
Oct	3.53	109	4.65	144
Nov	2.62	78.6	3.35	101
Dec	2.22	68.8	2.78	86.2
Yearly average	3.66	111	4.86	148
<b>Total for year</b>	<b>1340</b>		<b>1770</b>	



Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 47° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.60	80.4	3.24	100
Feb	2.98	83.5	3.78	106
Mar	3.69	114	4.72	146
Apr	4.24	127	5.54	166
May	4.28	133	5.75	178
Jun	4.36	131	5.99	180
Jul	4.40	136	6.11	189
Aug	4.45	138	6.16	191
Sep	4.40	132	5.94	178
Oct	3.53	109	4.65	144
Nov	2.62	78.7	3.36	101
Dec	2.23	69.0	2.79	86.4
Yearly average	3.65	111	4.84	147
<b>Total for year</b>	<b>1330</b>		<b>1770</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 48° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.60	80.6	3.24	101
Feb	2.98	83.5	3.78	106
Mar	3.68	114	4.71	146
Apr	4.22	127	5.51	165
May	4.25	132	5.70	177
Jun	4.32	130	5.94	178
Jul	4.36	135	6.05	188
Aug	4.42	137	6.12	190
Sep	4.39	132	5.92	178
Oct	3.53	109	4.65	144
Nov	2.63	78.8	3.37	101

<b>Dec</b>	2.23	69.2	2.79	86.6
<b>Yearly average</b>	3.64	111	4.82	147
<b>Total for year</b>	<b>1330</b>		<b>1760</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 49° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
<b>Jan</b>	2.61	80.8	3.25	101
<b>Feb</b>	2.98	83.5	3.78	106
<b>Mar</b>	3.67	114	4.70	146
<b>Apr</b>	4.20	126	5.48	164
<b>May</b>	4.21	131	5.65	175
<b>Jun</b>	4.28	128	5.87	176
<b>Jul</b>	4.32	134	5.99	186
<b>Aug</b>	4.39	136	6.08	188
<b>Sep</b>	4.37	131	5.90	177
<b>Oct</b>	3.52	109	4.65	144
<b>Nov</b>	2.63	78.9	3.37	101
<b>Dec</b>	2.24	69.3	2.80	86.8
<b>Yearly average</b>	3.62	110	4.80	146
<b>Total for year</b>	<b>1320</b>		<b>1750</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 50° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
<b>Jan</b>	2.61	80.9	3.26	101
<b>Feb</b>	2.98	83.5	3.78	106
<b>Mar</b>	3.66	114	4.69	145
<b>Apr</b>	4.17	125	5.45	163
<b>May</b>	4.18	129	5.60	174

<b>Jun</b>	4.23	127	5.81	174
<b>Jul</b>	4.27	132	5.93	184
<b>Aug</b>	4.36	135	6.03	187
<b>Sep</b>	4.36	131	5.88	176
<b>Oct</b>	3.52	109	4.64	144
<b>Nov</b>	2.63	79.0	3.38	101
<b>Dec</b>	2.24	69.4	2.81	87.0
<b>Yearly average</b>	3.60	110	4.78	145
<b>Total for year</b>	<b>1320</b>		<b>1740</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

#### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 51° για την περιοχή της Πάρνηθας.

<b>Month</b>	<b>Ed</b>	<b>Em</b>	<b>Hd</b>	<b>Hm</b>
<b>Jan</b>	2.61	81.0	3.26	101
<b>Feb</b>	2.98	83.4	3.78	106
<b>Mar</b>	3.65	113	4.68	145
<b>Apr</b>	4.15	125	5.41	162
<b>May</b>	4.14	128	5.55	172
<b>Jun</b>	4.19	126	5.75	172
<b>Jul</b>	4.23	131	5.87	182
<b>Aug</b>	4.33	134	5.99	186
<b>Sep</b>	4.34	130	5.86	176
<b>Oct</b>	3.52	109	4.64	144
<b>Nov</b>	2.64	79.1	3.38	101
<b>Dec</b>	2.24	69.6	2.81	87.2
<b>Yearly average</b>	3.59	109	4.75	145
<b>Total for year</b>	<b>1310</b>		<b>1730</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

## Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 52° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.62	81.1	3.27	101
Feb	2.98	83.4	3.77	106
Mar	3.64	113	4.66	144
Apr	4.13	124	5.38	161
May	4.10	127	5.50	170
Jun	4.14	124	5.68	171
Jul	4.19	130	5.81	180
Aug	4.30	133	5.94	184
Sep	4.33	130	5.83	175
Oct	3.52	109	4.63	144
Nov	2.64	79.1	3.38	101
Dec	2.25	69.7	2.82	87.3
Yearly average	3.57	109	4.73	144
<b>Total for year</b>	<b>1300</b>		<b>1730</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

## Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 53° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.62	81.2	3.27	101
Feb	2.97	83.3	3.77	106
Mar	3.63	113	4.64	144
Apr	4.10	123	5.34	160
May	4.06	126	5.45	169
Jun	4.09	123	5.62	169
Jul	4.14	128	5.75	178
Aug	4.27	132	5.90	183
Sep	4.31	129	5.81	174
Oct	3.51	109	4.63	143
Nov	2.64	79.2	3.38	102
Dec	2.25	69.7	2.82	87.4
Yearly average	3.55	108	4.70	143
<b>Total for year</b>	<b>1300</b>		<b>1720</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 54° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.62	81.3	3.27	101
Feb	2.97	83.2	3.77	105
Mar	3.62	112	4.63	143
Apr	4.07	122	5.31	159
May	4.02	125	5.39	167
Jun	4.04	121	5.55	167
Jul	4.09	127	5.68	176
Aug	4.23	131	5.85	181
Sep	4.29	129	5.78	173
Oct	3.51	109	4.62	143
Nov	2.64	79.2	3.39	102
Dec	2.25	69.8	2.82	87.5
Yearly average	3.53	107	4.68	142
<b>Total for year</b>	<b>1290</b>		<b>1710</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 55° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.62	81.3	3.28	102
Feb	2.97	83.1	3.76	105
Mar	3.61	112	4.61	143
Apr	4.04	121	5.27	158
May	3.98	123	5.34	165
Jun	3.99	120	5.48	165
Jul	4.05	125	5.62	174
Aug	4.20	130	5.80	180
Sep	4.27	128	5.75	173
Oct	3.50	108	4.61	143
Nov	2.64	79.2	3.39	102
Dec	2.25	69.9	2.83	87.6
Yearly average	3.51	107	4.65	141
<b>Total for year</b>	<b>1280</b>		<b>1700</b>	

--	--	--

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 56° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.62	81.3	3.28	102
Feb	2.96	83.0	3.75	105
Mar	3.59	111	4.59	142
Apr	4.02	120	5.23	157
May	3.94	122	5.28	164
Jun	3.94	118	5.41	162
Jul	4.00	124	5.55	172
Aug	4.16	129	5.75	178
Sep	4.25	127	5.73	172
Oct	3.49	108	4.60	143
Nov	2.64	79.2	3.38	102
Dec	2.25	69.9	2.83	87.7
Yearly average	3.49	106	4.62	140
<b>Total for year</b>	<b>1270</b>		<b>1690</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 57° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.62	81.3	3.28	102
Feb	2.96	82.8	3.75	105
Mar	3.58	111	4.57	142
Apr	3.99	120	5.19	156
May	3.90	121	5.22	162
Jun	3.89	117	5.34	160
Jul	3.95	122	5.48	170
Aug	4.12	128	5.69	176
Sep	4.23	127	5.69	171
Oct	3.49	108	4.59	142
Nov	2.64	79.1	3.38	101

<b>Dec</b>	2.26	69.9	2.83	87.7
<b>Yearly average</b>	3.47	106	4.59	140
<b>Total for year</b>	<b>1270</b>		<b>1670</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 58° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
<b>Jan</b>	2.62	81.3	3.28	102
<b>Feb</b>	2.95	82.7	3.74	105
<b>Mar</b>	3.56	110	4.55	141
<b>Apr</b>	3.95	119	5.15	154
<b>May</b>	3.85	119	5.16	160
<b>Jun</b>	3.84	115	5.27	158
<b>Jul</b>	3.90	121	5.41	168
<b>Aug</b>	4.08	127	5.64	175
<b>Sep</b>	4.21	126	5.66	170
<b>Oct</b>	3.48	108	4.58	142
<b>Nov</b>	2.64	79.1	3.38	101
<b>Dec</b>	2.26	69.9	2.83	87.7
<b>Yearly average</b>	3.45	105	4.56	139
<b>Total for year</b>	<b>1260</b>		<b>1660</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 59° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
<b>Jan</b>	2.62	81.3	3.28	102
<b>Feb</b>	2.95	82.5	3.73	104
<b>Mar</b>	3.55	110	4.53	140
<b>Apr</b>	3.92	118	5.11	153
<b>May</b>	3.81	118	5.10	158
<b>Jun</b>	3.78	114	5.20	156
<b>Jul</b>	3.85	119	5.34	166

<b>Aug</b>	4.04	125	5.58	173
<b>Sep</b>	4.18	125	5.63	169
<b>Oct</b>	3.47	107	4.57	142
<b>Nov</b>	2.63	79.0	3.38	101
<b>Dec</b>	2.25	69.9	2.83	87.7
<b>Yearly average</b>	3.42	104	4.53	138
<b>Total for year</b>	<b>1250</b>		<b>1650</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 60° για την περιοχή της Πάρνηθας.

<b>Month</b>	<b>Ed</b>	<b>Em</b>	<b>Hd</b>	<b>Hm</b>
<b>Jan</b>	2.62	81.2	3.27	102
<b>Feb</b>	2.94	82.3	3.72	104
<b>Mar</b>	3.53	109	4.50	140
<b>Apr</b>	3.89	117	5.06	152
<b>May</b>	3.76	117	5.04	156
<b>Jun</b>	3.73	112	5.12	154
<b>Jul</b>	3.79	118	5.27	163
<b>Aug</b>	4.00	124	5.53	171
<b>Sep</b>	4.16	125	5.59	168
<b>Oct</b>	3.46	107	4.55	141
<b>Nov</b>	2.63	78.9	3.37	101
<b>Dec</b>	2.25	69.9	2.83	87.7
<b>Yearly average</b>	3.40	103	4.49	137
<b>Total for year</b>	<b>1240</b>		<b>1640</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

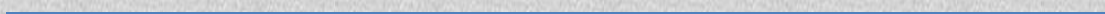
Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).



Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

## Κλιματολογικά δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Πάρνηθας

NAME: PARNITHA CITY: STATE

ELEV: 1220 m LAT: 38° 09' 48" N LONG: 23° 43' 05" E

## Τιμές Ιανουαρίου 2011

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
1	2.3	4.7	13:00	0.4	6:10	16.0	0.0	0.0	11.4	27.4	3:00	NW
2	3.5	4.6	15:10	2.7	5:20	14.8	0.0	17.4	17.9	56.3	12:40	S
3	2.9	4.9	13:10	0.5	00:00	15.4	0.0	2.8	18.0	46.7	22:50	NNW
4	-0.8	0.7	0:30	-1.6	22:50	19.1	0.0	0.2	23.8	46.7	8:10	NNW
5	-0.8	1.1	12:00	-1.9	6:50	19.1	0.0	0.2	8.2	30.6	18:10	N
6	-0.1	2.2	14:10	-1.8	8:00	18.4	0.0	0.0	13.5	33.8	6:10	NNW
7	1.2	3.8	13:30	-0.2	0:20	17.1	0.0	0.0	17.4	41.8	23:00	NW
8	5.2	9.1	13:20	1.9	0:10	13.2	0.0	0.0	18.3	46.7	0:40	WNW
9	8.3	10.3	12:00	6.2	0:20	10.1	0.0	0.0	13.2	35.4	22:40	NNW
10	8.4	10.7	9:00	7.1	18:20	9.9	0.0	0.0	4.8	25.7	0:10	NNW
11	4.4	7.8	0:10	2.9	6:40	13.9	0.0	0.0	11.7	27.4	2:20	WNW
12	4.4	5.3	11:40	3.6	6:30	13.9	0.0	3.0	11.1	29.0	16:30	SSE
13	3.7	4.6	0:10	2.9	4:40	14.7	0.0	8.2	21.2	43.5	11:30	N
14	4.1	7.2	9:40	3.0	1:10	14.2	0.0	0.2	23.0	64.4	20:50	NNW
15	6.2	9.9	23:20	3.7	0:30	12.2	0.0	0.0	22.0	53.1	0:30	NNW
16	2.1	7.5	0:30	0.2	14:10	16.2	0.0	32.8	41.7	114.3	23:20	NW
17	0.6	1.5	13:50	0.1	7:30	17.7	0.0	0.4	49.1	112.7	0:10	N
18	4.3	6.6	14:50	0.1	1:00	14.1	0.0	0.2	32.5	66.0	5:20	N
19	7.6	11.3	12:00	5.7	7:20	10.7	0.0	0.0	10.5	30.6	0:10	N
20	5.2	7.1	0:10	3.1	22:10	13.1	0.0	0.0	8.2	24.1	13:40	S
21	4.2	7.1	12:00	2.9	6:40	14.2	0.0	3.6	14.0	53.1	22:40	S
22	4.7	7.1	14:10	3.4	00:00	13.6	0.0	4.2	21.6	61.2	22:20	SSW
23	2.9	4.6	13:30	1.7	23:40	15.4	0.0	0.2	22.2	62.8	1:20	WSW
24	1.2	3.6	12:00	-1.6	23:00	17.2	0.0	2.8	17.7	38.6	6:20	WNW
25	-3.0	-0.9	5:10	-5.2	23:20	21.3	0.0	0.2	22.5	59.5	12:30	NNW
26	-3.8	-1.1	13:40	-6.6	5:00	22.1	0.0	0.0	11.7	29.0	3:40	NW
27	-0.4	2.3	12:10	-2.8	1:50	18.8	0.0	0.4	13.4	43.5	00:00	SE
28	0.1	0.9	5:10	-0.3	1:50	18.2	0.0	13.0	44.3	88.5	12:30	NE
29	-1.6	-0.1	0:50	-2.7	21:40	19.9	0.0	9.0	1.6	32.2	0:20	NNW
30	-2.4	-1.3	14:10	-3.4	7:50	20.7	0.0	0.2	0.0	0.0	---	---
31	-1.4	-0.2	13:50	-2.2	6:10	19.8	0.0	1.0	0.0	1.6	12:30	NNE
	2.4	11.3	19	-6.6	26	495.2	0.0	100.0	17.6	114.3	16	NNW

## Τιμές Φεβρουαρίου 2011

DAY	MEAN		TIME	LOW	TIME	HEAT	COOL	RAIN	AVG		TIME	DOM
	TEMP	HIGH				DEG	DEG		WIND	HIGH		DIR
1	-3.8	-2.2	0:10	-5.6	00:00	22.1	0.0	0.4	18.8	78.9	17:50	N
2	-3.3	-0.6	14:30	-6.2	2:00	21.6	0.0	0.0	36.4	80.5	2:00	NNE
3	-0.5	-0.1	19:50	-1.6	0:10	18.8	0.0	54.2	40.4	99.8	21:20	NE
4	-2.5	-0.9	0:10	-3.3	20:40	20.8	0.0	4.8	19.0	90.1	4:20	ENE
5	-2.2	-0.4	16:00	-3.2	0:20	20.5	0.0	2.8	15.0	57.9	20:30	NE
6	3.7	7.6	13:20	-1.6	1:20	14.6	0.0	0.0	21.6	49.9	20:00	NE
7	5.1	6.5	0:50	3.7	7:20	13.3	0.0	0.0	35.7	66.0	17:40	N
8	6.3	8.7	15:30	4.3	1:40	12.0	0.0	0.0	27.2	69.2	5:20	NE
9	7.1	10.8	12:00	4.2	22:50	11.3	0.0	0.0	15.4	48.3	20:10	NNE
10	2.4	4.5	0:30	0.4	00:00	15.9	0.0	0.0	32.7	64.4	8:50	N
11	2.8	6.4	15:50	-0.7	7:10	15.6	0.0	0.0	18.3	59.5	1:40	NW
12	5.9	8.5	6:00	3.7	0:10	12.4	0.0	0.2	27.2	61.2	22:20	NW
13	5.3	9.3	12:40	3.2	23:10	13.0	0.0	0.0	15.8	57.9	3:00	SSE
14	3.7	6.6	13:30	2.4	7:00	14.7	0.0	0.0	6.6	22.5	14:20	S
15	1.5	3.1	0:20	-0.3	23:10	16.8	0.0	0.8	27.4	53.1	22:30	N
16	0.8	3.5	12:50	-0.9	4:50	17.5	0.0	0.4	16.7	51.5	0:40	SW
17	4.4	6.7	13:20	1.7	0:10	13.9	0.0	0.0	17.4	46.7	22:10	SSW
18	5.3	7.1	18:40	2.2	21:30	13.1	0.0	5.8	35.1	104.6	21:30	SE
19	3.1	3.7	6:20	2.2	23:40	15.3	0.0	29.8	32.3	103.0	15:30	WSW
20	2.0	3.0	13:50	1.4	22:30	16.3	0.0	3.0	20.3	75.6	0:30	W
21	2.4	4.2	00:00	1.0	4:50	15.9	0.0	3.2	9.7	59.5	22:50	SE
22	3.8	5.6	13:40	2.6	7:40	14.6	0.0	16.6	18.5	61.2	0:40	SSE
23	3.0	4.4	13:10	1.7	23:50	15.3	0.0	0.8	23.3	48.3	21:30	N
24	3.0	4.2	12:10	1.7	1:20	15.3	0.0	35.6	29.3	75.6	23:10	NE
25	-0.2	2.6	0:10	-0.9	00:00	18.5	0.0	21.2	28.5	90.1	12:40	W
26	-1.7	-0.9	0:10	-2.9	23:20	20.0	0.0	0.0	2.9	46.7	11:40	NNW
27	-2.6	-1.4	13:10	-3.2	2:30	20.9	0.0	0.0	0.0	0.0	---	---
28	-1.6	-0.3	14:10	-2.9	0:10	19.9	0.0	0.6	0.0	0.0	---	---
	1.9	10.8	9	-6.2	2	459.9	0.0	180.2	21.1	104.6	18	N

## Τιμές Μαρτίου 2011

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
1	-1.3	-0.7	14:20	-1.9	19:00	19.6	0.0	6.0	0.8	32.2	13:20	NE
2	0.4	2.9	17:10	-1.4	0:10	17.9	0.0	10.4	7.1	41.8	23:00	N
3	2.0	4.7	11:30	0.4	23:50	16.3	0.0	0.2	15.3	54.7	00:00	NNW
4	-0.1	2.8	23:40	-0.9	21:20	18.4	0.0	0.0	28.8	59.5	15:00	N
5	3.3	7.4	10:00	0.1	6:50	15.0	0.0	0.0	9.3	41.8	6:40	NE
6	3.1	4.9	16:10	0.0	00:00	15.3	0.0	2.8	21.9	64.4	23:40	W
7	-2.7	0.8	1:50	-4.6	19:20	21.0	0.0	5.4	32.3	77.2	0:20	WNW
8	-6.1	-4.4	0:10	-7.4	20:10	24.4	0.0	0.8	31.9	80.5	2:20	ESE
9	-7.5	-6.2	14:10	-8.4	9:50	25.8	0.0	0.8	11.7	48.3	5:40	S
10	-6.2	-4.4	16:30	-8.2	1:20	24.6	0.0	0.2	19.5	56.3	22:20	S
11	-1.1	1.8	00:00	-5.2	0:50	19.4	0.0	0.0	27.0	49.9	14:00	NW
12	4.4	8.3	14:40	0.8	1:10	13.9	0.0	0.0	9.0	32.2	4:00	S
13	5.9	8.3	13:40	3.5	6:30	12.4	0.0	0.0	3.7	14.5	11:00	S
14	7.7	10.3	16:00	5.6	8:00	10.7	0.0	0.0	10.1	27.4	8:00	SSW
15	8.5	11.0	15:20	6.7	3:50	9.8	0.0	0.0	11.6	30.6	19:20	SSW
16	8.9	11.2	16:00	7.2	7:20	9.4	0.0	0.0	15.3	38.6	6:00	SSW
17	8.1	10.8	1:00	5.6	23:00	10.3	0.0	1.4	18.8	46.7	16:40	S
18	7.9	11.5	15:00	5.8	2:10	10.4	0.0	0.0	15.6	41.8	21:30	SSW
19	6.7	10.6	12:30	5.1	19:20	11.6	0.0	0.6	12.2	41.8	2:10	SSW
20	3.6	5.6	0:10	1.8	22:30	14.8	0.0	2.8	22.9	61.2	16:50	NW
21	0.2	1.9	0:10	-1.8	00:00	18.1	0.0	5.4	49.4	82.1	9:00	ENE
22	-2.1	-1.1	13:10	-3.0	9:00	20.4	0.0	0.0	43.1	78.9	18:00	WSW
23	-0.9	0.7	00:00	-2.3	4:30	19.2	0.0	0.2	43.5	80.5	9:30	W
24	2.8	6.1	23:00	0.3	4:20	15.6	0.0	0.0	24.5	80.5	15:00	W
25	7.9	11.8	13:50	5.8	0:30	10.4	0.0	0.0	17.7	69.2	7:20	WNW
26	7.7	11.1	16:00	5.3	22:30	10.7	0.0	0.0	21.9	49.9	21:20	SSW
27	6.9	10.4	15:40	3.8	5:10	10.9	0.0	0.0	25.9	56.3	8:50	WSW
28	8.6	12.2	14:20	6.0	0:40	9.8	0.0	0.0	13.4	46.7	22:10	SSW
29	7.9	10.2	17:50	6.1	21:40	10.4	0.0	1.0	19.2	49.9	17:00	SSW
30	8.3	11.1	12:40	6.8	6:50	10.1	0.0	0.0	12.9	38.6	15:30	ESE
31	7.0	7.7	16:10	6.1	9:40	11.3	0.0	17.0	15.6	56.3	11:10	N
	3.2	12.2	28	-8.4	9	468.1	0.0	55.0	19.7	82.1	21	S

## Τιμές Απριλίου 2011

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
1	5.7	6.9	6:40	4.0	00:00	12.7	0.0	9.4	40.1	77.2	00:00	N
2	2.9	4.2	2:30	2.2	15:50	15.4	0.0	11.0	33.6	95.0	16:50	---
3	4.2	6.7	17:30	2.1	7:50	14.1	0.0	0.2	14.0	62.8	12:00	---
4	4.6	8.1	17:00	1.3	2:20	13.8	0.0	0.2	18.5	61.2	11:00	---
5	8.5	12.0	14:10	6.1	1:40	9.8	0.0	0.0	17.9	43.5	7:00	---
6	4.8	6.6	0:10	3.3	21:50	13.5	0.0	0.8	33.3	83.7	19:30	---
7	3.7	5.7	16:40	2.0	6:10	14.7	0.0	0.8	43.5	85.3	5:20	---
8	10.6	15.1	15:40	5.0	0:10	7.8	0.0	0.0	24.1	49.9	0:50	---
9	13.4	16.9	17:10	10.6	4:20	4.9	0.0	0.0	20.3	49.9	1:20	---
10	8.8	12.6	17:40	6.3	9:10	9.5	0.0	0.0	24.1	80.5	9:10	---
11	4.7	7.8	2:20	1.4	22:20	13.7	0.0	0.0	27.8	106.2	11:10	---
12	5.4	9.3	16:00	1.8	4:20	12.9	0.0	0.0	20.3	53.1	0:50	---
13	9.1	12.4	16:30	6.7	23:10	9.3	0.0	0.0	18.5	59.5	22:10	---
14	5.6	9.1	18:10	2.6	23:10	12.7	0.0	1.6	24.6	86.9	8:10	---
15	4.5	7.5	11:50	2.4	1:10	13.3	0.0	0.2	6.0	27.4	12:50	ESE
16	4.2	6.9	16:00	1.8	22:50	14.1	0.0	4.2	14.8	45.1	00:00	NNE
17	1.9	2.6	15:00	0.8	8:20	16.4	0.0	22.6	37.0	62.8	4:50	NNE
18	0.5	1.6	0:10	-0.3	21:50	17.8	0.0	4.8	38.1	72.4	19:10	NNW
19	0.6	2.2	17:50	-0.5	0:40	17.7	0.0	4.0	13.8	77.2	12:00	NW
20	2.8	4.3	21:30	1.4	0:40	15.5	0.0	2.8	26.1	80.5	21:00	NNW
21	2.8	4.7	15:00	1.2	6:50	15.5	0.0	0.0	38.6	95.0	10:30	N
22	4.9	8.1	16:30	1.6	2:40	13.4	0.0	0.0	37.8	75.6	1:30	N
23	6.6	10.3	15:50	3.4	00:00	11.8	0.0	0.0	25.4	62.8	5:20	N
24	7.0	11.5	15:40	3.4	1:00	11.3	0.0	0.0	24.0	57.9	3:00	NNE
25	6.8	10.6	14:10	4.6	22:50	11.6	0.0	0.0	32.0	75.6	20:00	N
26	6.3	10.2	15:30	2.9	1:10	12.1	0.0	5.8	20.6	66.0	1:40	N
27	6.2	7.1	13:40	4.0	3:10	12.2	0.0	17.6	11.7	33.8	19:30	NE
28	6.5	7.8	13:20	5.7	20:30	11.8	0.0	0.4	20.4	46.7	22:40	NNE
29	7.4	12.6	17:10	4.7	4:10	10.9	0.0	0.6	20.8	48.3	0:10	NNW
30	9.6	12.9	17:00	7.6	3:30	8.7	0.0	0.0	11.7	30.6	14:40	SSE
	5.7	16.9	9	-0.5	19	379.0	0.0	87.0	24.7	106.2	11	N

## Τιμές Μάιος 2011

DAY	MEAN			LOW	TIME	HEAT	COOL	RAIN	AVG			DOM
	TEMP	HIGH	TIME			DEG	DEG		WIND	SPEED	HIGH	
1	10.6	12.1	17:50	8.1	8:10	7.8	0.0	1.0	16.7	49.9	13:10	SSE
2	12.2	15.7	17:10	9.3	4:20	6.2	0.0	0.0	20.9	41.8	5:00	NW
3	11.9	14.2	2:20	9.6	7:30	6.4	0.0	4.4	21.2	62.8	16:30	S
4	10.7	12.6	12:40	8.7	6:20	7.7	0.0	0.2	22.4	48.3	14:00	WNW
5	8.2	10.9	11:40	4.6	23:10	10.2	0.0	4.0	20.9	78.9	23:50	NNW
6	3.8	4.8	0:10	3.1	12:50	14.6	0.0	3.6	38.9	98.2	5:10	N
7	6.6	10.1	18:20	3.2	3:30	11.7	0.0	0.0	23.8	64.4	1:20	NNE
8	10.6	14.3	12:50	8.1	1:10	7.7	0.0	0.0	17.2	41.8	5:50	NNW
9	7.5	9.8	14:40	3.6	23:20	10.8	0.0	0.0	21.4	77.2	23:40	NNE
10	4.9	7.1	14:50	3.5	5:30	13.4	0.0	0.0	51.8	85.3	17:10	NNE
11	6.6	9.3	14:20	5.1	3:00	11.8	0.0	0.0	36.5	77.2	5:10	N
12	5.6	7.3	18:40	4.2	13:50	12.8	0.0	5.2	21.4	75.6	5:40	NW
13	8.3	11.7	17:40	5.4	3:30	10.1	0.0	0.0	16.4	53.1	3:00	NW
14	12.5	16.1	13:20	9.2	1:10	5.8	0.0	0.0	12.4	35.4	16:10	NW
15	14.2	17.6	13:20	12.1	3:20	4.2	0.0	0.0	10.1	27.4	16:10	SSE
16	14.6	17.8	14:10	12.7	5:30	3.7	0.0	0.0	16.1	38.6	22:20	SSW
17	11.9	14.6	15:40	9.2	00:00	6.4	0.0	0.0	10.6	38.6	15:20	S
18	9.3	12.8	11:20	6.3	4:30	9.0	0.0	0.0	13.4	38.6	12:50	ESE
19	7.8	9.9	18:40	6.2	13:00	10.6	0.0	17.2	20.9	51.5	19:20	NNW
20	10.4	14.2	14:40	7.1	1:30	7.9	0.0	0.4	25.3	53.1	1:40	NNW
21	13.1	16.6	12:50	10.9	2:10	5.2	0.0	0.0	21.7	45.1	4:20	NNE
22	13.2	15.7	14:10	11.3	3:30	5.2	0.0	0.0	36.2	70.8	11:20	NNE
23	14.2	17.0	16:10	12.7	6:10	4.2	0.0	0.0	35.9	64.4	9:50	NNE
24	14.4	18.4	15:10	12.1	6:30	3.9	0.0	0.0	27.7	61.2	3:10	N
25	14.9	17.2	15:20	12.2	7:50	3.4	0.0	0.0	27.5	53.1	11:10	NNE
26	13.3	15.3	11:00	11.9	00:00	5.1	0.0	5.0	35.4	62.8	7:10	NNE
27	10.8	13.2	13:00	9.8	6:30	7.5	0.0	11.0	35.9	80.5	3:00	NNW
28	11.2	13.6	18:00	9.6	5:50	7.1	0.0	0.8	27.8	57.9	4:00	NNW
29	13.6	16.5	17:50	11.6	6:20	4.7	0.0	0.0	13.2	38.6	3:50	N
30	13.3	16.2	18:00	11.4	5:30	5.1	0.0	0.0	16.7	43.5	11:40	NNE
31	13.5	16.5	10:40	11.8	3:50	4.8	0.0	0.0	11.3	35.4	0:30	NNE
	10.8	18.4	24	3.1	6	234.8	0.0	52.8	23.5	98.2	6	NNE

## Τιμές Ιουνίου 2011

DAY	MEAN		TIME	LOW	TIME	HEAT	COOL	RAIN	AVG		TIME	DOM
	TEMP	HIGH				DEG	DEG		WIND	SPEED		DIR
1	14.8	17.4	13:50	12.9	0:10	3.5	0.0	17.6	8.9	29.0	1:40	NNW
2	15.6	18.4	13:30	13.6	22:30	2.7	0.0	3.8	11.7	35.4	13:50	N
3	15.3	18.4	12:30	13.6	5:00	3.1	0.0	14.8	11.7	35.4	3:10	N
4	15.1	19.5	15:10	13.3	2:50	3.2	0.0	0.0	15.1	40.2	21:00	N
5	16.1	19.5	12:40	13.4	4:10	2.2	0.0	0.0	15.0	43.5	3:10	NNE
6	17.3	20.5	14:40	14.4	6:20	1.3	0.3	0.0	17.9	48.3	10:20	NE
7	18.3	21.4	14:40	15.2	6:50	0.7	0.7	0.0	9.3	37.0	6:50	N
8	20.3	21.9	12:10	18.4	0:20	0.0	2.0	0.0	14.0	51.5	22:40	SSW
9	22.2	25.6	15:40	18.2	00:00	0.0	3.8	0.0	20.8	46.7	21:00	WNW
10	16.9	20.4	17:00	14.3	7:00	1.7	0.3	0.2	27.0	56.3	9:10	NW
11	15.4	19.3	14:50	12.8	7:00	3.0	0.1	0.0	19.6	56.3	4:40	NNW
12	13.4	17.8	13:10	8.1	14:50	4.9	0.0	22.2	22.4	66.0	14:50	NW
13	13.2	16.5	17:50	10.6	6:30	5.2	0.0	0.2	22.4	70.8	10:10	NNW
14	14.7	18.4	12:20	12.9	4:20	3.6	0.0	1.8	11.7	33.8	6:50	N
15	13.7	15.6	13:10	11.8	5:00	4.7	0.0	0.2	25.1	51.5	7:20	NNE
16	13.2	16.1	17:30	10.9	7:20	5.2	0.0	0.4	25.1	51.5	7:00	NNW
17	15.5	19.1	16:40	12.6	4:20	2.8	0.0	0.0	20.1	48.3	3:10	N
18	18.0	21.9	16:40	15.6	5:40	1.0	0.7	0.0	11.6	33.8	6:10	NNW
19	19.5	22.7	15:30	16.9	0:30	0.2	1.3	0.0	11.4	32.2	22:20	NNW
20	20.7	24.4	14:40	17.6	1:40	0.1	2.4	0.0	11.4	32.2	0:10	SSE
21	17.5	19.3	1:10	15.2	8:50	1.0	0.2	0.0	28.2	54.7	10:50	N
22	15.3	17.9	16:00	13.1	6:20	3.0	0.0	0.0	43.0	72.4	6:40	N
23	16.3	18.9	16:50	13.5	5:10	2.1	0.1	0.0	46.5	78.9	0:20	NNW
24	17.9	20.7	15:50	15.6	5:50	0.9	0.5	0.0	40.4	69.2	7:10	N
25	20.6	24.4	17:10	17.0	00:00	0.1	2.3	0.0	22.0	54.7	0:40	N
26	11.4	17.0	0:10	9.6	13:10	6.9	0.0	6.8	34.4	80.5	10:30	N
27	11.8	14.4	15:10	9.4	6:50	6.5	0.0	0.0	20.8	66.0	9:30	N
28	13.4	17.1	17:00	10.5	6:20	4.9	0.0	0.0	12.1	37.0	12:30	NNW
29	13.7	16.8	13:10	12.0	5:50	4.7	0.0	0.8	11.7	43.5	3:10	SW
30	16.7	20.7	14:10	13.0	3:00	1.9	0.3	0.0	15.3	43.5	23:40	SW
	16.1	25.6	9	8.1	12	80.9	14.8	68.8	20.2	80.5	26	N

Τιμές Ιουλίου 2011

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
1	18.6	22.0	13:20	16.0	1:00	0.6	0.8	0.0	15.3	38.6	2:00	SSE
2	17.3	20.1	13:10	15.2	5:20	1.2	0.2	0.0	12.6	37.0	3:40	SSE
3	18.3	22.2	14:10	15.1	7:00	0.9	0.9	0.0	15.8	43.5	16:10	SW
4	17.3	22.0	16:40	14.2	7:30	1.6	0.5	0.0	20.0	48.3	1:50	NNW
5	19.2	23.6	16:30	15.6	0:10	0.4	1.4	0.0	12.9	38.6	21:10	SW
6	19.2	23.2	13:50	17.3	4:50	0.2	1.1	0.0	15.8	46.7	9:50	NW
7	18.9	23.1	16:50	16.7	5:50	0.3	0.9	0.0	13.8	41.8	8:30	N
8	18.7	21.8	14:30	15.8	5:00	0.6	1.0	0.0	23.3	54.7	10:50	N
9	19.5	22.8	16:00	17.1	4:50	0.2	1.3	0.0	40.1	67.6	5:50	NNE
10	19.7	22.8	15:30	16.9	6:30	0.2	1.6	0.0	43.8	69.2	0:10	N
11	19.9	22.3	15:10	18.3	4:30	0.0	1.6	0.0	41.2	67.6	0:50	N
12	18.9	21.4	17:00	16.5	7:30	0.4	1.0	0.0	37.2	74.0	8:10	N
13	19.3	22.4	14:30	17.3	7:30	0.2	1.1	0.0	29.5	67.6	4:40	N
14	19.3	22.8	15:40	16.5	6:50	0.3	1.3	0.0	23.5	57.9	12:10	N
15	20.3	23.6	14:30	17.6	5:00	0.1	2.1	0.0	24.5	59.5	6:00	N
16	22.2	26.2	16:10	18.6	4:10	0.0	3.8	0.0	20.8	49.9	1:10	NW
17	24.2	28.6	13:40	22.2	1:50	0.0	5.9	0.0	18.8	40.2	6:30	NNW
18	22.5	26.6	12:00	19.7	6:40	0.0	4.2	0.0	16.9	46.7	4:40	NNW
19	23.6	27.6	13:40	20.7	6:00	0.0	5.3	0.0	10.9	35.4	14:40	N
20	25.3	29.9	14:20	21.1	00:00	0.0	6.9	0.0	16.9	45.1	23:50	NNW
21	20.2	25.4	17:40	16.6	8:00	0.2	2.1	0.0	21.6	61.2	1:50	NW
22	20.7	26.4	17:20	17.1	5:40	0.2	2.6	0.0	18.5	46.7	19:50	NNW
23	20.8	25.9	15:30	18.1	2:10	0.0	2.6	0.0	17.4	41.8	5:20	NNW
24	21.2	24.9	16:10	18.7	1:20	0.0	2.8	0.0	8.7	38.6	00:00	SW
25	20.7	24.7	14:10	17.7	23:30	0.1	2.3	0.0	17.1	48.3	0:50	SW
26	19.2	23.2	16:00	15.9	4:50	0.4	1.3	0.0	17.9	49.9	5:10	W
27	19.8	24.7	15:40	15.8	5:10	0.5	2.0	0.0	13.2	35.4	2:10	SSE
28	21.7	25.2	16:30	19.2	6:20	0.0	3.4	0.0	18.0	43.5	8:40	N
29	21.4	27.2	14:50	18.7	3:20	0.0	3.1	0.0	15.1	37.0	0:20	N
30	21.1	26.3	14:10	18.2	7:10	0.0	2.8	0.0	15.3	38.6	5:10	NW
31	20.7	25.0	13:40	18.5	4:10	0.0	2.4	0.0	10.6	33.8	17:20	SSE
	20.3	29.9	20	14.2	4	8.4	70.3	0.0	20.2	74.0	12	N



## Τιμές Αυγούστου 2011

DAY	MEAN		TIME	LOW	TIME	HEAT	COOL	RAIN	AVG		TIME	DOM
	TEMP	HIGH				DEG	DEG		WIND	DIR		
1	19.9	23.3	12:50	17.9	5:20	0.0	1.6	0.0	8.9	30.6	13:50	SSE
2	18.2	21.7	15:40	15.1	3:00	0.8	0.7	0.0	20.0	48.3	1:50	N
3	16.9	20.3	16:00	14.2	6:50	1.6	0.2	0.0	23.3	54.7	7:40	N
4	18.7	23.0	16:10	15.8	6:30	0.8	1.2	0.0	16.6	46.7	4:30	NW
5	19.9	23.3	15:40	18.1	00:00	0.0	1.6	0.0	19.5	43.5	10:20	N
6	17.2	20.4	16:00	14.4	7:30	1.4	0.2	0.0	25.6	62.8	1:20	N
7	18.1	21.9	16:20	14.9	4:50	0.9	0.7	0.0	25.4	56.3	8:50	N
8	20.1	23.1	16:40	17.7	6:50	0.1	1.8	0.0	23.3	59.5	20:10	N
9	22.7	27.5	15:30	19.3	4:30	0.0	4.3	0.0	17.9	48.3	3:50	N
10	22.9	27.5	16:30	18.6	00:00	0.0	4.6	0.0	16.4	48.3	6:50	NNE
11	13.9	18.6	0:10	11.6	7:10	4.4	0.0	0.8	32.8	80.5	11:00	N
12	15.6	19.5	17:40	12.5	7:50	2.8	0.1	0.0	18.5	59.5	0:20	N
13	17.6	22.5	15:40	14.3	5:30	1.4	0.7	0.0	18.8	45.1	9:50	NNE
14	19.2	24.2	16:50	15.8	4:00	0.6	1.5	0.0	16.3	40.2	19:00	NNE
15	20.4	25.4	15:40	17.2	6:40	0.1	2.2	0.0	10.5	33.8	15:50	N
16	21.3	25.9	14:30	18.7	5:20	0.0	2.9	0.0	12.4	35.4	13:00	NNE
17	19.4	22.1	15:50	17.4	8:00	0.1	1.2	0.0	29.1	78.9	12:40	N
18	19.4	22.3	15:30	17.6	23:50	0.1	1.2	0.0	38.1	72.4	12:30	NNE
19	17.4	19.2	16:00	16.2	00:00	0.9	0.1	0.0	30.4	69.2	20:30	N
20	16.9	19.6	14:20	14.2	7:00	1.6	0.2	0.0	35.9	80.5	8:40	N
21	18.3	21.2	15:20	16.1	7:10	0.6	0.6	0.0	40.9	83.7	23:30	N
22	17.9	20.2	15:40	16.3	8:20	0.8	0.3	0.0	48.6	95.0	8:10	N
23	17.9	21.5	14:30	15.3	6:10	0.9	0.6	0.0	43.5	78.9	8:00	N
24	18.6	21.7	14:30	16.4	7:30	0.6	0.8	0.0	44.9	91.7	11:40	N
25	19.3	22.4	15:40	17.3	7:30	0.2	1.2	0.0	44.4	90.1	5:40	NNE
26	17.5	19.6	14:40	15.2	00:00	0.9	0.1	0.0	50.2	90.1	1:40	NNE
27	14.9	17.3	15:50	12.6	8:00	3.4	0.0	0.0	49.1	85.3	4:50	NNW
28	14.4	16.8	16:10	12.9	6:50	3.9	0.0	0.0	41.2	66.0	0:20	NNW
29	15.2	18.2	16:20	12.7	6:40	3.1	0.0	0.0	36.2	75.6	7:00	NNW
30	18.1	22.7	14:30	13.9	5:40	1.2	0.9	0.0	12.6	43.5	2:40	SSE
31	20.1	24.2	13:40	15.9	23:20	0.2	1.9	0.0	16.6	56.3	23:10	SSE
	18.3	27.5	9	11.6	11	33.6	33.4	0.8	28.0	95.0	22	N

## Τιμές Σεπτεμβρίου 2011

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
1	20.8	25.2	13:00	17.5	6:50	0.0	2.4	0.0	14.3	38.6	3:00	N
2	21.6	25.0	12:30	19.3	0:10	0.0	3.3	0.0	9.0	25.7	12:40	SSE
3	20.0	23.6	14:10	17.3	23:30	0.1	1.7	0.0	18.0	54.7	18:10	NNW
4	17.0	19.5	15:30	14.4	7:20	1.4	0.1	0.0	34.3	72.4	8:40	N
5	18.2	21.6	14:40	14.9	7:20	1.1	0.9	0.0	30.6	69.2	2:10	N
6	20.9	26.3	15:30	17.8	1:50	0.0	2.7	0.0	14.3	33.8	0:30	N
7	15.8	17.7	0:10	14.1	22:30	2.6	0.0	0.0	29.0	61.2	3:30	N
8	16.8	20.3	17:00	13.6	7:30	1.9	0.3	0.0	29.5	66.0	7:40	N
9	20.1	24.8	12:30	17.2	5:10	0.1	1.8	0.0	11.9	30.6	7:00	SSE
10	19.2	21.3	15:30	16.8	7:20	0.1	0.9	0.0	19.3	41.8	10:20	N
11	18.7	21.8	16:10	16.9	2:50	0.4	0.8	0.0	28.0	64.4	23:50	NNE
12	18.5	22.1	17:20	16.6	6:10	0.6	0.7	0.0	32.5	66.0	3:20	NNE
13	18.2	21.2	15:30	15.6	6:40	0.9	0.8	0.0	33.0	64.4	8:00	N
14	20.1	23.8	15:30	18.3	2:10	0.0	1.8	0.0	30.6	62.8	5:20	NNE
15	20.8	25.8	15:00	18.5	7:20	0.0	2.4	0.0	20.6	53.1	5:20	NE
16	17.9	20.2	14:10	16.3	8:20	0.7	0.3	0.0	37.8	77.2	14:30	N
17	18.4	21.2	14:20	15.4	8:10	0.6	0.7	0.0	34.6	67.6	5:40	N
18	17.7	20.1	16:10	15.1	8:40	0.9	0.3	0.0	32.0	64.4	1:50	N
19	18.6	24.3	15:40	16.0	2:40	0.8	1.1	0.0	17.5	49.9	0:10	NNE
20	17.6	22.7	11:10	13.6	22:10	1.2	0.5	3.6	16.1	57.9	21:40	SSE
21	12.9	16.5	12:00	9.9	23:50	5.4	0.0	0.4	18.5	48.3	23:00	W
22	11.0	13.1	14:20	9.7	1:30	7.3	0.0	7.0	27.5	57.9	0:50	N
23	13.2	15.6	15:30	11.0	1:10	5.1	0.0	0.2	32.2	69.2	3:50	N
24	14.8	17.9	14:20	13.4	1:10	3.6	0.0	0.0	24.6	56.3	6:10	N
25	14.1	16.8	16:00	12.3	7:10	4.3	0.0	0.0	38.9	74.0	13:40	N
26	12.5	14.8	15:10	10.3	20:50	5.8	0.0	0.0	42.0	80.5	1:30	N
27	10.5	12.7	14:30	9.4	7:30	7.8	0.0	0.0	47.3	80.5	7:10	N
28	10.4	13.0	14:30	8.7	7:10	7.9	0.0	0.0	43.8	74.0	6:40	N
29	11.4	13.9	13:50	9.4	7:20	6.9	0.0	0.0	45.2	78.9	6:00	N
30	11.4	14.0	14:00	8.9	21:20	6.9	0.0	0.0	31.1	66.0	0:10	N
	16.6	26.3	6	8.7	28	74.5	23.6	11.2	28.1	80.5	26	N

## Τιμές Οκτωβρίου 2011

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
1	9.4	11.0	14:50	7.9	3:50	8.9	0.0	0.0	37.2	77.2	8:30	N
2	10.7	13.1	16:20	9.4	6:50	7.6	0.0	0.0	25.4	66.0	2:10	N
3	11.6	14.6	13:20	9.9	22:00	6.7	0.0	0.0	31.9	67.6	9:50	N
4	11.2	14.5	16:20	9.2	8:10	7.1	0.0	0.0	30.7	70.8	4:50	NNE
5	12.2	15.9	14:40	10.3	3:40	6.1	0.0	0.0	20.6	53.1	7:40	NNE
6	14.0	18.8	15:10	10.9	1:40	4.3	0.0	0.0	15.9	41.8	0:20	SSE
7	14.3	17.8	12:50	11.9	0:10	4.1	0.0	0.0	15.3	38.6	21:10	WSW
8	13.1	16.9	13:50	11.1	5:00	5.2	0.0	0.4	22.7	69.2	19:20	S
9	11.1	14.7	13:40	8.7	19:30	7.3	0.0	6.8	24.9	74.0	1:00	SW
10	5.5	9.3	1:50	3.7	22:40	12.8	0.0	58.0	32.5	80.5	21:50	NW
11	4.4	5.5	23:30	3.7	6:30	13.9	0.0	18.6	43.9	85.3	3:10	NW
12	8.3	11.4	17:50	5.0	1:40	10.0	0.0	0.2	23.3	61.2	10:20	NW
13	12.8	17.7	15:40	10.6	1:40	5.5	0.0	0.0	10.9	48.3	1:30	NNW
14	10.1	13.4	3:50	8.2	00:00	8.2	0.0	1.8	31.2	59.5	19:30	NNE
15	7.2	8.2	0:10	5.6	22:20	11.2	0.0	10.6	36.9	69.2	16:10	NNE
16	3.3	5.9	0:40	0.2	00:00	15.1	0.0	35.8	42.3	83.7	23:50	NNE
17	-0.3	0.4	0:50	-1.2	9:30	18.6	0.0	3.0	35.2	85.3	0:10	N
18	3.4	7.6	17:20	0.1	0:20	14.9	0.0	1.2	20.1	48.3	1:30	NNW
19	8.3	12.6	16:00	3.9	1:40	10.1	0.0	0.0	10.5	29.0	20:50	WSW
20	11.3	14.6	13:30	9.0	19:30	7.1	0.0	0.0	5.3	17.7	12:10	SSE
21	11.5	14.8	11:30	9.5	19:00	6.8	0.0	0.0	9.0	22.5	20:50	SSE
22	11.2	15.1	12:40	8.1	00:00	7.2	0.0	0.0	12.7	40.2	18:30	N
23	6.9	8.9	1:50	5.5	23:10	11.4	0.0	0.0	38.6	56.3	7:20	N
24	6.4	8.6	15:10	5.4	7:40	11.9	0.0	0.0	37.2	62.8	3:10	N
25	6.3	8.1	14:20	5.4	21:10	12.1	0.0	0.4	39.8	69.2	10:20	NNE
26	5.5	6.9	14:10	4.3	23:50	12.8	0.0	0.8	48.8	98.2	20:40	N
27	3.7	5.1	13:30	2.5	8:10	14.6	0.0	0.8	58.7	98.2	2:40	N
28	3.9	5.8	14:10	2.9	4:50	14.4	0.0	0.8	52.8	83.7	3:00	NNW
29	3.6	4.7	13:10	2.8	19:20	14.8	0.0	0.8	59.4	86.9	6:00	N
30	3.3	4.2	11:30	2.3	23:50	15.1	0.0	0.0	51.7	82.1	1:40	N
31	3.6	6.9	11:20	2.0	5:50	14.7	0.0	0.0	23.7	77.2	2:30	N
	8.0	18.8	6	-1.2	17	320.6	0.0	139.9	30.6	98.2	26	N

## Τιμές Νοεμβρίου 2011

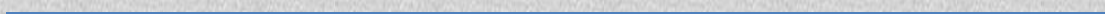
DAY	MEAN		TIME	LOW	TIME	HEAT	COOL	RAIN	AVG		TIME	DOM
	TEMP	HIGH				DEG	DEG		WIND	HIGH		DIR
1	5.2	9.6	13:40	2.2	7:00	13.2	0.0	0.0	7.6	29.0	20:10	NNW
2	4.3	6.4	1:10	2.5	5:50	14.1	0.0	0.0	35.4	72.4	23:10	N
3	3.6	4.9	13:20	2.6	7:30	14.8	0.0	0.4	43.1	77.2	5:30	N
4	3.9	6.1	00:00	2.4	2:50	14.4	0.0	0.0	33.6	54.7	1:50	N
5	8.4	11.4	11:30	3.1	5:10	9.9	0.0	0.0	11.1	40.2	2:20	ENE
6	11.1	12.6	13:40	9.2	17:00	7.3	0.0	0.0	5.6	16.1	1:30	ENE
7	11.1	14.2	10:30	8.2	23:30	7.2	0.0	0.0	5.1	25.7	6:00	NE
8	11.0	13.1	9:10	8.2	0:10	7.3	0.0	0.0	4.3	20.9	3:40	NNE
9	12.8	15.1	13:50	10.8	6:10	5.6	0.0	0.0	10.5	40.2	18:50	NNE
10	11.2	15.6	10:40	6.8	23:00	7.1	0.0	0.0	10.5	41.8	23:00	N
11	4.3	7.3	0:10	0.9	23:50	14.1	0.0	3.6	47.3	98.2	23:50	NNE
12	-0.7	1.0	0:10	-1.6	10:50	19.0	0.0	1.8	43.5	101.4	3:30	NNE
13	-0.8	-0.4	15:50	-1.6	0:10	19.2	0.0	0.4	43.0	91.7	17:30	N
14	-0.4	-0.1	19:20	-0.8	6:10	18.7	0.0	0.2	37.7	98.2	21:10	N
15	-0.3	-0.1	0:10	-0.6	7:20	18.7	0.0	15.6	0.0	1.6	10:30	W
16	-0.6	-0.1	12:30	-1.4	21:40	18.9	0.0	5.0	11.9	66.0	00:00	NNW
17	-0.4	0.2	8:40	-1.3	0:10	18.7	0.0	3.8	31.2	67.6	0:30	N
18	-0.6	-0.1	14:30	-1.1	2:30	18.9	0.0	0.0	40.9	72.4	17:00	N
19	3.9	7.1	13:50	-0.6	0:10	14.4	0.0	0.0	25.3	62.8	0:20	N
20	5.5	7.8	12:40	3.4	22:10	12.8	0.0	0.0	15.6	40.2	0:10	NNW
21	3.6	6.3	12:10	1.3	6:30	14.7	0.0	0.0	7.9	35.4	2:20	NNW
22	4.3	7.1	22:30	1.8	3:10	14.1	0.0	0.0	7.2	20.9	17:30	NW
23	5.2	8.3	12:00	2.6	6:40	13.2	0.0	0.0	10.6	43.5	23:20	N
24	1.9	5.0	0:40	0.8	23:40	16.4	0.0	0.0	48.8	72.4	11:40	N
25	0.1	1.2	3:20	-1.2	21:20	18.3	0.0	0.0	48.6	82.1	6:50	N
26	0.2	1.6	12:40	-0.9	2:20	18.2	0.0	0.0	33.2	75.6	23:30	N
27	1.6	4.2	23:20	-0.2	0:50	16.8	0.0	0.0	42.8	77.2	5:20	N
28	6.9	10.3	13:40	2.9	1:00	11.4	0.0	0.0	24.0	57.9	7:20	N
29	5.4	9.3	0:40	2.6	21:30	12.9	0.0	0.0	46.2	74.0	12:00	N
30	5.8	10.4	13:50	2.0	2:40	12.5	0.0	0.0	27.5	54.7	2:30	N
	4.2	15.6	10	-1.6	12	422.8	0.0	30.8	25.3	101.4	12	N

## Τιμές Δεκεμβρίου 2011

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
1	8.0	12.4	11:30	6.0	0:20	10.3	0.0	0.0	17.7	38.6	0:10	NNW
2	8.8	12.0	11:40	7.3	4:00	9.5	0.0	0.0	13.4	35.4	3:00	N
3	7.1	9.7	13:20	3.5	21:50	11.2	0.0	0.0	13.4	27.4	18:10	WNW
4	6.7	10.1	11:10	3.8	2:40	11.7	0.0	0.0	20.0	41.8	17:10	N
5	6.9	9.4	13:40	5.3	7:00	11.4	0.0	0.0	22.2	49.9	2:30	SW
6	6.8	8.4	13:30	6.0	6:30	11.5	0.0	0.0	27.0	57.9	16:50	N
7	5.5	8.9	10:50	1.9	00:00	12.8	0.0	5.0	30.3	91.7	20:40	N
8	3.6	7.3	13:20	0.5	00:00	14.8	0.0	0.2	31.1	77.2	21:50	NW
9	1.6	5.8	14:10	-1.6	7:20	16.7	0.0	0.0	20.3	77.2	0:10	NW
10	6.4	10.6	11:40	1.9	0:30	11.9	0.0	0.0	13.0	43.5	00:00	WNW
11	7.9	10.5	13:50	6.2	2:20	10.4	0.0	0.0	26.4	48.3	0:30	W
12	8.3	11.1	14:40	6.8	00:00	10.0	0.0	0.0	15.0	30.6	2:40	SW
13	7.1	9.3	14:10	5.8	23:40	11.3	0.0	0.0	14.6	35.4	10:20	N
14	7.1	10.0	14:10	5.8	1:20	11.2	0.0	0.0	12.7	40.2	19:50	NW
15	6.6	8.8	13:00	4.9	3:40	11.8	0.0	0.0	24.8	57.9	21:00	N
16	6.1	7.5	21:30	4.2	8:00	12.3	0.0	4.0	28.8	85.3	8:00	N
17	6.4	8.8	14:30	4.5	3:20	11.9	0.0	2.6	36.9	77.2	12:00	N
18	4.9	6.4	12:30	2.9	19:10	13.4	0.0	0.4	17.7	56.3	2:00	W
19	5.3	6.7	12:20	3.1	00:00	13.1	0.0	30.8	26.7	82.1	15:40	N
20	1.9	3.9	12:30	-0.8	23:10	16.4	0.0	0.2	29.8	69.2	14:10	SSW
21	1.7	4.8	23:40	-0.8	1:10	16.7	0.0	11.6	27.8	72.4	0:30	W
22	2.3	5.4	2:50	-2.3	23:40	16.0	0.0	21.6	33.2	99.8	7:00	N
23	-1.7	-0.1	12:30	-3.4	7:20	20.0	0.0	30.0	12.9	54.7	2:40	NNW
24	-1.8	-0.3	12:20	-2.9	2:40	20.2	0.0	2.2	3.9	41.8	22:00	NW
25	-2.7	-1.8	0:10	-4.6	00:00	21.1	0.0	0.4	5.1	30.6	0:10	NNE
26	-3.3	-2.3	13:40	-4.5	0:10	21.7	0.0	0.0	23.3	49.9	14:00	N
27	-2.1	-1.1	12:40	-3.2	0:10	20.4	0.0	0.0	15.8	43.5	20:50	W
28	-0.9	0.1	14:20	-2.0	21:30	19.3	0.0	1.4	12.2	41.8	16:00	NNW
29	-0.7	1.0	14:40	-2.3	1:10	19.0	0.0	0.0	6.1	19.3	0:40	WSW
30	1.6	2.8	21:50	0.2	0:10	16.7	0.0	3.8	12.9	43.5	21:00	SSW
31	1.0	3.4	11:30	-1.2	00:00	17.3	0.0	1.6	21.4	64.4	18:10	NNW
	3.8	12.4	1	-4.6	25	452.1	0.0	115.8	19.9	99.8	22	N

Κεφάλαιο 1

*Εισαγωγή*



## Η ενεργειακή πολιτική στη χώρα μας

Στη χώρα μας, τα προγράμματα ανάπτυξης των ΑΠΕ υποστηρίζονται και προωθούνται από πλευράς επίσημης πολιτείας, από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), που είναι ερευνητικός φορέας εποπτευόμενος από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) του Υπουργείου Ανάπτυξης, τα Περιφερειακά Ενεργειακά Γραφεία, τη ΔΕΗ, τα Ιδρύματα Τεχνολογίας και Ευρευνας, τα Πανεπιστήμια, τα Τεχνολογικά Εκπαιδευτικά Ιδρύματα (ΤΕΙ), την Τοπική Αυτοδιοίκηση κ.α.

Εκτός αυτών, έντονη είναι ήδη η δραστηριότητα του ιδιωτικού τομέα, σ' όλο το φάσμα των εφαρμογών των ΑΠΕ. Η ανάπτυξη τους ενισχύεται από σχετικά προγράμματα της ΕΕ, η οποία επιχορηγεί όχι μόνο την έρευνα (τόρα πια σε μικρότερο βαθμό) αλλά στηρίζει, ιδιαίτερα το τελευταίο διάστημα, εφαρμογές μεγάλης ισχύος, σε βιομηχανικές μονάδες, ξενοδοχεία κ.α. Σημαντικό βήμα προώθησης των ΑΠΕ στη χώρα μας, μέσα στην τελευταία δεκαετία, αποτέλεσε η χάραξη πιο συγκεκριμένης ενεργειακής πολιτικής και η θεσμοθέτηση νομοθετικού πλαισίου εγκατάστασης και αξιοποίησης τους.

Η ανάπτυξη των ΑΠΕ και κυρίως της αιολικής και της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας, προωθείται και ενισχύεται, με ισχυρά κίνητρα και υψηλούς ρυθμούς, σ' όλο τον αναπτυσσόμενο κόσμο. Η αιτία είναι τα συσσωρευμένα οικολογικά προβλήματα που δημιούργησε η αλόγιστη χρήση, αφενός των συμβατικών καυσίμων (ρύπανση περιβάλλοντος), αφετέρου της πυρηνικής ενέργειας (πυρηνικά ατυχήματα). Η κύρια δυσκολία που αντιμετωπίζουν σήμερα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προκειμένου να ενσωματωθούν στην καθημερινή ζωή, είναι το σχετικά υψηλό κόστος της παραγόμενης kWh τους, σε σχέση με το κόστος της kWh του πετρελαίου. Μεταξύ των δύο κύριων τρόπων παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας, αιολικής και φωτοβολταϊκής, η αιολική εμφανίζεται σήμερα οικονομικότερη και άρα περισσότερο προσιτή, κυρίως με τη μορφή αιολικών πάρκων, συνδεδεμένων στο δίκτυο της ΔΕΗ.

### Πρόσφατο θεσμικό πλαίσιο

Τον Ιούνιο του 2006 ψηφίστηκε νέος νόμος για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, (ν. 3468/06), με ιδιαίτερος ευνοϊκά κίνητρα σε ιδιώτες, αλλά κυρίως σε επιχειρήσεις που σκοπεύουν να επενδύσουν στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας. Τα βασικά σημεία – κίνητρα του νέου νόμου είναι :

- Επιδοτείται η αρχική εγκατάσταση σε ποσοστό από 30% έως 55% της αξίας του συστήματος, ενώ επιδοτούμενο είναι και το επιτόκιο σε περίπτωση δανεισμού (Αναπτυξιακός νόμος 3299/04).
- Η τιμή πώλησης της ηλιακής κιλοβατώρας είναι 0,40 – 0,50 ευρώ, ανάλογα με την ισχύ του φωτοβολταϊκού συστήματος και τον τόπο εγκατάστασης. Η τιμή είναι μεγαλύτερη στα νησιά και μικρότερη στην ηπειρωτική χώρα.

- Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων θα μπορεί να πωλείται στη ΔΕΗ εγγυημένα για μία 20ετία, σε τιμή η οποία θα αναπροσαρμόζεται με βάση τον πληθωρισμό ή τις αυξήσεις των τιμολογίων της ΔΕΗ.
- Η σύμβαση πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στη ΔΕΗ ισχύει για 10 έτη και μπορεί να παρατείνεται για επιπλέον 10, μονομερώς, με έγγραφη δήλωση του παραγωγού.

Τον Ιανουάριο του 2009 ψηφίστηκε ο νόμος 3734/2009, όπου κυρίως τροποποιούνται άρθρα του προηγούμενου νόμου και ρυθμίζονται θέματα αδειοδότησης και τιμολόγησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς. Η σύμβαση εγγυημένης πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας συνάπτεται για είκοσι (20) έτη, με τιμή αναφοράς από σχετικό πίνακα σταδιακά αποκλιμακούμενης τιμής της κιλοβατώρας μέχρι το 2014, που αντιστοιχεί στο μήνα και το έτος υπογραφής της σύμβασης. Δίδεται, επίσης η δυνατότητα, μετά από κοινή υπουργική απόφαση (ΚΥΑ), εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σε κτίρια, με λογιστικό συμψηφισμό της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς το δίκτυο και της καταναλισκόμενης απ' αυτό (Δύο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας).

Επίσης, μέσα στο 2010 ενισχύθηκε το θεσμικό πλαίσιο των ΑΠΕ με τον επόμενο νόμο και σχετικές ΚΥΑ:

- Νόμος 3851/2010 ΦΕΚ 85 Α' /4-6-2010. Επιτάχυνση της ανάπτυξης των ΑΠΕ για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας ΥΠΕΚΑ. Με το νόμο αυτό απλοποιούνται δραστικά οι διαδικασίες αδειοδότησης. Οι προτάσεις αδειοδότησης υποβάλλονται στη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), η οποία είναι ανεξάρτητη διοικητική αρχή. Η ΡΑΕ πλέον, εκτός των γνωμοδοτικών και εισηγητικών αρμοδιοτήτων της, έχει και την αρμοδιότητα έκδοσης των αποφάσεων αδειοδότησης έργων ΑΠΕ.
- ΚΥΑ 1079/4-6-2009. Ειδικό πρόγραμμα ανάπτυξης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτιριακές εγκαταστάσεις και ιδίως σε δώματα και στέγες.
- ΚΥΑ 1557/22-9-2010. Συμπλήρωση του ειδικού προγράμματος ανάπτυξης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτιριακές εγκαταστάσεις.

Για τη περίπτωση των φωτοβολταϊκών στα δώματα και στις στέγες, συνοπτικά, ισχύουν τα επόμενα:

- Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών έως 10 kW<sub>p</sub>, στο δώμα ή στη στέγη (συμπεριλαμβανομένων των στεγάστρων βεραντών, βοηθητικών χώρων και χώρων στάθμευσης) κτιρίου, που χρησιμοποιείται για κατοικία ή στέγαση πολύ μικρών επιχειρήσεων (Ηπειρωτική χώρα, διασυνδεδεμένα νησιά και Κρήτη). Στα υπόλοιπα μη διασυνδεδεμένα νησιά, μέχρι 5 kW<sub>p</sub>.
- Εγγυημένη τιμή πώλησης 55 λεπτά/kWh, για 25 έτη (η τιμή αυτή ισχύει για εγκαταστάσεις μέχρι 31/12/2011).



- Αρκεί η υποβολή έγγραφης γνωστοποίησης στην πολεοδομία για εκτέλεση εργασιών και μελέτη εγκατάστασης.

## Βιβλιογραφία

- [1] «Εναλλακτικές Μορφές Ενέργειας», Β. Μπιτζιώνης, εκδόσεις Τζιόλα, 2011.
- [2] «Σύγχρονες Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις», Β. Μπιτζιώνης, εκδόσεις Τζιόλα, 2008.
- [3] «Ανεμοκινητήρες», Γ. Μπεργελές, εκδόσεις Συμεών, 2005.
- [4] «Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Ι. Φραγκιαδάκης, εκδόσεις Ζήτη, 2007.
- [5] «Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία», Κ. Καγκαράκη, εκδόσεις Συμμετρία, 1992.
- [6] «Ήπιες Μορφές Ενέργειας Ι», Θωμάς Ζαχαρίας, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2006.
- [7] «Ήπιες Μορφές Ενέργειας ΙΙ», Θωμάς Ζαχαρίας, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2007.
- [8] «Φυσική των φ/β στοιχείων», Βασιλική Περράκη, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2008.
- [9] «Νέες τεχνολογίες των φ/β στοιχείων», Βασιλική Περράκη, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2008.
- [10] «Ένας πρακτικός οδηγός για τα φωτοβολταϊκά», Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών.
- [11] «Σύγχρονες εξελίξεις σε φ/β συστήματα για διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας», Ι. Κομπούγιας, Α. Κυρίτσης, Α. Νανάκος, Ε. Τατάκης.
- [12] «Μετατροπή της Ηλιακής Ενέργειας σε Ηλεκτρική με Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Νεοκλέους-Κωνσταντινίδη, Ίων, 1991.
- [13] «Μετατροπή της Ηλιακής Ενέργειας σε Ηλεκτρική με Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Νεοκλέους-Κωνσταντινίδη, Ίων, 1991.
- [14] «Επενδύσεις Φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα», Α. Ζαχαρίου, ΤΕΕ, 2010.
- [15] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες πηγές”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997.
- [16] Σταύρος Παπαθανασίου, “Ανανεώσιμες Πηγές ενέργειας”, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008.
- [17] Στέφανος Μανιάς, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, 6η έκδοση, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2007.
- [18] Μ. Ντρέκο, Χ. Πάτσιος, Α. Χανιώτης, Α. Κλαδάς “Ανάλυση Λειτουργίας και έλεγχος Συστήματος Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών Διασυνδεδεμένης στο Δίκτυο” Ελληνική επιτροπή CIGRE, σύνοδος Αθήνα 2009.
- [19] P.C. Krause, “Analysis of Electric Machinery”, McGraw-Hill, 1986.
- [20] Chee-Mun Ong, “Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab/Simulink”, Prentice Hall PTR, 1998.

- [21] V. Akhmatov, "Analysis of Dynamic Behavior of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power", PhD Thesis, Technical University of Denmark, April 2003.
- [22] J.G. Slootweg, "Wind Power – Modeling and Impact on Power System Dynamics", PhD Thesis, Delft, October 2003.
- [23] M. R. Patel, "Wind and Solar Power Systems", CRC Press, 1999.
- [24] P. M. Anderson, "Analysis of Faulted Power Systems", IEEE Press, Power Systems Engineering Series, 1995.
- [25] T. Petru and T. Thiringer, "Modelling of Wind Turbines for Power System Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.17, No.4, November 2002.
- [26] M. Papadopoulos, P. Malatestas, N. Hatziaargyriou, "Simulation and analysis of small and medium size power systems containing wind turbines", IEEE Trans on Power Systems, vol. 6, pp. 1453 -1458 Nov. 1991.
- [27] "Power Quality Improvements of Wind Farms", Fredericia, June 1998.
- [28] L.L. Freris, "Wind Energy Conversion Systems", Prentice Hall, 1990.
- [29] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", John Willey & Sons, 1998.
- [30] Papathanassiou S.A., Papadopoulos, M.P., "Dynamic behaviour of variable speed wind turbines under stochastic wind", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.: 14, issue: 4 , pages: 1617 -1623, Dec. 1999.
- [31] European Wind Energy Conference, "Proceeding of the International Conference held at Dublin Castle", Ireland, October 1997.
- [32] "Wind Energy for the Next Millenium", Proceedings of the European Wind Energy Conference, Nice, France, 1-5 March 1999.
- [33] T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems". John Wiley & Sons,Ltd., 2005.
- [34] H. Slootweg, E. de Vries, "Fixed vs. Variable", Renewable Energy World, January-February 2003.
- [35] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H.Bindner, P.Sørensen, B. Bak-Jensen, "Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines", Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, December 2001.
- [36] J. G. Slootweg; H. Polinder; W. L. Kling, "Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no.4, pp. 516–524, 2003.
- [37] Siegfried Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", 2nd ed., John Wiley & Sons, England, 2006.
- [38] V. Valtchev, A. Bossche, J. Ghijselen, and J. Melkebeek, "Autonomous renewable energy conversion system," Renew. Energy, vol. 19, no. 1, pp. 259–275, Jan. 2000.

- [39] S. Kim, and E. Kim, "PSCAD/EMTDC – Based modeling and analysis of a gearless variable speed wind turbine", IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 22, no. 2, pp. 421-430, June 2007.
- [40] N. Yamamura, M. Ishida, and T. Hori, "A simple wind power generating system with permanent magnet type synchronous generator", IEEE International Conf. on Power Electronics and Drive Systems, PEDS '99, Hong Kong , July 1999.
- [41] C. Patsios, A. Chaniotis, A. Kladas, "A hybrid maximum power point tracking system for grid-connected variable speed wind-generators" Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE 15-19, June 2008, p.p. 1749 – 1754.
- [42] Justin Wilkes, Jacopo Moccia, "Wind in power : 2009 European statistics", The European energy association, February 2010.
- [43] Othman B.k Hasnaoui, Jamel Belhadj, Mohamed Elleuch, "Direct Drive PMSG Wind Turbine investigation-Low Voltage Ride Through capability Dynamic behavior in presence of grid disturbance", Journal of Electrical Systems, August 2008.
- [44] Md. Wasi Uddin, Md. Yiasin Sumon, Rajib Goswami, Md. Rahimul Hasan Asif , K. M. Rahman "Sensorless peak power point tracking system for small scale wind turbine generators", 1<sup>st</sup> International Conference on the Developments in Renewable Energy echnology (ICDRET), December 2009.
- [45] Liang Ma, Wang Ran, Trillion Q. Z "Modeling and Control of three-phase Grid-connected Photovoltaic Inverter" 8th IEEE International Conference on control and Automation, Xiamen, China, June 2010.
- [46] «Σχεδίαση αυτόνομου υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος», Διπλωματική Εργασία της Μαρκάτου Μαρίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2011.
- [47] «Τεχνικό – οικονομική διερεύνηση φωτοβολταϊκών για οικιακή χρήση», Διπλωματική Εργασία του Δημητρίου Γ. Παναγόπουλου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.
- [48] «Παραμετρική Μελέτη Μηδενισμού Σκίασης Ηλιακών Συλλεκτών-Κώδικας-Εφαρμογές», διπλωματική εργασία του Σταμάτιου Καλάκιου, Εθνικό Μετσόβιο Πλυτεχνείο,2010.
- [49] «Διαχείριση Δεδομένων Μέτρησης της Ηλιακής Ακτινοβολίας», διπλωματική εργασία του Παναγιώτη Κεραμιτζή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010.
- [50] «Τεχνοοικονομική Μελέτη και Σύγκριση Υβριδικών Συστημάτων. Εφαρμογή σε Αυτόνομη Κατοικία», διπλωματική εργασία των Δ. Σαραφianού και Μ. Σειραγάκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2009.
- [51] «Σχεδιασμός Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος για την Τροφοδότηση Αγροικίας», διπλωματική εργασία της Φ. Μπουγιούκου, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010.

- [52] Σ. Α. Παπαθανασίου, “Συμβολή στην Ανάλυση Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για την επιλογή του Ηλεκτρικού Σχήματος”, Διδακτορική Διατριβή, Φεβρουάριος 1997, Αθήνα.
- [53] Φ. Δ. Κανέλλος, “Συμβολή στην Προσομοίωση και Αναγνώριση Ανεμογεννητριών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για τη Δημιουργία Μειωμένης Τάξης Ισοδυνάμων Μοντέλων”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Οκτώβριος 2003.
- [54] Σωτήριος Ι. Νάνου, “Μοντέλο Ανεμογεννήτριας με Πλήρη Μετατροπέα για Μελέτες Ευστάθειας”, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Ιούλιος 2009 .
- [55] Χρήστος Π. Πατσιούρας, “ Τεχνικές Απαιτήσεις Κωδίκων για τη Σύνδεση Μεγάλων Αιολικών Πάρκων στο Σύστημα”, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Σεπτέμβριος 2007.
- [56] Μαρία Σ. Ρώτα, “ Σύγκριση Κλασσικού και Ελέγχου βασισμένου σε Ασαφή λογική Ανεμογεννήτριας Μόνιμων Μαγνητών”, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Οκτώβριος 2008.
- [57] [http://www.eooa.gr/?page\\_id=540](http://www.eooa.gr/?page_id=540)
- [58] <http://dasikoxorio.wordpress.com/%CF%84%CE%B9>
- [59] <http://www.timbertrail.gr/sports/oreivatika-katafygia.html>
- [60] <http://www.sportsmag.gr/shelters>
- [61] <http://www.buildings.gr/oreivatein/oreivatein.htm>
- [62] [http://www.proskopismos.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=399&Itemid=74](http://www.proskopismos.com/index.php?option=com_content&task=view&id=399&Itemid=74)
- [63] <http://www.seoreivatou.gr/index.jsp?CMCCode=100601&extLang=>
- [64] <http://www.xwmatinos.gr/xwma/modules.php?name=News&file=article&sid=1277>
- [65] [http://katafygioagrafon.blogspot.com/p/blog-page\\_31.html](http://katafygioagrafon.blogspot.com/p/blog-page_31.html)
- [66] <http://www.pvtech.gr/pvgis.html>
- [67] [http://www.cocoon.gr/photovoltaic-system\\_no6.html](http://www.cocoon.gr/photovoltaic-system_no6.html)
- [68] [http://www.cres.gr/energy-saving/images/pdf/Analytikos\\_pinakas\\_timologiou\\_deh.pdf](http://www.cres.gr/energy-saving/images/pdf/Analytikos_pinakas_timologiou_deh.pdf)
- [69] <http://www.energomixaniki.gr/fvprosdiorismos.php>
- [70] <http://www.gardena.com/gr/water-management/irrigation-pump/classic-pressure-tank-unit-3000-4/>
- [71] <http://www.igsolarpower.com/anemogennitries.htm>
- [72] <http://www.anemogennitria.gr/articles.htm>
- [73] <http://toolserver.org/~geohack/geohack.php?language=el&pagename=%CE>
- [74] [http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/OMADESE RGASIAS/fwtovoltaika\\_ergwn.pdf](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/OMADESE RGASIAS/fwtovoltaika_ergwn.pdf)
- [75] [http://www.ebooks4greeks.gr/2011.Download\\_free-books/kathighths/Eidikes\\_Hlektrikes\\_Egkatasaseis\\_B\\_Downloaded\\_f\\_eBooks4Greeks.gr.pdf](http://www.ebooks4greeks.gr/2011.Download_free-books/kathighths/Eidikes_Hlektrikes_Egkatasaseis_B_Downloaded_f_eBooks4Greeks.gr.pdf)

- [76] [http://www.greenenergyparts.com/PDFManuals/solar\\_panel.pdf](http://www.greenenergyparts.com/PDFManuals/solar_panel.pdf)
- [77] [http://www.going-green.gr/gi\\_off\\_grid.html](http://www.going-green.gr/gi_off_grid.html)
- [78] <http://jkon.aeromodelling.gr/ninter-073a.htm>
- [79] <http://www.eshops.gr/index.php?act=viewProd&productId=11470>
- [80] [http://www.alexstore.gr/index.php?product\\_id=5872&page=shop.product\\_details&category\\_id=450&flypage=flypage.tpl&option=com\\_virtuemart&Itemid=71](http://www.alexstore.gr/index.php?product_id=5872&page=shop.product_details&category_id=450&flypage=flypage.tpl&option=com_virtuemart&Itemid=71)
- [81] [http://www.solarfree.gr/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=424&category\\_id=134&option=com\\_virtuemart&Itemid=18&vmcchk=1&Itemid=18](http://www.solarfree.gr/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=424&category_id=134&option=com_virtuemart&Itemid=18&vmcchk=1&Itemid=18)
- [82] <http://www.dcacpowerinverters.com/itemdesc.asp?ic=ML3500-24>
- [83] [http://www.cres.gr/perch/pdf/guide\\_homeowners\\_greek.pdf](http://www.cres.gr/perch/pdf/guide_homeowners_greek.pdf)
- [84] [http://www.eng.auth.gr/IHT/B%20Tomos/B01%20-%20AIOLOKH%20ENERGEIA/05-Carabelas\\_Daskalakis\\_MEL-EGETAST%20ANW%20MOYLIA.pdf](http://www.eng.auth.gr/IHT/B%20Tomos/B01%20-%20AIOLOKH%20ENERGEIA/05-Carabelas_Daskalakis_MEL-EGETAST%20ANW%20MOYLIA.pdf)
- [85] [http://www.windrose.gr/WindRose\\_Greek\\_Users\\_Guide.pdf](http://www.windrose.gr/WindRose_Greek_Users_Guide.pdf)
- [86] [http://www.hnms.gr/hnms/greek/climatology/climatology\\_region\\_diagrams.html?dr\\_city=Tatoi](http://www.hnms.gr/hnms/greek/climatology/climatology_region_diagrams.html?dr_city=Tatoi)
- [87] <http://aims.cres.gr/grwind150/viewer.htm>
- [88] <http://www.scribd.com/doc/81453529/3/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%>
- [89] <http://www.scribd.com/doc/81453529/3/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%>
- [90] [http://dSPACE.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/4762/3/papandreoug\\_windfarm.pdf](http://dSPACE.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/4762/3/papandreoug_windfarm.pdf)
- [91] <http://penteli.meteo.gr/stations/parnitha/NOAAPRYR.TXT>
- [92] <http://www.leaderexpo.gr/ENERTECH%20'11%20-%201%20OCTOBER/E%20SESSION/TZEN.pdf>
- [93] [http://wiki.answers.com/Q/Convert\\_kmh\\_to\\_ms](http://wiki.answers.com/Q/Convert_kmh_to_ms)
- [94] <http://aix.meng.auth.gr/lhtee/education/IAxBE8.pdf>
- [95] [ap.physics.auth.gr/pms/upload/PEP\\_wind\\_power\\_12-2010.pdf](http://ap.physics.auth.gr/pms/upload/PEP_wind_power_12-2010.pdf)
- [96] <http://www.ecowatt.gr/images/stories/proionta/air/swt7500dc-td-eng-0608.pdf>
- [97] [http://www.2004ewec.info/files/23\\_1400\\_soenkesiegfriedsen\\_01.pdf](http://www.2004ewec.info/files/23_1400_soenkesiegfriedsen_01.pdf)
- [98] <http://www.hlektronika.gr/index.php?page=theory?powersupplies>
- [99] [http://www.linksa.gr/index.php?option=com\\_content&view=category&id=180:2010-04-23-12-36-06&layout=blog&Itemid=282](http://www.linksa.gr/index.php?option=com_content&view=category&id=180:2010-04-23-12-36-06&layout=blog&Itemid=282)
- [100] <http://www.directindustry.com/prod/siemens-ag/ac-dc-switch-mode-power-supplies-modular-converters-17494-862341.html>

- [101] [http://www.toolhouse.gr/index.php?page=shop.product\\_details&category\\_id=44&flypage=ilvm\\_fly2\\_blue.tpl&product\\_id=2989&option=com\\_virtuemart&Itemid=67&vmcchk=1&Itemid=67](http://www.toolhouse.gr/index.php?page=shop.product_details&category_id=44&flypage=ilvm_fly2_blue.tpl&product_id=2989&option=com_virtuemart&Itemid=67&vmcchk=1&Itemid=67)
- [102] [http://www.e-ergaleio.gr/product\\_info.php?cPath=182&products\\_id=13539](http://www.e-ergaleio.gr/product_info.php?cPath=182&products_id=13539)
- [103] <http://www.mrtool.gr/epaggelmatika-biomichanika/gennitries/gennitria-epaggelmatiki-diesel-dhy6000le-10hp-230v-hyundai-2080.html#>

# Κεφάλαιο 1

---

*Εισαγωγή*

---



## 1.1 Οι συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι πρόγονοι μας στα πρώτα χρόνια της ζωής τους, στη γη, δε γνώριζαν πολλά πράγματα για τη χρήση της ενέργειας. Χρησιμοποιούσαν μόνο τη μυϊκή τους δύναμη και αργότερα τη μυϊκή δύναμη των ζώων. Στην πορεία του χρόνου διαπίστωσαν ότι ο άνεμος, η φωτιά και το νερό είχαν ενέργεια που μπορούσαν να την εκμεταλλευτούν. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε τους ανθρώπους στο σχεδιασμό και την δημιουργία εργαλείων και μηχανών με τα οποία μείωσαν τον προσωπικό τους μόχθο (ανεμόμυλοι, υδραυλικοί τροχοί κ.α.). Αρκετά αργότερα εμφανίστηκαν οι θερμικές μηχανές και μετά η ατμομηχανή. Στη συνέχεια η τεχνολογική εξέλιξη ήταν ραγδαία.

Στα νεότερα χρόνια, το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας παράγεται από τη χρήση καύσιμων υλών, προερχόμενων από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ιδιαίτερα το αργό πετρέλαιο και τα προϊόντα του αποτελούν μία από τις βασικότερες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σγαθών σε όλο τον κόσμο. Η αλόγιστη όμως χρήση τέτοιων πηγών ενέργειας έχει προκαλέσει αρνητικά αποτελέσματα στην ατμόσφαιρα και γενικότερα στο περιβάλλον.

Τα τελευταία χρόνια οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες (βιομηχανίες, αυτοκίνητα κ.α.), έχουν αυξήσει σημαντικά τις συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου με αποτέλεσμα την αύξηση της απορροφούμενης ακτινοβολίας και την επακόλουθη θερμοκρασιακή μεταβολή. Υπολογίζεται ότι η μέση θερμοκρασία της Γης έχει αυξηθεί κατά 0,5 με 0,6 °C από το 1880, λόγω της έξαρσης του φαινομένου του θερμοκηπίου και μέχρι το έτος 2100, εάν δεν ληφθούν μέτρα, η αύξηση της θερμοκρασίας θα είναι από 1,5 έως 4,5 °C.

Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε διάσκεψη στο Ρίο, το καλοκαίρι του 1992. Εκεί προσδιορίστηκε το πρόβλημα στις πραγματικές του διαστάσεις, προδιαγράφοντας άμεσες ενέργειες και επεμβάσεις. Τα επιστημονικά στοιχεία για τη σχέση της βιομηχανικής δραστηριότητας με τις αρνητικές κλιματικές αλλαγές, την οικολογική υποβάθμιση και το δυσοίωνα μέλλον του πλανήτη μας, ήταν συντριπτικά. Παρά ταύτα, οι τρόποι αντιμετώπισης και ο έλεγχος εφαρμογής τους δεν βρήκαν όλες τις κυβερνήσεις σύμφωνες. Αιτία; Οι επαγόμενες συνέπειες από τον περιορισμό της δράσης της βιομηχανίας των αναπτυγμένων χωρών. Στην επόμενη διάσκεψη στο Κιότο της Ιαπωνίας το Δεκέμβριο του 1997, υπεγράφη η πρώτη συμφωνία σε παγκόσμιο επίπεδο (Πρωτόκολλο του Κιότο) και τέθηκε τελικά σε ισχύ στις 16 φεβρουαρίου του 2005. Δυστυχώς, η εφαρμογή του δεν βρίσκει όλα τα κράτη πρόθυμα να ανταποκριθούν στις δεσμεύσεις που προβλέπει. Ο στόχος να μειωθούν οι εκπομπές ρυπογόνων αερίων μέχρι το 2012, κατά 5,2%, σε σχέση με το 1990, δεν φαίνεται, με τα σημερινά δεδομένα, εφικτός.

## 1.2 Οι πηγές ενέργειας σήμερα

Το σύνολο των πηγών ενέργειας, που ο άνθρωπος έχει στη διάθεση του διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες. Στις πηγές εκείνες που βασίζονται σε υπάρχοντα αποθέματα μέσα στο στερεό φλοιό της Γης, με συγκεκριμένη διάρκεια ζωής και σ' αυτές που καθημερινά που καθημερινά και αέναα μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης.

Στις πρώτες ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβου-

νο), αναφερόμενα και ως συμβατικά καύσιμα και η χαρακτηριστικά μη ήπια μορφή ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια.

Οι δευτερες έχουν βασική τους προέλευση από τον Ήλιο. Η ακτινοβολούμενη από τον Ήλιο ενέργεια, που φτάνει στη Γη, εκτός από τη γενικότερη συμβολή της στη δημιουργία, ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας, δίδει ακατάπαυστα ενέργεια, με διάφορες μορφές αξιοποίησης. Άμεσα θερμαίνει, εξατμίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού και συντηρεί τον γνωστό φυσικό κύκλο, δημιουργώντας τις λίμνες και τα ποτάμια, που αποτελούν πρόσθετη πηγή ενέργειας (υδατοπτώσεις). Θέτει σε κίνηση τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας (αιολική ενέργεια), δημιουργεί τα κύματα (ενέργεια κυμάτων) και συμβάλλει στη δημιουργία των θαλασσιών ρευμάτων. Απορροφούμενη αυτή η ενέργεια του Ήλιου από συνδυασμένα υλικά, παράγει ηλεκτρισμό (φωτοβολταϊκό φαινόμενο). Συμβάλλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας, η καύση δε των φυτικών προϊόντων παράγει ενέργεια (βιομάζα).

Οι κύριες πηγές ενέργειας, που χρησιμοποιούνται σήμερα, είναι:

### 1.2.1 Το κάρβουνο

Αποτέλεσε για πολλά χρόνια μέχρι σήμερα, την κύρια καύσιμη ύλη. Σ' αυτό βασίστηκε κατά κύριο λόγο, η βιομηχανική επανάσταση. Μεγάλο μέρος της σημερινής παγκόσμιας βιομηχανικής παραγωγής βασίζεται στην ενέργεια από την καύση του ορυκτού άνθρακα.

### 1.2.2 Το πετρέλαιο

Ήταν γνωστό από την αρχαιότητα, στους Εβραίους και τους Αιγύπτιους. Στη Δύση, γινόταν περιορισμένη χρήση του σε φωτισμό και την ιατρική, μέχρι το τέλος του 15<sup>ου</sup> αιώνα, οπότε άρχισε η βιομηχανική του εκμετάλλευση. Η παγκόσμια παραγωγή του εντατικοποιήθηκε από τα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα, ενώ από τα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα, οι ρυθμοί εκμετάλλευσης πήραν εκρηκτικές διαστάσεις. Σήμερα, μετά από δύο πε-τρελαϊκές κρίσεις (1973 και 1979) και τη διαπίστωση ορατών πλέον επιπτώσεων στο περιβάλλον μας, συνειδητοποιούμε την ανάγκη αλλαγής του τρόπου ζωής μας και αναζήτησης λύσεων από το χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παράλληλα, αποκτά ιδιαίτερο νόημα η εφαρμογή αυστηρότερης πολιτικής στον τομέα της ορθολογικής χρήσης και εξοικονόμησης ενέργειας.

Τα συμβατικά καύσιμα καλύπτουν το 85% της καταναλισκόμενης ενέργειας στις αναπτυγμένες χώρες και το 55%, στις υπό ανάπτυξη. Στις τελευταίες, το ποσοστό χρήσης πετρελαίου, ως ενεργειακής πηγής, συνεχίζει να αυξάνει, ενώ στις αναπτυγμένες χώρες παρατηρείται τάση μείωσης του, με σταδιακή διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εκτιμάται ότι τα υπάρχοντα αποθέματα των πηγών αυτών θα επαρκέσουν ακόμα για περίπου 200 χρόνια για το κάρβουνο, 60 χρόνια για το φυσικό αέριο και 50 χρόνια για το πετρέλαιο.

Η καύση του άνθρακα, του πετρελαίου και των παραγώγων του δίδει, ως άμεσα προϊόντα, το CO<sub>2</sub>, τα οξείδια του αζώτου και του θείου. Οι αυξημένες ποσότητες των αερίων αυτών, που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, αποτελούν μια μόνιμη απειλή για το μέλλον μας, προκαλώντας ισχυρές κλιματικές αλλαγές και

επιβαρυντική απόκλιση από τις κανονικές συνθήκες ισορροπίας του φαινομένου του θερμοκηπίου.

### 1.2.3 Η πυρηνική ενέργεια

Από το 1945 και μετά, προστέθηκε στις μεγάλης ισχύος πηγές ενέργειας, η πυρηνική. Η πυρηνική ενέργεια προορίζεται, στο βαθμό που έχει αναπτυχθεί σήμερα, κυρίως για παραγωγή ηλεκτρισμού βάσης, δηλαδή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σταθερής ισχύος χωρίς δυνατότητα κάλυψης των διακυμάνσεων ζήτησης. Καλύπτει το 6,5% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης και το 17% της παγκόσμιας παραγόμενης ηλ-εκτρικής ενέργειας. Η παραγόμενη παγκοσμίως ηλεκτρική ισχύς σε πυρηνικά εργ-οστάσια ανέρχεται σε ~375 GW, μέχρι και το 2011. Στην Ευρώπη ξεπερνά τα 195 GW, με τη Γαλλία στα 63,5 GW.

Στην πυρηνική ενέργεια αρχικά βασίστηκαν πολλές ελπίδες. Η Γαλλία είναι από τις χώρες που έδωσαν μεγάλη έμφαση στην ανάπτυξη της, χρησιμοποιώντας, κατά την περίοδο της δεκαετίας του 70, το μη πειστικό πια επιχείρημα της παραγωγής καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα αντιλαμβανόμαστε με απόγνωση, την αδυναμία μας να λύσουμε το πρόβλημα της ανεξέλεγκτης διασποράς των πυρηνικών όπλων ή της διασφαλισμένης αποθήκευσης των πυρηνικών αποβλήτων και αισθανόμαστε τρόμο για το ολοένα και πιο πιθανά πυρηνικά ατυχήματα. Από τα πιο σημαντικά εκείνο στον πυρηνικό σταθμό του Three Mile Island της Πενσυλβάνιας (Η.Π.Α), τον Απρίλιο του 1979, εκείνο στο Τσέρνομπιλ της Σοβιετικής Ένωσης, τον Απρίλιο του 1986, αλλά και το πιο πρόσφατο ατύχημα στην Φουκοσίμα της Ιαπωνίας στις 11 Μαρτίου του 2011. Τα ατυχήματα αυτά ανέδειξαν μία συνεχή απειλή, για το κόσμο μία φρίκη ανικανότητας να αντιμετωπίσει έναν ύπουλο και αόρατο εχθρό, που μόνιμα τον απειλεί με αφανισμό.

Το περιορισμένο των κοιτασμάτων του βασικού υλικού (ουράνιο 235), τα πυρηνικά απόβλητα και η απειλητική πιθανότητα ολοσχερούς καταστροφής του κόσμου μας, είτε από την υποτιθέμενη υπό έλεγχο πυρηνική αντίδραση είτε από την ανεξέλεγκτη διασπορά των πυρηνικών όπλων, βάζουν φρένο στην χρήση της.

Το σίγουρο είναι ότι οι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργούν ένα ρίσκο και είναι δεδομένο πια ότι πάντα θα υπάρχει μία πιθανή περίπτωση ατυχήματος με δραματικές συνέπειες για το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

## 1.3 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), έχουν κύρια γενεσιουργό αιτία την ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση εκείνη που αφορά στην ενέργεια των παλιρροϊκών κινήσεων που οφείλονται στη βαρυτική δράση, κυρίως της Σελήνης, πάνω στους υδάτινους όγκους που καλύπτουν την επιφάνεια της γης, καθώς και τη γεωθερμική,

όπου η ηλιακή ακτινοβολία παίζει δευτερεύοντα ρόλο.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναπληρώνονται μέσω των φυσικών κύκλων και θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες. Ο ήλιος, ο άνεμος, η γεωθερμία, τα ποτάμια, οι οργανικές ύλες, όπως το ξύλο και ακόμη τα απορρίμματα οικιακής και γεωργικής προέλευσης, είναι πηγές ενέργειας που η προσφορά τους δεν εξαντλείται ποτέ. Εξάλλου, η αξιοποίηση τους για την παραγωγή ενέργειας δεν επιβαρύνει το περιβάλλον. Η Ελλάδα διαθέτει αξιόλογο δυναμικό ΑΠΕ, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν μια πραγματική εναλλακτική λύση για την κάλυψη μέρους των ενεργειακών μας αναγκών, συνεισφέροντας στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικά καύσιμα, στην ελάττωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και στην ανάπτυξη αποκεντρωμένων περιοχών.

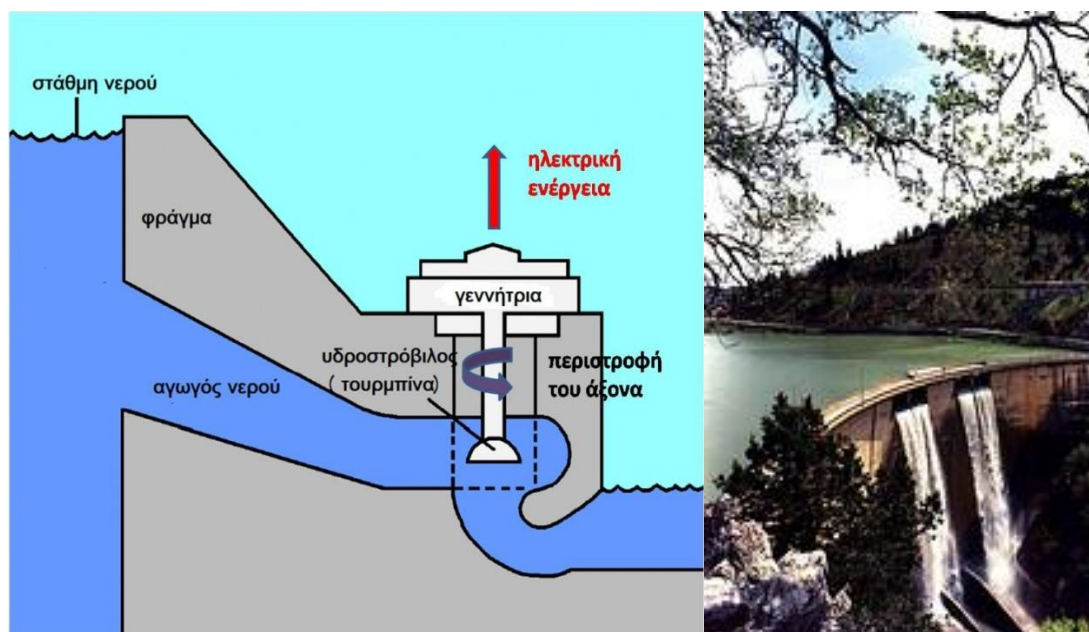
Οι μορφές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι:

### 1.3.1 Υδατόπτωση

Αποτελεί έναν από τους πιο φυσικούς τρόπους παραγωγής μεγάλης ισχύος, οικο-λογικά καθαρής, ηλεκτρικής ενέργειας, με ανανεώσιμη συμπεριφορά. Εκμεταλλευόμεστε την ύπαρξη φυσικών λεκανών συλλογής των ομβρίων υδάτων σε συγκεκριμένες περιοχές, με κατάλληλη εδαφική διαμόρφωση, κατασκευάζοντας φράγματα. Η υδατόπτωση κινεί υδροστρόβιλους, που με τη σειρά τους θέτουν σε κίνηση ηλεκτρογεννήτριες. Η δημιουργία τεχνητών λιμνών με φράγματα έχει περιορισμένη εφαρμογή λόγω των απαιτούμενων ειδικών εδαφικών χαρακτηριστικών. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις η κατασκευή ενός φράγματος, παρότι η περιοχή καλύπτει τα τεχνικά κριτήρια, μπορεί να προκαλέσει σημαντική οικολογική καταστροφή και ενδεχομένως μετακίνηση πληθυσμού, λόγω της κατάκλισης με νερό εκτεταμένων εύφορων και με ιδιαίτερη φυσική ομορφιά περιοχών. Η υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας καλύπτει, περίπου, το 7% της παγκόσμιας ενεργειακής παραγωγής.

Ανάλογα με το μέγεθος και την παραγόμενη ισχύ, τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια διακρίνονται σε:

- Μικρής κλίμακας: Είναι εγκαταστάσεις που, όπως υποδηλώνει το όνομα τους, παράγουν από 1 KW έως 1 MW ισχύος. Η βασική τους χρήση είναι η ηλεκτροδότηση μικρών οικισμών, (χωριών, κωμοπόλεων) ή μικρών εργοστασίων δευτερογενούς παραγωγής.
- Μεσαίας κλίμακας: Παράγουν μέχρι 20 MW ισχύος, είναι σχετικά χαμηλού κόστους κατασκευής ενώ είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα κατά την λειτουργία τους. Χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση είτε αστικών περιοχών είτε για τη λειτουργία μεγάλων παραγωγικών μονάδων με πολλές ενεργειακές απαιτήσεις.
- Μεγάλης κλίμακας: Παράγουν περισσότερα από 20 MW ισχύος και απαιτούν την κατασκευή μεγάλων φραγμάτων. Ένα από τα μεγαλύτερα εργοστάσια αυτού του τύπου είναι στο φράγμα Χούβερ στο Κολοράντο των ΗΠΑ, το οποίο έχει ισχύ 2.000 MW.

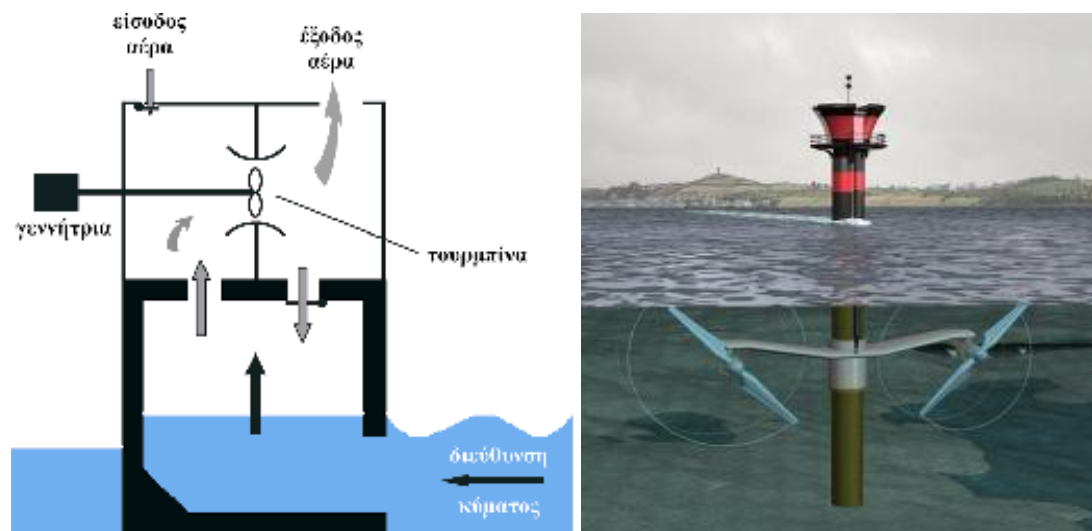


**Σχήμα 1.1** Πάνω αριστερά η γενική μορφή ενός υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Πάνω δεξιά ο υδροηλεκτρικός σταθμός Πλαστήρα με εγκαταστημένη ισχύ 130 MW, χαλύβδινου αγωγού πτώσης. Η υψομετρική διαφορά από το σημείο υδροληψίας στη λίμνη Πλαστήρα είναι 577 μέτρα.

### 1.3.2 Ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκών κινήσεων και θαλάσσιων ρευμάτων

Η παραγωγή ενέργειας από τα κύματα ή τις παλιρροϊκές κινήσεις, έχει αξιοποιηθεί σε συγκεκριμένες θέσεις, όπου το ύψος των κυμάτων και η διάρκεια κυματισμού καθώς και η ταχύτητα των θαλάσσιων ρευμάτων επιτρέπουν την ενεργειακή αξιοποίησή τους. Στη Βρετανία της Γαλλίας λειτουργεί από το 1966 σταθμός παραγωγής ηλ-εκτρικής ενέργειας ισχύος 240 MW. Εντυπωσιακό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυματισμό είναι η διάταξη με το όνομα Pelamis (είδος θαλάσσιου φιδιού). Η διάταξη που δείχνεται στη φωτογραφία του σχήματος 1.3, αποτελείται από τέσσερις κυλίνδρους, με δυνατότητα αρθρωτής κίνησης μεταξύ τους, σε κατακόρυφο επίπεδο. Υπό την επίδραση του κυματισμού αλλάζει η γωνία μεταξύ τους με αποτέλεσμα την άσκηση δυνάμεων σε έμβολα τοποθετημένα άνω και κάτω, στις πλευρές που συνδέονται μεταξύ τους. Έχει δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ισχύ 750 kW. Σε προχωρημένο πειραματικό στάδιο βρίσκεται επίσης η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με υποθαλάσσιες ηλεκτρογεννήτριες, όπως φαίνεται στη σχηματική παράσταση 1.2. Η μεγάλη πυκνότητα του νερού σε σχέση με την πυκνότητα του αέρα, καθιστά τις υποθαλάσσιες ηλεκτρογεννήτριες αποδοτικές, παρότι η ταχύτητα των θαλάσσιων ρευμάτων είναι αρκετά μικρότερη της τυπικής ταχύτητας των ανέμων. Η εφαρμογή τους, πάντως, πρόκειται να είναι περιορισμένη, σε θέσεις που υπάρχουν ισχυρά θαλάσσια ρεύματα (σχήμα 1.2). Μία άλλη ενδιαφέρουσα ιδέα που μελετάται, αφορά στην αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων σε ειδικές κατασκευές, στις οποίες

ενσωματώνεται ανεμογεννήτρια και μέρος των οποίων είναι βυθισμένο στη θάλασσα (σχήμα 1.2). Κατά τον κυματισμό, ο εισερχόμενος όγκος νερού συμπιέζει τον περιεχόμενο αέρα, ο οποίος, ρέοντας μέσω της κεντρικής χοάνης, θέτει σε περιστροφή τη φτερωτή της ανεμογεννήτριας. Η διάταξη των βαλβίδων εισόδου – εξόδου του αέρα, είναι τέτοια ώστε η ανεμογεννήτρια να περιστρέφεται κατά την ίδια φορά, ανεξάρτητα από τη φάση συμπίεσης ή εκτόνωσης του εσωτερικού αέρα, κατά τον κυματισμό.



**Σχήμα 1.2** Πάνω αριστερά σχηματική παράσταση συστήματος κίνησης ανεμογεννήτριας με συμπίεση του εσωτερικού αέρα στη διάταξη, με αξιοποίηση του κυματισμού. Πάνω δεξιά σχηματική παράσταση υποθαλάσσιας ηλεκτρογεννήτριας.



**Σχήμα 1.3** Το Pelamis σε λειτουργία. Το πρωτότυπο είναι τοποθετημένο στο European Marine Energy Center, στο Orkney της Σκωτίας.

### 1.3.3 Βιομάζα

Βιομάζα, ονομάζουμε οποιαδήποτε σχετικά νέα οργανική ύλη που προέρχεται από φυτά ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης. Η ενέργεια από βιομάζα αντλείται από φυτικό και ζωικό υλικό, όπως ξύλο από τα δάση,

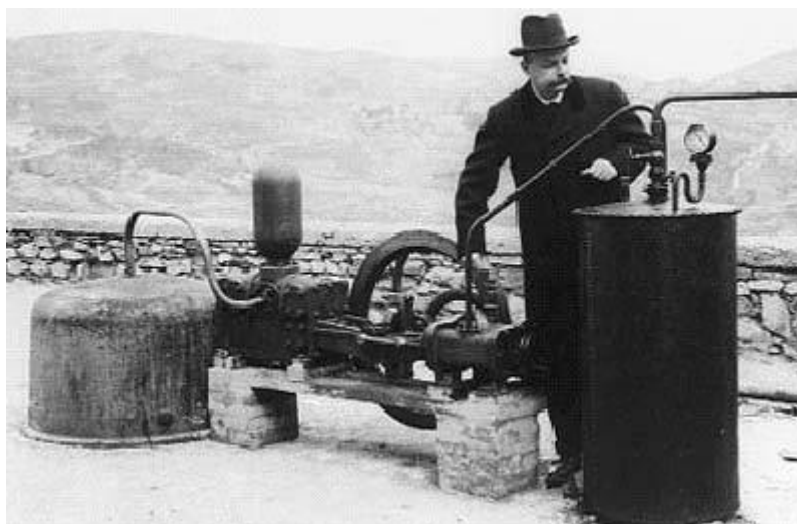
υπολείμματα από γεωργικές ή δασικές διαδικασίες και βιομηχανικά, ανθρώπινα ή ζωικά απόβλητα. Αντιθέτως, βιομάζα δεν είναι τα ορυκτά οργανικά υλικά (όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο). Η βιομάζα είναι φρέσκια οργανική ύλη. Είναι επίσης και το βιολογικής προέλευσης μέρος των αστικών λυμάτων και σκουπιδιών.

Η βιομάζα καλύπτει σήμερα το 14% της παγκόσμιας απαιτούμενης ενέργειας. Η καύση αποτελεί, ουσιαστικά, ουδέτερη διαδικασία από την άποψη του φαινομένου του θερμοκηπίου, αρκεί να μη διαταράσσεται η λεπτή ισορροπία στο φυσικό περιβάλλον.

### 1.3.4 Γεωθερμική ενέργεια

Αφορά στην ενέργεια των θερμών νερών (ή ατμών του νερού), που αναβλύζουν μέσα από ηφαιστειακές διόδους ή ρήγματα του υπεδάφους. Σύμφωνα με την επικρατέστερη θεωρία, η θέρμανση των γεωθερμικών ρευστών αποδίδεται κυρίως, στην εκλυόμενη ενέργεια κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών ισοτόπων στο στερεό φλοιό της γης. Όταν η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών είναι χαμηλή, η ενέργεια τους χρησιμοποιείται κυρίως για θέρμανση κτιρίων, θερμοκηπίων, κτηνοτροφικών μο-νάδων, ιχθυοκαλλιεργειών, κ.α., ενώ στις περιπτώσεις που η θερμοκρασία των ατμών είναι υψηλή (>150 °C), μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το γεωθερμικό δυναμικό που αφορά αποκλειστικά σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ανερχόταν παγκοσμίως σε ~11 GW, το 2010. Στη χώρα μας, η γεωθερμική ενέργεια, αξιοποιείται κυρίως σε θερμοκηπιακές μονάδες, σε περιοχές της Βόρειας Ελλάδας και σε νησιά του βορειοανατολικού και κεντρικού Αιγαίου.



*Σχήμα 1.4 Η πρώτη γεωθερμική μηχανή, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, (1913) στο Larderello της Ιταλίας συνολικής ισχύος 205 kW.*

### 1.3.5 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή

ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί την μετακίνηση μεγάλων μαζών του αέρα από τη μία περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας έτσι τους ανέμους.

Η εγκατάσταση αιολικών συστημάτων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, με χρήση ανεμογεννητριών οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα πτερυγίων, βρίσκεται σήμερα σε εντυπωσιακή εξέλιξη. Η παγκοσμίως εγκαταστημένη ονομαστική ισχύς ανεμογεννητριών, από 7,6 GW το 1997, έφτασε τα 159 GW το 2009 και αντίστοιχα στην Ευρώπη, τα 76 GW. Στον πίνακα 1.5 αναφέρονται οι χώρες με τη μεγαλύτερη εγκαταστημένη ισχύ ανεμογεννητριών.

Χώρα	Εγκατεστημένη Ισχύς (2009)	
	Αιολικά (GW)	Φωτοβολταϊκά (MW <sub>p</sub> )
<b>Ευρώπη</b>		
<b>Γερμανία</b>	25,8	9.830,3
<b>Ισπανία</b>	19,1	3.520,1
<b>Δανία</b>	3,5	4,6
<b>Ιταλία</b>	4,9	1032,0
<b>Ολλανδία</b>	2,2	63,3
<b>Ηνωμένο Βασίλειο</b>	4,1	32,6
<b>Ελλάδα</b>	1,1	55,0
<b>Σύνολο Ευρώπης</b>	<b>76,1</b>	<b>15.861,2</b>
<b>Παγκοσμίως</b>		
<b>Ινδία</b>	25,8	1566,0
<b>Ιαπωνία</b>	2,1	2654,0
<b>Κίνα</b>	25,8	240
<b>ΗΠΑ</b>	35,1	1.650,0
<b>Σύνολο Παγκοσμίως</b>	<b>159</b>	<b>22.100,0</b>

*Σχήμα 1.5* Εγκατεστημένη ισχύς Αιολικών και Φωτοβολταϊκών συστημάτων σε διάφορες χώρες και παγκοσμίως.



Στη χώρα μας λειτουργούν αρκετά αιολικά πάρκα με ισχύ από μερικές εκατοντάδες kW έως μερικές δεκάδες MW, κυρίως διασυνδεδεμένα με το δίκτυο της ΔΕΗ. Η συνολική εγκαταστημένη ισχύς έφτασε 1626,5 MW το 2011. Η ΔΕΗ έχει εγκαταστήσει στον Ελλαδικό χώρο, 24 MW κι απ' αυτά αρκετά στα νησιά (Κύθνος 5x10 kW, Μύκονος 100 kW, Κάρπαθος 175 kW κ.α.). Τα υπόλοιπα έχουν εγκατασταθεί από άλλους φορείς, κυρίως από την τοπική αυτοδιοίκηση και ιδιώτες. Στην Κρήτη, όπου η ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των μονάδων της ΔΕΗ, φθάνει τα 700 MW, λειτουργούν, ήδη, σε αρκετές περιοχές του νησιού μερικά μεγάλα αιολικά πάρκα, συνολικής ισχύος ~152 MW (Λασιθί: Μονή Τοπλού 6,6 MW, Μιτάτο 10,2 MW, περιοχή Αχλάδια ~30 MW, Χαντράς 9,9 MW, Ξερολίμνη 10,2 MW, Χώνος ~20 MW, κ.α. μικρότερα. Ηράκλειο: Μεγάλη βρύση ~5 MW, Πρινιάς 3,4 MW).

Το αιολικό δυναμικό, δηλαδή η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου, σε πολλά σημεία της χώρας μας βρίσκεται σε εξαιρετικά υψηλά επίπεδα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στα νησιά του Αιγαίου το αιολικό δυναμικό παρουσιάζει μία μέση ετησίως τιμή, από 7 έως 11 m/s, το οποίο υπερκαλύπτει την αποδοτική για τις ανεμογεννήτριες, περιοχή ταχυτήτων ανέμου και κατ' επέκταση τις απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια των νησιών αυτών. Συνεπώς ο νησιωτικός χώρος αποτελεί ιδανικό πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας των αιολικών συστημάτων.



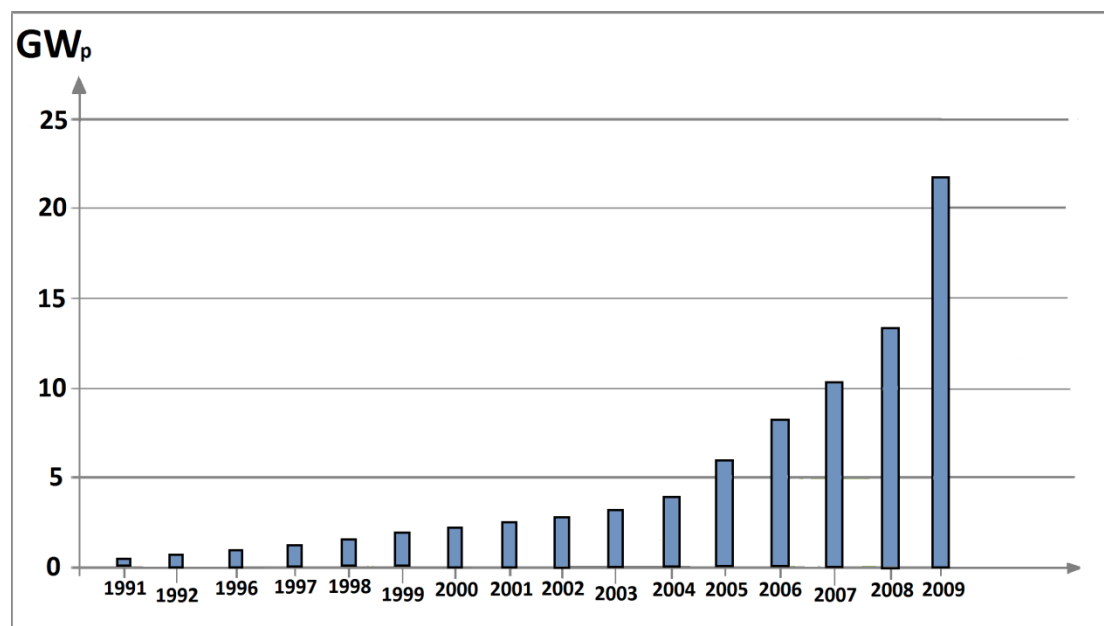
**Σχήμα 1.6** Αιολικό πάρκο Μονής Τοπλού στην Σητεία της Κρήτης συνολικής ισχύος 6,6 MW.

### 1.3.6 Φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια

Μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων, μετατρέπουμε την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι, γενικά, ένα σύστημα δύο υλικών σε επαφή, το οποίο όταν φωτίζεται εμφανίζει στα άκρα του συνεχή ηλεκτρική τάση. Σήμερα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία των οποίων η βιομηχανική παραγωγή έχει προωθηθεί, είναι αυτά που βασίζονται στη δημιουργία δύο ημιαγωγικών στρωμάτων σε επαφή.

Συνήθως, τα δύο στρώματα αποτελούνται από το ίδιο κύριο υλικό, το ένα στρώμα ημιαγωγός τύπου n και το άλλο τύπου p. Εξωτερικά τοποθετούνται κατάλληλα ηλεκτρόδια. Η κατασκευή έχει τη μορφή μιας σχεδόν τετράγωνης πλάκας, ώστε η εσωτερική επαφή των ημιαγωγών να καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια του πλακιδίου. Η παγκόσμια εγκαταστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων, από 313,5 MW<sub>p</sub> το 1991, έφτασε τα 22 GW<sub>p</sub>, στο τέλος του 2009 (Πίνακας 1.7). Απ' αυτά, περίπου 16 GW<sub>p</sub> αφορούν σε εγκατεστημένη ισχύ στην Ευρώπη ~1,7 GW<sub>p</sub> στις ΗΠΑ και ~2,7 GW<sub>p</sub> στην Ιαπωνία. Όπως προκύπτει από το σχήμα 1.7, η ποσοστιαία ετήσια μεταβολή της εγκατεστημένης ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο, κατά τη χρονική αυτή περίοδο, παρουσίασε ραγδαία αύξηση, από 18,5% το 1992, σε 29,3% το 2002 και έφτασε το 47% το 2009. Μεγάλοι ΦΒ σταθμοί έχουν εγκατασταθεί στην Ισπανία (Puertollano 47 MW<sub>p</sub>, Olmedilla 60 MW<sub>p</sub>), Γερμανία (Waldpolenz 40 MW<sub>p</sub>, Fisterwalde 70 MW<sub>p</sub>), Πορτογαλία (Septra 11 MW<sub>p</sub>) Ιταλία (Montalto di Castro 84,2 MW<sub>p</sub>), Καναδάς (Sanria 97 MW<sub>p</sub>).

Στην Ελλάδα η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων μέχρι και τον Μάρτιο του 2011, ανερχόταν σε 274,2 MW<sub>p</sub>. Στο νησιωτικό χώρο εξελίσσεται σχέδιο εγκατάστασης 200 MW<sub>p</sub>, εκ των οποίων τα 52,5 MW<sub>p</sub> στην Κρήτη.



*Σχήμα 1.7 Χρονική εξέλιξη της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύς αιχμής ΦΒ συστημάτων, στο χρονικό διάστημα 1991-2009.*



**Σχήμα 1.8** Αεροφωτογραφία Φωτοβολταϊκού πάρκου, 8,3 MW<sub>p</sub>, στην δημοτική ενότητα Καλυβίων του δήμου Τρικάλων.

# Κεφάλαιο 2

---

*Η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών*

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Στις μέρες μας είναι επιτακτική η ανάγκη για εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αυτό γιατί (1<sup>ov</sup>) πέρα από την ενέργεια που αντλούμε και θα αντλούμε για δεκατομμύρια χρόνια ακόμα αφού έχουμε να κάνουμε με ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και μάλιστα σε μία περίοδο που όπως όλα δείχνουν ότι οι συμβατικές πηγές ενέργειας πλησιάζουν στο τέλος τους, (2<sup>ov</sup>) προστάτευουμε το φυσικό μας περιβάλλον, αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό αν σκεφτεί κανείς ότι για κάθε κιλοβατώρα ηλεκτρισμού που λαμβάνουμε από το δίκτυο της ΔΕΗ και παράγεται από ορυκτά καύσιμα, επιβαρύνεται η ατμόσφαιρα με ένα τουλάχιστον κιλό διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης με την χρήση της ήλιακης ενέργειας συνεπάγεται λιγότερες εκπομπές άλλων επικίνδυνων ρύπων όπως τα καρκινογόνα μικροσωματίδια, τα οξείδια του αζώτου, οι ενώσεις του θείου. Οι ρύποι αυτοί επιφέρουν σοβαρές βλάβες στην υγεία μας, και το περιβάλλον.

Οι προοπτικές για την ηλιακή ενέργεια είναι τεράστιες, καθώς η καθημερινή πρόσληψη ηλιακής ενέργειας από την Γη είναι περίπου 200.000 φορές μεγαλύτερη από το παγκόσμιο ημερήσιο δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής.

Το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια εντάθηκε όταν χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, διαπιστώθηκε η πρακτική δυνατότητα της εύκολης, άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια, με την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων (ονομάζονται επίσης φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγών σχεδόν τετραγωνικής μορφής ώστε η εσωτερική επαφή των ημιαγωγών να καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια του πλακιδίου. (παλαιότερα τα συναντάμε και σε κυκλική μορφή δίσκου). Τα στοιχεία αυτά βασίζονται στην δημιουργία δύο ημιαγωγικών στρώματων σε επαφή. Συνήθως, τα δύο στρώματα αποτελούνται από το ίδιο κύριο υλικό, το ένα στρώμα είναι ημιαγωγός τύπου n και το άλλο τυπου p.

Όταν το φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται στην επιφάνεια του την ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνεται μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη του. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής του και την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται, ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μπορεί να δώσει τάση από 0,5 μέχρι και 0,8 Volts και πυκνότητα ρεύματος από 10 μέχρι 40 mA/cm<sup>2</sup> της επιφάνειας του.



Σχήμα 2.1 .Τυπική μορφή φωτοβολταϊκού στοιχείου

Πολλά ΦΒ στοιχεία (33-36) συνδέονται σε σειρά, ώστε, όταν η διάταξη αυτή φωτίζεται, να προκύπτει συνολική τάση ανοικτού κυκλώματος (Open circuit) 17-22 Volts. Το πλήθος των ΦΒ στοιχείων επιλέγεται έτσι ώστε να ταιριάζει με την απαιτούμενη τάση φόρτισης ενός κοινού ηλεκτρικού συσσωρευτή μολύβδου-θεικού οξέως (Pb/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), ονομαστικής τάσης 12V. Η ολοκληρωμένη αυτή φωτοβολταϊκή διάταξη ονομάζεται Φωτοβολταϊκό πλαίσιο (module). Χρησιμοποιείται επίσης, σπανιότερα, η ορολογία, φωτοβολταϊκή γεννήτρια (Photovoltaic generator). Στο εμπόριο διατίθενται ΦΒ πλαίσια σε ευρεία περιοχή τιμών ισχύος αιχμής. Μικρές κατασκευές ΦΒ στοιχείων, μερικών W<sub>p</sub>, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που δεν απαιτούν υψηλή ηλεκτρική ισχύ, όπως λ.χ. οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές «τσέπης». Σε εφαρμογές αυτόνομων ή συνδεδεμένων με το δίκτυο της ΔΕΗ, ΦΒ συστημάτων, χρησιμοποιούνται συνήθως, ΦΒ πλαίσια ισχύος αιχμής από 30 έως ~300W<sub>p</sub>.



Σχήμα 2.2 Τυπική μορφή φωτοβολταϊκού πλαισίου

## 2.1 Ιστορική Αναδρομή

Γύρω στο 1891, είχε αρχίσει να γίνεται αισθητή η μόλυνση του περιβάλλοντος στις μεγάλες βιομηχανικές πόλεις, μάλιστα εκείνη την εποχή το κυριότερο καύσιμο ήταν το κάρβουνο, ενώ δεν είχε αρχίσει ακόμα η μαζική χρήση του πετρελαίου. Η μεγάλη ώθηση για πρακτικές εφαρμογές της φωτοβολταϊκής μετατροπής δόθηκε με την πραγματοποίηση ορισμένων κρίσιμων τεχνολογικών προόδων, όπως η εξήγηση

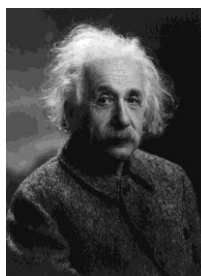
του φωτοηλεκτρικού φαινομένου από τον Albert Einstein (1904), η παρασκευή καθαρού πυριτίου με τη μέθοδο της τηγμένης ζώνης (1952), ο σχηματισμός διόδων πυριτίου με διάχυση προσμίξεων (1953), που οδήγησαν τελικά στην κατασκευή ηλιακών στοιχείων σημαντικής απόδοσης 6% (1954) και ακόμα μεγαλύτερης 14% (1972). Συγκεκριμένα οι κυριότεροι σταθμοί στην εξέλιξη της φωτοβολταϊκής μετατροπής είναι:

**1839** Παρατήρηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε μεταλλικά ηλεκτρόδια (Pt, Ag) βυθισμένα σε ηλεκτρολύτες από τον Γάλλο Φυσικό επιστήμονα Edmund Becquerel.



*Edmund Becquerel (1820- 1891)*

**1904** Ο Γερμανοεβραϊκής καταγωγής φυσικός Albert Einstein δημοσίευσε εργασία με την οποία έδωσε την εξήγηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Για αυτή του την προσπάθεια τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ το 1921.



*Albert Einstein (1879- 1955)*

**1937** Κατασκευή ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου από Pb S από τους Fisher και Godden.

**1939** Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από Se με απόδοση 1% από τον Αμερικανό μηχανικό Russell Shoemaker Ohl.



*Russell Ohl (1898- 1987)*

**1941** Κατασκευή του πρώτου ηλιακού στοιχείου από Πυρίτιο Si, πάλι από τον Russell Ohl.



*Ο Russell Ohl αρκετά νεότερος  
στο εργαστήριο του.*

**1952** Ανακάλυψη σταθμός στην εξέλιξη της φωτοβολταϊκής μετατροπής υπήρξε η μέθοδος της τηγμένης ζώνης για την κατασκευή στερεών πολύ μεγάλης καθαρότητας από τον ηλεκτροχημικό William Gardner Pfann γεννημένος στο Brooklyn της Νεας Υόρκης.



*William G. Pfann (1917- 1982)*

**1953** Μία εξήσου συμαντική ανακάλυψη υπήρξε η μέθοδος σχηματισμού ενώσεων p-n με διάχυση προσμίξεων από τον Αμερικανό Φυσικοχημικό Calvin Souther Fuller.



*Calvin S. Fuller (1902- 1994)*

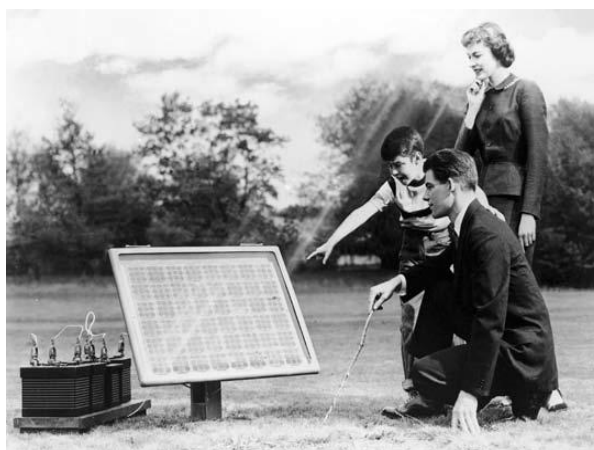
**1954** Ανακοινώθηκε η πρώτη κατασκευή ηλιακού στοιχείου Πυριτίου Si, με σχηματισμό επαφής p-n , με διάχυση προσμίξεων και με απόδοση 6% από τους Fuller, Pearson και Charin στα εργαστήρια AT&T Bell Laboratories του New Jersey των ΗΠΑ.





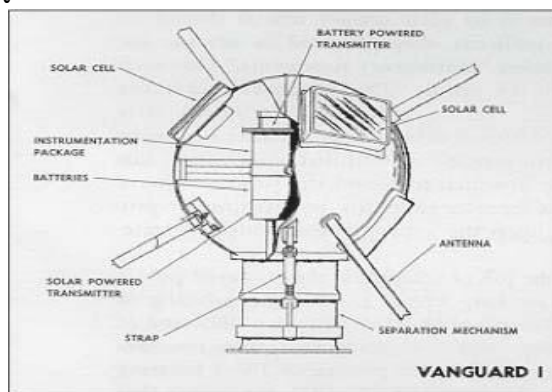
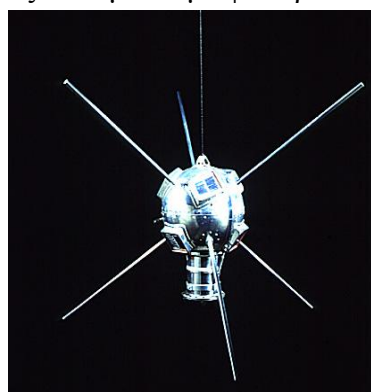
Σχήμα 2.3 Fuller, Pearson και Chapin στα Bell Laboratories των ΗΠΑ.

1956 Εμπορική παραγωγή ηλιακών στοιχείων Πυριτίου Si από την εταιρία Hoffman.



Σχήμα 2.4 Φωτογραφία από το Αμερικανικό περιοδικό Look Magazine 1956. Από τις πρώτες διαφήμισεις Φωτοβολταϊκής γεννήτριας της εποχής.

1958 Εκτόξευση του Αμερικανικού τεχνητού δορυφόρου Vanguard 1, εξοπλισμένου με έξι μικρά στοιχεία Si, ισχύος 5 mW, ως βοηθητική ενεργειακή πηγή. Ο δορυφόρος όχι μόνο έβγαλε εις πέρας την προβλεπόμενη λιγότερη διάρκεια του προγράμματος, αλλά εξακολούθησε να λειτουργεί χωρίς πρόβλημα επί έξι συνολικά χρόνια. Έτσι από το 1969 και μετά όλοι οι τεχνητοί δορυφόροι είναι εξοπλισμένοι με φωτοβολταϊκά στοιχεία.



Σχήμα 2.5 Πάνω αριστερά ο δορυφόρος και πάνω δεξιά αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά του.

**1958** Εκτόξευση Σοβιετικού τεχνητού δορυφόρου με αποκλειστική τροφοδότηση από ηλιακά στοιχεία.

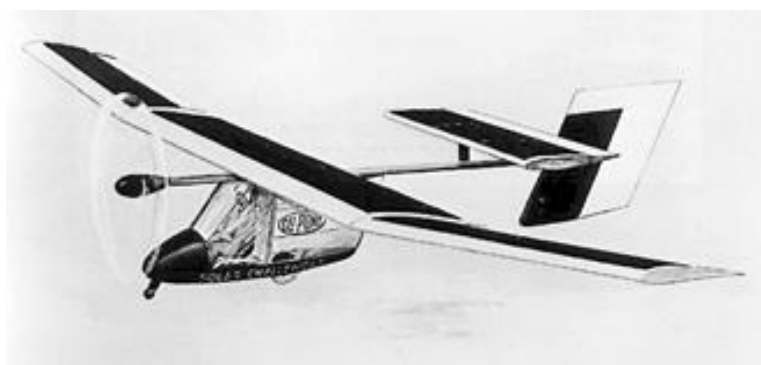
**1959** Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από CdS, με απόδοση 5% από τον Hammond.

**1972** Κατασκευή «ιώδους» ηλιακού στοιχείου από Si, με απόδοση 14% από Lindmayer και Allison.

**1976** Κατασκευή ηλιακού στοιχείου άμορφου πυρίτιου, με απόδοση 0,01% από Carlson και Wronski.

**1977** Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από GaAs, με απόδοση 16% από τον Kameth.

**1981** Πτήση πάνω από τη Μάγχη του αεροπλάνου Solar Challenger, εξοπλισμένου με 16128 ηλιακά στοιχεία Πυριτίου Si, ισχύος 2,7 kW. Η πτήση ήταν 163 μίλια και διήρκησε 5 ώρες και 23 λεπτά.



*Σχήμα 2.6 7 Ιουλίου του 1981 το Solar Challenger πέταξε πάνω από τη Μάγχη.*

**1983** Έναρξη εμπορικής λειτουργίας του φωτοβολταϊκού σταθμού της Βικτροβίλ, ισχύος 1MW.

**1984** Έναρξη βιομηχανικής παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων στην Ιαπωνία από άμορφο πυρίτιο με απόδοση 5%.

## 2.2 Εξέλιξη απόδοσης και κόστους των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Ως **απόδοση ( $\eta$ )** ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του. Η απόδοση των ηλιακών στοιχείων δεν είναι πάντα σταθερή αλλά όπως θα δούμε στο κεφ 5.3 μεταβάλλεται σημαντικά από διάφορους παράγοντες.

Για την εκτίμηση του **κόστους** των ηλιακών στοιχείων χρησιμοποιείται συμβατικά ο όρος Watt αιχμής ( $W_p$ , peak Watt) που είναι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που μπορεί να αποδώσει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, κάτω από τις πρότυπες συνθήκες

ελέγχου (STC,  $P_p = P_{m,STC}$ ). (η έννοια αυτή, STC, πρότυπες συνθήκες ελέγχου ορίζεται στο κεφ 4.11).

Αρχικά, το 1956 οι πρώτες εμπορικές κατασκευές Φωτοβολταϊκών στοιχείων, κυρίως διαστημικές, ήταν πολύ υψηλού κόστους ( $1000\$/W_p$  ή σε ευρώ  $759\€/W_p$ ) με σχετικά μικρή απόδοση 5-10%, το δε υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν κυρίως το κρυσταλλικό Πυρίτιο (c-Si) όπως και στις μέρες μας. Στην συνέχεια όμως, από το 1956 και μετά με την αύξηση της παραγωγής και τη βελτίωση της τεχνολογίας, πραγματοποιήθηκε ραγδαία μείωση του κόστους όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα Ε1. Αμέσως εκτός από τις διαστημικές εφαρμογές άρχισαν σταδιακά και οι επίγειες εφαρμογές της φωτοβολταϊκής μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι στις μέρες μας το κόστος των Φωτοβολταϊκών στοιχείων κυμαίνεται περί τα  $1,9\$/W_p$  ή σε ευρώ  $1,5\ €/W_p$ . Η δε απόδοση έχει αυξηθεί στο 22% σε ΦΒ στοιχεία για διαστημικές εφαρμογές και στο 14-18% σε ΦΒ στοιχεία για βιομηχανική-οικιακή χρήση.

Έτος	Κόστος ανά $W_p$ (σε \$)
1956	1000
1960	400
1970	100
1975	40
1980	10
1985	6
2012	1,9

Σχήμα 2.7. Εξέλιξη του κόστους των ηλιακών στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου.

Κατά την δεκαετία του 1980, η τάση μείωσης του κόστους βιομηχανικής παραγωγής των ΦΒ στοιχείων, οδήγησε στη χρησιμοποίηση οικονομικότερων μεθόδων παρασκευής του βασικού φωτοαγωγίμου υλικού. Έτσι έχουμε την εμφάνιση κατηγορίας ΦΒ στοιχείων από **άμορφο Πυρίτιο (a-Si)**, αυτά χαρακτηρίζονται από τη δημιουργία πολύ λεπτών στρωμάτων ή υμενίων υλικού (films), κυρίως πυριτίου, σε επιμελημένα καθαρισμένη επιφάνεια, που επιτρέπει την πρόσφυση του αποτιθέμενου υλικού. Επίσης οι προσπάθειες μείωσης του κόστους κατασκευής ενός ΦΒ στοιχείου οδήγησαν τελικά σε νέες διαφορετικές μεθόδους εναπόθεσης, με πολύ καλά αποτελέσματα, έτσι παρασκευάστηκαν ΦΒ στοιχεία με σχηματισμό ταινιών υλικού, από λειωμένη φάση, με εργαστηριακή απόδοση ~15%. Η επιφάνεια τους εμφανίζει μονοκρυσταλλικότητα κατά περιοχές, το δε υλικό ονομάζεται **πολύκρυσταλλικό Πυρίτιο (mc-Si)**. Το πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο, χρησιμοποιείται για την παρασκευή ΦΒ στοιχείων, που μπορούν να καλύψουν μεγάλη επιφάνεια, με βιομηχανική

απόδοση 12%-13%, πολύ κοντά στην βιομηχανική απόδοση ΦΒ στοιχείων μονοκρυσταλλικού Πυριτίου.

## 2.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ελλάδα

Στην χώρα μας, η συνολική εγκαταστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων διασυνδεδεμένων στο δίκτυο μέχρι και το Μάρτιο του 2011, ανερχόταν σε 274,2 MW<sub>p</sub>, η δε συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων περιλαμβανομένων των αυτόνομων, ανερχόταν σε 281,1 MW<sub>p</sub>. Στο νησιωτικό χώρο εξελίσσεται σχέδιο εγκατάστασης 200 MW<sub>p</sub>, εκ των οποίων 52,5 MW<sub>p</sub> στην Κρήτη. Μερικά από τα εγκατεστημένα συστήματα αποτελούνται από μικρούς ΦΒ σταθμούς σε συνεργασία με αιολικά συστήματα και ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, όπως π.χ. στη νήσο Κύνθο (100 kW<sub>p</sub>), στη νήσο Γαύδο (30kW<sub>p</sub>) καθώς και ΦΒ αντλητικά συστήματα σε διάφορα νησιά. Μέχρι το 1991, οπότε και άρχισε η σταδιακή απόσυρση των εγκαταστάσεων του, βρισκόταν σε λειτουργία στην Αγία Ρούμελη, κοντά στα Σφακιά (Νοτιοδυτική Κρήτη), ο πρώτος στην Ευρώπη (1982), πιλοτικός ΦΒ σταθμός με ισχύ 50 kW<sub>p</sub>, υπό την ευθύνη της ΔΕΗ. Μικρής ισχύος ΦΒ συστήματα βρίσκουν εφαρμογή σε φάρους αυτόνομης λειτουργίας. Στις αρχές του 2011 ανακοινώθηκε η δημιουργία Φωτοβολταϊκού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στην Κοζάνη, ονομαστικής ισχύος 200 MW. Ενδιαφέρουσα εφαρμογή αποτελούν τα ΦΒ ψυγεία πρόψυξης γάλακτος, σε κτηνοτροφικές περιοχές (Πρασές Χανίων Κρήτης, 8 kW<sub>p</sub>).

α/α	Ιδιοκτήτης	Νομός - Θέση - Χρήση	Ισχύς αιχμής (kW <sub>p</sub> )	Έτος έναρξης λειτ/γίας
1	ΔΕΗ	Χανιά, Αγία Ρουμέλη	50	1982
2	ΔΕΗ	Κύνθος	100	1983
3	ΔΕΗ	Αντικύθηρα	27,6	1987
4	ΔΕΗ	Γαύδος	30	1987
5	ΔΕΗ	Αρκοί	37,5	1988
6	ΔΕΗ	24 μικρά νησιά στο Αιγαίο	53	1990-1993
7	ΟΤΕ	Αντικύθηρα	33,4	1987
8	ΕΤΒΑ	Μενετές, Κάρπαθος, άντληση νερού	10	1986
9	Υπηρεσία Φάρων (Π.Ν.)	Διάφοροι φάροι	26,7	1989-1995
10	ΚΑΠΕ	Πικέρμι	4,3	1990
11	Ιερά μονή Σίμωνος Πέτρα	Άγιο Όρος	45	1994

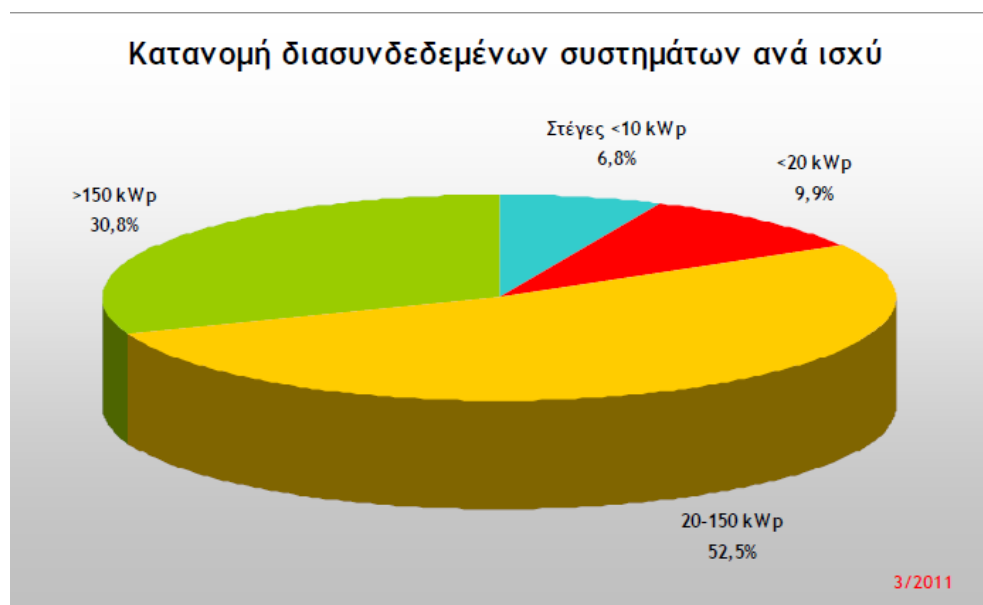
α/α	Ιδιοκτήτης	Νομός - Θέση - Χρήση	Ισχύς αιχμής (kW <sub>p</sub> )	Έτος έναρξης λειτ/γίας
12	Κέντρο γεωργικής έρευνας Κρήτη	Κοινότητα Πρασές (Χανιά), ψυγείο κτηνοτροφικών προϊόντων	8	1995
13	ΤΕΙ Κρήτης	Φωτοβολταϊκό Πάρκο, Ερευνητικό εργαστήριο	7	1992
14	ΤΕΙ Πάτρας	Ερύμανθος Αχαΐας, Ψυγείο κτηνοτροφικών προϊόντων	3	1995
15	INTRACOM	19 συστ. τηλεπικοινωνιών, Άγιο Όρος	12,5	1995
16	-	Νήσος Δονούσα	18	1995
17	ΙΤΕ-Π.Κ.	Αστεροσκοπείο Σκίνακα, Ψηλορείτης Ρέθυμνο	9	2000
18	Ρόκας Αιολική ΑΒΕΕ	Πλακοκερατιά Μιτάτου, Ιτάνου, Λασιθι	171,6	2001
19	Γερμανός ΑΒΕΕ	Μεσοχωριό, Αστερουσίων Ηράκλειο Κρήτης	170	2001
20	Λευκοσιδηρουργεία Κρήτης ΑΒΕΕ - CRETE CUN	ΒΙΠΕ, Ηράκλειο Κρήτης	130	2001
21	Αρτοποιία Κλαπάκη ΟΕ	Πλατάνια Χανίων	60	2001
22	Δρίνιας ΑΕ	ΒΙΠΕ Κιλκίς	200	2002
23	Αγγελάκης Ι.	Καρτερός-Καλιθέα, Ηράκλειο Κρήτης	140	2002
24	Κάμιнос ΑΕ	Λιθάρια Ν. Ιωνίας Αττικής	160	2003
25	ΕΜΠ (Κτήριο Χημ. Μηχαν.)	Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου	50	2002
26	Δήμος Ταύρου	Ταύρος	11,9	2002
27	Χαρμή ΑΕ hotel	Πάρος	10	2002
28	ΗΛΠΡΑ	Θεσσαλονίκη	6,5	2002
29	Μη καταγραμμένα ΦΒ συστήματα (εκτίμηση)	Μικρά ΦΒ συστήματα σε κατοικίες, αγροικίες, καταστήματα, αντλιακά συστήματα, γήπεδα, δρόμους, εκπαιδευτικά ιδρύματα, κα.	~200	

Σχήμα 2.8 Αρχικές εγκαταστάσεις ΦΒ Συστημάτων στην Ελλάδα.

Μέχρι τέλους του 2009, είχαν υποβληθεί για έγκριση στη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), περισσότερες από 7900 αιτήσεις εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών, συνολικής ισχύος ~3700 MW<sub>p</sub>. Έχουν εγκριθεί αδειοδοτήσεις, συνολικά

για ~200 MW<sub>p</sub> και έχουν εγκατασταθεί 55 MW<sub>p</sub>.

Μέχρι και τον Μάρτιο του 2011 στην Ελλάδα, η συνολική εγκαταστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων διασυνδεδεμένων στο δίκτυο ανερχόταν σε 274,2 MW<sub>p</sub>, εκ των οποίων όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα ποσοστό 6,8% αντιστοιχεί σε διασυνδεδεμένα συστήματα μέχρι 10 kW<sub>p</sub> (στέγες), το 9,9% σε διασυνδεδεμένα συστήματα από 10 έως 20 kW<sub>p</sub>, ποσοστό 52,5% σε συστήματα από 20 έως 150 kW<sub>p</sub>, και τέλος ποσοστό 30,8% αφορά διασυνδεδεμένα συστήματα ισχύς μεγαλύτερης των 150 kW<sub>p</sub>.

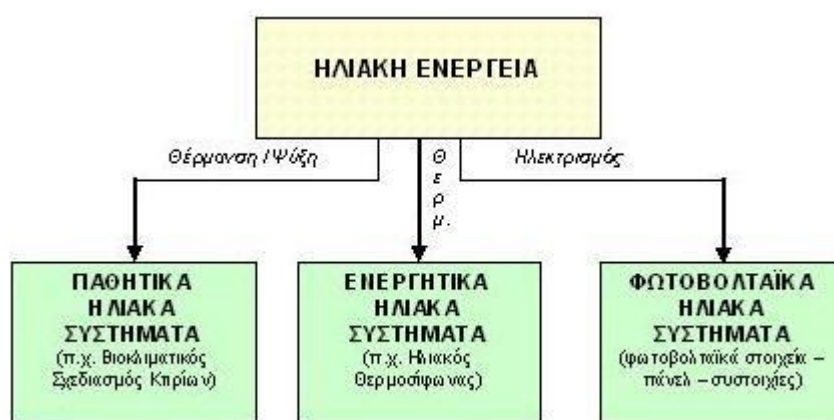


(Πηγές: ΔΕΣΜΗΕ, ΔΕΗ)

## 2.4 Ηλιακή Ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι η φωτεινή ενέργεια (φως), η θερμική ενέργεια (θερμότητα) καθώς και η ενέργεια ακτινοβολίας. Η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται στο σύμπαν, κυρίως με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλλά και με σωματιδιακή μορφή. Στο σύνολο της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο και πρόκειται για Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας. Ο Ήλιος είναι εξαιρετικά ισχυρή ενεργειακή πηγή, και το ηλιακό φως με μεγάλη διαφορά η πλουσιότερη πηγή ενέργειας που προσλαμβάνεται από τη Γη, αλλά η ένταση της στην επιφάνεια της Γης είναι στην πραγματικότητα πολύ χαμηλή. Αυτό οφείλεται κυρίως στην τεράστια αξονική διασπορά ακτινοβολίας από τον μακρινό Ήλιο. Μία σχετικώς ελάχιστων πρόσθετη απώλεια οφείλεται στην ατμόσφαιρα της Γης και στα σύννεφα, τα οποία απορροφούν ή σκεδάζουν μέχρι και 54% του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός. Παρ' όλα αυτά η συνολική ποσότητα της προσπίπτουσας στη Γη ηλιακής ενέργειας

υπερβαίνει κατά πολύ τις τρέχουσες και προβλεπόμενες παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες. Οι προοπτικές για την ηλιακή ενέργεια είναι τεράστιες, καθώς η καθημερινή πρόσληψη ηλιακής ενέργειας από την Γη είναι περίπου 200.000 φορές μεγαλύτερη από το παγκόσμιο ημερήσιο δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής. Αν τιθασευτεί κατάλληλως, αυτή η εξαιρετικά διάχυτη πηγή διαθέτει το δυναμικό κάλυψης όλων των μελλοντικών ενεργειακών αναγκών. Κατά τον 21ο αιώνα η ηλιακή ενέργεια αναμένεται να καταστεί όλο και περισσότερο ελκυστική ως ενεργειακή πηγή λόγω της ανεξάντλητης παροχής της και του μη ρυπαντικού της χαρακτήρα, σε έντονη αντίθεση προς τα πεπερασμένα ορυκτά καύσιμα άνθρακα, πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Την ηλιακή ενέργεια την εκμεταλλευόμαστε όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, μέσω **παθητικών** ηλιακών συστημάτων, **ενεργητικών** ηλιακών συστημάτων και **φωτοβολταϊκών** ηλιακών συστημάτων.

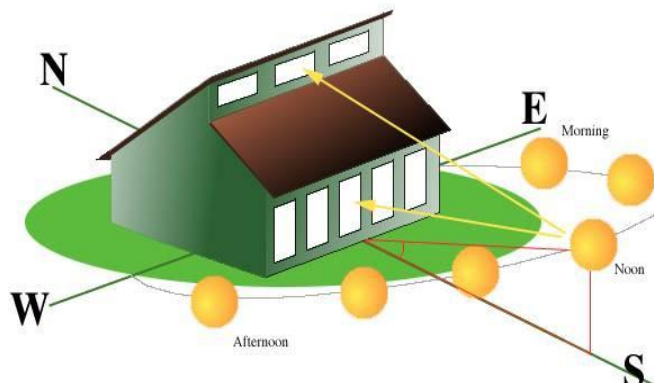


## 2.5 Παθητικά ηλιακά συστήματα

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από δομικά στοιχεία του κτηρίου. Αφορά την παθητική εκμετάλλευση των θερμοσυσσωρευτικών ιδιοτήτων των κοινών αρχιτεκτονικών στοιχείων της οικοδομής (κουφωμάτων, στεγών τοίχων, δαπέδων). Αναγκαία προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία των παθητικών ηλιακών συστημάτων ώστε να αξιοποιήσουν όσο το δυνατό περισσότερο την ηλιακή ενέργεια, είναι ένας κατάλληλος σχεδιασμός του κτηρίου. Αυτό σημαίνει ότι το κέλυφος πρέπει να επιτυγχάνει τη μέγιστη **ηλιακή συλλογή**, τη μέγιστη **θερμοχωρητικότητα**, τις ελάχιστες **θερμικές απώλειες**. Η λειτουργία των παθητικών συστημάτων βασίζεται σε 3 μηχανισμούς, (α) στη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και διατήρησης της στο εσωτερικό του κτηρίου για την θέρμανση των χώρων (φαινόμενο του θερμοκηπίου), (β) στη θερμική υστέρηση των υλικών (θερμοχωρητικότητα), (γ) στην ιδιότητα της θερμότητας να μεταφέρεται από το θερμό στο κρύο αντικείμενο (αρχές μετάδοσης της θερμότητας).

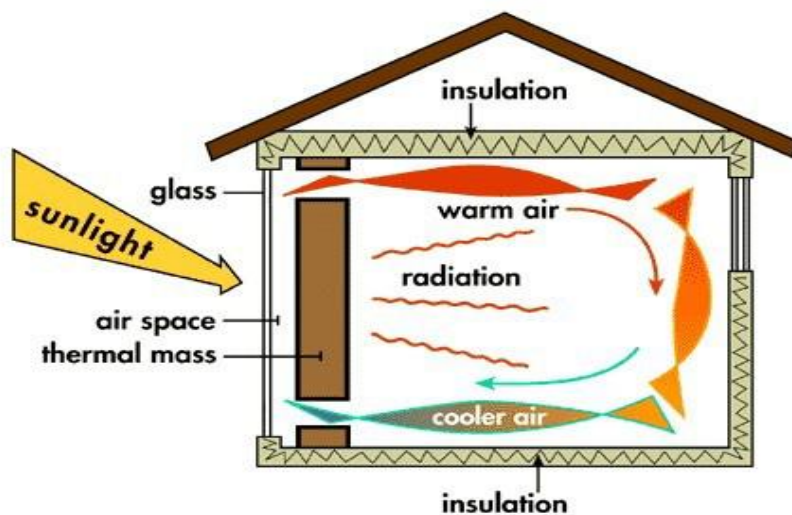
Έχουμε είδη παθητικών συστημάτων για θέρμανση Άμεσου κέρδους, Έμμεσου κέρδους και Απομονωμένου κέρδους.

Θέρμανση μέσω συστημάτων άμεσου κέρδους, έχουμε με την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας για θέρμανση του κτιρίου μέσω των νότια προσανατολισμένων ανοιγμάτων. Η αποτελεσματικότητα ενός τέτοιου συστήματος επηρεάζεται από τον προσανατολισμό, την θέση και το μέγεθος των ανοιγμάτων.



Σχήμα 2.9 Νότιος προσανατολισμός ανοιγμάτων.

Τα συστήματα έμμεσου κέρδους, αξιοποιούν έμμεσα τα ηλιακά οφέλη για θέρμανση του κτηρίου. Αυτά τα συστήματα απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κέλυφος και ύστερα επιτρέπουν στη θερμότητα να διεισδύσει στους χώρους διαβίωσης. Ο θερμικός τοίχος (Trombe, ή τοίχος νερού), το δάμα θερμικής αποθήκευσης, είναι οι κυριότερες εφαρμογές των μηχανισμών έμμεσου κέρδους.



Σχήμα 2.10 Μηχανισμοί έμμεσου κέρδους

Στα συστήματα απομονωμένου κέρδους, η επιφάνεια ηλιοσυλλογής δεν βρίσκεται σε επαφή με τον χώρο που επιθυμούμε να θερμάνουμε. Μεταξύ αυτής της επιφάνειας και το χώρο διαβίωσης υπάρχει ένας μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας όπως για παράδειγμα ένας ανεμιστήρας. Στα πραγματικά παθητικά ηλιακά συστήματα η μετάδοση της θερμότητας γίνεται με μη μηχανικά μέσα και βασίζεται κυρίως στην άνωση, μεταγωγή και ακτινοβολία της θερμότητας. Παράδειγμα απομονωμένου κέρδους είναι το θερμοσιφωνικό πάνελο.



## 2.6 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα

Ενεργητικά ηλιακά συστήματα ονομάζονται τα συστήματα που συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και στη συνέχεια την μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας, σε νερό, αέρα, ή σε κάποιο άλλο ρευστό. Η τεχνολογία που εφαρμόζεται είναι αρκετά απλή και υπάρχουν πολλές δυνατότητες εφαρμογής της σε θερμικές χρήσεις χαμηλών θερμοκρασιών.

Το ηλιακό φως που φτάνει στο έδαφος αποτελείται από σχεδόν 50% ορατό φως, 45% υπέρυθη ακτινοβολία και μικρότερες ποσότητες υπεριώδους και άλλων μορφών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αυτή η ακτινοβολία μπορεί να μετατραπεί είτε σε θερμική ενέργεια είτε σε ηλεκτρική. Δύο είναι οι τύποι συσκευών που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας και τη μετατροπή της σε θερμική ενέργεια: επίπεδοι συλλέκτες και συγκεντρωτικοί συλλέκτες.

Οι πιο διαδεδομένοι επίπεδοι συλλέκτες αποτελούνται από αμαυρωμένο μεταλλικό έλασμα, καλυμμένο με ένα ή δύο φύλλα γυαλιού, το οποίο θερμαίνεται από την πρόσπτωση του ηλιακού φωτός. Αυτή η θερμότητα μεταφέρεται σε αέρα ή νερό, αποκαλούμενα θερμιδοφόρα ρευστά, που ρέουν πίσω από το αμαυρωμένο έλασμα. Η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιείται απ' ευθείας ή να μεταφέρεται σε άλλο μέσο προς αποθήκευση. Οι επίπεδοι συλλέκτες θερμαίνουν τυπικά τα θερμιδοφόρα ρευστά σε θερμοκρασίες μεταξύ 66 και 93 °C. Ο βαθμός απόδοσης αυτών των συλλεκτών (δηλαδή, το ποσοστό της προσλαμβανόμενης ενέργειας που μπορούν να μετατρέψουν σε ωφέλιμη ενέργεια) κυμαίνεται μεταξύ 20 και 80%, αναλόγως της διαμόρφωσης του συλλέκτη.

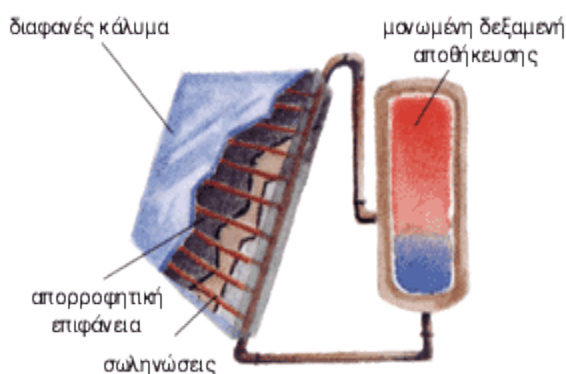
Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από δύο βασικά μέρη. Το πρώτο είναι το τμήμα συλλογής με τους ηλιακούς συλλέκτες και την επιφάνεια απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ το δεύτερο είναι το τμήμα αποθήκευσης με τη δεξαμενή αποθήκευσης νερού, που συνήθως διαθέτει και ηλεκτρική αντίσταση με θερμοστάτη ώστε να μπορεί να παράγει ζεστό νερό ακόμη και σε περιόδους μικρής ή μηδενικής ηλιοφάνειας. Διαχωρισμός υπάρχει, επίσης, με βάση το κύκλωμα κυκλοφορίας του θερμαινόμενου μέσου, και έτσι έχουμε αφενός τα ανοιχτού κύκλωματος στα οποία γίνεται απ' ευθείας η θέρμανση του νερού χρήσης, καθώς το θερμαινόμενο μέσο είναι το ίδιο το νερό που θα χρησιμοποιήσουμε, και αφετέρου τα κλειστού κύκλωματος, όπου η θέρμανση του νερού χρήσης είναι έμμεση, με το θερμαινόμενο μέσο να κυκλοφορεί σε ξεχωριστό κύκλωμα, το οποίο θερμαίνει το νερό που θα χρησιμοποιήσουμε μέσω εναλλάκτη θερμότητας, χωρίς να γίνεται ανάμιξη τους. Για να πετύχουμε μεγαλύτερη απόδοση της απορρόφησης υπάρχουν δύο βασικές παράμετροι τις οποίες μπορούμε να ρυθμίσουμε:

Πρώτη είναι, λοιπόν, να επιλέξουμε τον προσανατολισμό του συλλέκτη, με βέλτιστο προσανατολισμό το νότιο ( $\gamma=0^\circ$ ) για το βόρειο ημισφαίριο και το βόρειο ( $\gamma=180^\circ$ ) για το νότιο ημισφαίριο, δηλαδή πάντοτε ο συλλέκτης πρέπει να είναι στραμμένος προς τον ισημερινό. Να σημειώσουμε εδώ ότι αποκλίσεις μέχρι και  $20^\circ$

προκαλούν μικρές μειώσεις της προσπίπτουσας ενέργειας. Μια επόμενη παράμετρος είναι η κλίση που θα πρέπει να έχει ο συλλέκτης σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο (γωνία κλίσης  $\beta$ ), δηλαδή:

- Για μέγιστη ετήσια ενέργεια απαιτείται κλίση συλλέκτη ίση με το γεωγραφικό πλάτος, ( $\beta=\varphi$ ).
- Για μέγιστη ενέργεια θέρους απαιτείται κλίση συλλέκτη κατά  $15^\circ$  μικρότερη του γεωγραφικού πλάτους, ( $\beta=\varphi-15^\circ$ ).
- Για μέγιστη ενέργεια χειμónος απαιτείται κλίση συλλέκτη κατά  $15^\circ$  μεγαλύτερη του γεωγραφικού πλάτους, ( $\beta=\varphi+15^\circ$ ).

Το πιο απλό και διαδεδομένο ηλιακό ενεργητικό σύστημα είναι ο ηλιακός θερμοσίφωνας. Η αρχή λειτουργίας του είναι απλή και βασίζεται στο γεγονός ότι το νερό θερμαίνεται στο συλλέκτη διαστέλλεται και γίνεται ελαφρύτερο από το χαμηλότερης θερμοκρασίας νερό της δεξαμενής. Αυτή η διαφορά πυκνότητας του νερού έχει ως αποτέλεσμα τη φυσική κυκλοφορία του μέσου του συλλέκτη και τη μεταφορά του θερμού νερού στην αποθηκευτική δεξαμενή. Την ίδια στιγμή το κρύο νερό της δεξαμενής ωθείται προς το συλλέκτη. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη φυσική ροή του νερού είναι η τοποθέτηση της δεξαμενής σε σημείο ψηλότερο από τους συλλέκτες.



Σχήμα 2.11 Ηλιακός θερμοσίφωνας.

## 2.7 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί απ' ευθείας σε ηλεκτρισμό μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων όπως αναφερθήκαμε και παραπάνω. Αυτά γενικά αποτελούνται από ένα σύστημα δύο υλικών σε επαφή, το οποίο όταν φωτίζεται εμφανίζει στα άκρα του συνεχή ηλεκτρική τάση. Σήμερα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία των οποίων η βιομηχανική παραγωγή έχει προωθηθεί, είναι αυτά που βασίζονται στη δημιουργία δύο ημιαγωγικών στρωμάτων σε επαφή. Συνήθως, τα δύο στρώματα αποτελούνται από το ίδιο κύριο υλικό, το ένα στρώμα ημιαγωγός τύπου  $n$  και το άλλο

τύπου p. Εξωτερικά τοποθετούνται κατάλληλα ηλεκτρόδια. Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από ένα μοναδικό φωτοβολταϊκό κύτταρο ανέρχεται τυπικά σε μόλις περίπου 2,5 W. Η δε συνεχής ηλεκτρική τάση ανοιχτού κυκλώματος, βρίσκεται στην περιοχή 0,5-0,6 Volts, ενώ το αντίστοιχο ηλεκτρικό ρεύμα στην περιοχή των 10-40 mA/cm<sup>2</sup>, για πυκνότητα ισχύος ηλιακού φωτός 1 kW/m<sup>2</sup>. Ωστόσο, διά της συνένωσης μεγάλου αριθμού ΦΒ κυττάρων (μεταξύ τους ηλεκτρική σύνδεση σε σειρά) μπορούν να παράγονται εκατοντάδες βαττ, και διά της συνένωσης των ΦΒ πλαισίων μπορούν να παράγονται χιλιάδες κιλοβάτ ηλεκτρικής ισχύος. Με τα ΦΒ στοιχεία θα ασχοληθούμε εκτενέστερα σε παρακάτω κεφάλαια.



# Κεφάλαιο 3

---

*Ηλιακή Ακτινοβολία*

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

### 3.1 Ηλιακή ακτινοβολία και η Ένταση της

Η ηλιακή ακτινοβολία, (solar radiation), είναι ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκπεμπόμενη από τον ήλιο, στην οποία συμπεριλαμβάνονται ακτίνες X, υπεριώδης, ορατή και υπέρυθρη φωτεινή ακτινοβολία καθώς επίσης και εκπομπές ραδιοκυμάτων. Από την ενέργεια των  $3,8 \cdot 10^{33}$  εργίων, τα οποία εκπέμπονται ανά δευτερόλεπτο από τον Ήλιο, οι γειτονικοί του πλανήτες και δορυφόροι τους δέχονται μόνο ένα εξαιρετικά μικρό μέρος. Το μικρό τμήμα αυτής της ενέργειας που αναλογεί στην γη, (1 κιλοβάτ περίπου ανά τετραγωνικό μέτρο) είναι καθοριστικής σημασίας για τη διατήρηση των πάσης φύσεως διεργασιών στην επιφάνεια του πλανήτη μας.

Η τροχιά της γης, κατά την κίνηση της γύρω απ' τον ήλιο, είναι έλλειψη, με τον ήλιο στη μία των εστιών της, με μήκος μεγάλου ημιάξονα,  $a=149,6 \cdot 10^6$  km και εκκεντρότητα,  $e \sim 0,01673$ . Η απόσταση Γης-Ήλιου μεταβάλλεται περιοδικά, κατά τη διάρκεια του έτους, μεταξύ της μέγιστης τιμής της ( $\sim 4$  Ιουλίου), που ονομάζεται αφήλιο ( $\sim 152,1 \cdot 10^6$  km) και ελαχίστης ( $\sim 3$  Ιανουαρίου), που ονομάζεται περίλιο ( $147,1 \cdot 10^6$  km). Το μήκος του μεγάλου ημιάξονα,  $a$ , προσεγγιστικά  $150.000.000$  km, λαμβάνεται ως μονάδα μήκους σε διαστημικές αποστάσεις, ονομάζεται Αστρονομική Μονάδα και συμβολίζεται ως 1AU (Astronomical Unit). Για να διανύσει την απόσταση αυτή το φως, με την ταχύτητα των  $\sim 300.000$  km/s, απαιτούνται  $\sim 8,5$  min. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία απομακρύνεται ακτινικά από τον αστέρα προς το διάστημα και άρα η πυκνότητα ισχύος  $E$ , της ακτινοβολίας του, μεταβάλλεται αντιστρόφως αναλόγως με το τετράγωνο της απόστασης:

$$E = \frac{P}{4\pi d^2}$$

Όπου  $P$  η ολική, σ' όλα τα μήκη κύματος, εκπεμπόμενη απ' όλη την επιφάνεια του, ισχύς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και  $d$  η απόσταση από τον Ήλιο, στην οποία μετράται η ένταση της ακτινοβολίας.

### 3.2 Η δομή του Ήλιου

Ο ήλιος είναι ένα τυπικό αστέρι, με μάζα  $2 \cdot 10^{30}$  kg, ακτίνα  $700.000$  km, ηλικία  $5 \cdot 10^9$  χρόνια και υπολογίζεται ότι έχει μπροστά του άλλα 5 περίπου

δισεκατομμύρια χρόνια ζωής. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η δομή του Ήλιου στην οποία ξεχωρίζουν τα εξής τμήματα:

**Πυρήνας:** Βρίσκεται στο κέντρο και εκτείνεται σε διάμετρο 400.000 km με θερμοκρασίες που φτάνουν τους 15.000.000 K.

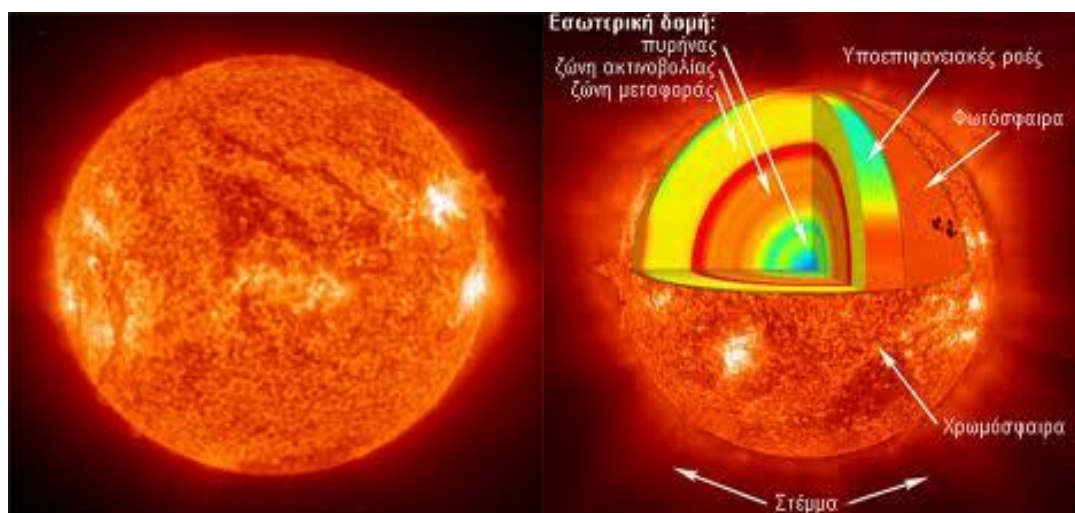
**Ζώνη ακτινοβολίας:** Καταλαμβάνει το 55% της ακτίνας του Ήλιου. Σε αυτή τη ζώνη η ενέργεια από τον πυρήνα μεταφέρεται προς τα έξω από τα φωτόνια.

**Ζώνη μεταφοράς:** Εδώ υπάρχει σχετικά ψυχρό και αραιό αέριο και κυριαρχεί η μεταφορά ενέργειας με συναγωγή.

**Φωτόσφαιρα:** Αποτελεί τον ορατό δίσκο του ηλίου πάχους 500 km.

**Χρωμόσφαιρα:** Είναι διαφανής στο φως γιατί έχει πυκνότητα 1000 φορές μικρότερη από την φωτόσφαιρα.

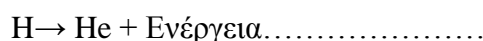
**Στέμμα:** Εκτείνεται προς το μεσοπλανητικό χώρο σχηματίζοντας την ηλιόσφαιρα.



Σχήμα 3.1 Πάνω αριστερά ο ήλιος και πάνω δεξιά η δομή του ήλιου.

Ο ήλιος αποτελείται ως επί το πλείστον από υδρογόνο κατά 70%, ήλιον κατά 28% και το υπόλοιπο 2% από βαρέα στοιχεία. Η επιφανειακή θερμοκρασία του είναι ~5800 K, ενώ η εσωτερική, περίπου, 15.000.000 K. Σε αυτήν την θερμοκρασία και σε πίεση 250 δισεκατομμύρια ατμόσφαιρες στον πυρήνα του ήλιου, ο οποίος έχει διάμετρο 400.000 km, πραγματοποιείται πυρηνική σύντηξη παράγοντας ενέργεια ως εξής. Δύο πυρήνες ελαφρών στοιχείων ευρισκόμενοι σε μια συνεχή κατάσταση διέγερσης συγκρούονται σε μεγάλες ταχύτητες, κάτω από συνθήκες πολύ υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, συγκροτώντας έτσι ένα νέο πυρήνα βαρύτερου στοιχείου.

Από την ένωση αυτή προκύπτει, όμως, ένα έλλειμα μάζας, καθώς η μάζα του νέου ατόμου δεν είναι ακριβώς ίση με το άθροισμα των δύο αρχικών. Το μικροσκοπικό αυτό κομμάτι της μαζικής απώλειας, πολλαπλασιαζόμενο με το τετράγωνο της ταχύτητας του φωτός μας δίνει την ενέργεια που παράγεται από τη σχάση. Έτσι έχουμε την μετατροπή του υδρογόνου σε ήλιο:



Η παραπάνω πυρηνική αντίδραση δικαιολογεί με το έλλειμμα μάζας, την εκλύομενη ενέργεια σύμφωνα με τη γνωστή σχέση  $E=\Delta m \cdot c^2$ , από την ειδική θεωρία της σχετικότητας του Einstein. Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο υδρογόνου, που μετατρέπεται σε He, εκλύεται ενέργεια ίση με  $1,67 \cdot 10^5$  kWh. Η ενέργεια που εκπέμπεται από τον ήλιο χαρακτηρίζεται από ένα μέγιστο σε μήκος κύματος 0,47 μικρών, ενώ η ισχύς της ακτινοβολίας του γύρω στα 8 κιλobάτ, ανά τετραγωνικό εκατοστόμετρο της επιφάνειας του.

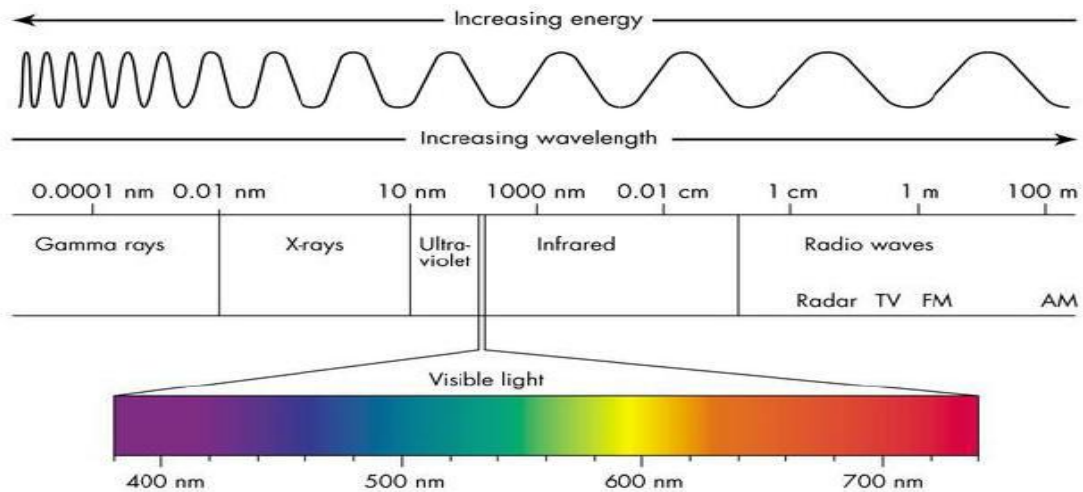
Σχήμα 3.2 Στοιχεία για τον ήλιο

<b>Απόσταση</b>	<b>149.600.000 km</b>
<b>Διάμετρος</b>	1.392.000 km (109,3 φορές η διάμετρος της Γης)
<b>Επιφάνεια</b>	$6,087 \times 10^{12} \text{ km}^2$ (12.000 φορές η επιφάνεια της Γης)
<b>Όγκος</b>	$1,412 \times 10^{18} \text{ km}^3$ (1.306.000 φορές ο όγκος της γης)
<b>Μάζα</b>	$1,99 \times 10^{30} \text{ kg}^3$ (333.400 φορές η μάζα της Γης)
<b>Ταχύτητα διαφυγής από την επιφάνεια του ήλιου</b>	618 km/s
<b>Ενεργός θερμοκρασία</b>	5.740 K
<b>Ολική παραγωγή ενέργειας</b>	$3,86 \times 10^{33} \text{ erg/s}$
<b>Ακτινοβολία απο την επιφάνεια του ήλιου</b>	$6,35 \times 10^{10} \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{s}$
<b>Λαμπρότητα του κέντρου του δίσκου</b>	$8,23 \times 10^5 \text{ lambert}$
<b>Ροή φώτος (μέσος φωτισμός από τον ήλιο στο ζενίθ)</b>	141.400 lux-στη μέση απόσταση της γης 103.000 lux-έξω από την ατμόσφαιρα της
<b>Πυκνότητα</b>	$150 \text{ g/cm}^3$
<b>Θερμοκρασία</b>	15.000.000 K*
<b>Πίεση</b>	$4 \times 10^{17} \text{ dyn/cm}^2$ ( $4 \times 10^{11} \text{ atm}$ )

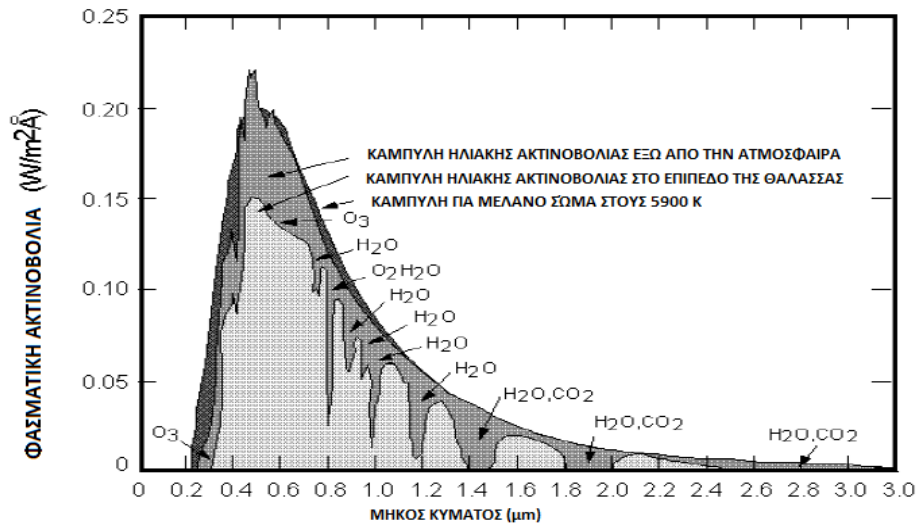
\*Διαφορετικοί υπολογισμοί δίνουν αποτελέσματα από 13.000.000 K έως 25.000.000 K

### 3.3 Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας

Το φάσμα του ηλιακού φωτός, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, εκτείνεται πρακτικά, στα όρια της ατμόσφαιρας της Γης, από 0,1  $\mu\text{m}$  (ακτίνες X) μέχρι 100 m (μακρά ραδιοκύματα).



Το φάσμα αυτό, έξω από την ατμόσφαιρα της γης, προσεγγίζεται με το φάσμα μέλανος σώματος θερμοκρασίας  $T_H \sim 5900 \text{ K}$ , με μέγιστο στο μήκος κύματος  $\lambda_{\text{μεγ}} \sim 480 \text{ nm}$ . Στο αριστερό μέρος των φασμάτων (στα όρια της ατμόσφαιρας της γης, αλλά και στο επίπεδο της θάλασσας) διακρίνονται γραμμές απορρόφησης, που οφείλονται σε χαμηλής θερμοκρασίας αέρια στοιχεία (Fe, Mg, Ca), της χρωμόσφαιρας του ήλιου. Οι απορροφήσεις στο δεξιό τμήμα των φασμάτων προέρχονται από τα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας της γης (υδρατμοί,  $\text{CO}_2$ , οξείδια του αζώτου κ.α.). Το όζον ελαττώνει ισχυρά την πυκνότητα ισχύος της διερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή 0,3-0.4  $\mu\text{m}$ .



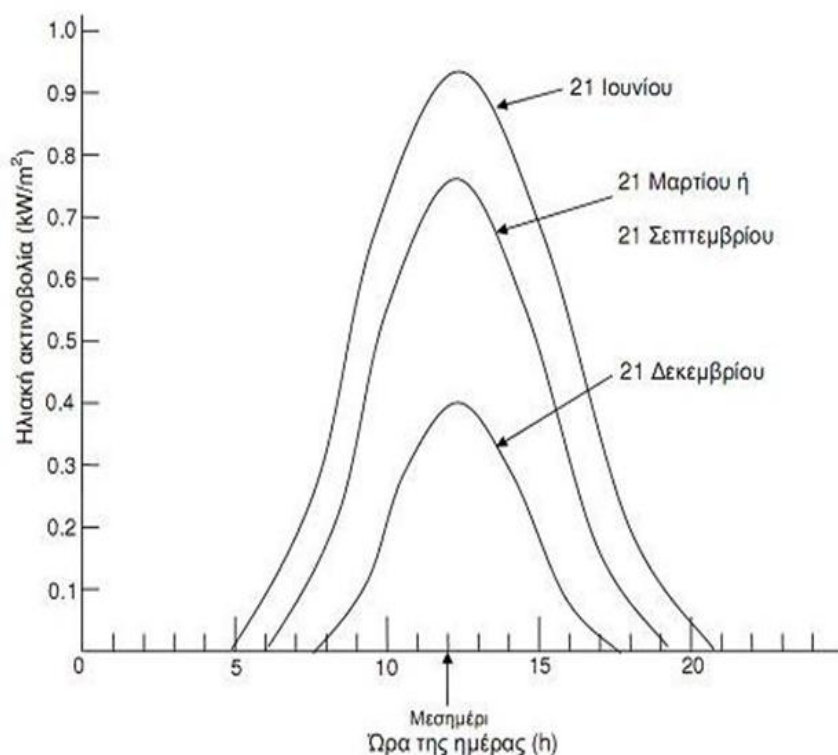
**Σχήμα 3.3** Φάσμα μέλανος σώματος θερμοκρασίας  $T=5900 \text{ K}$ , φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα, φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο της θάλασσας.

Το τμήμα του, που αφορά την ανάπτυξη της ζωής και τις πρακτικές εφαρμογές στη Γη, περιορίζεται στο διάστημα 0,3- 5  $\mu\text{m}$ , μικρό μέρος του οποίου αποτελεί η περιοχή του ορατου φάσματος (0,38- 0,75  $\mu\text{m}$ ). Η απορρόφηση σ' αυτή τη φασματική περιοχή, είναι μειωμένη, επιτρέποντας τη διόδο προς τη γη, στο μέρος εκείνο του ηλιακού φάσματος γύρω από το μέγιστο, που είναι πολύ σημαντικό για τη ζωή στον πλανήτη.



### 3.4 Διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας

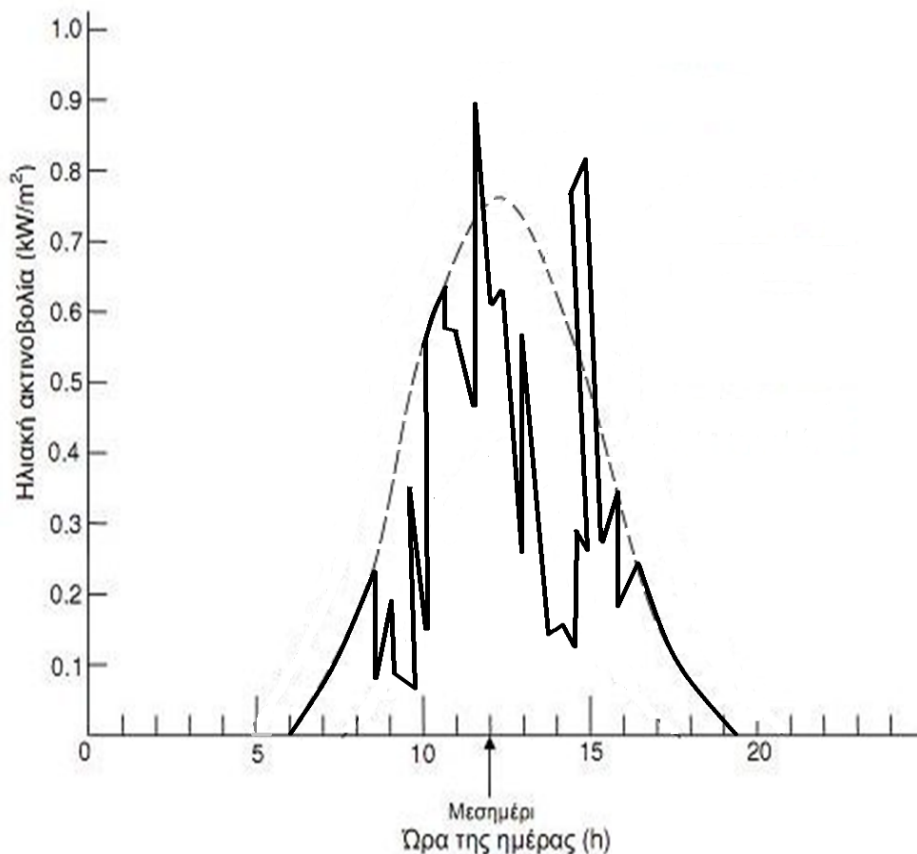
Η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Στο σχήμα 3.4 δείχνονται παραδείγματα της ομαλής μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας για 3 ενδεικτικές ημερομηνίες (καλοκαίρι, άνοιξη και φθινόπωρο-χειμώνα) σε συνθήκες ιδανικά καθαρού ουρανού.



**Σχήμα 3.4** Παράδειγμα της διακύμανσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια στη διάρκεια των φωτεινών ωρών τριών χαρακτηριστικών ημερομηνιών, με εντελώς καθαρό ουρανό. Οι ώρες είναι σε ηλιακές τιμές.

Χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η τιμή της μέγιστης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (ένταση αιχμής), που μετράται στο ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος του ορίζοντα, το οποίο δεν είναι αναγκαστικό να συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι. π.χ. στην Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολόι δείχνει 12:25' τον χειμώνα, και 13:25' το καλοκαίρι, όταν ισχύει η θερινή ώρα.

Όταν ο ουρανός έχει σύννεφα, η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης γίνεται ανώμαλη, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 3.5** Παράδειγμα της διακύμανσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια των φωτεινών ωρών μιας ημέρας με μερική νέφωση. Η ασυνεχής καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη διακύμανση με εντελώς καθαρό ουρανό.

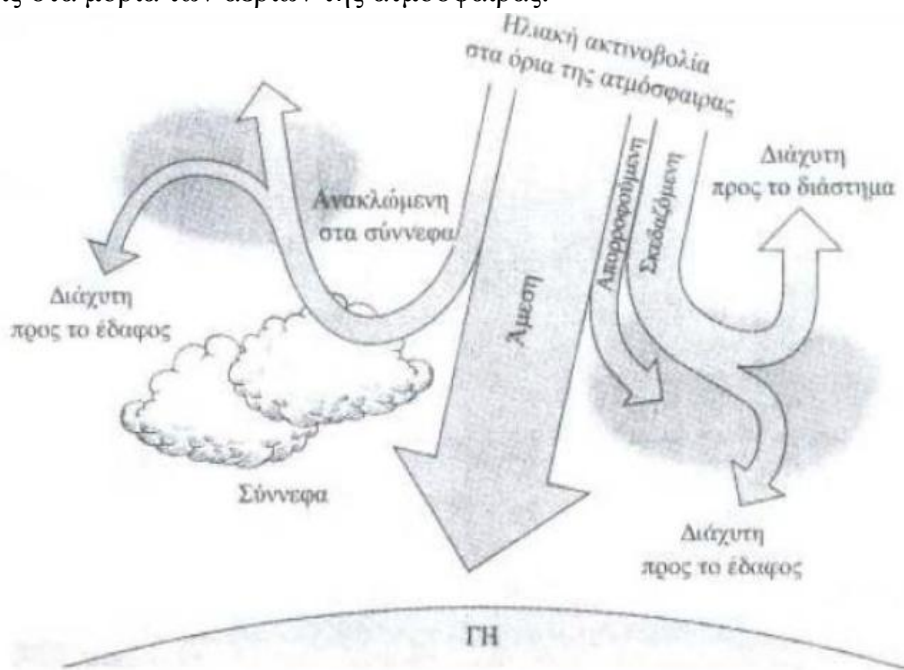
Οι παρατηρούμενες απότομες πτώσεις της έντασης οφείλονται στην παρεμβολή ενός νέφους που μετακινεί ο άνεμος. Επίσης το γρήγορο πέρασμα ενός σμήνους πουλιών ή ενός αεροπλάνου μέσα από τη δέσμη του ηλιακού φωτός που δέχεται ο συλλέκτης, καταγράφεται σαν μια πολύ οξεία στιγμιαία πτώση της έντασης της ακτινοβολίας. Παρατηρούμε, ακόμη εξάρσεις που ξεπερνούν τις κανονικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Προφανώς στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα θα συμβαίνει αθροιστική επίδραση της άμεσης ακτινοβολίας από τον ήλιο, μέσα από ένα άνοιγμα των νεφών, και της ανακλώμενης από τα σύννεφα.

Στη διάρκεια του έτους, στο βόρειο ημισφαίριο, ο αριθμός των φωτεινών ωρών της ημέρας, η μέγιστη ισχύς καθώς και η συνολική ημερήσια ενέργεια που δέχεται μία οριζόντια επιφάνεια, φτάνουν στις μέγιστες τιμές τους στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο) και πέφτουν στις αντίστοιχες ελάχιστες τιμές τους στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Στις επιφάνειες, όμως, π.χ. που βρίσκονται σε κλίση ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου, η μέγιστη τιμή της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι στα ηλιακά μεσημέρια των ισημεριών (21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου), διότι τότε δέχονται κάθετα τις ακτίνες του ήλιου.

### 3.5 Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

Κατά την εισχώρηση των ηλιακών ακτίνων, στην γήινη ατμόσφαιρα, η ένταση τους ελαττώνεται, καθώς τα φωτόνια σκεδάζονται αφενός στα μόρια της ατμόσφαιρας και στα πολύ μικρής διαμέτρου  $d$ , σωματίδια ( $d \leq \lambda$ , σκέδαση Rayleigh), αφετέρου, στα μεγαλύτερης διαμέτρου αιωρήματα της, δηλαδή, τους υδρατμούς, τη σκόνη και τον καπνό (σκέδαση Mie ή Tyndall). Ένα άλλο μέρος της ακτινοβολίας, απορροφάται από ορισμένα συστατικά της ατμόσφαιρας. Παραδείγματος χάριν, η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται από τα μόρια του όζοντος, στα ανώτερα στρώματα της κύριας μάζας της ατμόσφαιρας, έτσι ώστε η ένταση των ακτίνων αυτών, στην επιφάνεια της γης, να είναι εξαιρετικά μειωμένη και η καρκινογόνος δράση της αρκετά περιορισμένη. Όμοιας απορροφούν οι υδρατμοί το  $\text{CO}_2$ , τα οξείδια του αζώτου κ.α., σε άλλες περιοχές του φάσματος. Τέλος, μέρος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας φτάνει στην επιφάνεια της γης.

Συνεπώς σε κάθε τόπο της επιφάνειας της γης, φτάνουν όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα δύο συνιστώσες του ηλιακού φωτός: Η άμεση ή απευθείας, (Beam) που αφορά τις ακτίνες που φτάνουν απ'ευθείας από τον ήλιο και η διάχυτη (Diffuse), που αφορά τις ακτίνες που φτάνουν στην επιφάνεια αφού υποστούν πολλαπλές σκεδάσεις στα μόρια των αερίων της ατμόσφαιρας.



Σχήμα 3.6 Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

Η διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, προέρχεται από όλο τον ουράνιο θόλο (πάνω από το φυσικό ορίζοντα) και σε πρώτη εκτίμηση, μπορεί να θεωρηθεί ισότροπη. Γενικά λοιπόν η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα συλλέκτη ή ένα αισθητήρα, αποτελείται από την απευθείας, τη διάχυτη και την διάχυτα “ανακλώμενη” από το έδαφος.

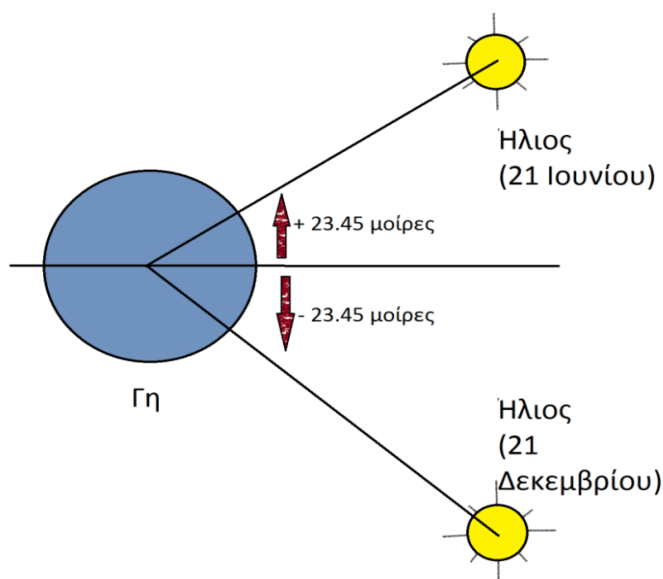
Η διάχυτα ανακλώμενη εξαρτάται από τη μορφολογία και το χρώμα του εδάφους ή της επικάλυψης του (γρασίδι ή χιόνι) και την πυκνότητα των νεφών, ενώ η ολική, απευθείας και διάχυτη, εξαρτώνται, σε γενικές γραμμές από τους εξής παράγοντες:

- α) τη σύσταση- κατάσταση της ατμόσφαιρας, τη δεδομένη χρονική στιγμή (υγρασία και γενικά, τα αιωρήματα της ατμόσφαιρας)
- β) την ημέρα κατά τη διάρκεια του έτους.
- γ) τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στη συλλεκτική επιφάνεια, η οποία μεταβάλλεται καθώς αλλάζει το ύψος του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας.

### 3.6 Ηλιακή γεωμετρία

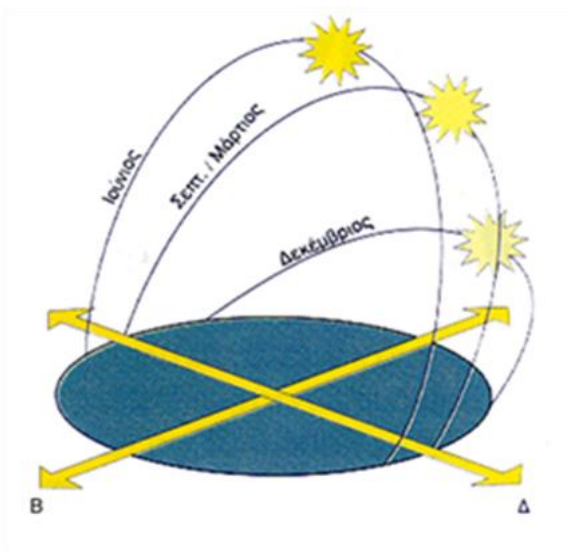
Όπως αναφερθήκαμε παραπάνω, η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας και η φωτονική της σύσταση παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ανάλογα με την ώρα, την εποχή, τις κλιματολογικές συνθήκες και την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία, σε αιωρούμενα σωματίδια και σε άλλα συστατικά. Επίσης, επηρεάζονται σε αξιόλογο βαθμό από άλλους προβλεπόμενους ή απρόβλεπτους παράγοντες, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, το πέρασμα σμήνους πουλιών ή αεροπλάνου κλπ.

Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία. Κατά την διάρκεια μιας χρονιάς, η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές, σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της απόκλισης ( $\delta$ ), δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου, και στο επίπεδο του ισημερινού (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7 Η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το θερινό και το χειμερινό ηλιοστάσιο

Οι τιμές της απόκλισης του ήλιου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο ημισφαίριο. Οι ακραίες της τιμές είναι  $+23.45^\circ$  στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο) και  $-23.45$  στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Άμεση συνέπεια των διαφορετικών τιμών της απόκλισης του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους είναι οι κυκλικές τροχές του διαγράφονται βορειότερα στον ουρανό το καλοκαίρι, με νωρίτερη ανατολή και αργότερη δύση στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ τον χειμώνα συμβαίνει το αντίθετο .



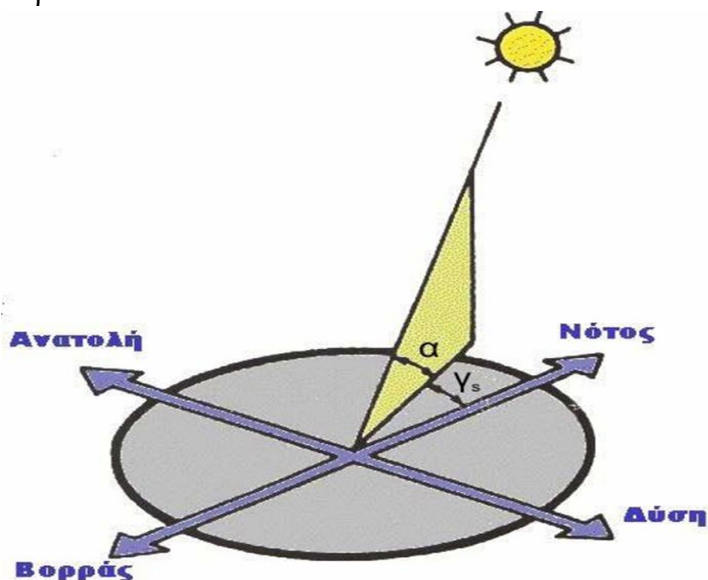
**Σχήμα 3.8** Παράδειγμα των αντίστοιχων τροχιών που διαγράφει ο ήλιος στον ουρανό στη διάρκεια της ημέρας, κατά τα ηλιοστάσια καθώς και τις ισημερίες (21 Ιουνίου, 21 Σεπτεμβρίου και 21 Μαρτίου, 21 Δεκεμβρίου).

Παράλληλα, διαμορφώνονται οι αντίστοιχες μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στις διάφορες εποχές του έτους. Ιδιαίτερα χρήσιμα μεγέθη για τη γενική εκτίμηση της καθημερινής και της εποχιακής διακύμανσης της ακτινοβολίας σε έναν τόπο, είναι η θεωρητική **ηλιοφάνεια**, δηλαδή το χρονικό διάστημα από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου. Ενδεικτικά έχουμε μετεωρολογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά για την Αθήνα. (πίνακας 3.9)

Ημερομηνία	Ύψος του ήλιου το μεσημέρι ( $^\circ$ )	Θεωρητική ηλιοφάνεια (h)	Μέση θερμοκρασία ( $^\circ\text{C}$ )
21 Μαρτίου (εαρινή ισημερία)	51,08	11,9	13
21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο)	75,25	14,8	25
21 Σεπτεμβρίου (Φθινοπωρινή ισημερία)	51,08	11,9	23
21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο)	28,35	9,5	11

**Σχήμα 3.9** Ύψος του ήλιου, θεωρητική ηλιοφάνεια, και μέση θερμοκρασία του αέρα στις φωτεινές ώρες της ημέρας.

Η θέση του ήλιου στον ουρανό ενός τόπου περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες: το ύψος και το αζιμούθιο (Σχήμα 3.10). Το **ύψος** του ήλιου ( $\alpha$ ), είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στον ορίζοντα. Αντί για ύψος, χρησιμοποιείται επίσης συχνά η συμπληρωματική της γωνία, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, αυτή, ονομάζεται **ζενιθιακή απόσταση** (ή **ζενιθιακή γωνία**) του ήλιου. Ζενίθ είναι το σημείο του ουρανού που συναντά η κατακόρυφος ενός τόπου, και ο όρος προέρχεται από την αραβική λέξη *senit* που σημαίνει ευθεία οδός. Η δεύτερη χαρακτηριστική γωνία του ήλιου, είναι το ηλιακό **αζιμούθιο** ( $Y_s$ ), είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Ο όρος προέρχεται από την αραβική έκφραση *as summut*, που σημαίνει κατεύθυνση. Προς τα δεξιά από το νότο το ηλιακό αζιμούθιο παίρνει θετικές τιμές, ενώ προς τα αριστερά, αρνητικές. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το ύψος του ήλιου και το αζιμούθιο μεταβάλλονται συνεχώς, καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό.



**Σχήμα 3.10** Οι γωνίες του ύψους ( $\alpha$ ) και του αζιμούθιου ( $Y_s$ ), που περιγράφουν κάθε στιγμή τη θέση του ήλιου στον ουρανό.

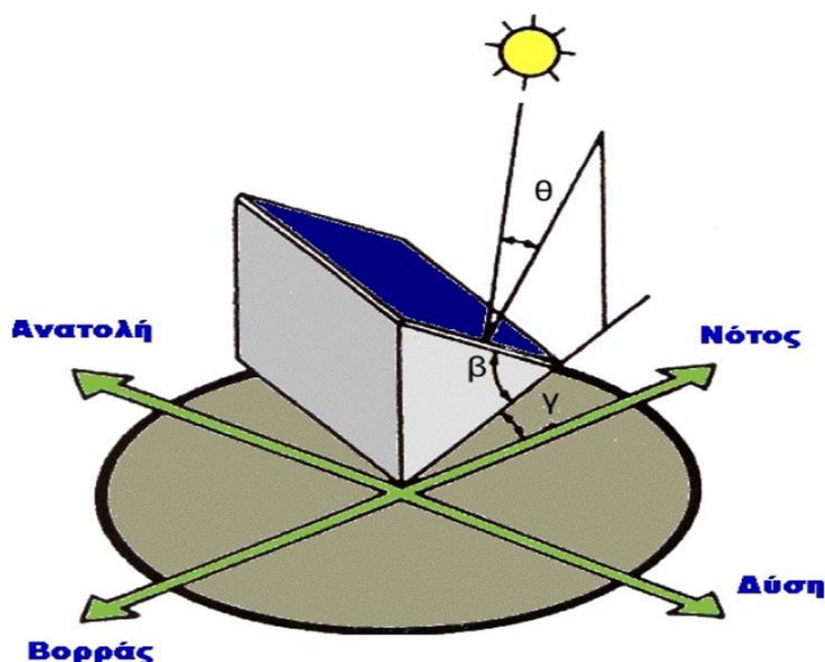
### 3.7 Προσανατολισμός του συλλέκτη

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Βασικά στοιχεία καθορισμού του προσανατολισμού ενός συλλέκτη είναι η κλίση και η αζιμούθια γωνία του, μετρούμενο ως

προς την κατεύθυνση του νότου. Η κατεύθυνση αυτή χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη τιμή της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ημέρας.

Η **κλίση** του συλλέκτη ( $\beta$ ) είναι η διεδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα. Δείχνει πόσο γέρνει ο συλλέκτης και μπορεί να πάρει τιμές από  $0^\circ$  μέχρι  $180^\circ$ . Για γωνίες  $\beta > 90^\circ$  το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω. (Σχήμα 3.11)

Η **αζιμούθια γωνία** του συλλέκτη ( $\gamma$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακορύφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από  $-180^\circ$  μέχρι  $+180^\circ$ . Η γωνία  $-180^\circ$  (που συμπίπτει με τη  $+180^\circ$ ) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς το βορρά, η γωνία  $-90^\circ$  προς την ανατολή, η γωνία  $0^\circ$  προς το νότο και η γωνία  $+90^\circ$  προς τη δύση (Σχήμα 3.11).



**Σχήμα 3.11** Η κλίση ( $\beta$ ) και η αζιμούθια γωνία ( $\gamma$ ) που χαρακτηρίζουν τον προσανατολισμό ενός ηλιακού συλλέκτη στην επιφάνεια της γης.

Προφανώς, η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε έναν επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  είναι  $0^\circ$ . Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Υπάρχουν μηχανικές διατάξεις που επαναπροσανατολίζουν συνεχώς τον συλλέκτη (π.χ. με τη βοήθεια φωτοκυττάρων ή σύγχρονου αυτοματισμού, PLC) ώστε η επιφάνεια του να αντικρύζει συνεχώς κάθετα τις ακτίνες του ήλιου. Οι διατάξεις αυτές είναι πολυσύνθετες και πολύ πιο δαπανηρές από αυτές του σταθερού τύπου καθώς απαιτείται επιπλέον ηλ. κινητήρας για την στρέψη των πλαισίων, επιπλέον σύστημα παρακολούθησης του ήλιου με προγραμματισμό PLC επεξεργαστή, βραχίονες και υδραυλικές μπουκάλες, καθώς και ηλ. πίνακας για την ασφάλεια του όλου συστήματος. Η διάταξη (πάνω σε δύο άξονες) παρακολούθησης του ήλιου μπορεί να

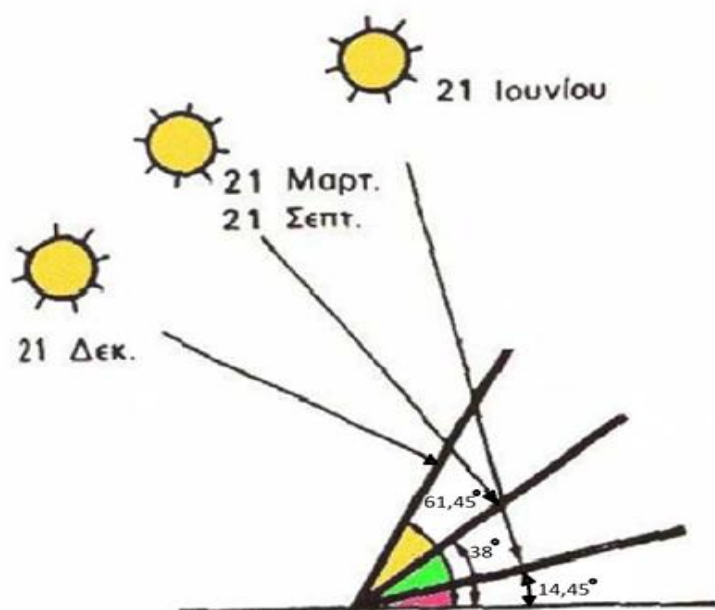
συλλέξει μέχρι και 25% περισσότερη ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός έτους, σε σύγκριση με την εγκατάσταση σταθερής κλίσης. Έχει διαπιστωθεί όμως ότι αν ο προσανατολισμός μπορεί να ρυθμίζεται χειροκίνητα, σε κλίματα με ηλιοφάνεια, τότε μια διάταξη επίπεδης κινούμενης πλάκας σταθερού τύπου που έχει κατάλληλη ρύθμιση ώστε να στρέφεται προς τον ήλιο δύο φορές την ημέρα και να παίρνει κατάλληλη κλίση τέσσερις φορές το χρόνο, μπορεί και συλλαμβάνει το 95% της ενέργειας, που συλλέγετε από ένα σύστημα παρακολούθησης δύο αξόνων.

### 3.8 Βέλτιστη κλίση του συλλέκτη

Στις συνηθισμένες περιπτώσεις οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, κατά τη διάρκεια του έτους. Η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας συνδέεται με τις άλλες γωνίες της ηλιακής γεωμετρίας, που αναφέρθηκαν παραπάνω, με τη σχέση:

$$\text{συν}\theta = \text{συν}\beta_{\alpha} \cdot \eta\mu\beta \cdot \text{συν}(\gamma - \gamma_{\alpha}) + \eta\mu\beta_{\alpha} \cdot \text{συν}\beta$$

Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, είναι ίση με την γεωγραφική παράλληλο του τόπου, και η αζιμούθια γωνία είναι  $0^{\circ}$  (προς το νότο). Αλλά λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή (Σχήμα 3.12).



**Σχήμα 3.12** Η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη στο θερινό (21 Ιουνίου) και το χειμερινό (21 Δεκεμβρίου) ηλιοστάσιο και στην εαρινή (21 μαρτίου) και στη φθινοπωρινή (21 Σεπτεμβρίου) ισημερία,



σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $38^\circ$  όπως η Αθήνα. Τα ύψη του ήλιου που εικονίζονται αφορούν στα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια.

Έτσι, αν επιδιώκεται να παράγει το σύστημα όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου  $10^\circ$  ως  $15^\circ$  μικρότερη από την παράλληλο του τόπου, ενώ για το χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου  $10^\circ$  με  $15^\circ$  μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου.

### 3.9 Προσανατολισμός του συλλέκτη ως προς τον αληθή νότο

Ο προσδιορισμός της αληθούς διεύθυνσης βορρά – νότου μπορεί να γίνει είτε με τη βοήθεια σχετικών οργάνων, όπως είναι η μαγνητική και η γυροσκοπική πυξίδα είτε με το προσδιορισμό της χρονικής στιγμής του ηλιακού μεσημεριού. Η χρησιμοποίηση της πυξίδας προϋποθέτει τη γνώση της μαγνητικής απόκλισης για τον δεδομένο τόπο, με βάση στοιχεία από σχετικούς πίνακες ή χάρτες. Για τον ακριβή προσδιορισμό των γωνιών χρησιμοποιούνται γωνιομετρικά όργανα ακριβείας, όπως ο θεοδόλιχος ή το ταχύμετρο, σε συνδιασμό με την πυξίδα.

Η μέθοδος προσδιορισμού της κατεύθυνσης του αληθούς νότου σ' ένα τόπο, με βάση το ηλιακό μεσημέρι βασίζεται στον προσδιορισμό της διεύθυνσης της σκιάς που δημιουργεί μια κατακόρυφη, λεπτή ράβδος, σε οριζόντιο επίπεδο, τη στιγμή που ο ήλιος βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο της φαινομένης ημερήσιας τροχιάς του. Ο καθορισμός της κατάστασης αυτής απαιτεί γνώση, της αντίστοιχης χρονικής στιγμής, με βάση τον τοπικό χρόνο, όπως τον δείχνει ένα ρολόι (Επίσημος ή Πολιτικός χρόνος). Για να προσδιοριστεί η χρονική στιγμή του ηλιακού μεσημεριού, με βάση τον επίσημο χρόνο απαιτούνται:

- α) η ζώνη πολιτικού χρόνου και το γεωγραφικό μήκος του τόπου.
- β) η χρονική διόρθωση με βάση την εξίσωση του χρόνου, για τη συγκεκριμένη ημέρα του έτους.

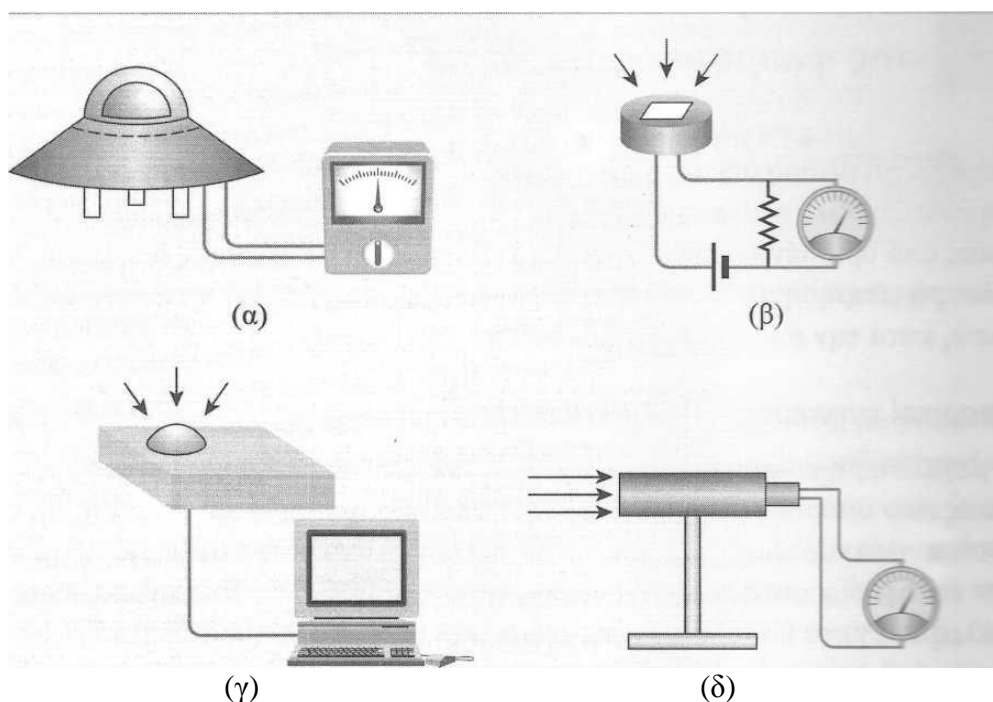
### 3.10 Όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας

Τα όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στους θερμικούς αισθητήρες, των οποίων η ένδειξη οφείλεται στη θέρμανση της φωτιζόμενης (μαύρης) επιφάνειας, μιας πλάκας από ορισμένο υλικό και στους αισθητήρες ηλεκτρονικής διέγερσης, στους οποίους η μέτρηση οφείλεται στις ενεργειακές μεταβάσεις των ηλεκτρονίων του υλικού, κατά την απορρόφηση φωτονίων.

**I. Θερμικοί ανιχνευτές (Thermal detectors):** Για μεγαλύτερη ευαισθησία

των θερμικών αισθητήρων, φροντίζουμε η μάζα της πλάκας που απορροφά την ακτινοβολία να είναι μικρή, ώστε μικρά ποσά απορροφούμενης ενέργειας να προκαλούν μεγάλη μεταβολή στη θερμοκρασία της. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν α) το πυρανόμετρο β) ο πυροηλεκτρικός κρύσταλλος γ) τα βολόμετρα, μεταξύ των οποίων και το thermistor.

- Πυρανόμετρο: Η αρχή λειτουργίας του (Σχήμα 3.13α), βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Η ακτινοβολία που προσπίπτει, στην ενεργό επιφάνεια (μαύρη), απορροφούμενη θαρμαίνει την πλάκα αυτή. Έτσι δημιουργείται διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ της εκτεθειμένης στο φως και μιας άλλης στο εσωτερικό, η οποία παραμένει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



**Σχήμα 3.13** (α) Πυρανόμετρο, (β) Φωτοδίοδος, (γ) Φασματοραδιόμετρο, (δ) Πυροηλεκτρικός κρύσταλλος

- Πυροηλεκτρικός κρύσταλλος: Η αρχή λειτουργίας του (Σχήμα 3.13δ), βασίζεται στην τροποποίηση της διπολικής ηλεκτρικής ροπής διηλεκτρικών υλικών, που ονομάζονται πυροηλεκτρικά (πυροηλεκτρικό φαινόμενο). Η αύξηση της θερμοκρασίας του πυροηλεκτρικού υλικού οδηγεί σε εμφάνιση ηλεκτρισμού, δηλαδή, πόλωσης του υλικού λόγω θέρμανσης του. Χαρακτηρίζεται από σταθερή απόκριση (Ampere/Watt), σε ευρεία περιοχή μηκών κύματος, δηλαδή, απόκριση ανεξάρτητη του μήκους κύματος, λ κι αυτό τον καθιστά ιδανικό για καταγραφή φασμάτων στην περιοχή ευαισθησίας του.
- Βολόμετρα: Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός υλικού, με την θερμοκρασία του, λόγω απορρόφησης της ενέργειας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για αυξημένη απόκριση του αισθητήρα, το υλικό του πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή απορ-

ροφητικότητα της ακτινοβολίας, σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων και μικρή θερμοχωρητικότητα. Κατασκευάζονται από ποικιλία υλικών, τόσο σε στοιχειακή (π.χ. Si, Ge, Bi, Au) όσο και σε σύνθετη μορφή (Bi σε συνδυασμό με ίνες από Nylon, Ge με προσμίξεις και ίνες nylon). Μια πολύ σημαντική κατηγορία βολομέτρων είναι τα μεταλλικά (π.χ. λευκόχρυσου ή πλατίνας Pt).

- **Thermistor:** Είναι ένα βολόμετρο, του οποίου το βασικό υλικό αποτελείται από μεταλλικά οξειδία (οξειδία μαγνησίου, νικελίου κοβαλτίου, χαλκού, σιδήρου και τιτανίου). Η χρήση τους περιορίζεται σε θερμοκρασίες κάτω των 300 °C, επειδή πάνω απ' τη θερμοκρασία αυτή μειώνεται η σταθερότητα της δομής τους. Μπορούν να κατασκευαστούν με διάφορες μορφές (με τη μορφή δίσκου, λεπτής φέτας, ράβδου) και σε μικρό μέγεθος, για καλή απόκριση στις μετρήσεις. Χαρακτηρίζονται από υψηλή διακριτική ικανότητα και δέκα (10) φορές πιο μεγάλη ευαισθησία από τα μεταλλικά βολόμετρα.

**II. Αισθητήρες ηλεκτρονικής διέγερσης (Quantum detectors):** Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται είτε στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή την εκπομπή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια ενός μετάλλου, είτε στη διέγερση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, στην περίπτωση των ημιαγωγών. Στην κατηγορία αισθητήρων που βασίζονται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ανήκουν, οι φωτοδιόδοι κενού ή φωτοκύτταρα και οι φωτοπολλαπλασιαστές, ενώ στην κατηγορία αισθητήρων που βασίζονται στη φωτοαγωγιμότητα του υλικού ανήκουν οι φωτοαγωγοί ή φωτοαντιστάσεις, η φωτοδίοδος ημιαγωγών, η φωτοβολταϊκή κυψελίδα ή φωτοβολταϊκό στοιχείο.

- **Φωτοαγωγοί ή φωτοαντιστάσεις:** Είναι ημιαγωγοί, ενδογενείς ή προσμύξεων, οι οποίοι εμφανίζουν έντονη φωτοαγωγιμότητα. Δηλαδή, η απορρόφηση φωτός στο ημιαγωγικό υλικό διεγείρει ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, αυξάνοντας την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ημιαγωγού.
- **Φωτοδίοδος ημιαγωγών:** Είναι μία δίοδος επαφής ημιαγωγών, (Σχήμα 3.13β) που όταν φωτίζεται στο εσωτερικό της παράγονται επιπλέον ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής, τα οποία διαχωρίζόμενα από το πεδίο επαφής, συμβάλλουν στη δημιουργία αυξημένου ηλεκτρικού ρεύματος. Στο κύκλωμα περιλαμβάνονται η ηλεκτρική πηγή, η δίοδος, και μία αντίσταση.
- **Φωτοβολταϊκή κυψελίδα ή φωτοβολταϊκό στοιχείο:** συγκεκριμένα διαφέρει από την φωτοδίοδο, καθώς η επιφάνεια της διόδου είναι πολύ μικρή. Αντίθετα το ΦΒ στοιχείο χαρακτηρίζεται από όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια και ο λόγος είναι ότι προορίζεται για πηγή ηλεκτρικής ενέργειας κι όχι αισθητήρας.
- **Φασματογράφος:** Διάταξη με την οποία αναλύεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μιας πηγής (ηλεκτρομαγνητικό φάσμα). Η ανάλυση βασίζεται στη χρήση είτε πρίσματος είτε οπτικών φραγμάτων (ανάκλασης ή διέλευσης).
- **Φασματοραδιόμετρο:** Είναι ένα φασματοσκόπιο εφοδιασμένο με μηχανισμούς κίνησης (Σχήμα 3.13γ) ώστε το φάσμα να σαρώνεται σ' όλο το λειτουργικό εύρος μηκών κύματος και να καταγράφεται σε ηλεκτρονική «μνήμη». Ο χρόνος καταγραφής του ηλιακού φάσματος είναι 1-2 min. Στο σημείο εισόδου

του φασματογράφου τοποθετείται μια «σφαίρα ολοκλήρωσης», προκειμένου η προσπίπτουσα ακτινοβολία να καταγράφεται ανεξάρτητα από τη γωνία πρόσπτωσης.

### 3.11 Ηλιακή ακτινοβολία στη χώρα μας

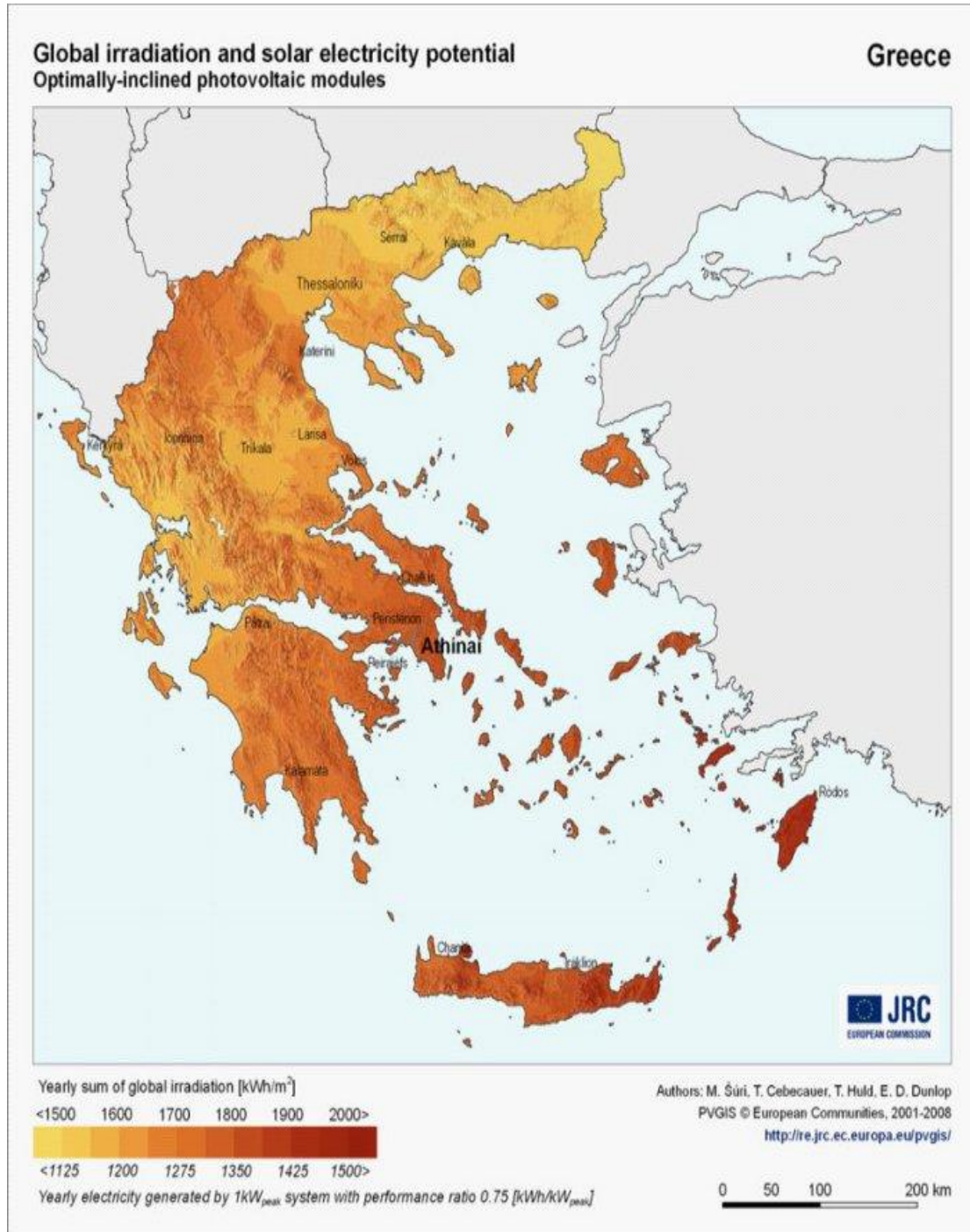
Όπως αναφερθήκαμε και παραπάνω η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί μία ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία στην χώρα μας κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα τόσο κατά την καλοκαιρινή όσο και κατά την χειμερινή περίοδο. Η μέση μηνιαία διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία σε μερικές αντιπροσωπευτικές περιοχές παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Μήνας	Μέση μηνιαία διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία Αθήνα (kWh/m <sup>2</sup> )	Μέση μηνιαία διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία Θεσσαλονίκη (kWh/m <sup>2</sup> )	Μέση μηνιαία διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία Κρήτη (kWh/m <sup>2</sup> )	Μέση μηνιαία διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία Ρόδος (kWh/m <sup>2</sup> )
Ιανουάριος	91,99	85,16	92,59	91,53
Φεβρουάριος	103,74	94,49	107,72	105,99
Μάρτιος	138,94	128,34	146,85	144,58
Απρίλιος	156,97	144,38	171,17	168,03
Μάϊος	179,01	166,69	197,67	194,27
Ιούνιος	176,60	166,03	195,51	192,45
Ιούλιος	184,75	176,44	200,81	198,52
Αύγουστος	184,19	176,86	195,57	193,84
Σεπτέμβριος	166,22	157,38	173,61	171,81
Οκτώβριος	139,06	131,02	141,68	140,32
Νοέμβριος	107,64	95,92	111,38	109,30
Δεκέμβριος	88,51	80,42	89,71	88,40
<b>Μέση ετήσια</b>	<b>143,13</b>	<b>133,59</b>	<b>152,02</b>	<b>149,92</b>

**Σχήμα 3.14** Μέση μηνιαία και μέση ετήσια διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m<sup>2</sup>) σε Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Κρήτη και Ρόδο.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η κατανομή ετησίων τιμών ενεργειακής απολαβής (kWh/m<sup>2</sup>·y) ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια νότια προσανατο-

λισμένου συλλέκτη, σε βέλτιστη γωνία κλίσης και αντίστοιχης ενεργειακής αποδοτικότητας ( $\text{kWh/kW}_p \cdot \text{y}$ ) ΦΒ συστοιχιών, στην Ελλάδα.



*Κι έχουμε στο κατάρτι μας βιγλάτορα παντοτινό τον Ήλιο τον Ηλιάτορα.*

**Οδυσσέας Ελύτης**

# Κεφάλαιο 4

---

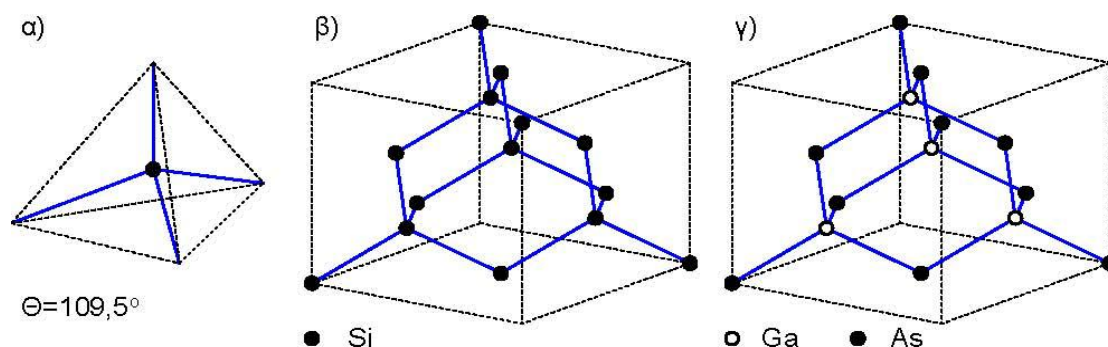
*Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο*

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

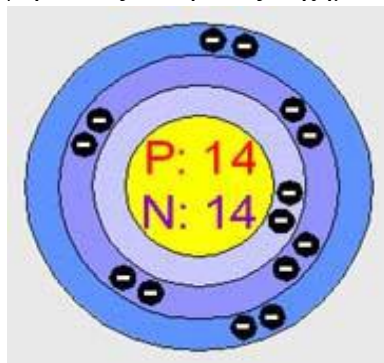
### 4.1 Ημιαγωγοί

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς, που είναι σώματα με ενδιάμεση ηλεκτρική αγωγιμότητα, ανάμεσα στους αγωγούς (δηλαδή στα μέταλλα) και στους μονωτές (π.χ. τα πολυμερή και τα κεραμικά υλικά). Οι κυριότεροι ημιαγωγοί είναι τετρασθενή στοιχεία όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο, ή χημικές ενώσεις όπως το αρσενικούχο γάλλιο και το θειούχο κάδμιο, με τετραεδρική κρυσταλλική δομή, δηλαδή τα γειτονικά άτομα βρίσκονται σε θέσεις του κρυσταλλικού πλέγματος που αντιστοιχούν στο κέντρο και στις κορυφές ενός κανονικού τετραέδρου και κάθε άτομο είναι ενωμένο με χημικούς δεσμούς με τέσσερα γειτονικά άτομα (σχήμα 4.1).



**Σχήμα 4.1** α) Η κρυσταλλική δομή των κυριότερων ημιαγωγών είναι τετραεδρική. β) Στους στοιχειακούς ημιαγωγούς (π.χ. στο πυρίτιο) όλα τα άτομα του πλέγματος είναι ίδια. γ) Στις ημιαγωγίμες χημικές ενώσεις (π.χ. στο αρσενικούχο γάλλιο) τα άτομα που βρίσκονται στις γειτονικές θέσεις είναι διαφορετικά.

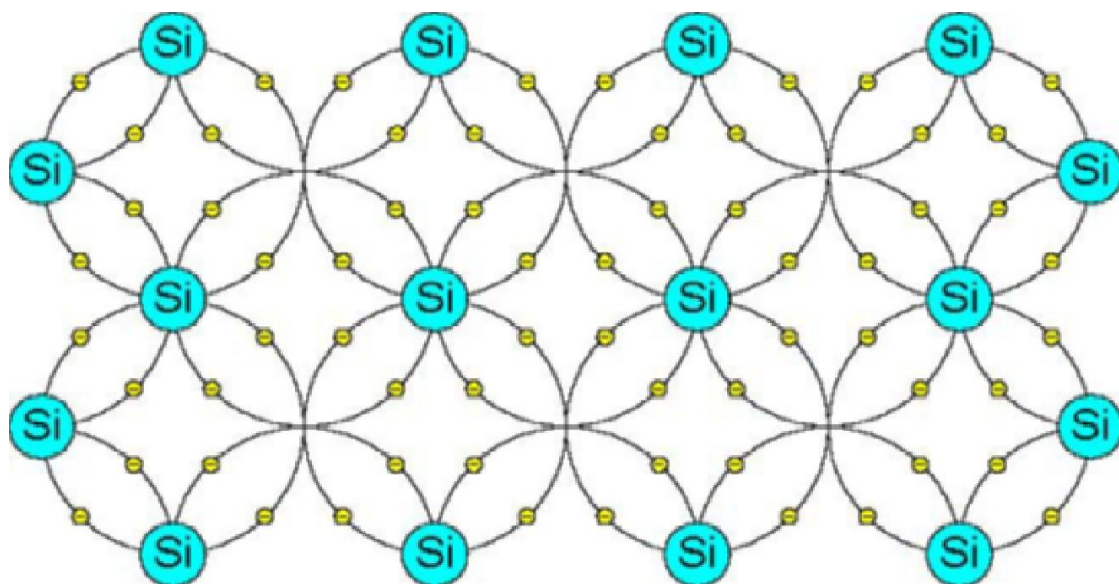
Ο ημιαγωγός με την μεγαλύτερη χρήση όχι μόνο για τα ηλιακά στοιχεία αλλά και για πλήθος ηλεκτρονικών εφαρμογών, είναι το πυρίτιο. Το πυρίτιο έχει κάποιες ιδιαίτερες χημικές ιδιότητες στην κρυσταλλική του δομή. Έχει 14 ηλεκτρόνια κατανεμημένα σε τρεις διαφορετικές στιβάδες (Σχήμα 4.2).



**Σχήμα 4.2** Άτομο πυριτίου.

Οι πρώτες δύο, εσωτερικές στιβάδες του ατόμου, είναι συμπληρωμένες με 2 και 8 ηλεκτρόνια αντίστοιχα, είναι λιγότερο ενεργές και δεν συμμετέχουν σε μηχανισμούς αγωγιμότητας. Η εξωτερική στιβάδα όμως δεν είναι συμπληρωμένη, σε

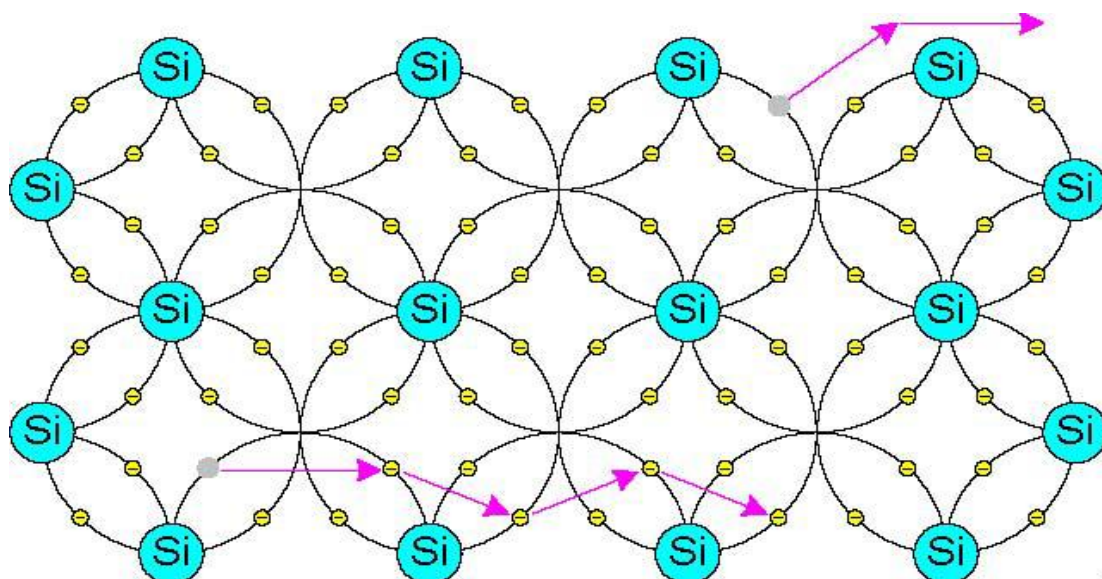
αυτή βρίσκονται τα ηλεκτρόνια σθένους (4 ηλεκτρόνια) του ατόμου που σχηματίζουν τους δεσμούς και τα οποία μπορούν να μετακινηθούν μόνο προς τις οπές γειτονικών δεσμών ή να ανταλλάξουν θέσεις με άλλα ηλεκτρόνια σθένους γειτονικών δεσμών. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, κάθε άτομο πυριτίου είναι ενωμένο με 4 γειτονικά άτομα και ο κάθε χημικός δεσμός αποτελείται από 2 ηλεκτρόνια. Επομένως όλα τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων είναι απασχολημένα στους δεσμούς, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ελεύθεροι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος και το σώμα να μη διαθέτει ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η εικόνα όμως αυτή ισχύει μόνο στην υποθετική περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή είναι εντελώς υποβαθμισμένος ενεργειακά, π.χ. σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, κοντά στο απόλυτο μηδέν, πράγματι οι ημιαγωγοί μετατρέπονται σε μονωτές.



**Σχήμα 4.3** Απλοποιημένη απεικόνιση, σε δύο διαστάσεις, του πλέγματος του πυριτίου, με τα ηλεκτρόνια σθένους εντοπισμένα στους δεσμούς. Στην πραγματικότητα, τα ηλεκτρόνια εναλλάσσουν συνεχώς θέσεις μεταξύ τους, στους γειτονικούς δεσμούς του στερεού.

Όταν όμως οι ημιαγωγοί απορροφήσουν κάποια αξιόλογη ενέργεια, π.χ. με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας, πραγματοποιείται μια ριζική μεταβολή. Έτσι στη συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η θερμική ενέργεια που παρέχεται στο σώμα και κατανέμεται στα άτομα του, προκαλεί την ελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Δηλαδή, καθώς η θερμική ενέργεια ανακατανέμεται συνεχώς από το ένα άτομο στο άλλο, μπορεί να επαρκέσει στιγμιαία σε μερικές τυχαίες θέσεις για να διεγείρει και να ελευθερώσει από ένα ηλεκτρόνιο σθένους σε μερικούς από τους δεσμούς του σώματος. Τα ελευθερωμένα αυτά ηλεκτρόνια απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους, χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν από τη θερμότητα και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα (σχήμα 4.4).





**Σχήμα 4.4** Επίδραση της θερμικής διέγερσης στο πυρίτιο. Πάνω δεξιά: ελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου από ένα δεσμό. Κάτω: από δεξιά προς αριστερά έχουμε την διαδοχική μετατόπιση μιας οπής, σαν αποτέλεσμα μιας σειράς αντίθετων μετακινήσεων ηλεκτρονίων σθένους προς την εκάστοτε κενή θέση σε ένα γειτονικό δεσμό.

Η απομάκρυνση ηλεκτρονίων από μερικούς δεσμούς του σώματος και η αποδυνάμωση, έτσι, ενός σχετικά μικρού πλήθους δεσμών στα σώματα που μελετάμε, δεν συνεπάγεται την απώλεια της συνοχής των ατόμων τους και την κατάρρευση του κρυσταλλικού τους πλέγματος. Όπως είδαμε στο σχήμα 4.4 τα άτομα που συνδέει ένας από τους δεσμούς από τους οποίους ελευθερώθηκαν ηλεκτρόνια, εξακολουθούν να συνδέονται με τα γειτονικά τους άτομα με τρεις άθικτους δεσμούς καθώς και με έναν ατελή δεσμό ενός ηλεκτρονίου (θα μπορούσαμε να πούμε, συνολικά με «τρισήμιση» δεσμούς). Οι δεσμοί αυτοί επαρκούν για τη συγκράτηση των ατόμων στις θέσεις τους. Άλλωστε το πλήθος των ελεύθερων ηλεκτρονίων και επομένως και των διασπασμένων δεσμών των σωμάτων που μελετάμε, είναι ένα μικρό ποσοστό του συνόλου των δεσμών των ατόμων τους, π.χ. για το πυρίτιο στη συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η αναλογία είναι της τάξης του  $1:10^{13}$ !

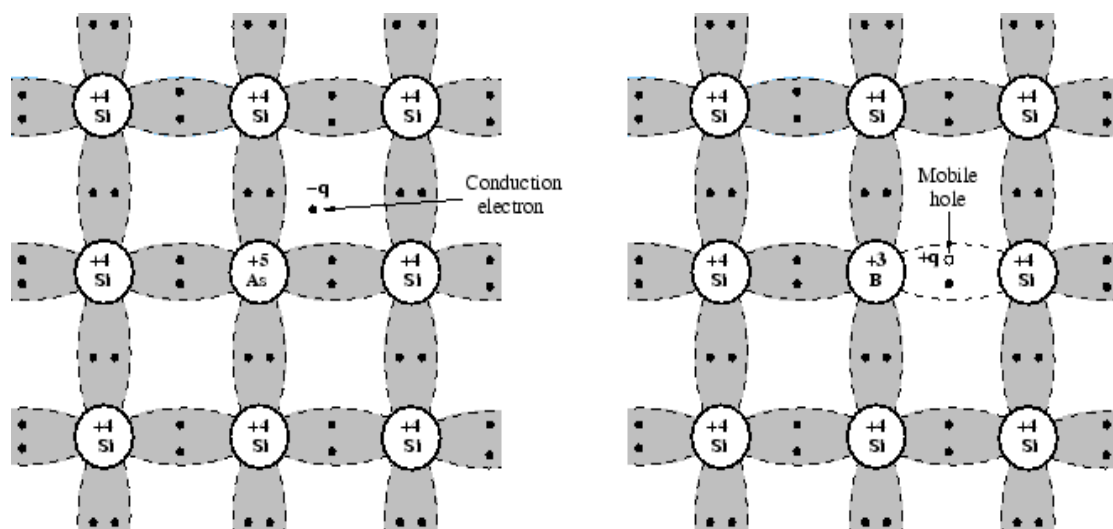
Κατά τη μελέτη ηλεκτρικής συμπεριφοράς των ημιαγωγών και της εμφάνισης του φωτοβολταϊκού φαινομένου σ' αυτούς, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ροή ηλεκτρονίων φορέων, λόγω της **διάχυσης** τους. Διάχυση λοιπόν είναι η διαδικασία διασποράς των μελών (μορίων, ιόντων ή ηλεκτρονίων) ενός συστήματος A, μέσα σ' ένα άλλο σύστημα B, λόγω διάφορων της συγκέντρωσης της ουσίας A, στις δύο θέσεις. Η διάχυση συνεχίζεται μέχρις ότου η συγκέντρωση του σώματος A, ισοκατανεμηθεί μέσα στη μάζα του σώματος B. Η τάση διάχυσης ενός συστατικού μέσα σ' ένα σύνθετο σύστημα, καθορίζεται με το χημικό δυναμικό,  $\mu$ , το οποίο εκφράζει το ποσό της ελεύθερης ενέργειας,  $F$ , που απαιτείται για να μεταβληθούν κατά ένα, τα μέλη του συστατικού αυτού, χωρίς να αλλάξει η θερμοκρασία, ο όγκος και το πλήθος των μελών των υπολοίπων συστατικών του συνολικού συστήματος. Συνήθως, μετρείται σε eV/μέλος του δεδομένου συστατικού.

## 4.2 Ημιαγωγοί πρόσμειξης

Μεταξύ των ημιαγωγών, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι λεγόμενοι ημιαγωγοί πρόσμειξης (Extrinsic semiconductors), που μέσα στο κρυσταλλικό τους πλέγμα περιέχουν διασπαρμένα άτομα από επιλεγμένο διαφορετικό υλικό. Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων ημιαγωγών: **τύπου n** και **τύπου p**.

**Ο ημιαγωγός τύπου n**, προκύπτει από τον αντίστοιχο ενδογενή ημιαγωγό, αν αντικατασταθούν μερικά από τα άτομα του, με άτομα άλλου υλικού, με μεγαλύτερο σθένος. Παραδείγματος χάριν, αν μερικά άτομα του κρυσταλλικού πυριτίου Si, τα οποία χαρακτηρίζονται από σθένος 4, αντικατασταθούν, με άτομα αρσενικού As, με σθένος 5 (σχήμα 4.5), τότε δημιουργείται ο ημιαγωγός τύπου n του πυριτίου. Η αντικατάσταση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα να μένει ένα ηλεκτρόνιο ανά άτομο πρόσμειξης, μη συμμετέχον σε δεσμό και το οποίο στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, εγκαταλείπει το άτομο As και γίνεται ελεύθερο. Έτσι ο ημιαγωγός τύπου n, περιέχει περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια σε σχέση με τον ενδογενή (ενδογενής: καθαρός ημιαγωγός που η αγωγιμότητα του δεν οφείλεται σε ξένους παράγοντες αλλά προέρχεται από την ενδογενή διέγερση ηλεκτρονίων σθένους προς την ζώνη αγωγιμότητας). Τα άτομα της 5σθενούς πρόσμειξης ονομάζονται δότες.

Οι ηλεκτρονικές στάθμες των ατόμων των δοτών βρίσκονται λίγο κάτω από τον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας, κατά το ποσό των  $\sim 50$  meV, αφού με αυτό το ποσό ενέργειας, τα ηλεκτρόνια των σταθμών αυτών γίνονται «ελεύθερα» στο εσωτερικό του υλικού. Παριστάνονται με μικρές διακριτές γραμμές, για να τονιστεί ότι πρόκειται για μεμονομένα άτομα μέσα στο σύνολο των ατόμων του κυρίως υλικού, σ' όλη την έκταση του ημιαγωγού αυτού.



*Σχήμα. 4.5 Πάνω αριστερά βλέπουμε ένα άτομο πυριτίου Si να έχει αντικατασταθεί από άτομο αρσενικού As, δημιουργείται έτσι ο ημιαγωγός τύπου n του πυριτίου. Πάνω δεξιά βλέπουμε ένα άτομο πυριτίου Si να έχει αντικατασταθεί από άτομο βορίου B, δημιουργείται έτσι ο ημιαγωγός τύπου p του*

πυριτίου.

**Ο ημιαγωγός τύπου p**, δημιουργείται αν μερικά από τα άτομα του κυρίου υλικού αντικατασταθούν με άτομα μικρότερου σθένους (π.χ. βορίου B, αλουμινίου Al, γαλλίου Ga, ινδίου In). Έτσι με την αντικατάσταση ενός ατόμου πυριτίου Si με ένα άτομο βορίου B, το οποίο έχει σθένος 3, δημιουργείται υλικό, στο οποίο υπάρχουν άτομα που μπορούν να δεχθούν ένα ηλεκτρόνιο, προκειμένου να συμπληρωθεί ο ελεύθερος δεσμός (σχήμα 4.5). Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι δημιουργείται μια οπή (hole).

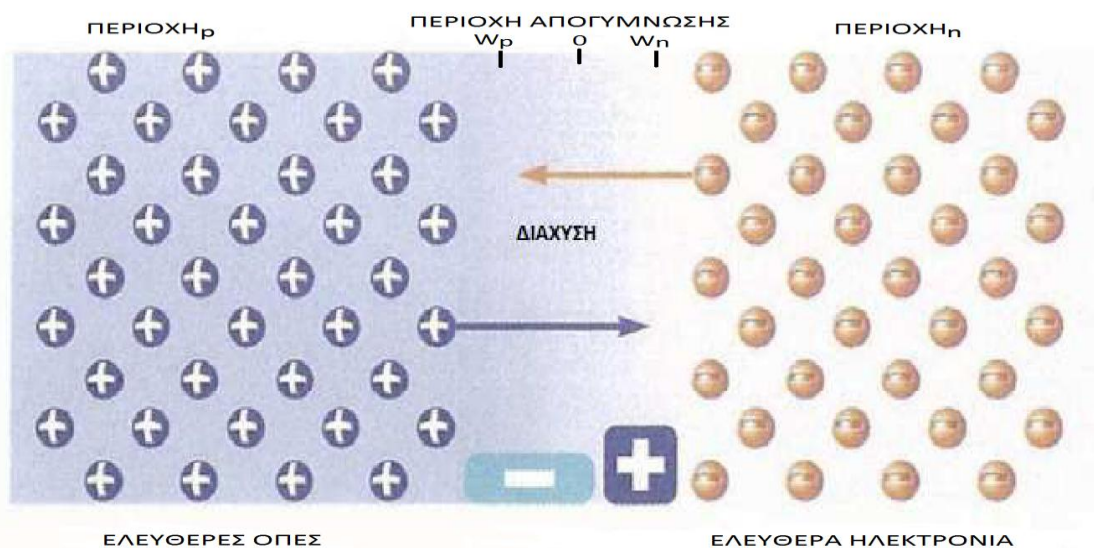
Από τα γειτονικά άτομα Si, στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, αποσπάται κάποιο απ' τα ηλεκτρόνια σθένους και αποδίδοντας, όπως στην περίπτωση των δοτών, αντίστοιχα μικρή ενέργεια, μεταβαίνει για κάλυψη του δεσμού στο βόριο. Στη συνέχεια η κάλυψη του δημιουργούμενου κενού του ατόμου Si, γίνεται με μεταπήδηση ενός ηλεκτρονίου «σθένους», από άλλο άτομο Si. Άρα η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου, θέτει μερικά από τα ηλεκτρόνια σθένους σε κίνηση, η οποία ισοδυναμεί με κίνηση της οπής προς την αντίθετη κατεύθυνση (στην πραγματικότητα δεν υπάρχει μετακίνηση των οπών, αλλά μόνο μετακίνηση των ηλεκτρονίων, οστόσο με την μετακίνηση αυτή φαίνεται σαν να μετακινούνται και οι οπές). Έτσι, είναι πιο βολικό, αντί να αναφερόμαστε στην κίνηση των ηλεκτρονίων σθένους, από άτομο σε άτομο, να χρησιμοποιούμε την ισοδύναμη και πολύ πιο πρακτική εικόνα της οπής.

Τα άτομα των προσμείξεων αυτών ονομάζονται αποδέκτες. Οι ηλεκτρονικές στάθμες των αποδεκτών βρίσκονται αμέσως πάνω από την ζώνη σθένους.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, λοιπόν, οι ηλεκτρικοί φορείς ενός ημιαγωγού, που μπορούν να συμβάλλουν σε ρεύμα είναι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας και οι οπές της ζώνης σθένους.

### 4.3 Επαφή ημιαγωγών τύπου p-n

Όταν δημιουργηθεί επαφή μεταξύ δύο ημιαγωγών τύπου p και n αντίστοιχα, του ίδιου κυρίως, υλικού π.χ. Si, τότε, ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό τύπου n του πυριτίου, μεταβαίνουν, με διάχυση (diffusion) στον ημιαγωγό p του πυριτίου. Αυτό σημαίνει ότι, στο τμήμα n-Si κι εκεί απ' όπου έφυγαν τα ηλεκτρόνια, παραμένουν θετικά φορτισμένα ιόντα. Ομοίως, οπές του χώρου p-Si, περνούν, με διάχυση, στην απέναντι μεριά αφήνοντας ακάλυπτα τα αντίστοιχα αρνητικά ιόντα του χώρου τους. Η μετακίνηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να παραμείνουν ιόντα στις γειτονικές περιοχές, δεξιά και αριστερά της μεταλλουργικής επαφής (σχήμα 4.6 επίπεδο στη θέση 0). Αρνητικά ιόντα σε μέρος της περιοχής του ημιαγωγού τύπου p και θετικά, σε μέρος της περιοχής του ημιαγωγού τύπου n. Έτσι, δημιουργείται η **περιοχή απογύμνωσης** (depletion region)(σχήμα 4.6), δηλαδή, περιοχή απογυμνωμένη από ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές.



**Σχήμα 4.6** Επαφή δύο ημιαγωγών τύπου p και n. Διακρίνεται επίσης η περιοχή απογύμνωσης, δεξιά και αριστερά της μεταλλουργικής επαφής.

Το μήκος απογύμνωσης μέσα στην περιοχή p, συμβολίζεται όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα με  $w_p$  και αντίστοιχα, το μήκος απογύμνωσης μέσα στην περιοχή n με  $w_n$ . Η συνολική περιοχή  $w = w_p + w_n$ , έχει έκταση από κλάσμα του  $\mu\text{m}$ , μέχρι αρκετές δεκάδες  $\mu\text{m}$  (π.χ. 0,1- 10  $\mu\text{m}$ , για το Si), εξαρτώμενη, από το υλικό, τις πυκνότητες των προσμείξεων και την εφαρμοζόμενη τάση.

## 4.4 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

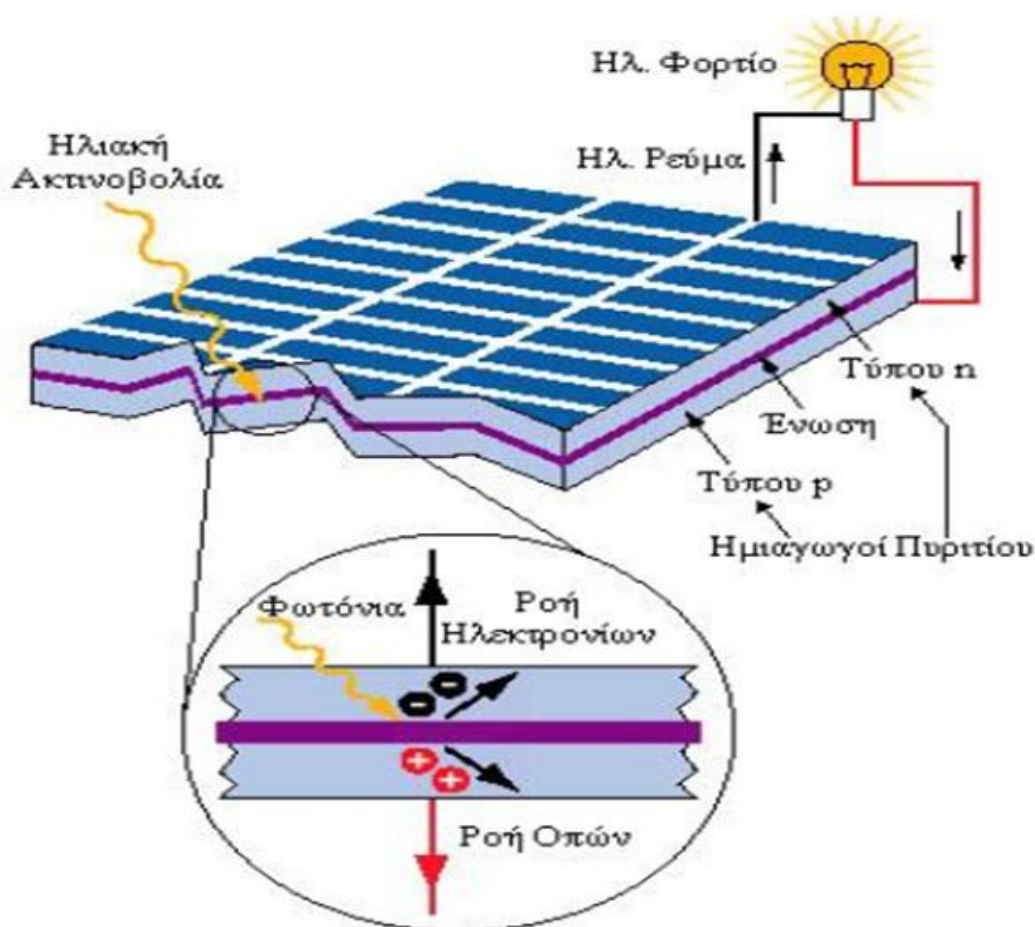
Στην περιοχή της ημιαγωγικής επαφής, δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών σ' όλο το χώρο των ημιαγωγών που είναι σε επαφή, με δύο βασικούς τρόπους:

- α) Θερμικά (εξαιτίας του ότι η διάταξη βρίσκεται σε ορισμένη θερμοκρασία).
- β) Με τη δράση εξωτερικού φωτισμού, (φωτονίων) κατάλληλου μήκους κύματος.

Διακρίνουμε τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, που δημιουργούνται μέσα στην περιοχή επαφής, λόγω του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου (περιοχή απογύμνωσης), αλλά και έξω από αυτήν, πολύ κοντά στα σύνορα των περιοχών τύπου p και n αντίστοιχα. Πολλοί από τους φορείς αυτούς έχουν πολύ μεγάλη πιθανότητα να φτάσουν στις περιοχές όπου υπερτερούν οι όμοιοι προς αυτούς τους φορείς (φορείς πλειονότητας), και να παραμείνουν ως «ελεύθεροι» ηλεκτρικοί φορείς, αφού η πιθανότητα να συναντήσουν φορέα μειονότητας και να επανασυνδεθούν, είναι πολύ μικρή. Οι υπόλοιποι που θα συναντήσουν αντίθετο φορέα, με τον οποίο θα επανασυνδεθούν,

δεν θα συμβάλουν στη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος, μέσα στην ημιαγωγική διάταξη.

Όπως είδαμε και στην παραπάνω παράγραφο, η περιοχή τύπου  $n$  έχει ως φορείς πλειονότητας τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αντίστοιχα, η περιοχή τύπου  $p$ , τις οπές. Οι πρόσθετοι φορείς, φορτίζουν τους χώρους στους οποίους φτάνουν, με πλεονάζοντα φορτία. Το δυναμικό στο χώρο  $p$ , λόγω των επιπλέον οπών, γίνεται θετικότερο, ως προς το αντίστοιχο του χώρου  $n$ , όπου έχουν καταλήξει τα ηλεκτρόνια που δημιουργήθηκαν στην επαφή. Η συνεχής κίνηση των φωτοδημιουργούμενων φορέων, με την επίδραση του ισχυρού πεδίου, αποτελεί ρεύμα, με φορά αυτή του ενδογενούς πεδίου, δηλαδή, από τον ημιαγωγό τύπου  $n$  στον ημιαγωγό τύπου  $p$ . Το φωτοδημιουργούμενο ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται **φωτόρεύμα  $I_L$** .

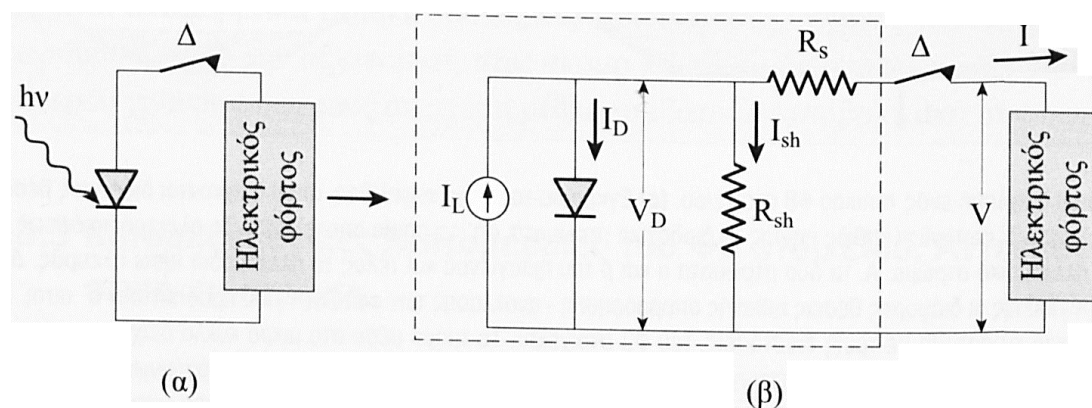


**Σχήμα 4.7** Ο μηχανισμός εκδήλωσης του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο. Τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας, που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός του όψη, τύπου  $n$ , παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές). Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στην ημιαγώγιμη πλάκα (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου) μπορεί να βρεθούν κοντά στην περιοχή της ένωσης  $p-n$  και να δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου. Έτσι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς τα εμπρός (τιμήμα τύπου  $n$ ) και οι οπές προς τα πίσω (τιμήμα τύπου  $p$ ), με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του  $\Phi B$  στοιχείου.

Η τιμή του δημιουργούμενου φωτορεύματος  $I_L$  είναι ευθέως ανάλογη του πλήθους των απορροφούμενων φωτονίων, το οποίο είναι, επίσης ευθέως ανάλογο των προσπίπτοντων φωτονίων, των οποίων η συνολική ενέργεια, ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας, αποτελεί την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Συνεπώς εξαρτάται από την πυκνότητα ισχύος  $E$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που προσπίπτει στην ημιαγωγική διάταξη, καθώς επίσης και του εμβαδού της επαφής των δύο ημιαγωγών.

## 4.5 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ΦΒ στοιχείου

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα μέσα στο πλαίσιο της διακεκομμένης γραμμής. Περιλαμβάνει μια πηγή σταθερού ρεύματος ( $I_L$ ) σε συνδυασμό με μια ιδανική δίοδο. Στη συνέχεια τοποθετείται το μη ιδανικό τμήμα του ΦΒ στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει, αφενός, την αντίσταση απωλειών διαρροής του ρεύματος μεταξύ των άκρων του ΦΒ στοιχείου, η οποία τίθεται παράλληλα συνδεδεμένη, στα άκρα της διόδου αφετέρου, την αντίσταση απωλειών στο δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου, που αντιπροσωπεύεται από αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με τη δίοδο.



**Σχήμα 4.8** (α) Απλό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου. (β) Πλήρες ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου. Η εσωτερική αντίσταση διαρροής της επαφής είναι η  $R_{sh}$  και η εσωτερική αντίσταση σε σειρά, η  $R_s$ .

Η **παράλληλη αντίσταση  $R_{sh}$**  (Shunt resistance) συνδέεται με τη διαρροή ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n και αφορά διαδρομές ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n, μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της διόδου. Αναλυτικότερα, οι διαδρομές αυτές αφορούν ρεύματα:

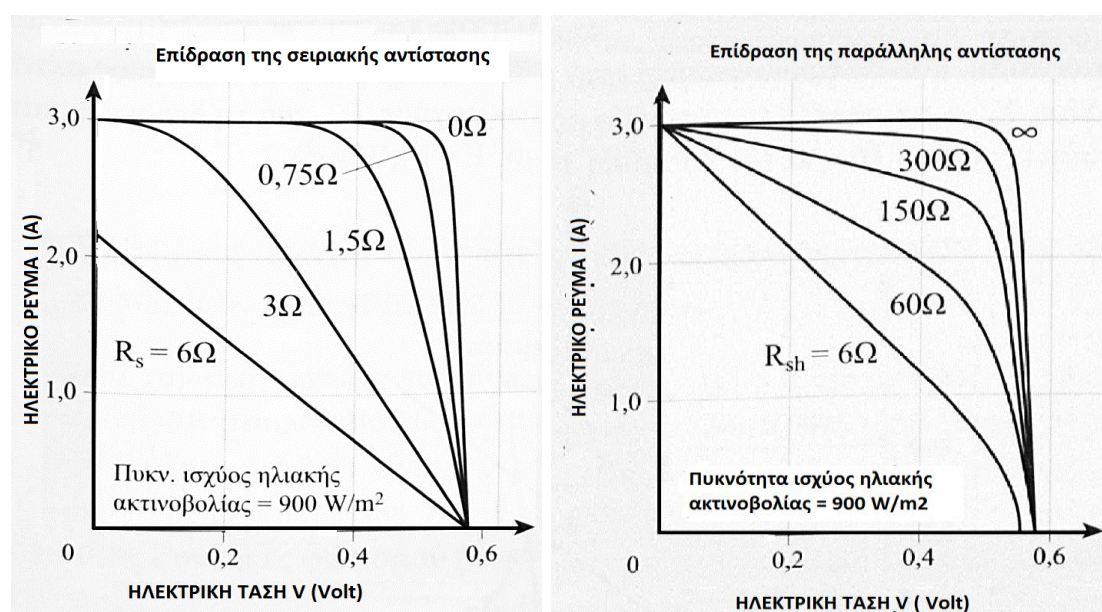
1. Διαμέσου του σώματος της διάταξης επαφής
2. Δια των εξωτερικών επιφανειών της επαφής, παράλληλα προς το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής και

## 3. Διαμέσου ηλεκτρικής διάβασης που δημιουργούν οι προσμείξεις της επαφής

Η **σειριακή αντίσταση**  $R_s$  (Series resistance) αφορά στην αντίσταση που παρουσιάζει η επαφή:

1. Κατά τη δίοδο του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το σώμα της διόδου
2. Στις ωμικές αντιστάσεις των σημείων προσφυγής των ηλεκτροδίων της επαφής καθώς και κατά μήκος των μεταλλικών κλάδων τους

Στις παρακάτω χαρακτηριστικές I-V, φαίνεται η επίδραση της σειριακής αντίστασης,  $R_s$  και της παράλληλης αντίστασης διαρροής,  $R_{sh}$ .



**Σχήμα 4.9** Επίδραση της σε σειρά αντίστασης  $R_s$  και της παράλληλα εμφανιζόμενης  $R_{sh}$  σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Η τιμή της παράλληλης αντίστασης διαρροής  $R_{sh}$  σε πολύ καλής απόδοσης ΦΒ στοιχεία είναι μεγαλύτερη των  $10^3 \Omega$ . Τιμές χαμηλότερες των  $500 \Omega$ , προκαλούν έντονη κλίση του οριζόντιου τμήματος της χαρακτηριστικής I-V, δηλαδή έντονη ελάττωση του ρεύματος καθώς προχωρούμε προς την τάση ανοιχτού κυκλώματος,  $V_{oc}$ . Η ελάττωση είναι εντονότερη όσο η  $R_{sh}$  ελαττώνεται (σχήμα 4.9). Μικρή  $R_{sh}$  χαρακτηρίζει καμπύλη I-V με αντίστοιχα μικρό παραλληλόγραμμο  $I_m \cdot V_m$ , μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος,  $P_m$ , και άρα χαμηλότερη τιμή του παράγοντα πλήρωσης, FF.

Αύξηση της τιμής της σειριακής αντίστασης  $R_s$  περιορίζει την περιοχή τάσεων στην οποία αντιστοιχεί σταθερό ρεύμα βραχυκύκλωσης, ίσο με αυτό που αντιστοιχεί στην ιδανική περίπτωση (σχήμα 4.9). Άμεσο αποτέλεσμα της αύξησης της  $R_s$  είναι η δραστική ελάττωση της αντίστοιχης μέγιστης ισχύος που αποδίδει το στοιχείο. Τυπικές τιμές της  $R_s$ , για καλής ποιότητας ΦΒ στοιχεία είναι:  $0,1 \Omega$  έως  $0,3 \Omega$ .

## 4.6 Τάση ανοικτού κυκλώματος – ρεύμα βραχυκύκλωσης

Στην περίπτωση που το φωτοβολταϊκό στοιχείο βρίσκεται σε **ανοικτό κύκλωμα** και σε κατάσταση σταθερού φωτισμού, τα δύο ρεύματα που κυκλοφορούν μέσα στην επαφή, είναι αντίθετης φοράς και ίσα κατά απόλυτη τιμή  $I_s = -I_L$  (σχήμα 4.10α). Αυτή η ισότητα ρευμάτων, τα οποία επιβάλλονται αφενός από τη διάχυση, λόγω αύξησης των πυκνοτήτων των φορέων πλειονότητας, αφετέρου από την ηλεκτρική τάση του ενδογενούς ηλεκτρικού φραγμού, έχει σαν αποτέλεσμα η ηλεκτρική τάση στα άκρα της επαφής p-n, να προσεγγίζει το ύψος της τάσης  $V_{bi}$  (τάση διάχυσης: η τάση που διακόπτει το φαινόμενο της διάχυσης από το ένα τμήμα της επαφής στο άλλο) με φορά αντίθετη αυτής. Ονομάζεται τάση ανοικτού κυκλώματος,  $V_{oc}$  και ισχύει:

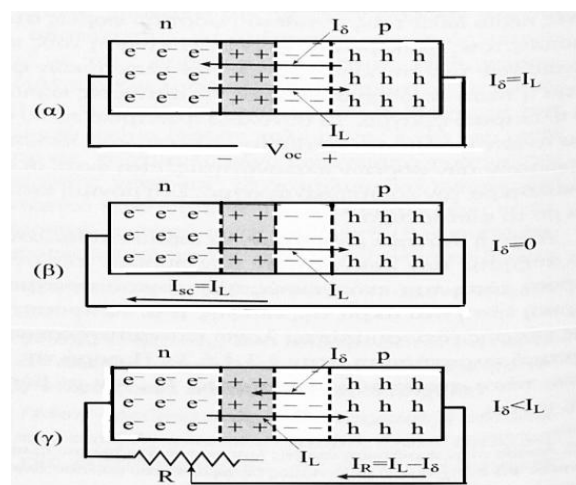
$$V_{oc} \leq V_{bi}$$

όπου η ισότητα αφορά στην ιδανική περίπτωση που δεν συμβαίνουν επανασυνδέσεις.

Περίπτωση όπου το φωτοβολταϊκό στοιχείο βρίσκεται σε **κλειστό κύκλωμα**, μπορεί να υπάρξει, με την βραχυκύκλωση των άκρων του (χάλκινο σύρμα) ή με σύνδεση αντίστασης  $R$  στα άκρα του.

Αν τα άκρα της επαφής p-n, που φωτίζεται όπως και πριν κάτω από σταθερές συνθήκες φωτισμού, είναι βραχυκυκλωμένα μεταξύ τους με ένα χάλκινο σύρμα μεγάλης διατομής και μηδενικής πρακτικά αντίστασης, τότε θα περάσει μέσα από το σύρμα ρεύμα ίσο με το  $I_L$  (σχήμα 4.10β). Οι αυξημένες πυκνότητες των φορέων πλειονότητας στα άκρα της επαφής, δημιουργούν έκχυση τους είτε μέσα από την επαφή, που παρουσιάζει φραγμό, είτε μέσα από το σύρμα, που δεν παρουσιάζει φραγμό ( $\Delta V=0$ ). Άρα κατά το βραχυκύκλωμα το φωτόρευμα  $I_L$ , διέρχεται από τον αγωγό βραχυκύκλωσης και κατά συνέπεια, το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , του φωτοβολταϊκού στοιχείου ισούται, ιδανικά, με  $I_L$ .

$$I_{sc} = I_L$$



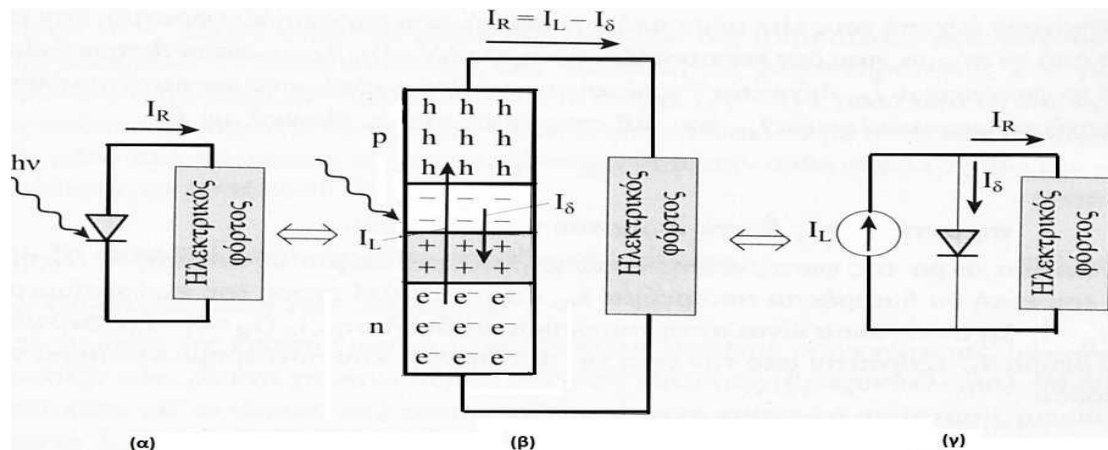
Σχήμα 4.10 α) Ανοικτό κύκλωμα, β) Επαφή βραχυκυκλωμένη, γ) Επαφή συνδεδεμένη με αντίσταση  $R$ .



Όταν στα άκρα της φωτιζόμενης επαφής συνδέσουμε μια αντίσταση  $R$  (σχήμα 4.10γ) τότε αυτή θα διαρρέεται από ρεύμα  $I_R$ , που αποτελεί τη διαφορά του φωτορεύματος  $I_L$  από τη συνιστώσα του ρεύματος διάχυσης  $I_\delta$  ( $I_R = I_L - I_\delta$ ). Δηλαδή, το ρεύμα  $I_R$  εξαρτάται από την τιμή της αντίστασης που συνδέουμε στα άκρα των επαφών p-n.

## 4.7 Ηλεκτρική συμπεριφορά φωτιζόμενου ΦΒ στοιχείου

Σύμφωνα με τα όσα αναφέραμε παραπάνω, φως, δεδομένης πυκνότητας ισχύος και φάσματος, δημιουργεί μέσα στο σώμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου ηλεκτρικό ρεύμα  $I_L$ , του οποίου η ένταση μένει σταθερή καθώς αλλάζει η ωμική αντίσταση, που είναι συνδεδεμένη στα άκρα του. Έτσι η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι ισοδύναμη με εκείνη, που θα δημιουργούσε η σύνδεση μιας πηγής σταθερού ρεύματος στα άκρα της διόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11γ. Στο σχήμα 4.11α δίδεται η τυπική μορφή ηλεκτρικού κυκλώματος που περιλαμβάνει φωτοβολταϊκό στοιχείο και ωμικό καταναλωτή και στο σχήμα 4.11β φαίνεται η πραγματική κατάσταση των ρευμάτων μέσα στο φωτοβολταϊκό στοιχείο εξαιτίας της δράσης του φωτός.



**Σχήμα 4.11** α) Τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα που περιλαμβάνει φωτοβολταϊκό στοιχείο. β) Αναλυτική παρουσίαση των ρευμάτων στο κύκλωμα. γ) Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα.

Συμπερασματικά, το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι μια ηλεκτρική πηγή, η οποία, στην ιδανική της συμπεριφορά, έχει την ιδιότητα να διατηρεί σταθερή τιμή ρεύματος σε μια αντίσταση, ανεξάρτητα από την τιμή της. Σε κάθε περίπτωση, η πηγή αυτή προσαρμόζει την τάση της στα άκρα της αντίστασης, ώστε το ρεύμα να μένει, πρακτικά, σταθερό.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο συμπεριφέρεται, μέσα σε ορισμένα όρια τάσεων, ως πηγή σταθερού ρεύματος. Το παρεχόμενο ηλεκτρικό ρεύμα είναι περίπου σταθερό, σε ευρεία περιοχή τάσεων. Στη συνέχεια, και μέχρι την τάση ανοικτού κυκλώματος, το ρεύμα μειώνεται ραγδαία, προσεγγίζοντας, σε μια στενή περιοχή

τάσεων, τη συμπεριφορά πηγής σταθερής τάσης.

Στον αντίποδα βρίσκεται η ηλεκτρική πηγή σταθερής τάσης, π.χ. ο ηλεκτρικός συσσωρευτής. Η τάση του μένει, περίπου σταθερή, σε μεγάλο εύρος εντάσεων ρευμάτων, που δημιουργεί σε καταναλωτές-φορτία, που τροφοδοτεί. Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, υπό δεδομένη πυκνότητα ισχύος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, παράγει δεδομένο μέγιστο ρεύμα, ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αντίθετα, ένας συσσωρευτής μπορεί να δώσει πολύ μεγάλα ρεύματα. Στην περίπτωση βραχυκύκλωσης των άκρων του, δίδει εξαιρετικά μεγάλο ηλεκτρικό ρεύμα, περιορισμένο μόνο από την εσωτερική του αντίσταση.

Η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου μοιάζει με την αντίστοιχη ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή. Μπορούμε λοιπόν να διακρίνουμε ομοιότητες και διαφορές φωτοβολταϊκού στοιχείου και ηλεκτρικού συσσωρευτή καθώς και οι δύο διατάξεις μπορούν να δώσουν ηλεκτρική ενέργεια, αλλά η δυνατότητα παροχής ενέργειας, στις δύο περιπτώσεις, οφείλεται σε διαφορετικές αιτίες.

α) Στον ηλεκτρικό συσσωρευτή έχουμε χημικές δράσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων και του διαλύματος, με αποτέλεσμα την αποταμίευση ενέργειας στα αλλοιωμένα ηλεκτρόδια, ενώ στα φωτοβολταϊκά στοιχεία, το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής προκαλεί διαχωρισμό των πρόσθετων ηλεκτρικών φορτίων, που δημιουργεί το απορροφούμενο φως, χωρίς αποταμίευση ενέργειας.

β) Ο ηλεκτρικός συσσωρευτής αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια με, περίπου, σταθερή ηλεκτρική τάση και με δυνατότητα να δώσει στο φορτίο (ανάλογα με την αντίσταση του), από πολύ μικρά έως πολύ μεγάλα ηλεκτρικά ρεύματα. Αντίθετα, το μέγιστο ρεύμα (ρεύμα βραχυκύκλωσης) που μπορεί να δώσει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο εξαρτάται, κυρίως, από την πυκνότητα ισχύος  $1 \text{ kW/m}^2$  και φθάνει, σε εργαστηριακή μορφή, τα 30 έως 40  $\text{mA/cm}^2$ . Ο ηλεκτρικός συσσωρευτής χαρακτηρίζεται ως πηγή σταθερής ηλεκτρικής τάσης ενώ το φωτοβολταϊκό στοιχείο, κατά κύριο λόγο, ως πηγή σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος.

## 4.8 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V του φωτοβολταϊκού στοιχείου

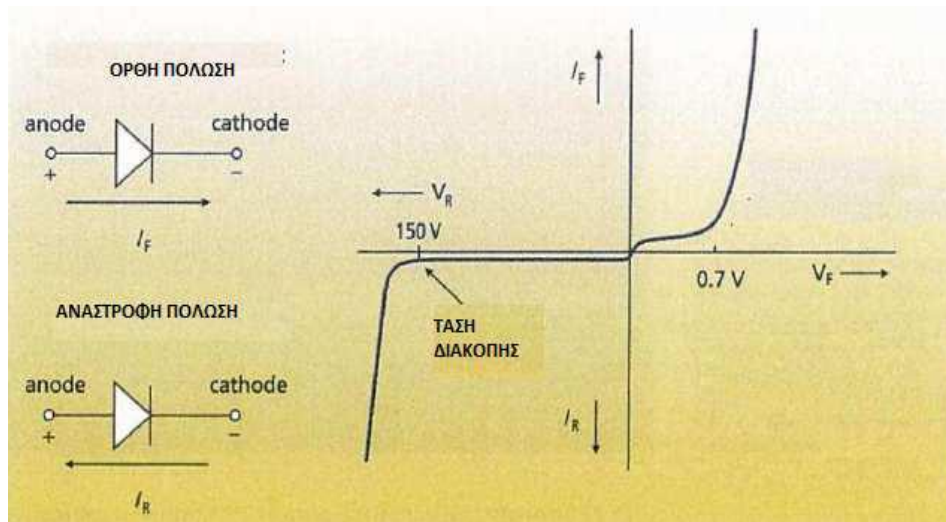
Σύμφωνα με προηγούμενη ανάλυση, το ρεύμα  $I_s$ , είναι σαν να προέρχεται από μια ορθή τάση  $V_F$ , επειδή οφείλεται στην αύξηση των πυκνοτήτων των φορέων πλειονότητας. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι οι τιμές του  $I_s$  ακολουθούν την καμπύλη I-V της διόδου (σχήμα 4.12).

Έτσι για να κατασκευάσουμε την καμπύλη I-V, της φωτιζόμενης διόδου, θα πρέπει να προσθέσουμε την καμπύλη I-V της μη φωτιζόμενης διόδου και την ευθεία  $I = -I_L$ , του φωτορεύματος, που αποτελεί την I-V της πηγής σταθερού ρεύματος. Το ρεύμα  $I_R$  όμως έχει αντίθετη φορά από το επιβαλλόμενο στη διόδο από μια εξωτερική πηγή με ορθή πόλωση. Συνεπώς, στο διάγραμμα I-V, της μη φωτιζόμενης επαφής, θα

τοποθετήσουμε τις τιμές  $I_R$ , στον αρνητικό ημιάξονα. Σε κάθε τιμή του  $I_S$ , προσθέτουμε το  $-I_L$  και θα βρίσκουμε το  $I_R$ , το οποίο το συμβολίζουμε πιο απλά ως  $I$ .

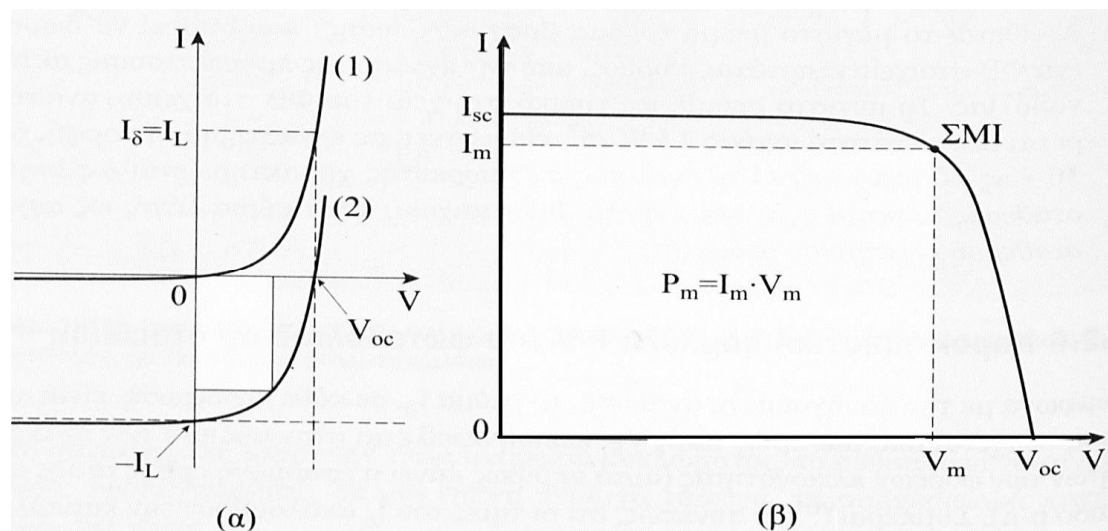
$$I = I_S \left\{ \exp\left(\frac{eV}{\eta_{i\delta} k_B T}\right) - 1 \right\} - I_L$$

(όπου  $\eta_{i\delta}$ , ο παράγων ιδανικότητας της διόδου)



Σχήμα 4.12 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V της διόδου, σε ορθή και ανάστροφη πόλωση

Στο παρακάτω σχήμα 4.13α φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη I-V, ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, στο σκοτάδι (1) και στο φως (2), ενώ στο σχήμα 4.13β δίδεται σε μεγέθυνση το τμήμα της καμπύλης που βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο ανεστραμμένο ως προς τις τιμές του ρεύματος, στο οποίο η επαφή p-n συμπεριφέρεται ως φωτοβολταϊκό στοιχείο. Σε αυτή την περιοχή η φωτοβολταϊκή κυψέλη συμπεριφέρεται ως πηγή ενέργειας και άρα παρέχει ενέργεια σε ένα καταναλωτή ( $P = V \cdot I < 0$ ).

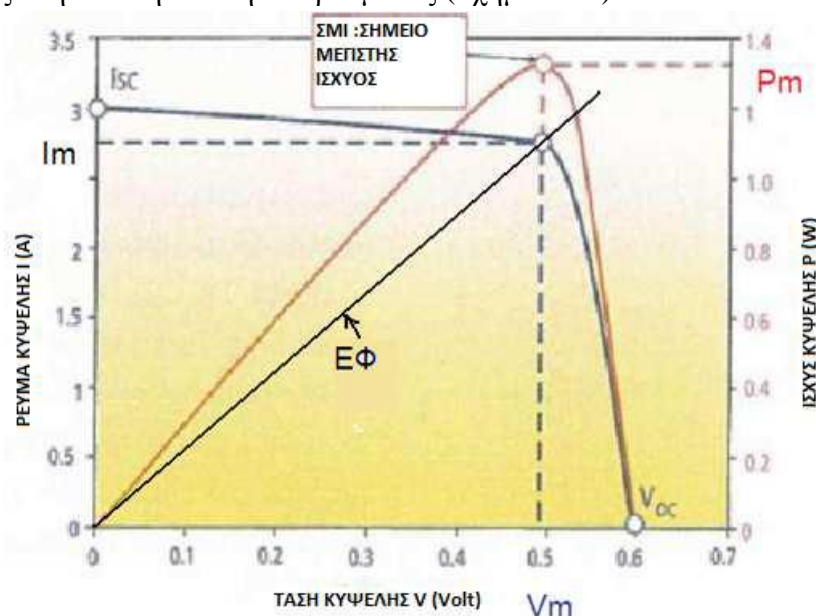


Σχήμα 4.13 α) Χαρακτηριστική καμπύλη I-V, ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, στο σκοτάδι (1) και στο φως (2). β) Μεγέθυνση του τμήματος της καμπύλης που βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο.

## 4.9 Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος

Για την αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του φωτοβολταϊκού στοιχείου, πρέπει να προσαρμόσουμε την αντίσταση του καταναλωτή, που επιθυμούμε να συνδέσουμε στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ώστε η τάση και το ρεύμα σ' αυτόν να αντιστοιχούν στο σημείο μέγιστης ισχύος, ΣΜΙ (Maximum Power Point, Mpp).

Υπολογίζουμε την ισχύ που παρέχει το φωτοβολταϊκό στοιχείο, στην αντίσταση  $R$  σε συνάρτηση με την τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου και κατασκευάζουμε το γράφημα της σε συνάρτηση με την τάση  $V$ . Στις ακραίες τιμές τάσης, 0 και  $V_{oc}$  η παρεχόμενη ισχύς είναι μηδέν. Συνεπώς, είναι αναμενόμενο, η καμπύλη  $P = f(V)$  να εμφανίζει μέγιστο, το οποίο παρουσιάζεται κοντά στο σημείο όπου αρχίζει η έντονη πτώση του ρεύματος (σχήμα 4.14).



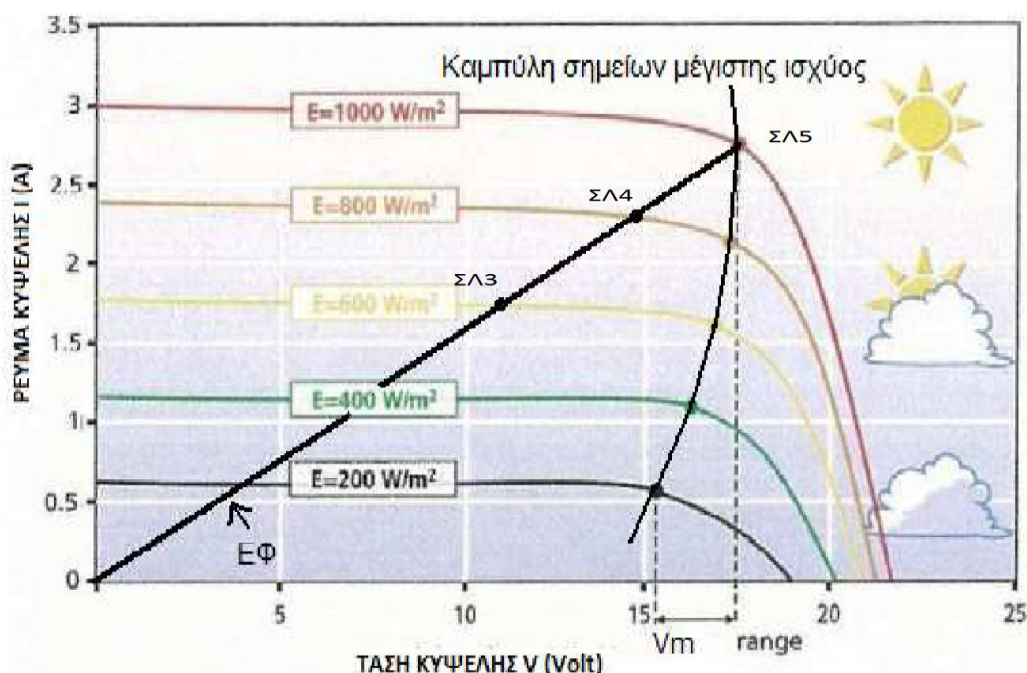
**Σχήμα 4.14** Ανεστραμμένη I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου, στο τεταρτημόριο που αυτό παρέχει ενέργεια, επίσης η καμπύλη ισχύος και η ευθεία φόρτου  $E\Phi$ , για ένα ωμικό καταναλωτή με αντίσταση  $R$  αντίστοιχη του ΣΜΙ ( $R = V_m / I_m$ ).

## 4.10 Καμπύλη φόρτου

Μία χρήσιμη γραφική παράσταση, η οποία ενσωματώνεται και συνδυάζεται με τα διαγράμματα I-V της ηλεκτρικής πηγής που τροφοδοτεί μία διάταξη, η οποία αξιοποιεί την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, (π.χ. μία ωμική αντίσταση, ένα ηλεκτρικό συσσωρευτή, ένα ηλεκτρικό κινητήρα κ.α.) είναι η **καμπύλη φόρτου** της διάταξης. Είναι η καμπύλη που προκύπτει ως γραφική παράσταση, του ρεύματος  $I$  που διαρρέει τη διάταξη, σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη στην είσοδο της

ηλεκτρική τάση  $V$ ,  $I = f(V)$ . Η καμπύλη φόρτου, τοποθετημένη στο διάγραμμα I-V του φωτοβολταϊκού στοιχείου, τέμνει την χαρακτηριστική καμπύλη του, σ' ένα σημείο, που αποτελεί κοινή λύση για τις εξισώσεις που αντιστοιχούν στις δύο καμπύλες. Το σημείο αυτό καθορίζει το ρεύμα και την τάση στο φόρτο και ονομάζεται σημείο λειτουργίας του συστήματος. Στην περίπτωση που το φορτίο είναι ωμική αντίσταση, η σχέση  $I = f(V)$ , είναι αναλογική και η γραφική παράσταση της ευθεία γραμμή. Σε περίπτωση που μεταβληθεί η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, η καμπύλη I-V αλλάζει και για το δεδομένο φορτίο, το σημείο λειτουργίας δεν θα συμπίπτει πλέον με το σημείο μέγιστης ισχύος, ΣΜΙ.

Για τον έλεγχο της αποδοτικής λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αλλά και για τον σχεδιασμό των ηλεκτρονικών που συνδυάζονται μ' αυτό, προσδιορίζουμε τα σημεία μέγιστης ισχύος, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του στοιχείου. Επιδιώκουμε το σημείο λειτουργίας του σε κάθε διαφορετική κατάσταση, που θα προκύψει, (π.χ. από μεταβολή της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας,  $E$ ) να αποτελεί και το σημείο μέγιστης ισχύος,  $P_m$ , για τη δεδομένη κατάσταση. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.15, το σημείο λειτουργίας 5, (ΣΛ5), αποτελεί και το σημείο μέγιστης ισχύος  $P_m$ , για πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας,  $E = 1 \text{ kW/m}^2$ .



**Σχήμα. 4.15** Καμπύλη I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου για πέντε διαφορετικές τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, επίσης η καμπύλη σημείων μέγιστης ισχύος, ΣΜΙ και η ευθεία φόρτου, EΦ, για ωμική αντίσταση.

Σύμφωνα λοιπόν με το παραπάνω σχήμα 4.15, όταν αλλάζει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σ' ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, που τροφοδοτεί μια ηλεκτρική αντίσταση, το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται. Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς αποδίδεται στην αντίσταση, μόνο για ορισμένο επίπεδο ακτινοβολίας. Σε

διαφορετικές τιμές της έντασης, της ακτινοβολίας, αποδίδεται ισχύς μικρότερη από την αντίστοιχη μέγιστη ισχύ. Μόνο το ΣΛ5 συμπίπτει με το ΣΜΙ της I-V, στις υπόλοιπες καμπύλες I-V, τα δύο σημεία δεν συμπίπτουν. Για να συμβεί κάτι τέτοιο, πρέπει να αλλάξει η ωμική αντίσταση, έτσι ώστε η νέα ευθεία φόρτου, να περνά από το αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος της νέας καμπύλης I-V. Οι τιμές ρεύματος-τάσης, στο σημείο μέγιστης ισχύος, συμβολίζονται με  $I_m$  και  $V_m$ . Η μέγιστη ισχύς, που μπορεί να δώσει το φωτοβολταϊκό στοιχείο, υπό δεδομένη προσπίπτουσα πυκνότητα ακτινοβολίας E, ισούται με,  $P_m = I_m \cdot V_m$ .

#### 4.11 Πρότυπες συνθήκες ελέγχου – ισχύς αιχμής φωτοβολταϊκού στοιχείου

Τα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία ελέγχονται σε ένα εργαστηριακά παρασκευασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο καθώς επίσης και στο τελικά διατιθέμενο βιομηχανικό προϊόν (ΦΒ πλαίσιο), είναι ο παράγων πλήρωσης FF, το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , και η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ , σε συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας του στοιχείου. Η γνώση των χαρακτηριστικών αυτών μεγεθών, επιτρέπει τον έλεγχο της αποδοτικότητας του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Για το σκοπό αυτό, καθορίστηκαν διεθνώς, οι ακόλουθες **πρότυπες συνθήκες ελέγχου** των χαρακτηριστικών ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πλαισίου (Standard Test Conditions, STC).

Πρότυπες συνθήκες ελέγχου:

- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δέσμης παράλληλων ακτίνων (Beam), πυκνότητας ισχύος  $E = 1 \text{ kW/m}^2$ , και φάσματος αντίστοιχου του ηλιακού με AM1,5.
- Κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας στην όψη του φωτοβολταϊκού στοιχείου.
- Θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου:  $\theta_{STC} = 25 \text{ }^\circ\text{C}, \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Στα ειδικά εργαστήρια ελέγχου και πιστοποίησης των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων, ο χώρος ελέγχου βρίσκεται στην προκαθορισμένη θερμοκρασία των  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Το φάσμα εκπομπής της χρησιμοποιούμενης πηγής φωτισμού, προσομοιάζει προς το ηλιακό. Η πηγή αυτή λειτουργεί στιγμιαία (Flash), ώστε η θερμοκρασία του υλικού του φωτοβολταϊκού στοιχείου να παραμένει στα προκαθορισμένα όρια των πρότυπων συνθηκών, επιπλέον, η ακτινοβολία από την τεχνητή πηγή, προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στην πραγματικότητα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, λειτουργούν κάτω από φυσικό ηλιακό φως, του οποίου τα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας καθ' όλο το έτος. Έπιπλέον, η αποδιδόμενη ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια

εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και από τις ιδιαίτερες κλιματικές συνθήκες του τόπου εγκατάστασης.

Με βάση τις πρότυπες συνθήκες, εισάγεται η έννοια της **ισχύς αιχμής** (Peak power,  $P_p$ ), ως χαρακτηριστικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου, η δε μονάδα στο SI, γράφεται,  $W_p$ , (Peak Watt, Watt αιχμής)

Ισχύς αιχμής λοιπόν, ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, είναι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που μπορεί να αποδώσει, κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC,  $P_p = P_{m,STC}$ ).

Η έννοια αυτή χρησιμοποιείται ομοίως, για το χαρακτηρισμό ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ή μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Αποτελεί το χαρακτηριστικό στοιχείο με βάση το οποίο προσδιορίζεται το μέγεθος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.

## 4.12 Παράγων πλήρωσης FF φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το διαγραμμισμένο "παραλληλόγραμμο" μέσα στην καμπύλη I-V, με πλευρές  $I_m$  και  $V_m$ , έχει "εμβαδόν" ίσο με τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ από το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Το πηλίκο του εμβαδού αυτού προς το εμβαδό ενός άλλου παραλληλογράμμου με πλευρές  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$ , που περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ως πηγή σταθερού ρεύματος, δίνει το μέτρο προσέγγισης αυτής της λειτουργίας της επαφής και λέγεται **παράγων πλήρωσης FF** (Fill Factor). Οι τιμές του, καθορίζονται από το υλικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου και τις συνθήκες, είναι δε μεταξύ 0 και 1. Η τιμή αναφοράς του δίδεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC) και όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές του FF, τόσο περισσότερο η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος, στην περιοχή τάσεων 0- $V_{oc}$ . Σ' αυτές τις περιπτώσεις η διάταξη χαρακτηρίζεται αφενός από μικρή ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά, αφετέρου από μεγάλη τιμή παράλληλης αντίστασης. Τυπικές τιμές 0,7 έως 0,9 χαρακτηρίζουν φωτοβολταϊκά στοιχεία με αποδεκτή έως πολύ καλή ενεργειακή απόδοση, αντίστοιχα.

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

## 4.13 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το υλικό, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών κυψελίδων, είναι το πυρίτιο (Si). Ως στοιχείο, το πυρίτιο βρίσκεται ελεύθερο στη

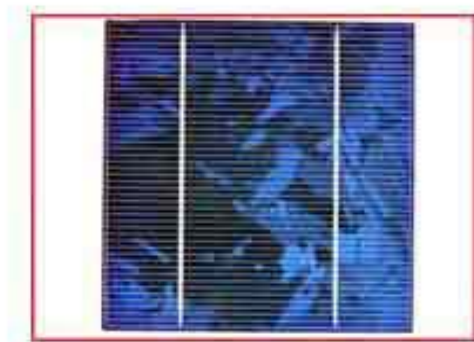
φύση σε αφθονία. Τα διάφορα ορυκτά και πετρώματα του πυριτίου αποτελούν το 87% του φλοιού της Γης, ενώ είναι το δεύτερο σε αφθονία χημικό στοιχείο στη Γη, μετά το οξυγόνο, με ποσοστό 28%. Στην άμμο το πυρίτιο περιέχεται με τη μορφή του οξειδίου του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ). Το τελικό προϊόν χαρακτηρίζεται από υψηλή (99,99999%) έως και πολύ υψηλή καθαρότητα (99,9999999%). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τη δομή του βασικού υλικού ή τον ιδιαίτερο τρόπο παρασκευής. Οι διαφορετικοί τύποι είναι οι εξής:

**Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου** (single-crystal silicon): Το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (Wafer~300  $\mu\text{m}$ ). Η απόδοσή τους, με τη μορφή κυψελίδας, κυμαίνεται από ~21% έως ~24%. Χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής και έχουν χρώμα σκούρο μπλε.



Σχήμα 4.16 Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

**Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου** (multicrystalline silicon mc-Si): Έχουν δυνατότητα κατασκευής κατασκευής μεγάλων επιφανειών. Συνήθως κόβονται σε τετραγωνικής μορφής στοιχεία και αποτελούνται από λεπτά επιστρώματα, πάχους 10 έως 50  $\mu\text{m}$ .



Σχήμα 4.17 Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Στην επιφάνεια της κυψελίδας, διακρίνονται οι διαφορετικές μονοκρυσταλλικές περιοχές. Τα όρια τους αποτελούν θέσεις παγίδευσης των φορέων και άρα όσο μικρότερο είναι το συνολικό μήκος των οριακών περιοχών μέσα στο δεδομένης διάστασης φωτοβολταϊκό στοιχείο, τόσο καλύτερη είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του. Γενικά, όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις των μονοκρυσταλλικών περιοχών του πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στοιχείου, τόσο υψηλότερη είναι η απόδοση



του, η οποία κυμαίνεται από 17% έως ~20% σε εργαστηριακή μορφή κυψελίδας. Χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλή χρονική σταθερότητα. Το δε κόστος παρασκευής τους είναι χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το χρώμα τους είναι γαλάζιο.

**Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου** (amorphous ή thin film silicon): Διαθέτουν τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων ή υμενίων (films), έχουν θεωρητικά πολύ χαμηλό κόστος παραγωγής, εξαιτίας της μικρής χρησιμοποιούμενης μάζας υλικού. Το λεπτό επίστρωμα σχηματίζεται πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών αυτών στοιχείων, μειώνεται έντονα, στα αρχικά στάδια φωτισμού τους, στα επίπεδα του 6 με 8%. Σήμερα, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παρασκευή σύνθετων φωτοβολταϊκών στοιχείων, με διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα, με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος. Έτσι παρασκευάζονται φωτοβολταϊκά στοιχεία από κράμα πυριτίου με άνθρακα και γερμάνιο, τριών επαφών a-SiGe (~1,4 eV), a-SiC (1,85 eV), με σταθεροποιημένη απόδοση ~13%. Το ιδιαίτερο κατασκευαστικό χαρακτηριστικό τους είναι η δυνατότητα δημιουργίας διαδοχικών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε μεγάλες επιφάνειες φωτοβολταϊκών πλαισίων.



**Σχήμα 4.18** Φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου.

Εκτός των φωτοβολταϊκών στοιχείων άμορφου πυριτίου (a-Si), τα οποία σήμερα αποτελούν τα περισσότερο διαδεδομένα στο κόσμο, για την κατηγορία αυτή, κατασκευάζονται φωτοβολταϊκά στοιχεία και από άλλα ημιαγώγιμα υλικά, κυρίως με συνδυασμό μεταξύ τους. Ο συνδυασμός επιλέγεται έτσι ώστε να προκύπτει διάταξη με καλύτερη αξιοποίηση του ηλιακού φάσματος. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, παρά τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματά τους σε σχέση με το πυρίτιο (φασματική απόκριση, σταθερότητα απόδοσης, χαμηλό θερμικό συντελεστή μέγιστης ισχύος κ.α.), εμφανίζουν ακόμα περιορισμένη χρήση, κυρίως λόγω των δυσκολιών που συνδέονται με την πολυπλοκότητα των μεθόδων που χρησιμοποιούνται. Πάντως, η συντελούμενη πρόοδος στον τομέα βελτίωσης των μεθόδων παρασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτών επιστρώσεων ενισχύει την πρόβλεψη για ισχυρή διείσδυση τους στην αγορά, πιθανότατα μέχρι το 2020 και μάλιστα σε ανταγωνιστικό βαθμό σε σχέση με το κρυσταλλικό πυρίτιο. Ο επόμενος πίνακας 4.19 παρουσιάζει τα πιο σημαντικά απ' αυτά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, το καθένα με τα πλεονεκτήματά του και τα μειονεκτήματά του.

α/α	Βασικά υλικά ΦΒ στοιχείου	Χαρακτηριστικά	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1	Ετεροένωση $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$	Πολυκρυσταλλικό $E_g = 1,2 \text{ eV}/2,3 \text{ eV}$ απόδοση ~10%.	Μικρό κόστος κατασκευής.	Μη σταθερής απόδοσης ΦΒ στοιχείο.
2	Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός $\text{CuInSe}_2$ ή CIS	Εργαστηριακή απόδοση 12-13%. Με προσθήκη Ga, βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά του και φτάνει απόδοση 17%. Η απόδοση βιομηχανικού πλαισίου είναι 8-11%.	Χαμηλό κόστος κατασκευής, σταθερότητα ισοδύναμη του c-Si. Υψηλή ετήσια ενεργειακή αποδοτικότητα.	Χαμηλή απόδοση βιομηχανικού προϊόντος.
3	Τελουριούχο κάδμιο $\text{CdTe}$	Ιδανικό ενεργειακό διάκενο.	Εξαιρετική εκμετάλλευση του ηλιακού φάσματος.	Μη επαναλήψιμες ιδιότητες. Δυσκολία δημιουργίας μεταλλικών επαφών.
4	Αρσενικούχο γάλλιο $\text{GaAs}$	Παρουσιάζει την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση ~25,5%. Χρήση σε διαστημικές εφαρμογές.	Υψηλή ενεργειακή απόδοση βιομηχανικού ΦΒ πλαισίου, 22%.	Υψηλό κόστος κατασκευής.

Σχήμα 4.19 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών επιστρωμάτων

# Κεφάλαιο 5

---

*Φωτοβολταϊκοί Συλλέκτες*

---

## ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

### 5.1 Φωτοβολταϊκός συλλέκτης πυριτίου (πλαίσιο)

Το πυρίτιο αποτελεί το πιο διαδεδομένο τύπο ημιαγωγού στοιχείου και η χρήση του έχει επικρατήσει σχεδόν στο σύνολο των ηλεκτρονικών και φωτοβολταϊκών εφαρμογών. Η ηλιακή ακτινοβολία (ηλιακό φως) μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων πυριτίου. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούνται από ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα, ανάλογα με το αποτέλεσμα που θέλουμε να έχουμε.

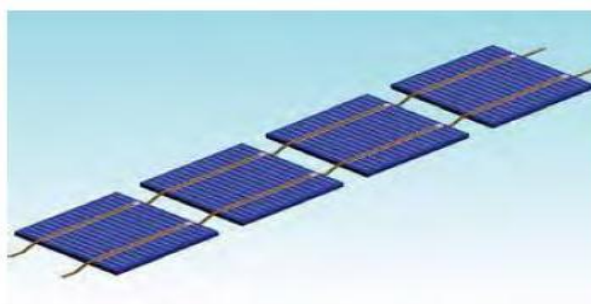
Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε ότι, σύνδεση σε σειρά  $N$ , καθ' όλα όμοιων φωτοβολταϊκών στοιχείων, οδηγεί σε σύστημα με ανάλογα πολλαπλάσια τάση ανοικτού κυκλώματος, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης ισούται με το αντίστοιχο του ενός ( $V_{\text{toc}} = NV_{\text{oc}}$  και  $I_{\text{sc}} = I_{\text{sc}}$ ). Η παράλληλη σύνδεση  $N$  όμοιων φωτοβολταϊκών στοιχείων, δίδει ένα σύνολο με την ίδια τάση ανοικτού κυκλώματος, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ισούται με  $N$  φορές το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ενός ( $V_{\text{toc}} = V_{\text{oc}}$  και  $I_{\text{sc}} = NI_{\text{sc}}$ ).

Ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης θα πρέπει να πληροί κάποια επιθυμητά ηλεκτρικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά. Τα βασικά κριτήρια των χαρακτηριστικών αυτών είναι:

1. Για τα μεν ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, η δυνατότητα συνδιασμού της μονάδας αυτής με συσσωρευτή τυπικής ονομαστικής τάσης 12V, για την αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

2. Για τα δε μορφολογικά χαρακτηριστικά, οι διαστάσεις της μονάδας, η ευκολία κατασκευής, μεταφοράς και ενσωμάτωσης τους σε σύνολα (συστοιχίες) καθώς και το μειωμένο κόστος αντικατάστασης του, στην περίπτωση βλάβης.

Στην πράξη ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά (σχήμα 5.1) βρίσκονται σφραγισμένα ερμητικά κλειστά, μέσα σε πλαστική ύλη για προστασία από τις καιρικές συνθήκες (π.χ. υγρασία), ενώ η μπροστινή όψη του πλαισίου προστατεύεται από ανθεκτικό γυαλί υψηλής διαφάνειας. Η κατασκευή αυτή, που έχει πάχος περίπου 5 χιλιοστά, τοποθετείται συνήθως σε πλαίσιο από αλουμίνιο.



Ηλεκτρική σύνδεση ηλιακών στοιχείων

Σχήμα 5.1 Σύνδεση σε σειρά φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Συγκεκριμένα, σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου, ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, δίδει τάση  $\sim 0,6$  Volts σε θερμοκρασία  $\theta_c = 25$  °C, το δε σύνολο 36 τέτοιων στοιχείων σε σύνδεση σειράς, δίδει τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc} = 36 \cdot 0,6 \text{ V} = 21,6$  Volts, που είναι απαραίτητη, για την φόρτιση συσσωρευτή τυπικής ονομαστικής τάσης 12 Volts. Η τελική κατασκευή φωτοβολταϊκού πλαισίου πληροί ειδικές προδιαγραφές, ώστε να διαθέτει την απαραίτητη μηχανική αντοχή, τις κατάλληλες υποδοχές στήριξης και επιπλέον την αυξημένη στεγανότητα για προστασία από την υγρασία. Μια τέτοια κατασκευή χρειάζεται σχεδόν μηδενική συντήρηση και έχει διάρκεια ζωής που φτάνει τα τριάντα χρόνια.

Η διάταξη αυτή αποτελεί την τυπική βιομηχανική μονάδα (module) και ονομάζεται **φωτοβολταϊκό πλαίσιο** (photovoltaic module). Σπανιότερα, χρησιμοποιείται ο όρος **φωτοβολταϊκή γεννήτρια** (photovoltaic generator), ενώ αποτελεί τη βασική δομική μονάδα κάθε μεγαλύτερης εγκατάστασης παραγωγής φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (array). Στο εμπόριο υπάρχουν τυπικές τιμές ισχύος αιχμής από μερικά  $W_p$  έως τα 150  $W_p$ . Διατίθενται δε σε μεγαλύτερες διαστάσεις, με περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία, σε σειρά και παράλληλη εσωτερική σύνδεση, με τη μορφή σύνθετων διατάξεων, που χαρακτηρίζονται από υψηλή ισχύ αιχμής και συνήθως υψηλή τάση ανοικτού κυκλώματος, κατάλληλα για ειδικές εφαρμογές.

Η αρχική μορφή των φωτοβολταϊκών στοιχείων σ' ένα συλλέκτη, ήταν κυκλική, με αποτέλεσμα να μένει αρκετή μη ενεργός επιφάνεια του πλαισίου. Σήμερα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, έχουν τετραγωνικής μορφής σχήμα, ώστε να ελαχιστοποιείται η μη αξιοποιήσιμη επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Όσον αφορά την επιλογή του αριθμού των φωτοβολταϊκών στοιχείων απ' τα οποία θα κατασκευαστεί το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αναφέρθηκε προηγουμένως ότι, αυτό έχει άμεση σχέση με την ονομαστική ηλεκτρική τάση 12 V στους πόλους των ηλεκτρικών συσσωρευτών  $Pb/H_2SO_4$ , οι οποίοι κατέχουν την πρώτη θέση στην παγκόσμια αγορά. Έτσι για την φόρτιση ενός συσσωρευτή μολύβδου-θειικού οξέως ( $Pb/H_2SO_4$ ), ονομαστικής τάσης 12 V, απαιτείται τάση περίπου 14,2-14,4 Volts. Στο σύστημα αυτό είναι απαραίτητη η παρεμβολή μιας απλής ηλεκτρονικής διάταξης, για τον έλεγχο των ορίων τάσης φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή καθώς και μιας διόδου αντεπιστροφής, ώστε να αποτρέπεται η εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή διαμέσου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, όταν αυτή δεν φωτίζεται. Αυτά τα πρόσθετα ηλεκτρονικά και οι γραμμές μεταφοράς, απαιτούν μία επιπλέον τάση 1-2 V. Άρα το ΣΜΙ της πιο απλής φωτοβολταϊκής συστοιχίας, δηλαδή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον τάση, 15 με 17 Volts. ( $14,4V + 1$  έως 2 V).

Έτσι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων, οδηγούν στην επιλογή συγκεκριμένων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η τάση όπου επιθυμούμε να λειτουργεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, σε διάφορα επίπεδα φωτισμού, βρίσκεται στην περιοχή 14V-17V, ενώ η αντίστοιχη τάση ανοικτού κυκλώματος είναι στην περιοχή 19V-22V.

Με στόχο τα φωτοβολταϊκά πλαίσια να προσαρμοστούν περισσότερο στην αρχιτεκτονική μορφή των κτηρίων, οι εταιρείες κατασκεύασαν πλαίσια που ταιριάζουν με τις απαιτήσεις της πρακτικότητας και της αισθητικής. Παραδείγματος χάριν, για τις στέγες των κτιρίων παραδοσιακής μορφής, προτείνεται η χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων, με τη μορφή κεραμιδιών (εικόνα 5.2).



*Σχήμα 5.2 Πάνω αριστερά η τοποθέτηση και πάνω δεξιά η ολοκλήρωση της εγκατάστασης, με τη χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων, με τη μορφή κεραμιδιών.*

Στις πλευρές του κτηρίου, μπορούν να τοποθετηθούν φωτοβολταϊκά πλαίσια – ζωγραφικοί πίνακες. Φωτοβολταϊκά πλαίσια ημιπερατά στο ηλιακό φως μπορούν να τοποθετηθούν σε διαδρόμους μεγάλων κτηριακών συγκροτημάτων, συνδυάζοντας τη δυνατότητα φυσικού ημερήσιου φωτισμού του διαδρόμου με τη δυνατότητα τεχνητού φωτισμού, από αποθηκευμένη φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια, κατά τη διάρκεια της νύκτας ή των συννεφιασμένων ημερών.

## 5.2 Ονομαστική ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

Το κυριότερο τυπικό ηλεκτρικό χαρακτηριστικό ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, βάση του οποίου θα το ψάξουμε στο εμπόριο, ώστε να καλύψει τις ανάγκες μιας συγκεκριμένης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης καθώς και η εμπορική του τιμή, καθορίζονται από την έννοια της **ισχύος αιχμής** (peak power), όπως αυτή ορίστηκε και για το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Ισχύς αιχμής,  $P_p$ , ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, είναι η μέγιστη ισχύς με την οποία αυτό αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια, κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου. Έστω, π.χ. ότι η ισχύς αιχμής ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μονοκρυσταλλικού

πυριτίου, είναι  $75 W_p$ , τότε αυτό σημαίνει ότι το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, όταν δέχεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πυκνότητας ισχύος,  $E=1 \text{ kW/m}^2$ , φάσματος AM 1,5 και η θερμοκρασία του είναι  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , τότε θα παράγει ηλεκτρική ενέργεια με ισχύ  $75 \text{ W}$ . Είναι προφανές ότι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, το οποίο βρίσκεται στην ύπαιθρο, δεν λειτουργεί πάντα σε αυτές τις ιδανικές συνθήκες.

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά ενός μονοκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού πλαισίου ισχύς αιχμής  $P_p= 80\text{W}$ . Είναι τα βασικά χαρακτηριστικά όπου θα πρέπει να ερευνήσουμε για την αγορά του φωτοβολταϊκού μας πλαισίου, τέτοια είναι η ισχύς  $P_p$ , η ένταση του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ , επίσης, αναγράφεται και η θερμοκρασία NOCT, την οποία αποκτά το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ευρισκόμενο σε καθορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος, που προσεγγίζουν μία μέση πραγματική κατάσταση. Συνεπώς, όσο μικρότερη η τιμή της για ένα πλαίσιο, τόσο μικρότερη η μείωση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος, σε σχέση με άλλο ίδιας ισχύος αιχμής, του οποίου όμως, η θερμοκρασία NOCT είναι μεγαλύτερη.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΗ
Τυπική ισχύς αιχμής, $P_p$ (Peak power)	80 W
Εγγύηση για ελάχιστο της ισχύος αιχμής	76 W
Ηλεκτρική τάση στο σημείο ισχύος αιχμής ( $V_{m,STC}$ )	16,9 V
Ηλεκτρικό ρεύμα στο σημείο ισχύος αιχμής ( $I_{m,STC}$ )	4,73 A
Τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{oc,STC}$ )	21,5 V
Ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc,STC}$ )	4,97 A
Θερμικός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης	0,05%/K
Θερμικός συντελεστής τάσης ανοικτού κυκλώματος	-0,5%/K
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	49 $^\circ\text{C}$
Διαστάσεις (μήκος · πλάτος · πάχος) σε mm	1425 · 652 · 36
Βάρος, kg	11,9

Πίνακας 5.3 Τυπικά χαρακτηριστικά μονοκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού πλαισίου, ισχύς αιχμής 80W.

### 5.3 Απόδοση ΦΒ πλαισίου και παράγοντες που την επηρεάζουν

Ο στιγμιαίος συντελεστής απόδοσης ( $\eta_m$ ) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, εμβαδού  $S$ , προσδιορίζεται από το πηλίκο της αποδιδόμενης μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος,  $P_m$ , προς την προσπίπτουσα στο πλαίσιο, ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας  $E \cdot S$ ,

όπου  $E$ , η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου :

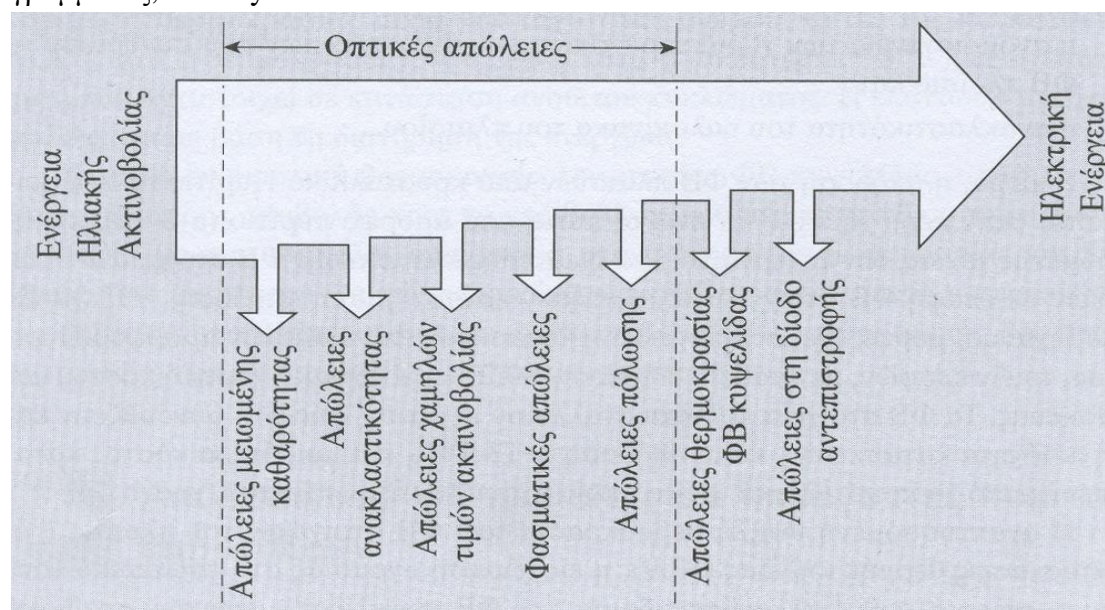
$$\eta_m = \frac{P_m}{E \cdot S}$$

Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες των υλικών παρασκευής του, τη θερμοκρασία των κυψελίδων και την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η τιμή αναφοράς του καθορίζεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC). Σε συνθήκες διαφορετικές από τις πρότυπες, η τιμή του καθορίζεται από τη διαφορά  $\theta_c - \theta_{STC}$ , των θερμοκρασιών της κυψελίδας στη δεδομένη κατάσταση φωτισμού και στην κατάσταση STC (25 °C), αντίστοιχα, καθώς και από την πυκνότητα ισχύος  $E$ , της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η τιμή του στιγμιαίου συντελεστή απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου, ( $\eta_m$ ), καθορίζεται από τις αποκλίσεις που υφίσταται από την τιμή  $\eta_{m, STC}$ , που προσδιορίζεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC). Οι απώλειες αυτές αφορούν:

- Τη γήρανση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, δηλαδή στη μείωση της απόδοσης του λόγω αλλοίωσης των υλικών κατασκευής των κυψελίδων του φωτοβολταϊκού πλαισίου.
- Στις απώλειες οπτικού δρόμου και θερμοκρασίας κυψελίδας, που προκύπτουν λόγω της διαφοροποίησης των χαρακτηριστικών της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντα αέρα, των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε σχέση με αυτά των πρότυπων συνθηκών.
- Στις απώλειες στη δίοδο αντεπιστροφής του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Οι ενεργειακές απώλειες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα, με τη μορφή διαγράμματος, "Sankey".



Σχήμα 5.4 Διάγραμμα Sankey για τη ροή ενέργειας σε φωτοβολταϊκό πλαίσιο.



Η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι μικρότερη της αντίστοιχης του φωτοβολταϊκού στοιχείου εργαστηριακής παρασκευής. Οι βασικότεροι λόγοι είναι:

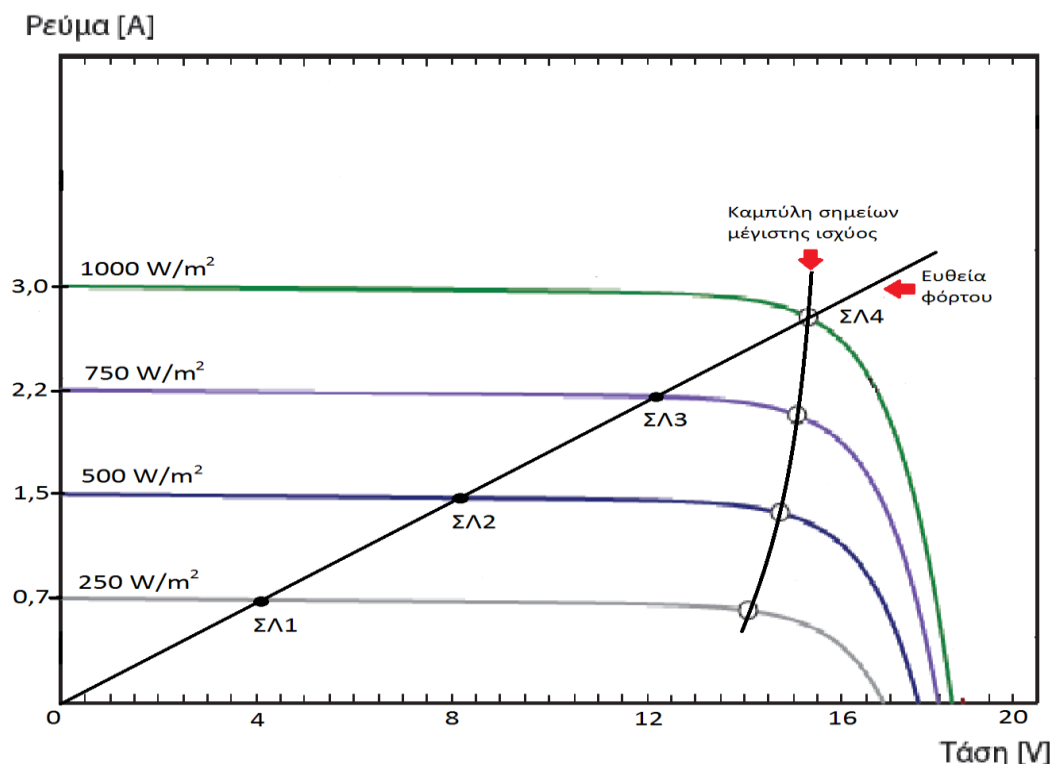
- Η μη πλήρης κάλυψη της γεωμετρικής επιφάνειας του, από την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η οποία καθορίζεται από τον παράγοντα κάλυψης, (Ο παράγων κάλυψης φωτοβολταϊκού πλαισίου ισούται με το πηλίκο της πραγματικής επιφάνειας των φωτοβολταϊκών στοιχείων που αποτελούν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, προς την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου).
- Η ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων, που συνθέτουν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.
- Η ανακλαστικότητα του υαλοπίνακα του πλαισίου.

Σήμερα, η απόδοση για φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι περίπου 15%, ενώ πολυκρυσταλλικού πυριτίου πλαίσια ~12%. Για άμορφου πυριτίου φωτοβολταϊκά πλαίσια συναντάμε απόδοση γύρω στο 10%.

Παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά, και προκαλούν μείωση της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, είναι, η αναπτυσσόμενη υψηλή θερμοκρασία κάτω από την οποία μπορεί να λειτουργούν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του πλαισίου, η εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό τους και οι συνακόλουθες αλλοιώσεις δομής της φωτοβολταϊκής κυψελίδας. Επίσης, σκόνες και άλλα σώματα που προσκολλούν στην επιφάνεια όψης των πλαισίων, μειώνουν την ενεργειακή τους απόδοση. Το μέγεθος της επίδρασης εξαρτάται, από το υλικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου, τον τύπο του και την διαχρονική του αξιοπιστία της μηχανικής κατασκευής και των ηλεκτρολογικών και μονωτικών υλικών.

## **5.4 Σημείο λειτουργίας ΦΒ πλαισίου κάτω από διαφορετικές πυκνότητες ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας**

Στο παρακάτω σχήμα 5.5 αποδίδονται μερικές χαρακτηριστικές καμπύλες I-V, σε διαφορετικές πυκνότητες ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Στο ίδιο σχήμα φαίνονται τα διαφορετικά σημεία λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, που τροφοδοτεί μια σταθερή αντίσταση, σε διαφορετικές πυκνότητες ισχύος προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Παρατηρούμε ότι στα σημεία μέγιστης ισχύος, σε διαφορετικά επίπεδα πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, ορίζουν μια περιοχή ηλεκτρικών τάσεων, μέσα στην οποία κυμαίνεται η τάση στα άκρα της αντίστασης φόρτου. Η περιοχή αυτή εκτείνεται, συνήθως, μεταξύ 14 V και 17 V και, όπως έχει αναφερθεί καλύπτει τις απαιτήσεις φόρτισης ενός τυπικού ηλεκτρικού συσσωρευτή ονομαστικής τάσης 12 V.



**Σχήμα 5.5** Για δεδομένο ωμικό φορτίο, τα σημεία λειτουργίας ΣΛ (1,2,3), που αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού του φωτοβολταϊκού πλαισίου, δεν συμπίπτουν με τα αντίστοιχα σημεία μέγιστης ισχύος, με εξαίρεση, στη συγκεκριμένη περίπτωση, το ΣΛ4, αντίστοιχο της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας  $1\text{kW/m}^2$ .

Το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου, που τροφοδοτεί ένα καταναλωτή διαφορετικό από ωμική αντίσταση, προσδιορίζεται με όμοιο τρόπο. Στο διάγραμμα, που περιέχει την καμπύλη I-V του φωτοβολταϊκού πλαισίου, σχεδιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη φόρτου του καταναλωτή. Το σημείο τομής των δύο καμπυλών αποτελεί το σημείο λειτουργίας του συστήματος.

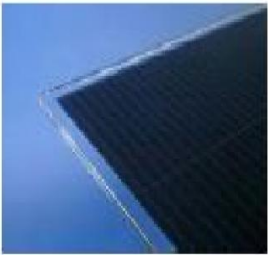


Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση συστήματος στο οποίο το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι συνδεδεμένο σε ηλεκτρικό συσσωρευτή. Η καμπύλη φόρτου, πάνω στην οποία βρίσκονται τα σημεία λειτουργίας του συστήματος, στην περίπτωση αυτή, βρίσκεται πολύ κοντά στην καμπύλη των σημείων μέγιστης ισχύος του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Συνεπώς, με την παρουσία του συσσωρευτή, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, παρέχει στο φόρτο ενέργεια με ισχύ πολύ κοντά στη μέγιστη τιμή, σε αντιστοιχία με την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.

## 5.5 Διάκριση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διακρίνονται, όπως και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- **Φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου**, τα οποία έχουν πολύ καλή απόδοση (15% περίπου). Χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής και έχουν χρώμα σκούρο μπλε.
- **Φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου**, τα οποία έχουν καλή απόδοση (12% περίπου). Το κόστος παρασκευής τους είναι χαμηλότερο από αυτό του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Έχουν χρώμα γαλάζιο που είναι περισσότερο αποδεκτό από τους αρχιτέκτονες για ενσωμάτωση στις κατοικίες.
- **Φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου**, όπου έχουν σχετικά καλή απόδοση (10% περίπου). Το κόστος παρασκευής τους είναι χαμηλό. Χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα δημιουργίας φωτοβολταϊκών στοιχείων συνεχούς κάλυψης μεγάλων επιφανειών (τεχνολογία λεπτών υμενίων - films).

Στον παρακάτω πίνακα 5.6 αποτυπώνεται η διάκριση αυτή των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

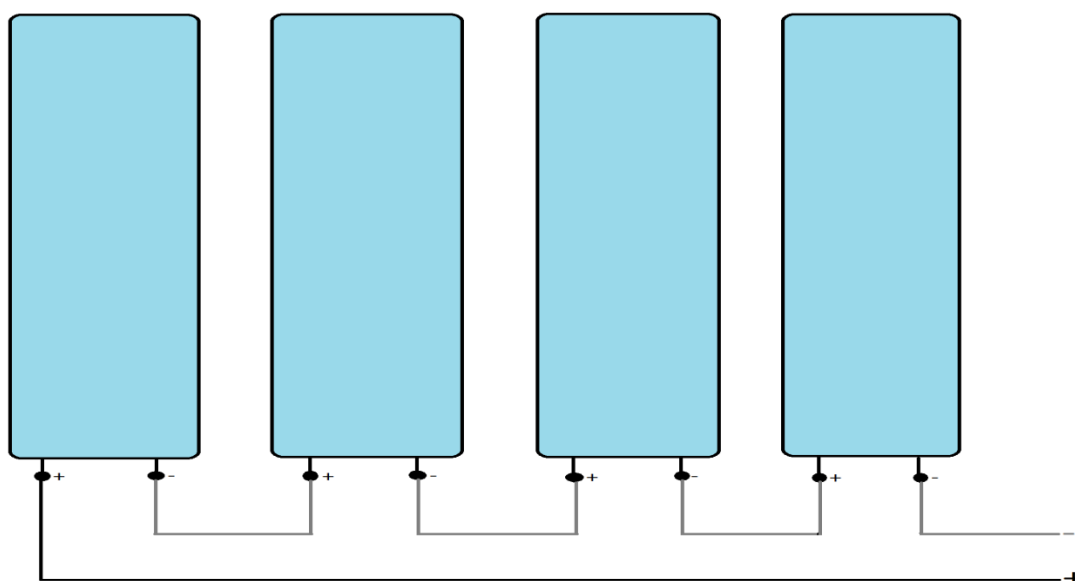
ΤΥΠΟΣ	'Λεπτού υμενίου' ή 'Thin Film'	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Εμφάνιση			
Απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας	~10%	~12%	~15%
Επιφάνεια ανά kWp	9-25 m <sup>2</sup>	7-9 m <sup>2</sup>	5,5-9 m <sup>2</sup>

Πίνακας 5.6

## 5.6 Τρόποι σύνδεσης φωτοβολταϊκών πλαισίων

Ανάλογα με τις απαιτήσεις που έχουμε, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να συνδεθούν σε σειρά, παράλληλα ή σε μεικτή σύνδεση.

Η σύνδεση σε σειρά δύο ή και περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων αυξάνει την τάση στους τελικούς ακροδέκτες του συγκροτήματος, που ονομάζεται στην περίπτωση αυτή **φωτοβολταϊκό panel** (σύνθετο), (σχήμα 5.7). Το φωτοβολταϊκό panel αποτελείται από φωτοβολταϊκά πλαίσια συναρμολογημένα σε ένα μεταλλικό πλαίσιο (συνήθως από αλουμίνιο), με καλωδιώσεις που απολήγουν σε ηλεκτρολογικό κιβώτιο, ως ενιαία κατασκευή, έτοιμη για εγκατάσταση, με δυνατότητα, λόγω μικρού βάρους, εύκολης αφαίρεσης, μεταφοράς ή επέμβασης στα επί μέρους φωτοβολταϊκά πλαίσια, ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες όμοιες μονάδες. Συγκεκριμένα, συνδέοντας σε σειρά  $n$  όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια, έχουμε ένα σύστημα με ανάλογα πολ-λαπλάσια τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{toc} = n \cdot V_{oc}$ ). Το δε ρεύμα του συστήματος (μέγιστο ή βραχυκύκλωσης) είναι ίσο με αυτό του ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ( $I_{tsc} = I_{sc}$ ).



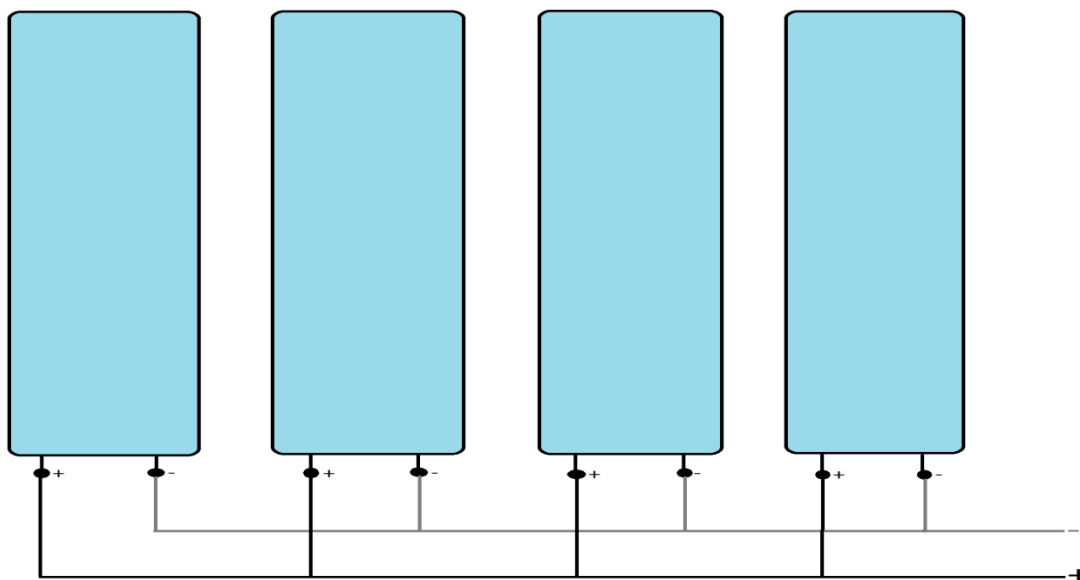
Σχήμα 5.7 Σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά.

Συνδέοντας σε σειρά δύο και περισσότερων καθ' όλα όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων, δημιουργούμε έναν κλάδο σύνδεσης. Η σύνδεση δε σε σειρά πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων ή panel, σε μία επίπεδη συνήθως επιφάνεια αυξάνει πολύ την τάση στους τελικούς ακροδέκτες του συγκροτήματος, που ονομάζεται στην περίπτωση αυτή **φωτοβολταϊκή συστοιχία** (array).

Η σύνδεση παράλληλα δύο ή και περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων αυξάνει την ένταση στους τελικούς ακροδέκτες του συγκροτήματος, που ονομάζεται στην περίπτωση αυτή φωτοβολταϊκό panel. Συγκεκριμένα, συνδέοντας παράλληλα  $n$  όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια, έχουμε ένα σύστημα με ρεύμα (βραχυκύκλωσης ή μέγιστο) που ισούται με  $n$  φορές το ρεύμα (βραχυκύκλωσης ή μέγιστο) του ενός πλαισίου ( $I_{tsc} = n \cdot I_{sc}$ ). Η τάση του συστήματος είναι ίδια με την τάση του ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ( $V_{toc} = V_{oc}$ ), (σχήμα 5.8).

Η παράλληλη σύνδεση πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων ή panel, σε μία επίπεδη συνήθως επιφάνεια αυξάνει πολύ την ένταση στους τελικούς ακροδέκτες του

συγκροτήματος, που ονομάζεται στην περίπτωση αυτή φωτοβολταϊκή συστοιχία (array). Πάντως, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε μία συστοιχία, συνδιάζονται (μεικτή σύνδεση) έτσι ώστε η μεταφορά της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας να γίνεται με τις μικρότερες δυνατές απώλειες στη γραμμή μεταφοράς, δηλαδή, με χαμηλό ρεύμα και αντίστοιχα μεγάλη ηλεκτρική τάση, μέσα στα επιτρεπτά όρια.

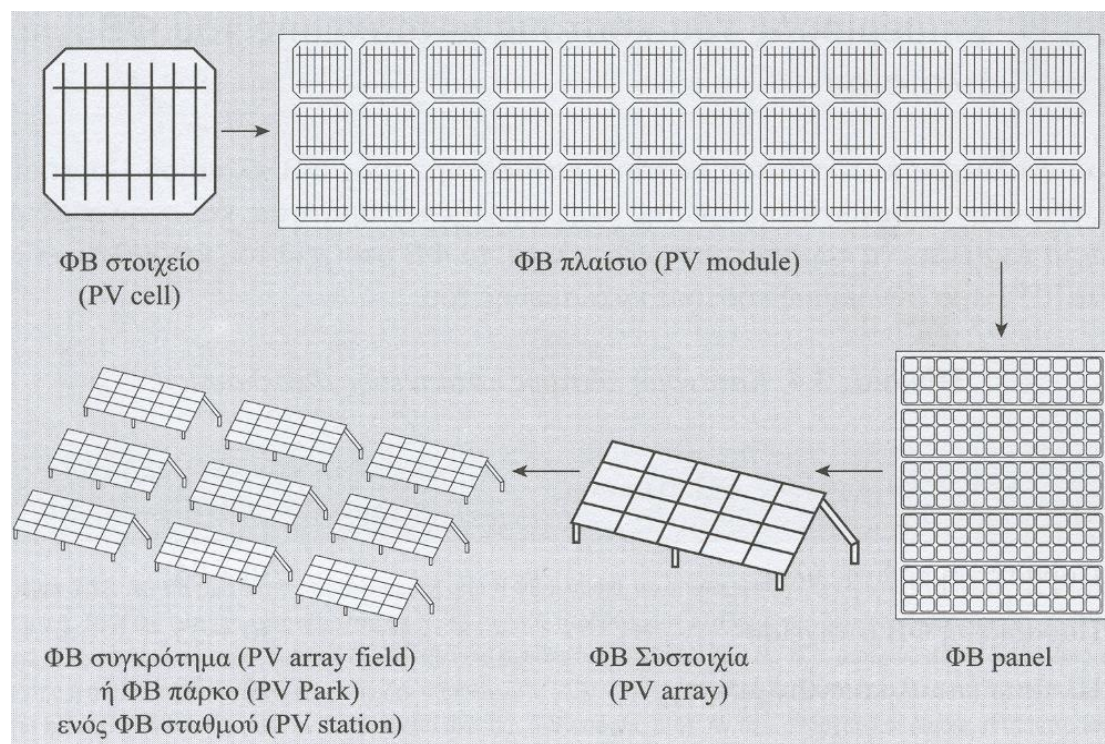


Σχήμα 5.8 Σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων παράλληλα.

Ένα σύνολο φωτοβολταϊκών συστοιχιών, κατάλληλα συνδεδεμένων (σε σειρά, παράλληλα ή μεικτά) ανάλογα με την επιθυμητή τάση και ένταση στους τελικούς ακροδέκτες του συστήματος, ονομάζεται **φωτοβολταϊκό συγκρότημα** ή **φωτοβολταϊκό πάρκο** (σχήμα 5.9). Το φωτοβολταϊκό πάρκο μαζί με τις υπόλοιπες διατάξεις που απαιτούνται για τον έλεγχο της φόρτισης των συσσωρευτών και τη μετατροπή του παραγόμενου συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, αποτελούν το **φωτοβολταϊκό σταθμό**.

Η επιλογή του τρόπου σύνδεσης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών μεταξύ τους, γίνεται με βάση την ονομαστική τάση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (όπως θα δούμε στο επόμενο ΚΕΦ, με την ονομαστική τάση στην είσοδο του μετατροπέα, φορτιστή, συσσωρευτών κλπ.). Η επιλογή του τρόπου σύνδεσης έχει σχέση (ανάλογα και με το μέγεθος της εγκατάστασης) και με τον περιορισμό των απωλειών. Συνδέοντας πολλούς φωτοβολταϊκούς συλλέκτες σε σειρά αυξάνουμε την τάση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης μειώνοντας αντίστοιχα το ονομαστικό ρεύμα του κάθε κλάδου. Το αρχικό κόστος εγκατάστασης σ' αυτή την περίπτωση είναι μεγαλύτερο.

Στο παρακάτω σχήμα 5.9 φαίνονται οι τυπικοί σχηματισμοί σύνθεσης φωτοβολταϊκών στοιχείων και πλαισίων.



Σχήμα 5.9 Ορολογία και τυπικοί σχηματισμοί σύνθεσης φωτοβολταϊκών στοιχείων και πλαισίων.

Για την προστασία των τμημάτων ενούς φωτοβολταϊκού συγκροτήματος, από την εκφόρτιση του συσσωρευτή ή των συσσωρευτών, όταν το σύστημα των πλαισίων δεν παράγει τάση (κατά τη διάρκεια της νύχτας ή στη διάρκεια της ημέρας με πολύ συννεφιά), χρησιμοποιούνται διόδοι αντεπιστροφής. Με τις διόδους αντεπιστροφής αποφεύγουμε τη δημιουργία ρευμάτων μέσα στους παράλληλους κλάδους. Τοποθετούμε διόδους αντεπιστροφής σε κάθε κλάδο και διόδους παράκαμψης σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο ενός κλάδου.

Όλες οι συνδεσμολογίες (διόδοι παράκαμψης ή αντεπιστροφής, γραμμές ισχύος κλπ.) πρέπει να γίνονται μέσα σε στεγανά κουτιά αυξημένης προστασίας (IP68) (σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.10 Στεγανά κουτιά αυξημένης προστασίας.

Οι συνδέσεις πρέπει να είναι σταθερές, για την αποφυγή δημιουργίας τοπικών αντιστάσεων (πτώση τάσης, ανάπτυξη θερμότητας) και η είσοδος – έξοδος των καλωδίων, γίνεται με χρήση ειδικών στεγανών στυπιοθλιπτόν, (σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11 Απεικόνιση στυπιοθλιπτόν.

Τα καλώδια θα πρέπει να είναι ειδικού τύπου (κατάλληλα για εξωτερικό περιβάλλον), εύκαμπτα και στην αλλαγή διεύθυνσης πρέπει να γίνεται σωστή κάμψη. Οι εξωτερικές συνδέσεις των καλωδίων θα πρέπει να γίνονται με ειδικούς στεγανούς συνδετήρες ασφαλείας, ιδιαίτερα σε περιοχές που είναι προσβάσιμες σε παιδιά.

## 5.7 Πλεονεκτήματα φωτοβολταϊκών συλλεκτών

Τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συλλεκτών είναι τα ακόλουθα:

- Δεν έχουν κινούμενα μέρη και παράγουν ισχύ αθόρυβα.
- Δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον με αέρια ή με άλλα κατάλοιπα, αφού δεν λαμβάνει χώρα κάποια χημική αντίδραση.
- Λόγω του σπονδυλωτού τρόπου κατασκευής τους, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να προσαρμοστούν σε όλες τις απαιτήσεις μεγέθους και ζήτησης ισχύος.
- Μπορούν εύκολα να λειτουργήσουν παράλληλα με άλλα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνοντας την αξιοπιστία των συστημάτων.
- Είναι επεκτάσιμα ανάλογα με τις ανάγκες σε φορτίο χωρίς την απαίτηση ειδικής εγκατάστασης.
- Μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα και αξιόπιστα χωρίς την παρουσία κάποιου χειριστή.
- Επειδή δεν χρειάζονται διαρκή παρακολούθηση, έχουν πολύ μικρό κόστος λειτουργίας και συντήρησης.
- Δεν καταναλώνουν καύσιμο.
- Λειτουργούν χωρίς προβλήματα σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και κάτω από όλες τις καιρικές συνθήκες.

- Το ηλιακό κύτταρο δεν αλλοιώνεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του και έχει επίσης μεγάλη διάρκεια ζωής.



# Κεφάλαιο 6

---

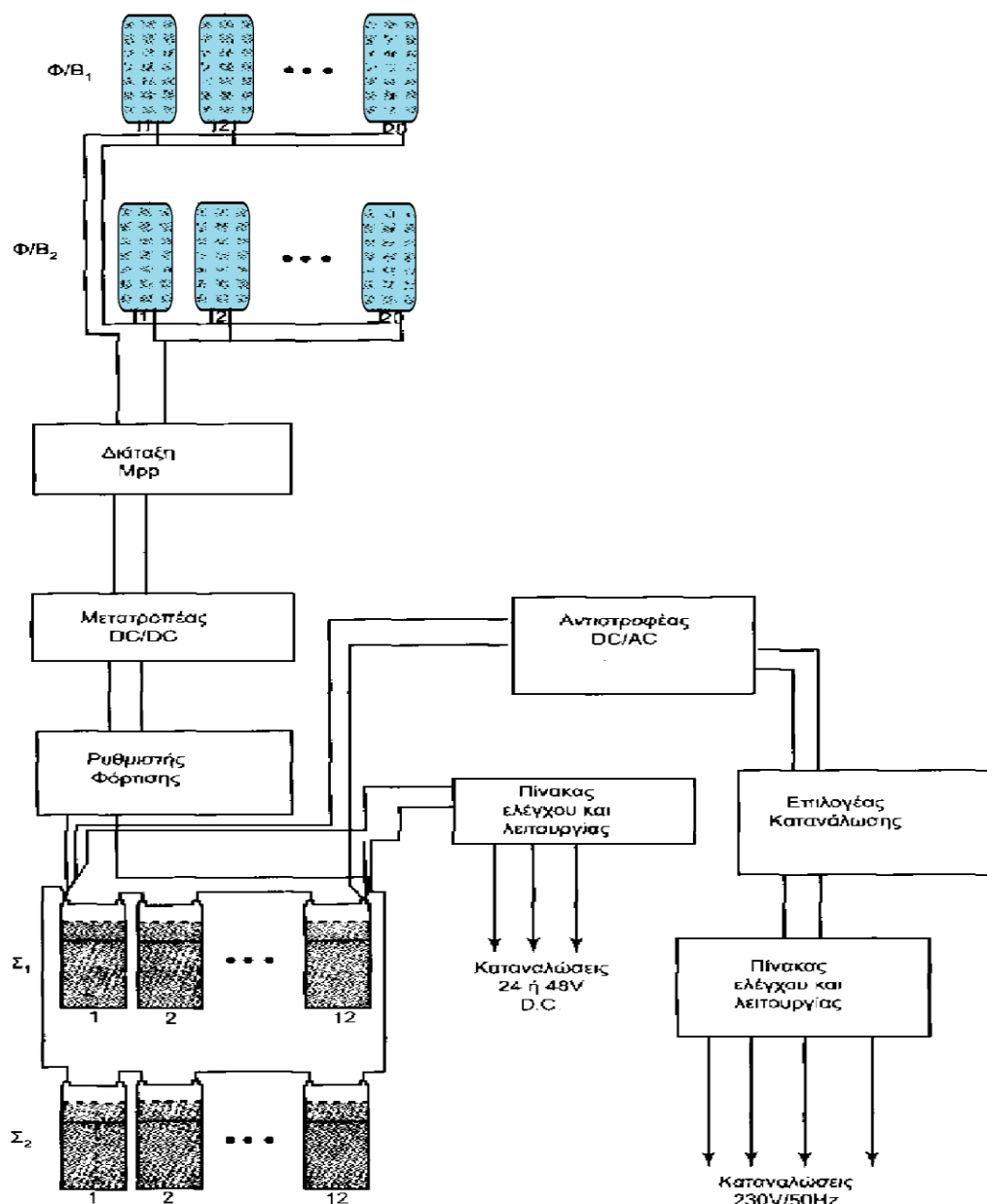
*Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Συστημάτων*

---

## ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

### 6.1 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα

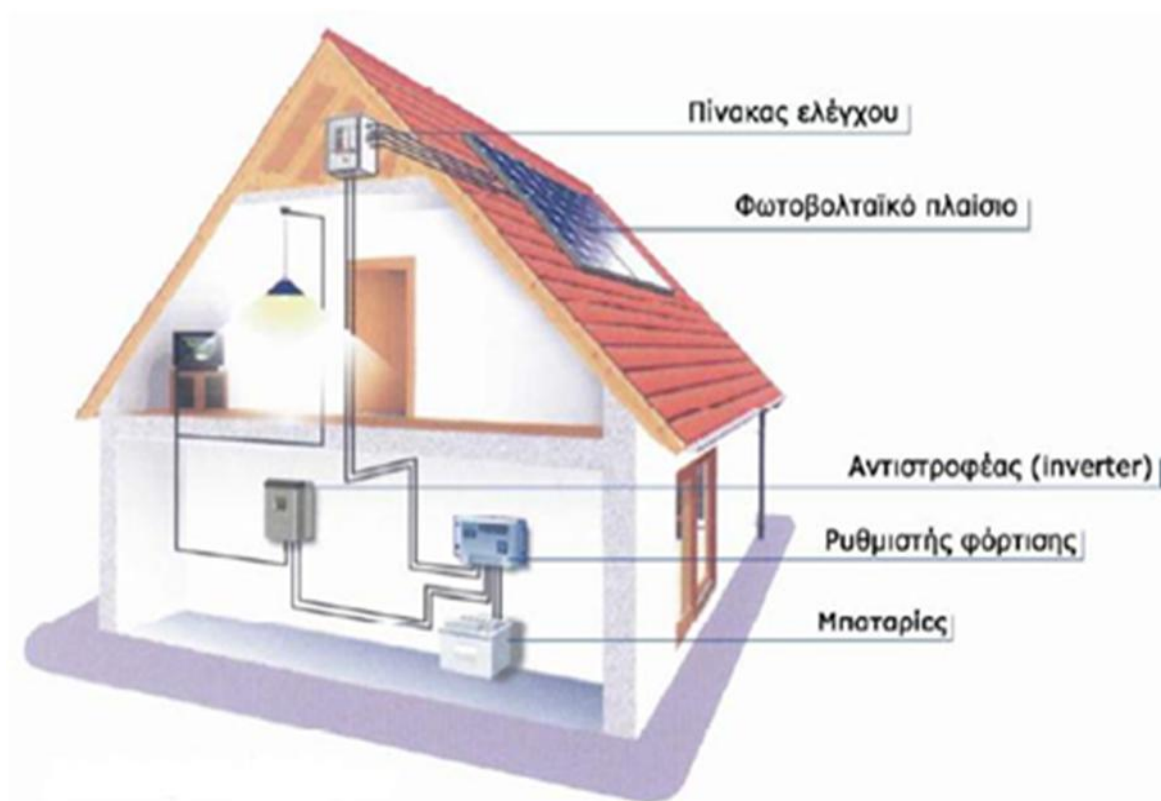
Το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα (σχήμα 6.1 και 6.2), είναι συνήθως εγκατεστημένο μόνιμα και μπορεί να καλύψει τις ανάγκες σε ηλεκτρισμό εξοχικών κατοικιών, σκαφών, αγροικών, θερμοκηπίων, τροχόσπιτων και απομακρυσμένων σταθμών διάφορων μετρήσεων.



Σχήμα 6.1 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα. Φ/Β<sub>1</sub>, Φ/Β<sub>2</sub>, ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων και Σ<sub>1</sub>, Σ<sub>2</sub>, συστοιχίες συσσωρευτών βιομηχανικού τύπου.

Με σωστό υπολογισμό της αναγκαίας σε αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να καλύψει ακόμα και μόνιμες κατοικίες για απεξάρτηση από το βασικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται:

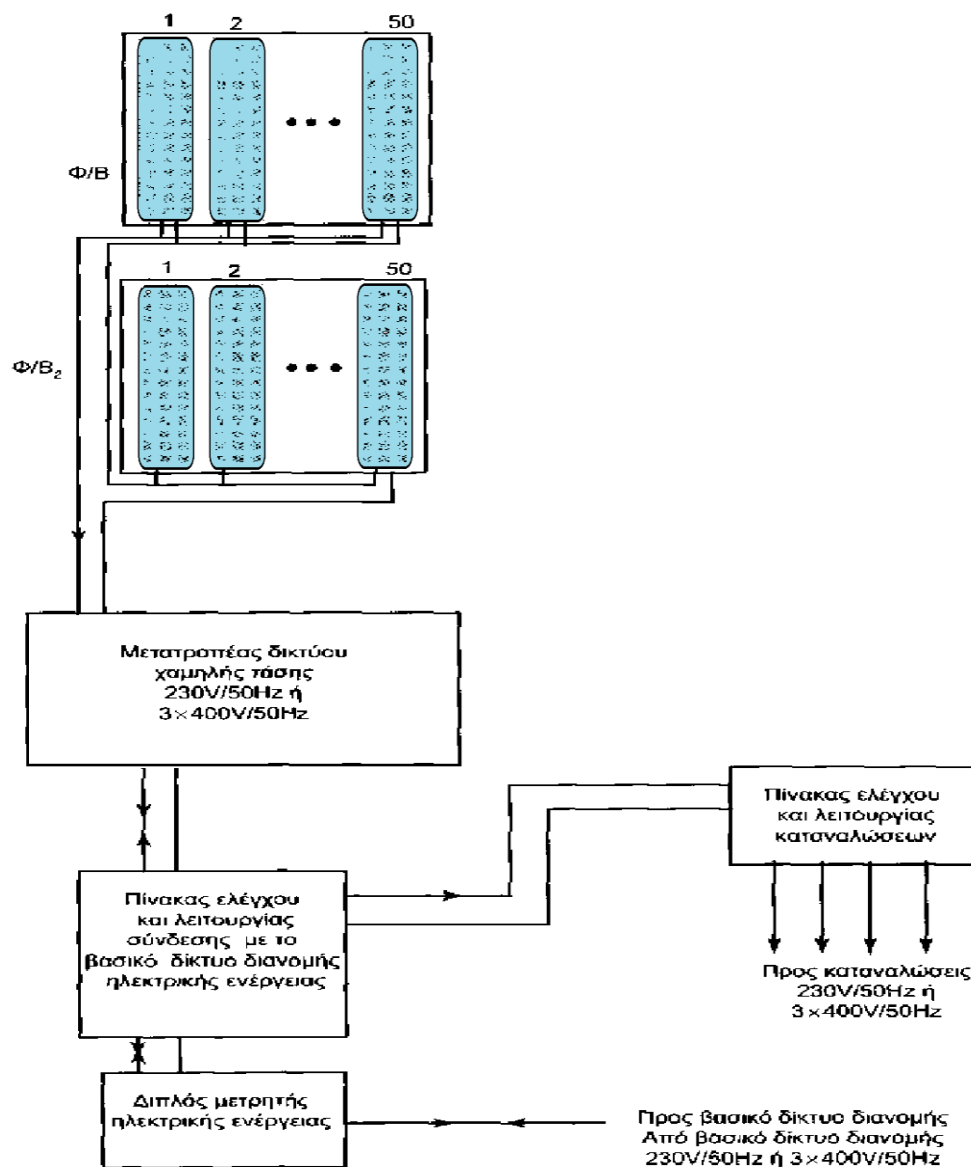
- Από τις ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων για την παραγωγή της αναγκαίας ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας.
- Από την διάταξη λειτουργίας Mpp (προσαρμόζει τη λειτουργία γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος).
- Από τον μετατροπέα DC/DC (προσαρμόζει την τάση εξόδου από τις ομάδες των φωτοβολταϊκών πλαισίων στην επιθυμητή τάση εισόδου του ρυθμιστή-φορτιστή).
- Από τον αυτόνομο ρυθμιστή-φορτιστή των συσσωρευτών αποθήκευσης (ελέγχει και ρυθμίζει τη διαδικασία φόρτισης και αποφόρτισης των συσσωρευτών αποθήκευσης).
- Από τον ηλεκτρονικό αντιστροφέα (inverter) που μετατρέπει τη συνεχή τάση εισόδου σε εναλλασόμενη 230V/50Hz.
- Από τον επιλογέα κατανάλωσης (ελέγχει τη λειτουργία των καταναλώσεων και έχει τη δυνατότητα επιλογής των φορτίων σε περιπτώσεις περιορισμού της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας).
- Από τον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας των καταναλώσεων της ηλεκτρικής εγκατάστασης (φορτία 230V/50Hz).
- Από τον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας ορισμένων καταναλώσεων που θα λειτουργούν με συνεχή τάση 24V ή 48V.



Σχήμα 6.2 Γενική μορφή αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

## 6.2 Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα (με δυνατότητα κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας)

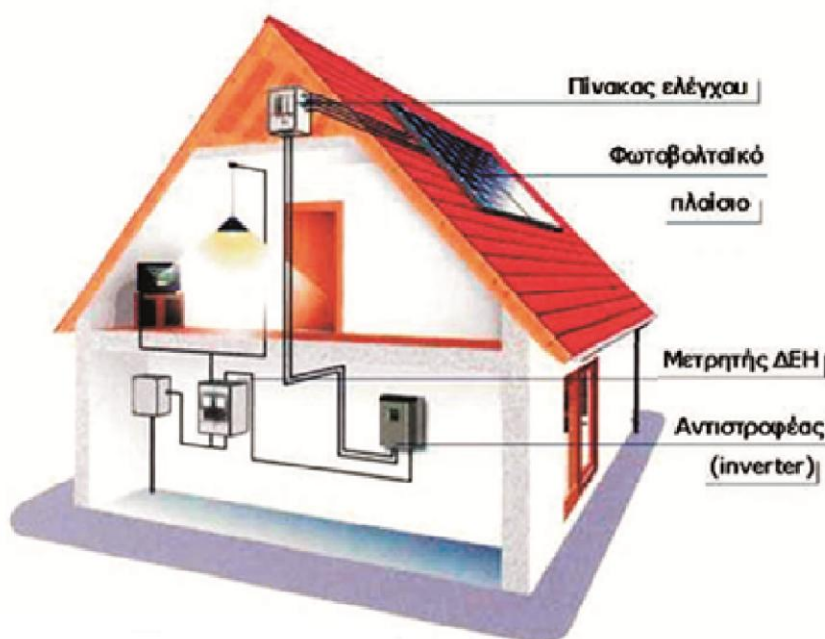
Κατασκευάζεται συνήθως για ισχύ από  $10\text{kW}_p$  και πάνω, με σύνδεση στο βασικό δίκτυο (σχήμα 6.3). Ο ιδιοκτήτης του συστήματος που είναι αυτοπαραγωγός, μπορεί εφόσον το επιθυμεί, να καταναλώνει όσο ηλεκτρική ενέργεια χρειάζεται και να πουλάει την υπόλοιπη, έναντι προσυμφωνημένης τιμής (με κέρδος) στο βασικό δίκτυο (π.χ. τις ηλιόλουστες ημέρες ή όταν απουσιάζει). Επίσης έχει τη δυνατότητα όταν δεν παράγει ηλεκτρική ενέργεια, να καλύπτει τις ανάγκες του από το βασικό δίκτυο, με χρέωση σ' αυτόν από την εταιρεία που εκμεταλλεύεται το βασικό δίκτυο (όταν έχει συννεφιά ή κατά τη διάρκεια της νύχτας).



Σχήμα 6.3 Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα με δυνατότητα κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας.  $\Phi/B_1$ ,  $\Phi/B_2$ , ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι ότι δεν απαιτούνται συσσωρευτές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται:

- Από τις ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων για την παραγωγή μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας.
- Από τον μετατροπέα δικτύου, χαμηλής τάσης, μονοφασικό (230V, 50Hz) ή τριφασικό (3 · 400V, 50Hz).
- Από τον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας, σύνδεσης με το βασικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Από το διπλό μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Από τον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας των καταναλώσεων.



*Σχήμα 6.4 Γενική μορφή διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος με δυνατότητα κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας.*

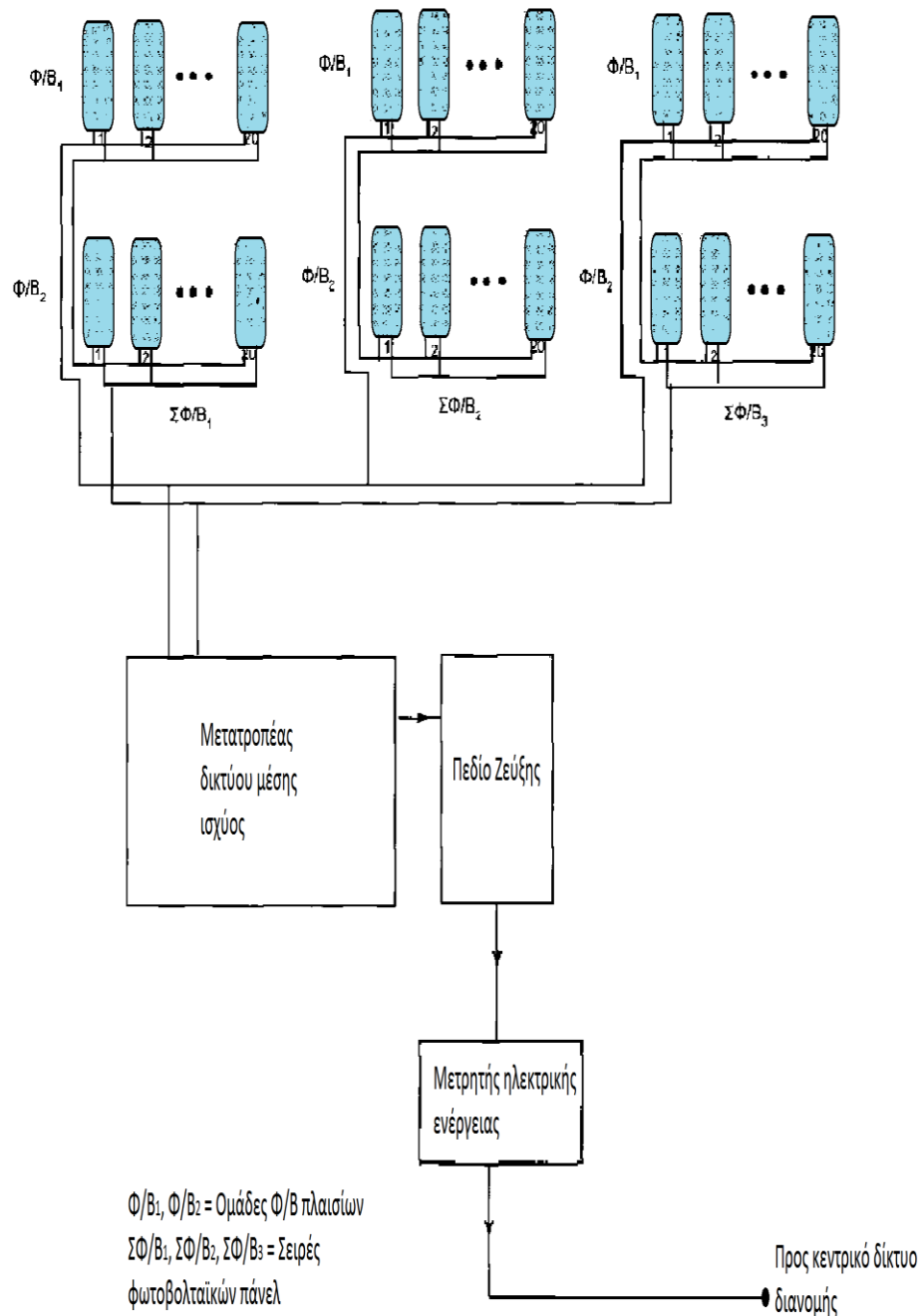
### **6.3 Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα (η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται εξολοκλήρου στο κεντρικό δίκτυο)**

Κατασκευάζεται συνήθως για ισχύ από 50kW<sub>p</sub> και πάνω με σκοπό να διοχετεύει όλη την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο κεντρικό δίκτυο (σχήμα 6.5 και ).

Ανάλογα με την ισχύ των φωτοβολταϊκών συλλεκτών ο μετατροπέας δικτύου μπορεί να είναι:

- Μικρής ισχύος χαμηλής τάσης, μονοφασικός ή τριφασικός.
- Μέσης ισχύος χαμηλής τάσης τριφασικός ( $3 \cdot 400 \text{ V}$ ).
- Μεγάλης ισχύος μέσης τάσης τριφασικός ( $3 \cdot 20 \text{ KV}$ ).

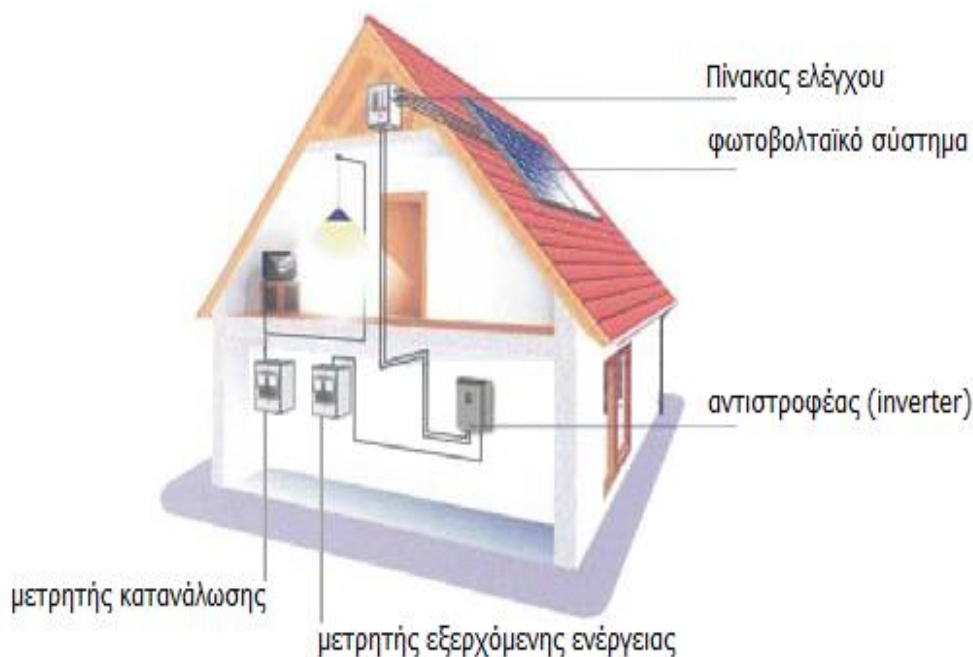
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μορφή των περισσότερων διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων, που κατασκευάζονται από ιδιώτες, με αποκλειστικό σκοπό την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας στην ΔΕΗ.



**Σχήμα 6.5** Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται εξολοκλήρου στο κεντρικό δίκτυο.

Ο μετατροπέας δικτύου συνδέεται με το πεδίο ζεύξης και φέρει ηλεκτρονική διάταξη, που σε περίπτωση διακοπής ρεύματος του κεντρικού δικτύου διανομής, θέτει την φωτοβολταϊκή εγκατάσταση αυτομάτως εκτός. Ένα τέτοιο διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται:

- Από τις ομάδες (σειρές) των φωτοβολταϊκών πάνελ για εγκαταστημένη ισχύ από 50kW<sub>p</sub> και πάνω.
- Από τον μετατροπέα δικτύου με το πεδίο ζεύξης και τον μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Από την κεντρική παροχή σύνδεσης πεδίου ζεύξης και μετασχηματιστή κεντρικού βασικού δικτύου.



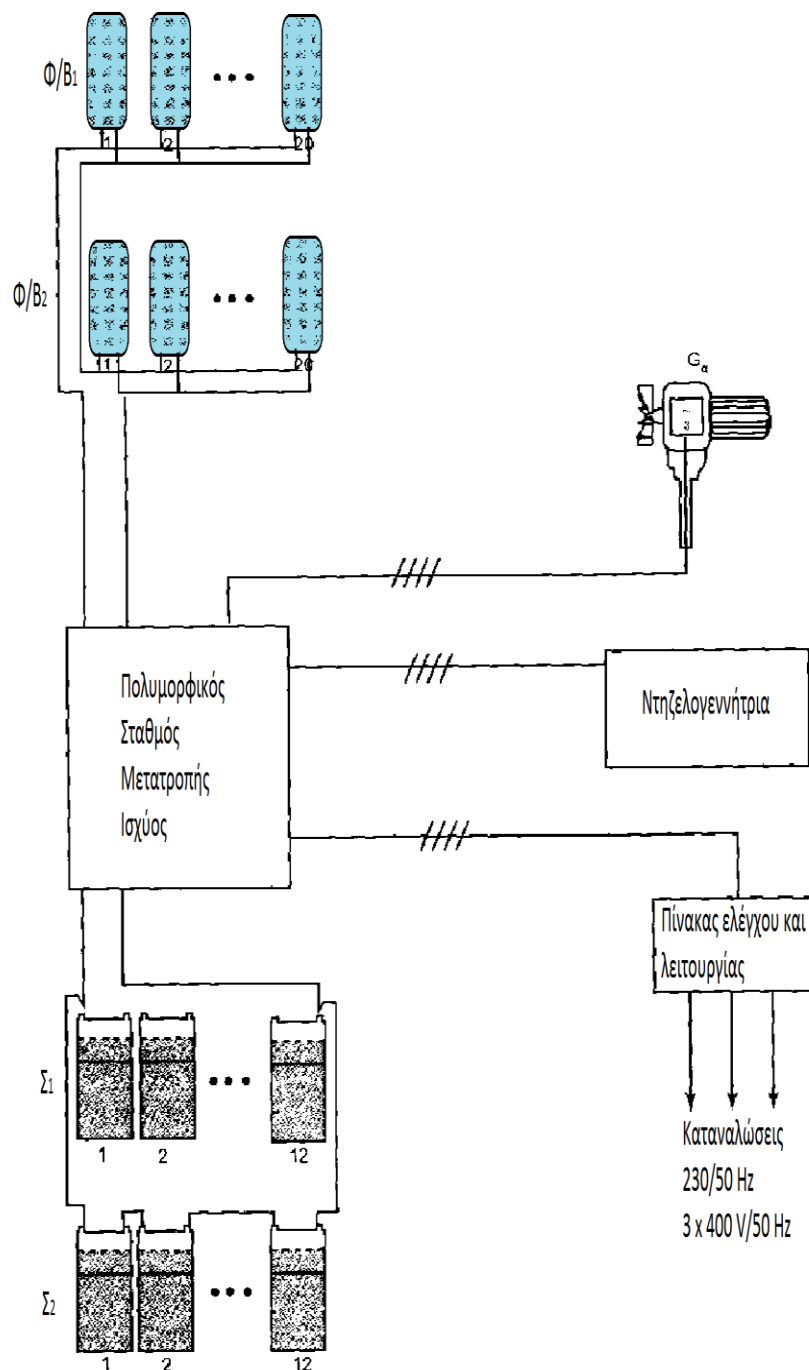
*Σχήμα 6.6* Γενική μορφή διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται εξολοκλήρου στο κεντρικό δίκτυο.

## 6.4 Υβριδικό σύστημα αυτόνομο

Το σύστημα αυτό (σχήμα 6.7) συνδυάζει δύο τουλάχιστον πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (συνδυασμός φωτοβολταϊκών πλαισίων και ανεμογεννήτριας). Μπορεί το σύστημα αυτό να έχει τη δυνατότητα σύνδεσης και με τρίτη πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ντίζελογεννήτρια). Ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα αποτελεί κατάλληλη και βιώσιμη λύση για περιοχές χωρίς πρόσβαση στο βασικό δίκτυο. Μπορεί να περιλαμβάνει και συσσωρευτές αποθήκευσης ηλεκτρικής

ενέργειας για αδιάλειπτη λειτουργία των εγκαταστάσεων που τροφοδοτεί. Ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα περιλαμβάνει:

- Τις ομάδες των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Την ανεμογεννήτρια.
- Τον πολυμορφικό σταθμό μετατροπής ισχύος και αδιάλειπτης λειτουργίας.
- Τους συσσωρευτές αποθήκευσης.
- Τον πίνακα τροφοδοσίας των καταναλώσεων.



**Σχήμα 6.7** Υβριδικό σύστημα αυτόνομο,  $\Phi/B_1$ ,  $\Phi/B_2$ , ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων,  $G_a$  ανεμογεννήτρια,  $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_2$ , συσσωρευτές αποθήκευσης.



## 6.5 Υβριδικό σύστημα διασυνδεδεμένο

Συνδυάζει δύο ή και περισσότερες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (συνδυασμός φωτοβολταϊκών πλαισίων, ανεμογεννήτριας, νηξελογεννήτριας και συσσωρευτών αποθήκευσης). Όταν ένα υβριδικό σύστημα συνδέεται με το κεντρικό δίκτυο διανομής ή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι αναγκαία η νηξελογεννήτρια και οι συσσωρευτές αποθήκευσης.

Το σύστημα αυτό, αποτελεί την καλύτερη δυνατή λύση για νησιωτικές περιοχές και μπορεί να παρέχει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια έχοντας ως τελευταία λύση την λειτουργία της νηξελογεννήτριας.

Στην πράξη τα διασυνδεδεμένα υβριδικά συστήματα κατασκευάζονται για μεγάλη ισχύ και εξυπηρετούν πολλές καταναλώσεις. Ένα διασυνδεδεμένο υβριδικό σύστημα περιλαμβάνει:

- Τις ομάδες των φωτοβολταϊκών πλαισίων που συνήθως αποτελούν το φωτοβολταϊκό πάρκο.
- Την ομάδα των ανεμογεννητριών που συνήθως αποτελούν το αιολικό πάρκο.
- Την νηξελογεννήτρια.
- Τον πολυμορφικό σταθμό μετατροπής ισχύος.
- Τους συσσωρευτές αποθήκευσης που συνήθως αποτελούν τις συστοιχίες.

## 6.6 Ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες)

Όταν μία εγκατάσταση με φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αλλά λειτουργεί αυτόνομα, θα πρέπει να αποθηκεύει ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας την οποία έχει ανάγκη τις νυχτερινές ώρες ή τις ημέρες με συννεφιά (μικρή ή μηδενική ηλιοφάνεια). Το μέγεθος της ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να αποθηκεύεται εξαρτάται από τις ανάγκες που έχουμε σε ημερήσια βάση και από την πρόβλεψη που κάνουμε για ημέρες με μηδενική ηλιοφάνεια και αποτελεί στοιχείο υπολογισμού.

Η τοποθέτηση των συσσωρευτών γίνεται μέσα σε ιδιαίτερο χώρο (τμήμα αποθήκευσης ηλεκτροστασίου). Ο χώρος αυτός πρέπει να αερίζεται επαρκώς και η τοποθέτηση των συσσωρευτών θα πρέπει να γίνεται σε σειρές, με άνετο χώρο για παρακολούθηση και συντήρηση. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στις συνδέσεις των ακροδεκτών στους πόλους των συσσωρευτών ή των δίβολτων στοιχείων μεγάλης χωρητικότητας. Οι συνδέσεις θα πρέπει να γίνονται με ειδικά περιλαίμια και κοχλίες και να τοποθετείται στη συνέχεια αντισκοριακό υλικό.

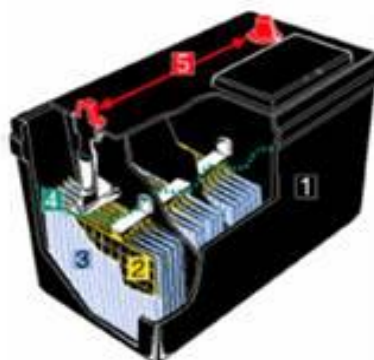
Υπάρχουν διάφοροι τύποι συσσωρευτών με την ονομασία τους να προέρχεται από τον τύπο των ηλεκτροδίων κατασκευής τους. Έτσι έχουμε τους συσσωρευτές μολύβδου ( $Pb-H_2SO_4$ ), που είναι οι πιο διαδεδομένοι στα φωτοβολταϊκά συστήματα,

λόγο των πολλών πλεονεκτημάτων που έχουν και του μικρού σχετικά κόστους. Επίσης άλλοι τύποι συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ο νικελίου-καδμίου (Niced), νατρίου-θείου, ψευδαργύρου-βρωμίου, ψευδαργύρου-χλωρίου κ.λ.π.

## 6.7 Συσσωρευτές μολύβδου ( $P_b - H_2SO_4$ )

Οι συσσωρευτές μολύβδου αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια από τα οποία το θετικό (κάθοδος), είναι κατασκευασμένο από διοξείδιο του μολύβδου ( $PbO_2$ ) και το αρνητικό (άνοδος), από μεταλλικό μόλυβδο ( $Pb$ ). Τα δύο ηλεκτρόδια τοποθετούνται μέσα σε ειδικό ανθεκτικό κιβώτιο το οποίο γεμίζεται με ηλεκτρολύτη (διάλυμα  $H_2SO_4$  20%) που μπορεί να είναι σε μορφή ζελέ ή σε υδαρή μορφή.

Κατά τη διαδικασία της φόρτισης, δηλαδή τη σύνδεση των πόλων του συσσωρευτή με πηγή συνεχούς ρεύματος ελεγχόμενης τάσης, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε χημική. Ενώ κατά τη διαδικασία της εκφόρτισης, δηλαδή την σύνδεση των πόλων του συσσωρευτή με ηλεκτρική κατανάλωση, η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Στο παρακάτω σχήμα 6.8 φαίνεται σε τομή ένας συσσωρευτής μολύβδου.



**Σχήμα 6.8** Συσσωρευτής μολύβδου σε τομή 1) Το κέλυφος 2) Πλάκες εσωτερικά θετικές και αρνητικές από μόλυβδο και οξείδιο του Μολύβδου 3) Διαχωριστικές πλάκες από συνθετικό υλικό 4) Διάλυμα θειικού οξέος σε νερό, ηλεκτρολύτης 5) Τους πόλους από μόλυβδο, οι πόλοι είναι τα σημεία σύνδεσης της μπαταρίας με τα φορτία.

Κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών μολύβδου είναι:

- α) **Ονομαστική τάση συσσωρευτή ( $U_n$ ).** Η ονομαστική τάση ενός στοιχείου συσσωρευτή μολύβδου είναι 2,25 V περίπου. Ανάλογα με τα στοιχεία που έχουμε συνδεδεμένα σε σειρά, έχουμε συσσωρευτές με ονομαστικές τάσεις 2,6,12, και 24 V.
- β) **Τάση φόρτισης.** Ο συσσωρευτής μολύβδου πρέπει να φορτίζεται με ειδικό φορτιστή και με τάση που ορίζεται από τον κατασκευαστή. Η τάση φόρτισης θα πρέπει να είναι σταθερή. Ο συσσωρευτής γενικά θεωρείται φορτισμένος όταν η τάση του κάθε στοιχείου φτάσει τα 2,4 V, δηλαδή σε μία μπαταρία των έξι στοιχείων

ονομαστικής τάσης  $U_n=12\text{ V}$ , η τάση στους πόλους φθάνει τα  $14,4\text{ V}$ .

γ) **Τάση συντήρησης.** Είναι η τάση που πρέπει να εφαρμόζεται από μία πηγή συνεχούς ρεύματος, στους πόλους του συσσωρευτή, έτσι ώστε αυτός να παραμένει συνεχώς φορτισμένος.

δ) **Ρεύμα φόρτισης.** Το ρεύμα φόρτισης ορίζεται από τον κατασκευαστή και είναι αυτό με το οποίο πρέπει να φορτίζεται για να έχουμε μέγιστη διάρκεια ζωής. Το ρεύμα φόρτισης θα πρέπει να κυμαίνεται από  $0,1\text{ C}$  μέχρι  $0,2\text{ C}$ . Για παράδειγμα, σε ένα τυπικό συσσωρευτή μολύβδου  $12\text{ Volts}$  και χωρητικότητα  $18\text{ Ah}$ , το ρεύμα φόρτισης θα πρέπει να είναι  $I=0,1 \cdot 18=1,8\text{A}$ , όπου είναι το ιδανικό ρεύμα φόρτισης για να έχουμε μέγιστη διάρκεια ζωής. Στην περίπτωση αυτή ο χρόνος φόρτισης του συσσωρευτή θα είναι  $t_f=18/1,8=10\text{h}$ . Σε περιπτώσεις όπου το ρεύμα φόρτισης ξεπερνά το  $0,2\text{ C}$ , τότε ο χρόνος φόρτισης είναι μικρότερος, όμως η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή μειώνεται αισθητά. Γενικά, όσο μακρύτερη είναι η περίοδος φόρτισης, τόσο υψηλότερη είναι η τελική στάθμη της χωρητικότητας και τόσο καλύτερη είναι η κατάσταση του συσσωρευτή. Οι συσσωρευτές μολύβδου δεν πρέπει να υπερφορτίζονται. Κατά την υπερφόρτιση ο υδατικός ηλεκτρολύτης εξατμίζεται και πρέπει να συμπληρωθεί με απεσταγμένο νερό. Αν ο συσσωρευτής είναι σφραγισμένος αυξάνεται η πίεση και ανοίγει η βαλβίδα ανακούφισης για να φύγουν τα αέρια.

ε) **Τάση εκφόρτισης.** Ως τάση εκφόρτισης ορίζεται η μικρότερη τιμή που μπορεί να υπάρχει στους ακροδέκτες του συσσωρευτή χωρίς αυτός να κινδυνεύει να καταστραφεί. Αν για οποιοδήποτε λόγο η τάση στους ακροδέκτες κατέβει κάτω από αυτή την τιμή (ορίζεται από τον κατασκευαστή και είναι συνήθως  $2,00\text{ V}$  ανά στοιχείο), θα πρέπει μέσω ειδικής διάταξης (κατάλληλος αυτοματισμός) να αποσυνδεθούν τα φορτία από τον συσσωρευτή.

στ) **Ρεύμα εκφόρτισης.** Ορίζεται ως το ρεύμα εκείνο που εξαντλεί την χωρητικότητα του συσσωρευτή χωρίς αυτός να κινδυνεύει (τάση ανά στοιχείο από  $2,4$  σε  $2\text{ V}$ ). Το ρεύμα αυτό ισούτε με το  $1/20$  της ονομαστικής χωρητικότητας του συσσωρευτή.

ζ) **Χρόνος ζωής συσσωρευτή.** Οι συσσωρευτές δεν πρέπει να φορτίζονται για μεγάλο χρονικό διάστημα με πολύ υψηλή τάση γι' αυτούς (overcharging), ούτε να εκφορτίζονται κάτω από ένα κρίσιμο γι' αυτούς όριο (overdischarging). Η διαδικασία αυτή καθορίζει το χρόνο ζωής τους. Η υπερφόρτιση έχει σαν αποτέλεσμα την ηλεκτρόλυση και την παραγωγή υδρογόνου με ταυτόχρονη έντονη ελάττωση της στάθμης του ηλεκτρολυτικού διαλύματος (απώλεια νερού). Ο χρόνος ζωής των συσσωρευτών εκφράζεται σε κύκλους λειτουργίας (φόρτιση-εκφόρτιση).

η) **Ονομαστική και πρακτική χωρητικότητα.**

Ονομαστική χωρητικότητα είναι η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον συσσωρευτή και τη μετράμε σε αμπερώρια (Ah). Η χωρητικότητα των συσσωρευτών καθορίζεται με  $0,05\text{ C}$ , που σημαίνει ότι για χωρητικότητα  $50\text{Ah}$  μπορεί να εκφορτίζεται με  $2,5\text{A}$  για χρόνο  $20$  ώρες.

Πρακτική χωρητικότητα είναι η ενέργεια που παίρνουμε από τον συσσωρευτή με τις συγκεκριμένες συνθήκες εργασίας. Στην πράξη οι συσσωρευτές εκφορτίζονται με πολύ μεγάλα ρεύματα, με αντίστοιχη μείωση της χωρητικότητας τους. Ένας συσσωρευτής με ονομαστική χωρητικότητα  $50\text{Ah}$ , όταν εκφορτίζεται με  $1\text{C}$  ( $I_M=50$

Ah) μπορεί να αποδώσει μόνο το 30% της ονομαστικής του χωρητικότητας. Δηλαδή 15 Ah.

θ) **Αυτοεκφόρτιση συσσωρευτή.** Ένας φορτισμένος συσσωρευτής εκφορτίζεται ακόμη και αν δεν είναι συνδεδεμένος σε φορτίο (αυτοεκφόρτιση). Η αυτοεκφόρτιση οφείλεται στη συνεχή δράση του θεικού οξέος ( $H_2SO_4$ ), στα ηλεκτρόδια του συσσωρευτή κατά την οποία ο μόλυβδος (Pb) και το διοξείδιο του μολύβδου ( $PbO_2$ ), μετατρέπονται σε θεικό μόλυβδο ( $Pb SO_4$ ) με εκλυόμενα αέρια υδρογόνο ( $H_2$ ) και οξυγόνο ( $O_2$ ). Η αυτοεκφόρτιση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του συσσωρευτή. Σε θερμοκρασία 5 °C, το ηλεκτρικό φορτίο ελαττώνεται κατά 2% περίπου το μήνα. Σε θερμοκρασία 15 °C, το ηλεκτρικό φορτίο ελαττώνεται κατά 4% περίπου το μήνα, ενώ σε θερμοκρασία 25 °C, το ηλεκτρικό φορτίο ελαττώνεται κατά 10% περίπου το μήνα.

ι) **Ενέργεια που αποδίδει ένας συσσωρευτής.** Θεωρητικά η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε έναν συσσωρευτή υπολογίζεται από το γινόμενο της τάσης επί την χωρητικότητα του. Η ενέργεια που μας δίνει στην πράξη ένας συσσωρευτής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_k = \beta \cdot Q \cdot U_\beta \cdot h_\sigma$$

όπου:

$E_k$  = η ενέργεια που μας δίνει στην πράξη ο συσσωρευτής σε Wh.

$\beta$  = το βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή.

$Q$  = η χωρητικότητα του συσσωρευτή σε Ah.

$U_\beta$  = η τάση εκφόρτισης του συσσωρευτή σε V.

$h_\sigma$  = ο βαθμός απόδοσης του συσσωρευτή που συνήθως λαμβάνεται 0,85.

ια) **Αναγκαία χωρητικότητα συσσωρευτή.** Όταν λέμε αναγκαία χωρητικότητα συσσωρευτή, εννοούμε τη χωρητικότητα εκείνη, που πρέπει να έχει ο συσσωρευτής ή η συστοιχία των συσσωρευτών, για να έχουμε ενέργεια ικανή να καλύψει τις ανάγκες μας, στην πιο δυσμενή περίπτωση συνεχούς νέφωσης. Σύμφωνα με τα στοιχεία της μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας (θεωρητικός και πραγματικός αριθμός ωρών ηλιοφάνειας), τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο έχουμε την μικρότερη ηλιοφάνεια, ενώ τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο, τη μεγαλύτερη. Έτσι η δυσμενέστερη περίπτωση παρουσιάζεται τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο όπου η χωρητικότητα των συσσωρευτών πρέπει να είναι τέτοια, που να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των φορτίων, για διάρκεια μίας εβδομάδας. Παράδειγμα, για ημερήσια αναγκαία φορτία που η μέση τιμή τους είναι 50 kWh για τους μήνες Δεκέμβριο ή Ιανουάριο, θα πρέπει η συστοιχία των συσσωρευτών να είναι σε θέση να μας δώσει (για μία εβδομάδα με μηδενική ηλιοφάνεια),  $E_k = 50 \cdot 7 = 350$  kWh ή 350.000 Wh. Για να επιτύχουμε τόσο μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκευμένη, θα πρέπει να συνδέσουμε κατάλληλα, περισσότερους από έναν συσσωρευτές.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι διαφορετικές κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται οι συσσωρευτές μολύβδου, ανάλογα με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις των εφαρμογών, για τις οποίες προορίζονται.

α/α	Σύστημα χρήσης	Εφαρμογές	Παρατηρήσεις
1	Εκκίνησης, φωτισμού και έναυσης (Starting, Lighting and Ignition, SLI)	Αυτοκίνητα, σκάφη και αεροσκάφη	Υψηλά ρεύματα σύντομης διάρκειας, δηλαδή αβαθείς εκφορτίσεις.
2	Διατάξεις έκτακτης τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας	UPS, τηλεφωνία, κ.α.	Αβαθείς εκφορτίσεις
3	Στατικής ή βιομηχανικής χρήσης	Υποβρύχια, τραίνα	Σχετικά μικρά ρεύματα εκφόρτισης, βαθιές εκφορτίσεις, μεγάλος χρόνος ζωής (πολλοί κύκλοι λειτουργίας)
4	Ηλεκτρικών οχημάτων	Οχήματα φόρτωσης, εκφόρτωσης και μεταφοράς εμπορευμάτων, ηλεκτρικά αυτοκίνητα κ.α.	Βαθείς εκφορτίσεις, μεγάλος χρόνος ζωής (πολλοί κύκλοι λειτουργίας)
5	Αποθήκευσης ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας (ΦΒ συσσωρευτές)	Αυτόνομα ΦΒ συστήματα (Stand alone PV systems) και υβριδικά συστήματα	Ίδιας κατηγορίας όπως οι συσσωρευτές βιομηχανικής χρήσης και ηλεκτρικών οχημάτων

## 6.8 Συνδεσμολογία συσσωρευτών

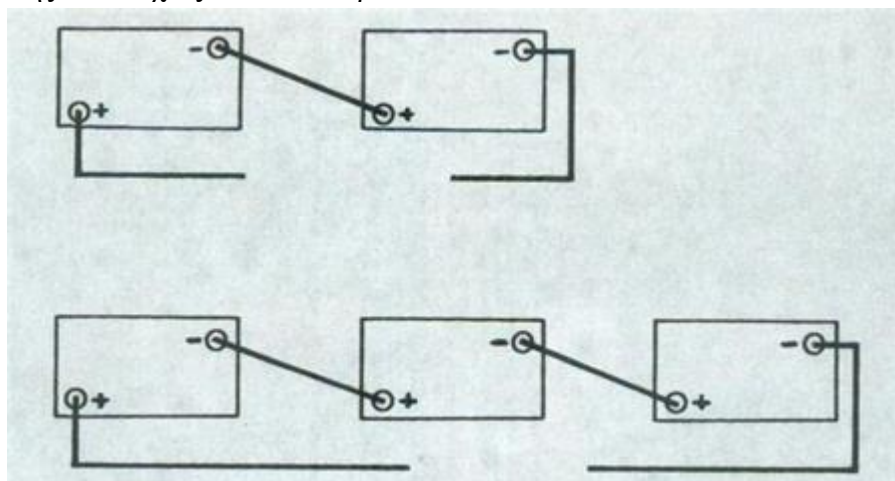
Στις μικρές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, όπου η ανάγκη για αποθηκευμένη ενέργεια δεν είναι ιδιαίτερα αυξημένη, μπορούμε και με έναν συσσωρευτή, κατάλληλης ονομαστικής τάσης και χωρητικότητας να έχουμε κάλυψη.

Στις μεσαίες και ιδιαίτερα στις μεγάλες εγκαταστάσεις με φωτοβολταϊκά και στις περιπτώσεις αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων, η ανάγκη για αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια είναι μεγάλη. Σ' αυτές τις περιπτώσεις συνδέουμε κατάλληλα περισσότερους από έναν συσσωρευτές. Η σύνδεση γίνεται με τη βοήθεια ειδικών εξαρτημάτων (συνδετήρες) τα οποία τοποθετούμε στους πόλους των συσσωρευτών (θετικός + και αρνητικός -). Οι συσσωρευτές συνδέονται μεταξύ τους με τρεις τρόπους:

### α) Σύνδεση σε σειρά.

Στην περίπτωση αυτή (σχήμα 6.9), συνδέουμε τον αρνητικό πόλο του πρώτου

συσσωρευτή με τον θετικό του δεύτερου και συνεχίζουμε έτσι με όλους τους προς σύνδεση συσσωρευτές. Ο θετικός πόλος του πρώτου συσσωρευτή και ο αρνητικός του τελευταίου, μας δίνουν τους τελικούς ακροδέκτες τροφοδοσίας της συγκεκριμένης συστοιχίας των συσσωρευτών.



Σχήμα 6.9 Σύνδεση δύο ή και περισσότερων συσσωρευτών σε σειρά.

Η συνολική ονομαστική τάση της συστοιχίας είναι ίση με το άθροισμα των ονομαστικών τάσεων όλων των συσσωρευτών που συνδέονται σε σειρά. Ενώ η συνολική ονομαστική χωρητικότητα της συστοιχίας είναι ίση με τη χωρητικότητα του ενός συσσωρευτή, δηλαδή:

$$U_{ολ} = U_1 + U_2 + \dots + U_v$$

$$Q_{ολ} = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_v$$

Η συνολική ονομαστική ένταση της συστοιχίας είναι παντού η ίδια και είναι ίση με την ονομαστική ένταση του ενός συσσωρευτή, δηλαδή:

$$I_{ολ} = I_1 = I_2 = \dots = I_v$$

Για την συνδεσμολογία σε σειρά, οι συσσωρευτές θα πρέπει να έχουν τα ίδια ονομαστικά μεγέθη (τάση, ένταση, χωρητικότητα). Στην πράξη συνδέουμε τους συσσωρευτές σε σειρά, όταν θέλουμε να έχουμε μεγάλη τάση και μικρή σχετικά ένταση.

### β) Παράλληλη σύνδεση

Στην περίπτωση αυτή συνδέουμε μαζί όλους τους θετικούς πόλους των συσσωρευτών και έχουμε τον θετικό πόλο της συστοιχίας και όλους τους αρνητικούς και έχουμε τον αρνητικό πόλο της συστοιχίας (σχήμα 6.10).

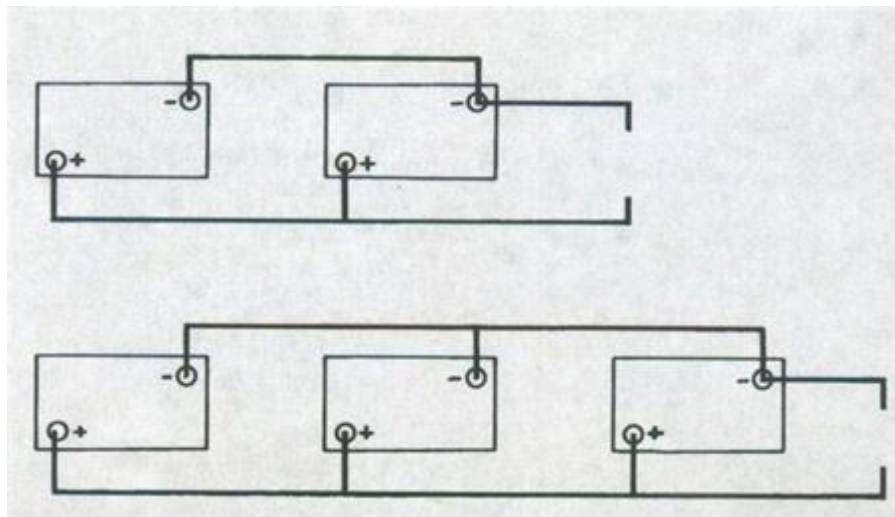
Η συνολική ονομαστική χωρητικότητα της συστοιχίας είναι ίση με το άθροισμα των επί μέρους χωρητικότητων των συσσωρευτών που είναι συνδεδεμένοι παράλληλα, ενώ η συνολική ονομαστική τάση της συστοιχίας είναι ίση με την τάση του ενός συσσωρευτή, δηλαδή:

$$Q_{ολ} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_v$$

$$U_{ολ} = U_1 = U_2 = \dots = U_v$$

Η συνολική ονομαστική ένταση της συστοιχίας είναι ίση με το άθροισμα των επί μέρους εντάσεων των συσσωρευτών που είναι συνδεδεμένοι παράλληλα, δηλαδή:

$$I_{ολ} = I_1 + I_2 + \dots + I_v$$

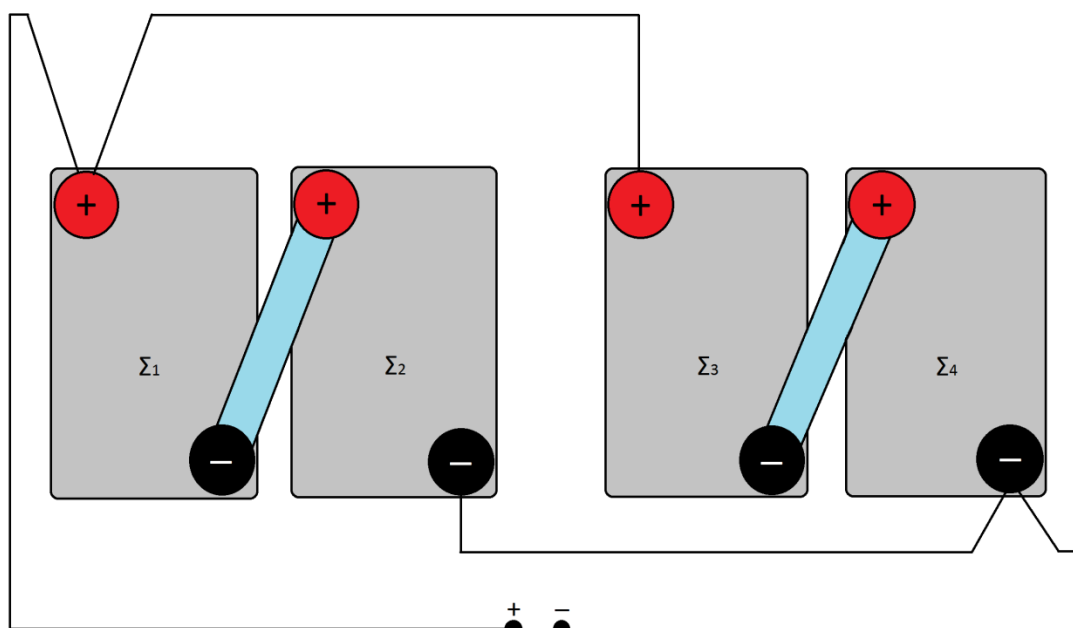


Σχήμα 6.10 Σύνδεση δύο ή και περισσότερων συσσωρευτών παράλληλα.

Για την παράλληλη σύνδεση, οι συσσωρευτές θα πρέπει να έχουν τα ίδια ονομαστικά μεγέθη (τάση, ένταση, χωρητικότητα). Στην πράξη συνδέουμε τους συσσωρευτές παράλληλα, όταν θέλουμε να έχουμε μεγάλη χωρητικότητα (μεγάλη ένταση) και μικρή σχετικά τάση.

### γ) Μικτή σύνδεση

Η μικτή σύνδεση (σχήμα 6.11) χρησιμοποιείται για να έχουμε τη δυνατότητα σε μία συστοιχία να πάρουμε τελικά και μεγάλη τάση και μεγάλη χωρητικότητα (μεγάλη ένταση).



Σχήμα 6.11 Μικτή σύνδεση συσσωρευτών.

Η σύνδεση αυτή συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της σύνδεσης σε σειρά και της σύνδεσης παράλληλα. Έτσι στην περίπτωση αυτή έχουμε:

- $U_{1,2} = U_1 + U_2$  και  $U_{3,4} = U_3 + U_4$
- $U_{ολ} = U_{1,2} = U_{3,4}$
- $I_{1,2} = I_1 = I_2$  και  $I_{3,4} = I_3 = I_4$
- $I_{ολ} = I_{1,2} + I_{3,4}$
- $Q_{1,2} = Q_1 = Q_2$  και  $Q_{3,4} = Q_3 = Q_4$
- $Q_{ολ} = Q_{1,2} + Q_{3,4}$

Στην πράξη στην μικτή σύνδεση χρησιμοποιούμε τα ίδια ονομαστικά μεγέθη (τάση, ένταση, χωρητικότητα).

## 6.9 Ελεγκτής φόρτισης-εκφόρτισης

Η διαχείριση της ενέργειας που παράγουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα, απαιτεί την χρήση ηλεκτρονικών διατάξεων κατάλληλων για τη βελτιστοποίηση της αποθήκευσης, της μεταφοράς και της προστασίας του συστήματος και ειδικά των συσσωρευτών από υπερφόρτιση ή από υπερεκφόρτιση. Η ηλεκτρονική διάταξη για τον έλεγχο και την προστασία των συσσωρευτών είναι ο «Ελεγκτής – Ρυθμιστής φόρτισης - εκφόρτισης» (charge controller). Η διάταξη αυτή μπορεί να αποτελεί αυτοτελή μονάδα, μπορεί όμως και να βρίσκεται ενσωματωμένη με τον μετατροπέα (inverter), σε μία ολοκληρωμένη ηλεκτρονική μονάδα.

Η φόρτιση των συσσωρευτών, μέσω μιας πηγής ηλεκτρικής ενέργειας, π.χ. φωτοβολταϊκής συστοιχίας, ανεμογεννήτριας, ή ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, απαιτεί το συνεχή έλεγχο της κατάστασης φόρτισης τους, ώστε, όταν αυτοί φτάσουν στην κατάσταση μέγιστης φόρτισης, να διακόπτεται η διαδικασία. Έτσι, αποφεύγεται η υπέρταση του συσσωρευτή, η οποία θα είχε ως συνέπεια την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου, λόγω ηλεκτρόλυσης και συνακόλουθα μείωση της στάθμης του διαλύματος. Αντίστοιχα, απαιτείται έλεγχος του συσσωρευτή, όσο αυτός τροφοδοτεί την κατανάλωση, ώστε να προληφθεί η καταστροφική για τον συσσωρευτή, κατάσταση υπερεκφόρτισης (ελεγκτής εκφόρτισης).

Γενικά ο ελεγκτής φόρτισης – εκφόρτισης, στην πιο περιορισμένη του μορφή, εποπτεύει τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης ώστε να απομονώνει το σύστημα αποθήκευσης, αφενός από το σύστημα παραγωγής της ενέργειας, στην περίπτωση της υπερφόρτισης, και αφετέρου από το σύστημα κατανάλωσης, στην περίπτωση της υπερεκφόρτισης. Και στις δύο περιπτώσεις, η διακοπή αυτή προκαλείται όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή ξεπεράσει, προς τα άνω και αντίστοιχα προς τα κάτω, ορισμένα όρια τάσης (setpoints). Η διακοπή αυτή όταν έχουμε υπερφόρτιση ή υπερεκφόρτιση αντίστοιχα, επιτυγχάνεται από ένα σύνολο ολοκληρωμένων συστη-



μάτων που ελέγχουν ηλεκτρικούς διακόπτες, ηλεκτρομηχανικούς διακόπτες (relays), ηλεκτρονικά ισχύος (tranzistors, thyristors, triacs κ.λ.π).

## 6.10 Τύποι ελεγκτών φόρτισης-εκφόρτισης

Στο εμπόριο υπάρχουν πολλοί τύποι ελεγκτών – ρυθμιστών φόρτισης, από την πιο απλή μορφή, μέχρι την πιο σύνθετη. Η επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή – ρυθμιστή φόρτισης έχει σχέση με τις απαιτήσεις του συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας, το μέγεθος και το κόστος της εγκατάστασης.

- **Ρυθμιστές φόρτισης μικρής ισχύος.**

Έχουν σχεδιαστεί για μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα, με ισχύ από 10 W μέχρι και 100 W (σχήμα 6.12), και έχουν την δυνατότητα αποσύνδεσης του συσσωρευτή σε περίπτωση υπερφόρτισης ή υπερεκφόρτισης ή αποσύνδεσης του φορτίου, λόγω χαμηλής τάσης του συσσωρευτή. Παρέχουν ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενο τρόπο φόρτισης με προστασία βαθιάς αποφόρτισης και ενσωματωμένο αισθητήρα θερμοκρασίας.

Φέρουν πλήρη ηλεκτρονική προστασία από υπέρταση φωτοβολταϊκού συλλέκτη, ανάστροφη πολικότητα συλλέκτη ή συσσωρευτή, υπερφόρτιση και βραχυκύκλωμα στην κατανάλωση. Έχουν ενδείξεις, κατάσταση φόρτισης, επίπεδο φόρτισης συσσωρευτή, αποσύνδεσης λόγω χαμηλής τάσης συσσωρευτή, υπερφόρτιση / βραχυκύκλωμα. Οι ρυθμιστές αυτοί, είναι κατάλληλοι για μικρές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σε μικρές αγροικίες, τροχόσπιτα και εφαρμογές ελεύθερου χώρου.

- **Ρυθμιστές φόρτισης χαμηλής ισχύος.**




Έχουν σχεδιαστεί για φωτοβολταϊκά συστήματα με ισχύ από 100 W μέχρι 1000 W (σχήμα 6.12). Παρέχουν εξαιρετικές ενδείξεις, προγραμματισμό και λει-τουργίες ασφάλειας. Το επίπεδο φόρτισης του συσσωρευτή επιδεικνύεται σαφώς με ένα ιστόγραμμα, καθώς επίσης και οι ενεργειακές ροές από και προς το συσσωρευτή και η κατάσταση των καταναλώσεων (π.χ. υπερφόρτιση, βραχυκύκλωμα φορτίου κ.λ.π.).

Η λειτουργία προστασίας βαθιάς αποφόρτισης, μπορεί να ρυθμιστεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους: ελεγχόμενη από τάση, ελεγχόμενη από το επίπεδο φόρτισης του συσσωρευτή ή προσαρμοστική ρύθμιση (πολυπλοκότητας). Έχουν ενσωματωμένη λειτουργία ακουστικής προειδοποίησης όπως επίσης και προγραμματιζόμενη λειτουργία φωτισμού τη νύχτα.

- **Ρυθμιστές ενεργειακών συστημάτων.**

Προσφέρουν πλήρη έλεγχο του κύκλου φόρτισης και τροφοδοσίας φορτίου (σχήμα 6.12), φέρουν ελεγκτή πολλαπλών λειτουργιών που μπορεί να ανοίξει ή να κλείσει την ισχύ σύμφωνα με τα κριτήρια που τίθενται από το

χρήστη. Παρέχουν πλήρη ασφάλεια και έχουν τη δυνατότητα για κάθε ένδειξη ή μέτρηση μεγέθους.

Τύπος	Ρυθμιστές μικρής ισχύος	Ρυθμιστές χαμηλής ισχύος	Ρυθμιστές ενεργειακών συστημάτων
Εικόνα			
Τάση συστήματος	12 V ή 24 V	12 V ή 24 V	48 V
Μέγιστο ρεύμα φόρτισης	8 A	30 A	40 A
Μέγιστο ρεύμα κατανάλωσης	8 A	30 A	40 A
Τάση εκκινήσεως φόρτισης	11.8 V ή 23.6 V	11.1 V ή 22.2 V	42.8 V
Τάση διακοπής φόρτισης	14 V ή 27.2 V	13.1 V ή 25.2 V	50.4 V
Αυτοκατανάλωση	< 4 mA	< 4 mA	< 4 mA
Θερμοκρασία λειτουργίας	-20 έως +60 °C	-30 έως +70 °C	-30 έως +70 °C
Διαστάσεις (ΠxΥxΜ)	95x101x35 mm	142x96x34 mm	188x90x48 mm
Βάρος (g)	120 g	270 g	370 g

**Σχήμα 6.12** Ρυθμιστές φόρτισης για μέγιστη υποστηρίξιμη ισχύς εισόδου φωτοβολταϊκών, έως και 100 W, 720 W και 2000 W αντίστοιχα.

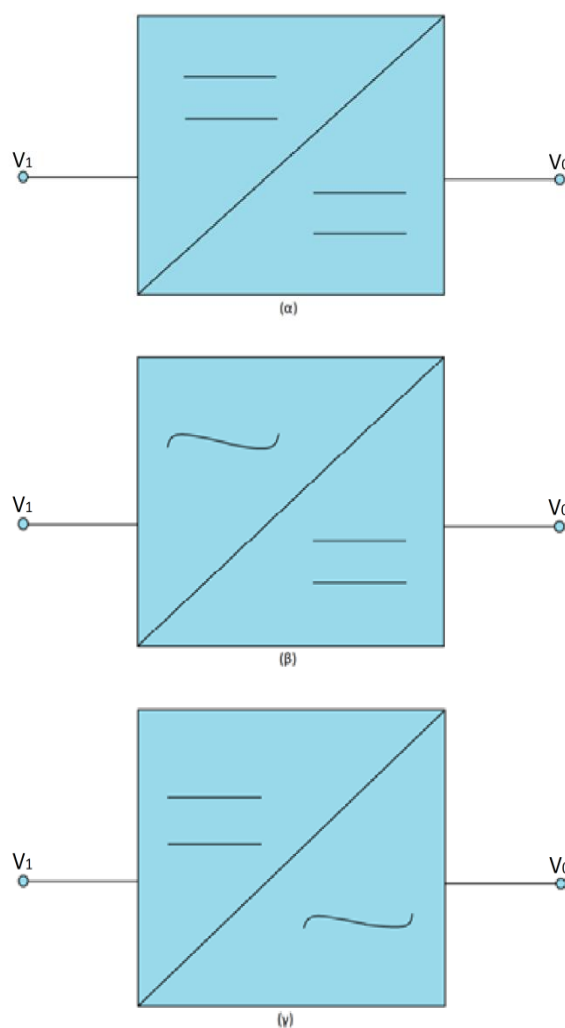
## 6.11 Μετατροπείς (converters)

Οι μετατροπείς (converters), είναι ηλεκτρονικές διατάξεις που μετατρέπουν:

- Συνεχές ρεύμα σε συνεχές οποιασδήποτε τάσης (DC-DC conversion).
- Συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο οποιουδήποτε πλάτους (DC-AC conversion).
- Εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή (AC-DC conversion).

Στην πράξη μπορεί να αποτελεί χωριστή μονάδα ή να αποτελεί ενιαία ηλεκτρονική διάταξη με τον ελεγκτή – ρυθμιστή φόρτισης. Όταν αποτελεί ενιαία διάταξη, η λειτουργία του είναι να προσαρμόζει την τάση που παράγει το σύστημα, στην τάση του συστήματος αποθήκευσης, ώστε να γίνεται πλήρη εκμετάλλευση της διαθέσιμης ενέργειας.

Οι συμβολικές παραστάσεις των τριών τύπων μετατροπέων είναι:



α) DC-DC β) AC-DC γ) DC-AC

## 6.12 Μετατροπείας DC – DC

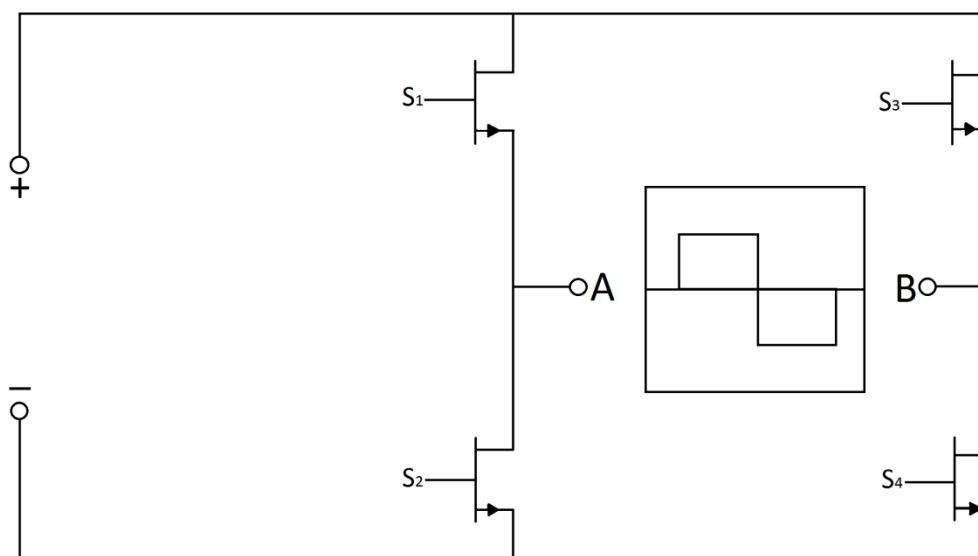
Η μετατροπή μιας συνεχούς τάσης, σε συνεχή με διαφορετική τιμή (μικρότερη ή μεγαλύτερη) γίνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις, συμβάλλοντας στη μείωση των απωλειών στη γραμμή μεταφοράς, από το χώρο παραγωγής στο χώρο κατανάλωσης.

Στο χώρο των φωτοβολταϊκών πλαισίων έχουμε σύνδεση των συλλεκτών σε σειρά ή παράλληλα, ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να μεταφέρεται, με όσο επιτρέπεται, υψηλή τάση για να έχουμε χαμηλό ρεύμα στη γραμμή μεταφοράς και επομένως χαμηλές απώλειες. Στο χώρο της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ο μετατροπέας DC-DC, προσαρμόζει την τάση των φωτοβολταϊκών πλαισίων ή της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στην τάση του συσσωρευτή, ώστε να υπάρχει πλήρη εκμετάλλευση της ενέργειας και επιπλέον να μην έχουμε συνθήκες υπέρτασης του συσσωρευτή. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν απόδοση περίπου 90%.

Στη διάταξη ενσωματώνεται μικροελεγκτής, ο οποίος, ελέγχει συνεχώς και επιβάλλει την προσαρμογή του σημείου λειτουργίας του συστήματος, που παράγει την ηλεκτρική ενέργεια, με το σημείο μέγιστης ισχύος, που καθορίζεται από τις συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Ο μικροελεγκτής ονομάζεται διάταξη παρακολούθησης Σημείου Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point Tracking Mpp<sub>T</sub>).

## 6.13 Μετατροπείας DC-AC (inverter)

Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος (DC) σε εναλλασσόμενο (AC) γίνεται πλέον με μία καθαρά ηλεκτρονική διάταξη, τον ηλεκτρονικό μετατροπέα DC-AC (inverter). Ο μετατροπέας αυτός είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος που μετατρέπει συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη (μονοφασική ή τριφασική). Η βασική αρχή λειτουργίας του περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα 6.13. Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε περιπτώσεις που διαθέτουμε πηγή συνεχούς ηλεκτρικής τάσεως και καταναλωτές εναλλασσόμενης, όπως συμβαίνει π.χ. στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές οικιακής ή βιομηχανικής χρήσεως. Αποτελείται από ηλεκτρονικούς διακόπτες (π.χ. bipolar tranzistors ισχύος, MOSFETs, thyristors κ.λπ.), η συνδυασμένη λειτουργία των οποίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σειράς τετραγωνικών παλμών, διαδοχικά ορθών και ανεστραμμένων (Inversion), παράγοντας έτσι ηλεκτρικό σήμα, που πλησιάζει πολύ την ημιτονική μορφή.



**Σχήμα 6.13** Βασική αρχή λειτουργίας του inverter.  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , τα διακοπτικά στοιχεία. Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (DC-AC conversion), επιτυγχάνεται με κλείσιμο – άνοιγμα των διακοπτικών στοιχείων, ανά δύο, χιαστί (1, 4 και 2, 3). Όσο τα  $S_1, S_4$  είναι αγώγιμα και τα  $S_2, S_3$  σε αποκοπή, τα σημεία  $A$  και  $B$  έχουν πρόσημα + και – αντίστοιχα. Όταν συμβαίνει το αντίστροφο, τα  $A$  και  $B$  έχουν πρόσημα – και + αντίστοιχα. Μ' αυτό τον τρόπο δημιουργείται η εναλλασσόμενη τετραγωνική τάση (κέντρο του διαγράμματος).

Ο inverter έχει πολύ καλή απόδοση που κυμαίνεται συνήθως από 93 έως 97%, η λειτουργία τους όμως συνοδεύεται, κατά περίπτωση, από παραγωγή μεγάλου πλήθους αρμονικών υψηλής συχνότητας. Οι αρμονικές, ιδιαίτερα σε περίπτωση σύνδεσης με το δίκτυο διανομής, προκαλούν προβλήματα και πρέπει πριν την σύνδεση, να τοποθετούνται ειδικές ηλεκτρονικές διατάξεις (φίλτρα). Στην πράξη, έχουμε τους μετατροπείς DC-AC δικτύου (μετατρέπουν την DC τάση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε AC τάση δικτύου) και τους μετατροπείς DC-AC συσσωρευτών (μετατρέπουν την DC τάση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε DC τάση των συσσωρευτών και την DC τάση των συσσωρευτών σε AC τάση κατανάλωσης ή δικτύου).

## 6.14 Μετατροπείς DC-AC δικτύου

Οι μετατροπείς DC-AC δικτύου, κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη και καλύπτουν μία μεγάλη κατηγορία εφαρμογών. Είναι κατάλληλοι για οικιακές ή βιομηχανικές εφαρμογές και καλύπτουν τις ανάγκες των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής, μεσαίας ή μεγάλης ισχύος.

➤ **Μετατροπείς DC-AC δικτύου μικρής ισχύος χαμηλής τάσης μονοφασικοί**

- Είναι εύκολοι στην εγκατάσταση (μειωμένες σχετικά δαπάνες εγκατάστασης).
- Είναι κατάλληλοι και για εσωτερική και εξωτερική εγκατάσταση.
- Φέρουν ειδική αδιάβροχη διάταξη για τη σύνδεση με το συνεχές και εναλλασσόμενο ρεύμα.
- Έχουν προστασία από υπέρταση και υπερένταση.
- Έχουν δυνατότητα για διάγνωση και επικοινωνία ενσύρματα ή ασύρματα.
- Καλύπτουν ένα εκτεταμένο πεδίο λειτουργίας από  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Τύπος	SB-3000TL	SB-5000TL
Εικόνα		
<b>ΜΕΓΕΘΗ ΕΙΣΟΔΟΥ (INPUT DC)</b>		
Μέγιστη Φ/Β ισχύς ( $P_{pv}$ )	4000 W	6250 W
Μέγιστη DC ισχύς ( $P_{DC, max}$ )	3200 W	5300 W
Μέγιστη DC τάση ( $U_{DC, max}$ )	550 V	600 V
Φ/Β περιοχή λειτουργίας MPPT ( $U_{pv}$ )	188V – 440 V	250 V – 480 V
Ελάχιστη DC τάση εισόδου (min. DC Voltage)	125 V	250 V
Μέγιστο ρεύμα εισόδου ( $I_{pv, max}$ )	17 A	21 A
Μέγιστος αριθμός strings (παράλληλα)	2	4
DC αποσύνδεση	Συνδετήρες καλωδίων Snap	Συνδετήρες καλωδίων Snap
Θερμικά ελεγχόμενα varistors	ναι	ναι
Έλεγχος διαρροής ρεύματος	ναι	ναι

Τύπος	SB-3000TL	SB-5000TL
<b>ΜΕΓΕΘΗ ΕΞΟΔΟΥ (OUTPUT AC)</b>		
Μέγιστη AC ισχύς ( $P_{AC, max}$ )	3000 W	5000 W
Ονομαστική AC ισχύς ( $P_{AC, nom}$ )	3000 W	5000 W
Περιοχή λειτουργίας της AC (τάσης $U_{AC}$ )	198 V – 260 V	211 V – 260 V
Αρμονικές	< 4 %	< 4 %
AC συχνότητα (FAC)	59.5 Hz – 60.5 Hz	59.3 Hz – 60.5 Hz
Διαφορά φάσης (cosφ)	1	1
Προστασία βραχυκυκλώματος	Ναι, έλεγχος ρεύματος	Ναι, έλεγχος ρεύματος
<b>ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ</b>		
Μέγιστη απόδοση	97 %	96,8 %
<b>ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</b>		
Διαστάσεις (Π/Υ/Μ)	470/445/180 (mm)	470/490/225 (mm)
Βάρος	22 kg	31 kg

**Πίνακας 6.14** Τεχνικά χαρακτηριστικά μετατροπέων δικτύου μικρής ισχύος, SB-4000TL και SB-5000TL (μονοφασικοί χαμηλής τάσης).

➤ **Μετατροπείς DC-AC μέσης ισχύος χαμηλής τάσης, τριφασικοί**

- Δυνατότητα σύνδεσης των συσκευών σε δίκτυο χαμηλής τάσης.
- Φέρουν ηλεκτρομαγνητικό διακόπτη ζεύξης – απόζευξης πεδίο DC με ηλεκτρικό servo κινητήρα.
- Έχουν προστασία υπέρτασης και κρουστικών τάσεων εντάσεων πεδίο DC και AC
- Έχουν διάταξη διόρθωσης αέργου ισχύος.
- Έχουν την δυνατότητα ελέγχου της εγκατάστασης και αξιολόγησης των στοιχείων.
- Έχουν πεδίο τάσης εισαγωγής και επιλογής από 300V DC μέχρι 600V DC.
- Στην έξοδο τους μας δίνουν τριφασική τάση χαμηλής τιμής 3 · 400 V και συχνότητα 50 Hz.

Τύπος	SMA-SC100	SC125LV
Εικόνα	 SMA Solar Technology AG	
<b>ΜΕΓΕΘΗ ΕΙΣΟΔΟΥ (INPUT DC)</b>		
Προτεινόμενη μέγιστη PV- ισχύς ( $P_{pv}$ )	110 kWp	145 kWp
Περιοχή DC τάσης MPPT ( $U_{pv}$ )	250 V – 600 V	300V – 600V
Μέγιστη τάση εισόδου ( $U_{pv, max}$ )	650 V	650 V
Μέγιστη ένταση εισόδου ( $I_{pv, max}$ )	430 A	448 A
Μέγιστος αριθμός strings (παράλληλα)	3	5
Προστασία DC υπέρτασης	ναι	ναι
<b>ΜΕΓΕΘΗ ΕΞΟΔΟΥ (OUTPUT AC)</b>		
Ονομαστική AC ισχύς ( $P_{AC, nom}$ )	100 kW	125 kW
Λειτουργική τάση $\pm 10 \%$	400 V	400 V
Ονομαστική AC ένταση ( $I_{AC, nom}$ )	145 A	180 A
AC συχνότητα (FAC)	50 Hz – 60 Hz	50 Hz – 60 Hz
Αρμονικές	< 3 %	< 3 %
Μετατόπιση φάσης (cosφ)	1	1
Προστασία AC υπέρτασης	ναι	ναι




Τύπος	SMA-SC110	SC125LV
<b>ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ</b>		
Μέγιστη απόδοση	95 %	94 %
<b>ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</b>		
Διαστάσεις (Πλάτος/Υψος/Βάθος)	1800/2000/850 (mm)	2000/2120/850 (mm)
Βάρος	1160 kg	1460kg

**Πίνακας 6.15** Τεχνικά χαρακτηριστικά μετατροπέων δικτύου μέσης ισχύος, SMA-SC100 και SC125LV (τριφασικοί χαμηλής τάσης).

➤ **Μετατροπέας DC-AC μεγάλης ισχύος μέσης τάξης**

- Έχουμε αύξηση της απόδοσης παραγωγής και μείωση κόστους λόγω άμεσης σύνδεσης σε μέση τάση.
- Φέρει M/I, M/T και κάλυμμα για υπαίθρια εγκατάσταση.
- Φέρει ηλεκτρομαγνητική διακοπή ισχύος πεδίου DC με ηλεκτροκινητήρες servo.
- Έχει προστασία υπέρτασης σε συνεχές και εναλλασσόμενο πεδίο.
- Έχει διάταξη διόρθωσης αέργου ισχύος.
- Έχει δυνατότητα ελέγχου των εγκαταστάσεων και αξιολόγησης στοιχείων.
- Αύξηση της αποδοτικότητας της εγκατάστασης από 1,5 μέχρι 2,0 % σε σχέση με εγκαταστάσεις με μετασχηματιστή χαμηλής τάσης.
- Μπορεί να κατασκευασθεί και χωρίς κάλυμμα για εσωτερική εγκατάσταση.

Τύπος	SC 1000MV
Εικόνα	

SC 1000MV ΜΕΓΕΘΗ ΕΙΣΟΔΟΥ (INPUT DC)	
Προτεινόμενη μέγιστη PV-ισχύς ( $P_{pv}$ )	1160 kW <sub>p</sub>
Περιοχή DC τάσης MPPT ( $U_{pv}$ )	450 V – 820 V
Μέγιστη τάση εισόδου ( $U_{pv, max}$ )	880 V
Μέγιστη ένταση εισόδου ( $I_{pv, max}$ )	2364 A
DC κυματισμός τάσης ( $U_{pp}$ )	< 3 %
Μέγιστος αριθμός strings (παράλληλα)	4
Προστασία DC υπέρτασης	ναι
ΜΕΓΕΘΗ ΕΞΟΔΟΥ (OUTPUT AC)	
Ονομαστική AC ισχύς ( $P_{AC, nom}$ )	1000 kW
Λειτουργική τάση ± 10 %	3 x 20 kV
Ονομαστική AC ένταση ( $I_{AC, nom}$ )	28,8 A
Αρμονικές	< 3 %
Μετατόπιση φάσης (cosφ)	1
Προστασία AC υπέρτασης	ναι
ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	
Μέγιστη απόδοση	97,3 %
ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Διαστάσεις (Πλάτος/Υψος/Βάθος)	5400/3620/3000 (mm)
Βάρος	35 ton
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
Θερμοκρασία	-20 °C έως +40 °C
Υγρασία	0 έως 100 %

# Κεφάλαιο 7

---

Υπολογισμοί Φωτοβολταϊκής  
Εγκατάστασης

---

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ Φ/Β ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

### 7.1 Μελέτη φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Για να προχωρήσουμε στους υπολογισμούς (μελέτη) μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, θα πρέπει να γνωρίζουμε:

- α) Το μέγεθος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (μικρή, μεσαία, μεγάλη)
- β) Τον προορισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (οικιακή χρήση, βιομηχανική χρήση, παραγωγή για τροφοδότηση οικισμού, παραγωγή για διοχέτευση στο κεντρικό δίκτυο διανομής κ.λπ.).
- γ) Πότε θα λειτουργεί η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση (χειμερινή περίοδο ή καλοκαιρινή περίοδο ή όλο το χρόνο).
- δ) Αν θα χρησιμοποιηθεί ή όχι βοηθητική πηγή ενέργειας (Ντηζελογεννήτρια).
- ε) Αν θα έχουμε υβριδικό σύστημα παραγωγής (φωτοβολταϊκά πλαίσια και ανεμογεννήτρια κ.λπ.).
- στ) Αν θα γίνεται αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας (χρήση συσσωρευτών).
- ζ) Ποια θα είναι η μέγιστη ισχύς ζήτησης.
- η) Ποιο θα είναι το είδος του φορτίου (φωτισμός ή κίνηση) .
- θ) Το χρόνο λειτουργίας του φορτίου (ημέρα ή νύχτα ή όλο το 24ωρο).
- ι) Αν η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση θα είναι ή όχι συνδεδεμένη με το κεντρικό δίκτυο διανομής.
- ια) Που θα τοποθετηθεί η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση και ποιο θα είναι το κόστος γης.
- ιβ) Τι είδους βάσεις θα χρησιμοποιηθούν (σταθερές με ετήσια βέλτιστη κλίση, σταθερές με μηνιαία βέλτιστη κλίση, περιστρεφόμενες με χειροκίνητη κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο, περιστρεφόμενες με αυτόματη παρακολούθηση της πορείας του ήλιου για συνεχή κάθετη πρόσπτωση).
- ιγ) Το είδος των φωτοβολταϊκών συλλεκτών που θα χρησιμοποιήσουμε (μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά, λεπτού υμένα).
- ιδ) Το είδος των ηλεκτρονικών διατάξεων και των συσκευών που θα χρησιμοποιήσουμε (στοιχεία από κατασκευαστή)
- ιε) Τα μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής.

Μια ολοκληρωμένη τεχνικο-οικονομική μελέτη για εφαρμογή φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτιριακές εγκαταστάσεις ή σε υπαίθριους χώρους, με βάση και το ισχύον νομοθετικό και επενδυτικό πλαίσιο, περιλαμβάνει:

- Τον υπολογισμό της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στη θέση της εγκατάστασης με βάση την ετήσια ή την μηνιαία βέλτιστη κλίση για

σταθερές βάσεις ή τους αντίστοιχους υπολογισμούς για τις περιπτώσεις περιστρεφόμενων βάσεων.

- Τους τρόπους τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών στον οικοπεδικό χώρο ή στα κτίρια.
- Τον υπολογισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, σε ετήσια βάση, ανά KW εγκαταστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών για κάθε μία από τις περιπτώσεις του τρόπου τοποθέτησης των συλλεκτών στον οικοπεδικό χώρο ή στα κτίρια.
- Τα ηλεκτρολογικά σχέδια της εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών καθώς και τις προδιαγραφές των υλικών και των συσκευών που θα χρησιμοποιηθούν.
- Τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων.
- Την εξέταση των συνθηκών που υπάρχουν στην περιοχή για την δυνατότητα σύνδεσης με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο (χαμηλής ή μέσης τάσης).
- Την οικονομική αξιολόγηση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης σύμφωνα με το νομικό πλαίσιο που ισχύει.
- Την διαδικασία για την ένταξη του έργου στον αναπτυξιακό νόμο.
- Την προετοιμασία των φακέλων για την αδειοδότηση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

## 7.2 Εκτίμηση του μεγέθους των ενεργειακών αναγκών

Αν είναι γνωστός ο προορισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούμε κατά προσέγγιση να εκτιμήσουμε τις ενεργειακές απαιτήσεις των καταναλωτών.

Όταν η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση αφορά έναν καταναλωτή (όπως η τροφοδότηση μιας οικίας για τετραμελή οικογένεια με μέση συμπεριφορά) θα έχουμε τις ενεργειακές ανάγκες που προκύπτουν από τον παρακάτω πίνακα 7.1.

Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας για τους μήνες Ιούνιο-Ιούλιο-Αύγουστο είναι 574000Wh ή 574KWh ανά μήνα, ενώ το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας για τους υπόλοιπους μήνες είναι 264000Wh ή 264 KWh ανά μήνα.

Πάντως, για λόγους απόδοσης και οικονομίας δεν συνιστάται η χρήση φωτοβολταϊκών για την κάλυψη ηλεκτρικών συσκευών με μεγάλη ηλεκτρική κατανάλωση, όπως θερμοσίφωνα, ηλεκτρικό καλοριφέρ, ηλεκτρική κουζίνα, κλιματιστικό κ.λπ. Για τις χρήσεις αυτές υπάρχουν οικονομικότερες λύσεις που δεν στηρίζονται στην ηλεκτρική ενέργεια, όπως ηλιακός θερμοσίφωνα, κουζίνα υγραερίου, ενεργειακό τζάκι κ.λπ.

a/a	Όνομασία ηλεκτρικής συσκευής	Τυπική ισχύς (W)	Χρόνοι λειτουργίας σε ώρες ανά μήνα	Μηνιαία κατανάλωση (Wh)	Παρατηρήσεις
1	Ψυγείο	300	200	60000	
2	Καταψύκτης	300	200	60000	
3	Ανεμιστήρας	100	100	10000	Μόνο για τους μήνες Ιούνιο-Ιούλιο και Αύγουστο
4	Λαμπήρες υψηλής απόδοσης	100	300	30000	
5	Λαμπτήρες φθορισμού	50	300	15000	
6	Πλυντήριο ρούχων	2500	10	25000	
7	Πλυντήριο πιάτων	1000	20	20000	
8	Ηλεκτρικό σίδερο	1000	10	10000	
9	Στεγνωτήρας μαλλιών	1000	2	2000	
10	Τηλεόραση	100	200	20000	
11	Υπολογιστής	100	50	5000	
12	Κλιματιστικό	3000	100	300000	Μόνο για τους μήνες Ιούνιο-Ιούλιο και Αύγουστο
13	Τοστιέρα	1000	5	5000	
14	Στερεοφωνικό	100	60	6000	
15	Φούρνος μικροκυμάτων	1500	4	6000	
	<b>Σύνολο</b>	<b>12150</b>			

Πίνακας 7.1 Ενεργειακές ανάγκες κατοικίας τεσσάρων ατόμων με μέση συμπεριφορά.

Από τον παραπάνω πίνακα 7.1 προκύπτει ότι η μέγιστη εγκαταστημένη ισχύς είναι  $P_m = 12150 \text{ W}$  ή  $12,150 \text{ KW}$ . Επειδή οι καταναλωτές δεν λειτουργούν ταυτόχρονα, υπολογίζουμε την μέγιστη απαιτούμενη ισχύ παίρνοντας υπόψη τον συντελεστή ετεροχρονισμού, που για την περίπτωση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων για οικίες λαμβάνεται περίπου στην τιμή  $\sigma_{\text{ετ}} = 0,40$ . Έπομένως:

$$P_{\text{ma}} = P_m \cdot \sigma_{\text{ετ}} = 0,40 P_m \Rightarrow$$

$$P_{\text{ma}} = 0,40 \cdot 12,15 = 4,86 \text{ KW}$$

Η μέγιστη απαιτούμενη ισχύς που προκύπτει από την παραπάνω σχέση, θα πρέπει να είναι πάντα μεγαλύτερη από την ισχύ της κάθε συσκευής του πίνακα 7.1 ( $4860 \text{ W} > 3000 \text{ W}$ ).

### 7.3 Εκτίμηση του συνολικού βαθμού απόδοσης του Φ/Β συστήματος

Η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων θεωρητικά υπολογίζεται από το πηλίκο της μηνιαίας ενεργειακής απαίτησης προς την ολική μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία, σε KWh/m<sup>2</sup>, που προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Έπομένως θεωρητικά έχουμε:

$$F_a = \frac{E_a}{H_{mk}}$$

Όπου,  $F_a$  = η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε m<sup>2</sup>.

$E_a$  = ενεργειακή απαίτηση σε KWh.

$H_{mk}$  = μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε KWh/m<sup>2</sup>.

Η παραπάνω σχέση μας δίνει την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, θεωρώντας ότι ο βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι ίσος με την μονάδα. Στην πράξη ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και η τιμή του είναι πολύ μικρότερη από τη μονάδα. Έτσι θα αναφερθούμε στον βαθμό απόδοσης φωτοβολταϊκού συλλέκτη και στον βαθμό απόδοσης των ηλεκτρονικών διατάξεων σχετικά με τους παράγοντες επιρροής τους.

- **Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού συλλέκτη**

Ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού συλλέκτη εξαρτάται από το υλικό και τον τρόπο κατασκευής και δίνεται από τον κατασκευαστή. Έτσι για φωτοβολταϊκά πλαίσια πυριτίου έχουμε:

- Άμορφο  $n_{\pi\lambda} = 5 - 7 \%$
- Πολυκρυσταλλικά  $n_{\pi\lambda} = 10 - 14 \%$
- Μονοκρυσταλλικά  $n_{\pi\lambda} = 14 - 17 \%$

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και εξαρτάται από τον συντελεστή  $\sigma_{\theta}$  (συντελεστής θερμοκρασίας περιβάλλοντος), για τον οποίο έχουμε τις τιμές:

- $\sigma_{\theta} \sim 0,80$  για τους καλοκαιρινούς μήνες.
- $\sigma_{\theta} \sim 0,90$  για τους χειμερινούς μήνες.
- $\sigma_{\theta} \sim 0,85$  μέση ετήσια τιμή.

Η απόδοση όμως των φωτοβολταϊκών πλαισίων επηρεάζεται και από την ρύπανση των συλλεκτών και εξαρτάται από τον συντελεστή  $\sigma_p$  (συντελεστής ρύπανσης), για τον οποίο έχουμε τις τιμές:

- $\sigma_p \sim 1$  για πολύ μικρή έως μηδενική ρύπανση.
- $\sigma_p \sim 0,90$  για μέτρια ρύπανση.
- $\sigma_p \sim 0,80$  για υψηλή ρύπανση.

Επειδή σε περιοχές με υψηλούς δείκτες ρύπανσης έχουμε μεγάλη μείωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, περίπου 20%, θα πρέπει να γίνεται περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας τους με απορρυπαντικό.

Επομένως: 
$$n_{\sigma} = n_{\pi\lambda} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_p$$

- **Βαθμός απόδοσης των ηλεκτρονικών διατάξεων και των εγκαταστάσεων τροφοδοσίας και ελέγχου ενός φωτοβολταϊκού συστήματος**

Ο βαθμός αυτός προκύπτει από το γινόμενο των βαθμών απόδοσης των επί μέρους διατάξεων που έχουν σχέση με την παρακολούθηση, φόρτιση – εκφόρτιση, μετατροπή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως:

$$n_{\delta} = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \dots n_v$$

Στην πράξη, συνήθως, έχουμε:

- Βαθμός απόδοσης μετατροπέων περίπου 0,90.
- Βαθμός απόδοσης συσσωρευτών περίπου 0,85.
- Βαθμός απόδοσης διατάξεων παρακολούθησης και ελέγχου περίπου 0,98.
- Βαθμός απόδοσης εγκαταστάσεων (καλωδιώσεις κ.λπ) περίπου 0,97.

Στους υπολογισμούς λαμβάνουμε μία τιμή που ανάλογα με το είδος και το πλήθος των ηλεκτρονικών διατάξεων και των συσκευών κυμαίνεται από  $n_{\delta} = 0,65$  μέχρι  $n_{\delta} = 0,80$ .

- **Υπολογισμός του συνολικού βαθμού απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος.**

Ο συνολικός βαθμός του φωτοβολταϊκού συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$n_{ολ} = n_{\sigma} \cdot n_{\delta}$$

Η σχέση αυτή μας δίνει την αναγκαία επιφάνεια των φωτοβολταϊκών συλλεκτών ή πλαισίων που είναι:

$$F_{\sigma} = \frac{F_a}{n_{ολ}} = \frac{E_a}{H_{mk} \cdot n_{\sigma} \cdot n_{\delta}}$$



# Κεφάλαιο 8

---

*Αιολική Ενέργεια*

---

## ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η κινητική ενέργεια του ανέμου η οποία οφείλεται κυρίως στην άνιση θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο. Περίπου το 2% της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στον πλανήτη μας, μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια η οποία υπολογίζεται σε  $3,6 \cdot 10^9$  MW. Η ενέργεια αυτή είναι τεράστια συγκρινόμενη με τις ανάγκες της ανθρωπότητας. Ενδεικτικά οι ενεργειακές ανάγκες των Η.Π.Α. είναι μόλις το 10% της ενέργειας των ανέμων που πνέουν εκεί, γεγονός που αποδεικνύει πόσο πλούσια πηγή ενέργειας είναι ο άνεμος. Οι πλέον ευνοημένες περιοχές του πλανήτη μας από πλευράς αιολικού δυναμικού είναι οι χώρες της πολικής και εύκρατης ζώνης, ιδιαίτερα κοντά στις ακτές.

Η αιολική ενέργεια μας προσφέρει τη δυνατότητα να παράγουμε ηλεκτρισμό χωρίς να επιβαρύνουμε το περιβάλλον. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις περιορίζονται κυρίως στην οπτική όχληση, σε αντίθεση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που ζημιώνουν το περιβάλλον με τα απόβλητά τους (στερεά, υγρά και αέρια) και τους πυρηνικούς σταθμούς.

Η ισχύς ρεύματος είναι ανάλογη της πυκνότητάς του και του κύβου της ταχύτητάς του. Έτσι για την ίδια ταχύτητα και διατομή ένα ρεύμα αέρα θα έχει περίπου 800 φορές μικρότερη ενέργεια από αντίστοιχη δέσμη νερού. Η αιολική ενέργεια συνεπώς είναι μια «αραιή» ή «ήπια» μορφή ενέργειας, δηλαδή είναι μικρή η ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα χρόνου που μπορεί να δεσμευτεί σε κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας που προσβάλλεται από τον άνεμο. Για παράδειγμα άνεμος εντάσεως 5 μποφόρ, περίπου 9,5 m/s, έχει ισχύ 500 W ανά  $m^2$  προσβαλλόμενης επιφάνειας, ενώ ένας ανεμοκινητήρας (A/K) μπορεί στην καλύτερη περίπτωση να δεσμεύσει το 48% αυτής της ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη κατασκευής μονάδων, μεγάλων διαστάσεων. Σ' αυτό το μειονέκτημα αντεπεξέρχεται με επιτυχία η σημερινή τεχνολογία με την κατασκευή ανεμοκινητήρων μεγάλων διαστάσεων που ανταγωνίζονται οικονομικά τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Παράλληλα η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από το πλεονέκτημα ότι δίνει απ' ευθείας μηχανική ενέργεια μια «αναβαθμισμένη» κατά την τεχνική ορολογία, μορφή ενέργειας που με πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης και απλά μέσα μετατρέπεται σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια εξορισμού έχει τοπικό χαρακτήρα και επομένως συντελεί στην περιφερειακή και τοπική ανάπτυξη. Αποτελεί συνεπώς μια αστείρευτη πηγή ενέργειας με αξιοσημείωτο δυναμικό και δωρεάν πρώτη ύλη στη διάθεση της ανθρωπότητας και προβάλλει σήμερα ως μια από τις πιο κατάλληλες εναλλακτικές πηγές για την παραγωγή ηλεκτρισμού αλλά και για άλλες χρήσεις.

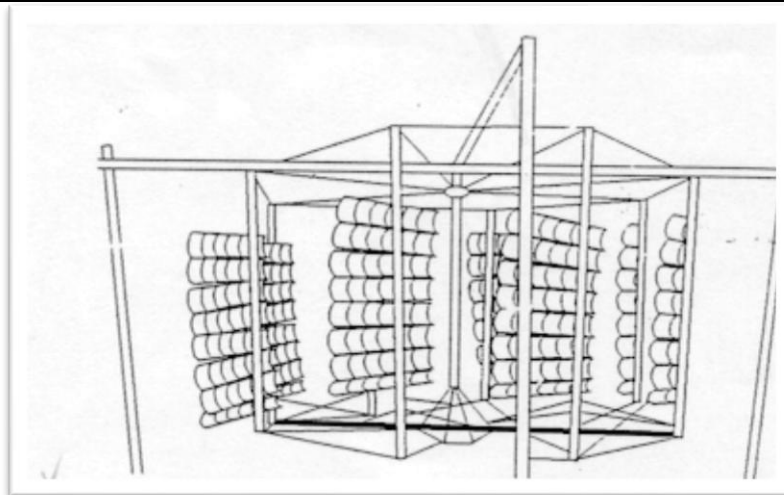
## 8.1 Ιστορική αναδρομή

Η αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου ξεκίνησε από τα πρώιμα ιστορικά χρόνια και έπαιξε αποφασιστικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας με τη χρήση της τόσο στη ναυτιλία όσο και στην άρδευση καθώς και στις αγροτικές καλλιέργειες. Η αναφορά της ελληνικής μυθολογίας στο θεό «Αίοιο», ο οποίος με τη βοήθεια των οκτώ βοηθών θεών (των οκτώ πρωτευόντων ανέμων : Βορέα, Καικία, Αηλιώτη, Εύρο, Νότο, Λίψ, Ζέφυρο και Σκίρωνα) θεωρείται ο διαχειριστής των ανέμων, υπογραμμίζει τη σημασία της αιολικής ενέργειας στην οικονομική και παραγωγική δραστηριότητα εκείνων των χρόνων.



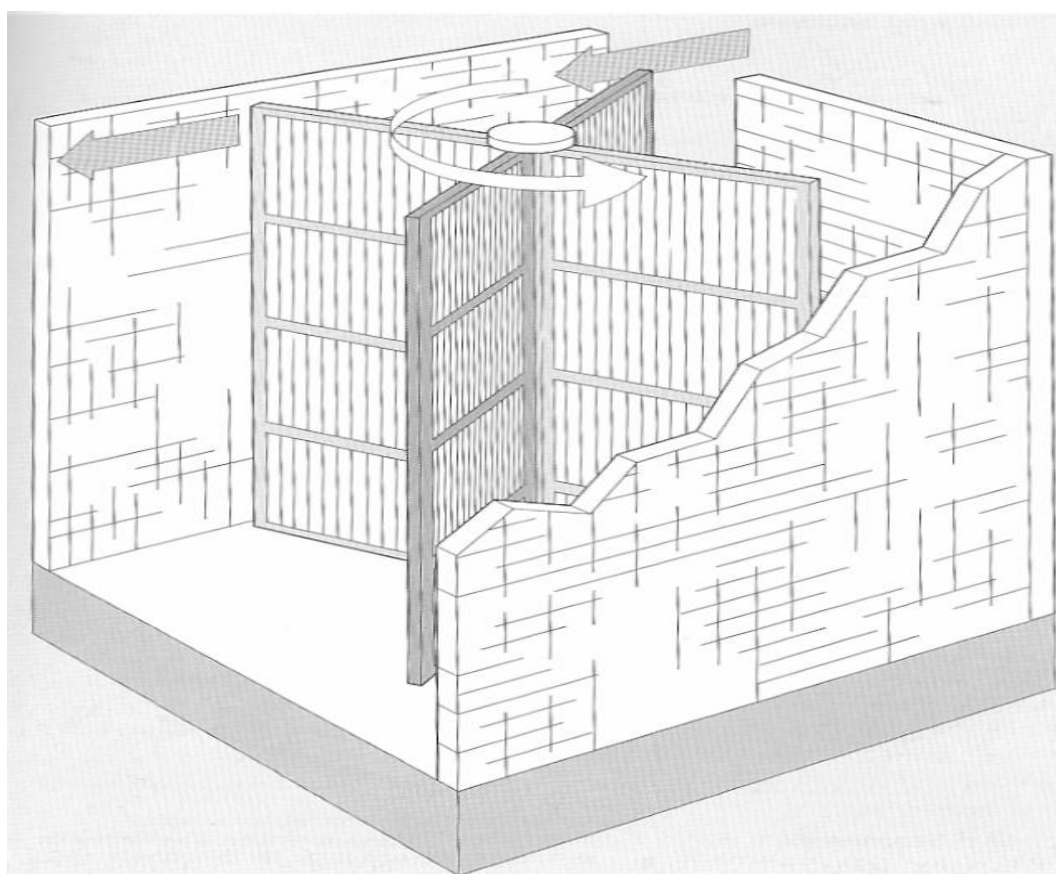
**Σχήμα 8.1** Οι οκτώ βοηθοί του Αιόλου απεικονίζονται στο πύργο των αέρηδων (κτίσμα του 1<sup>ου</sup> π.Χ. αιώνα στην πλάκα ).

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τον άνθρωπο για την κίνηση των ιστιοφόρων πλοίων. Οι ιστορικές και αρχαιολογικές αναφορές υποστηρίζουν επίσης ότι αιολικές μηχανές (ανεμόμυλοι) χρησιμοποιήθηκαν από τους σημαντικότερους αρχαίους λαούς, τους Κινέζους, τους Πέρσες, και τους Αιγύπτιους. Κύριο υλικό κατασκευής τους ήταν το ξύλο, τα πανιά καθώς και ειδικές λιθόκτιστες κατασκευές. Για παράδειγμα, στην Αίγυπτο διατηρούνται οι πέτρινες βάσεις ανεμόμυλων με ηλικία μεγαλύτερη των τριών χιλιάδων ετών, ενώ σύμφωνα με τις ιστορικές μαρτυρίες ήδη τον 7<sup>ο</sup> π.Χ. αιώνα στην Βαβυλωνία ανεμόμυλοι έδιναν την απαραίτητη ενέργεια για την άρδευση της Μεσοποταμίας. Λέγεται μάλιστα ότι ο βασιλιάς Χαμουραμί της Βαβυλωνίας, ήδη από το 17<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ., είχε συλλάβει κάποιο σχέδιο, προκειμένου να αρδεύσει τη κοιλάδα της Μεσοποταμίας με τη βοήθεια της αιολικής ενέργειας.



Σχήμα 8.2 Απεικόνιση Κινέζικου ανεμόμυλου.

Παράλληλα, αρχαιολογικές ανασκαφές στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα στο Αφγανιστάν έφεραν στο φως σημαντικό αριθμό από ανεμόμυλους κάθετου άξονα στα Σίστρα και στην περιοχή της Βακτρίας, η οποία αποικίσθηκε κυρίως από Έλληνες της Στρατιάς του Μεγάλου Αλεξάνδρου. Σύμφωνα με τις υπάρχουσες ενδείξεις, οι χρησιμοποιούμενοι ανεμόμυλοι τόσο στη Βαβυλωνία (ο ανεμόμυλος των Περσών) όσο και στην Κίνα (ο κινέζικος ανεμόμυλος) ήταν κατακόρυφου άξονα. Αργότερα, τον 3<sup>ο</sup> π.Χ. αιώνα ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς σχεδίασε τον κατά πάσα πιθανότητα πρώτο ανεμόμυλο οριζόντιου άξονα με τέσσερα πτερύγια.



Σχήμα 8.3 Ανεμόμυλος πλακών κατακόρυφου άξονα.

Η χρήση των ανεμόμυλων για την άλεση των δημητριακών και την άρδευση συνεχίστηκε στις χώρες τις ανατολής, στη Μικρά Ασία και στο Αιγαίο και κατά τη Βυζαντινή εποχή. Στην Ευρώπη υποστηρίζεται ότι οι ανεμόμυλοι εμφανίστηκαν περίπου το 1200 μ.Χ. και μεταφέρθηκαν από τους σταυροφόρους κατά την επιστροφή τους από τα Ιεροσόλυμα. Η πρώτη γραπτή αναφορά των ευρωπαϊκών ανεμόμυλων οριζοντίου άξονα δίνεται σε ένα γαλλικό φορολογικό έγγραφο του 1125 μ.Χ. ενώ το πρώτο γνωστό σκίτσο ευρωπαϊκού ανεμόμυλου βρίσκεται σε ένα εκκλησιαστικό ψαλτήριο του 12<sup>ου</sup> αιώνα. Έτσι την εποχή του Μεσαίωνα ανεμόμυλοι εμφανίζονται στην Ολλανδία, την Ισπανία ( ο θρύλος του Δον Κιχώτη ), την Πορτογαλία, την Γαλλία και την Ιταλία. Στην Ολλανδία μάλιστα γύρω στο 1500 μ.Χ. οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για την άντληση των νερών από τις περιοχές που βρίσκονται σε χαμηλότερη στάθμη από αυτήν της θάλασσας.



Αντίγραφο του πρώτου  
Περσικού ανεμόμυλου

Μεσογειακός  
ανεμόμυλος

Αμερικανικός  
ανεμοκινητήρας

Ο τύπος του ανεμόμυλου που χρησιμοποιήθηκε στην Ευρώπη την εποχή του Μεσαίωνα ήταν ως επί το πλείστον οριζόντιου άξονα με τέσσερα πτερύγια ( περιστρεφόμενου κλωβού, περιστρεφόμενης οροφής). Οι κύριες χρήσεις του ήταν το άλεσμα των σιτηρών, το κόψιμο του καπνού, του ξύλου και άλλων γεωργικών προϊόντων, καθώς και η άντληση νερού για άρδευση ή αποξήρανση. Ένας άλλος τύπος ανεμόμυλου, ο οποίος εξαπλώθηκε ιδιαίτερα την εποχή της Αναγέννησης και του αμερικανικού ονείρου, ήταν ο αργός πολύπτερος ανεμόμυλος, ο οποίος χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα για την άντληση νερού και ονομάζεται «Αμερικανικός ανεμόμυλος». Για την αποκατάσταση της ιστορικής αλήθειας, ο ανεμόμυλος αυτός προέρχεται από την Ευρώπη και χρησιμοποιήθηκε από τους αποίκους αρχικά στα ανατολικά παράλια της Αμερικής για την κίνηση αντλιών με αποτέλεσμα να παρουσιάσει μεγάλη εξάπλωση. Παρ' όλα αυτά το Σικάγο γίνεται την περίοδο 1870 έως 1930 το κέντρο βιομηχανικής παραγωγής ανεμόμυλων, με εκτιμώμενη παραγωγή έξι εκατομμυρίων ( 6.000.000 ) μονάδων την περίοδο που προαναφέραμε. Η χρήση των ανεμόμυλων στις Η.Π.Α. έφθασε στο απόγειό της μεταξύ 1920 και 1930 με την εγκατάσταση περίπου 600.000 μηχανών. Ο συγκεκριμένος τύπος ανεμοκινητήρα , αν και δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή ενεργειακή απόδοση, εμφανίζει σημαντική

ροπή λειτουργίας ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, γεγονός που τον καθιστά ιδιαίτερα αποδοτικό σε γεωργικές και βιοτεχνικές εφαρμογές. Βασικό του μειονέκτημα είναι το σχετικά μεγάλο βάρος, που οφείλεται στον τύπο και στο πλήθος των πτερυγίων που χρησιμοποιεί.



**Σχήμα 8.4** Πολύπτερος Αμερικανικός ανεμοκινητήρας.

Στις αρχές του αιώνα μας πρώτοι οι Δανοί παράγουν ηλεκτρισμό από τον άνεμο, ενώ στην Αμερική ανεμόμυλοι μεταλλικής κατασκευής χρησιμοποιούνται επίσης για ηλεκτροδότηση. Έτσι, το 1891 λειτούργησε στο Askov της Δανίας πειραματικός ανεμοκινητήρας με δύο ηλεκτρικές γεννήτριες ( 2·9 kW ) και διάμετρο 22,8 m, κάτω από την επίβλεψη του καθηγητή P. La Cour. Αντίστοιχα, τη δεκαετία του 1930 κατασκευάστηκε στη Βαλτική μηχανή 100 kW, με σχεδιαστική επίβλεψη των Sabanin Yuriev. Τέλος το 1940 κατασκευάστηκε στο Vermont των Η.Π.Α. ένας πειραματικός δίπτερος ανεμοκινητήρας σημαντικής ισχύος.

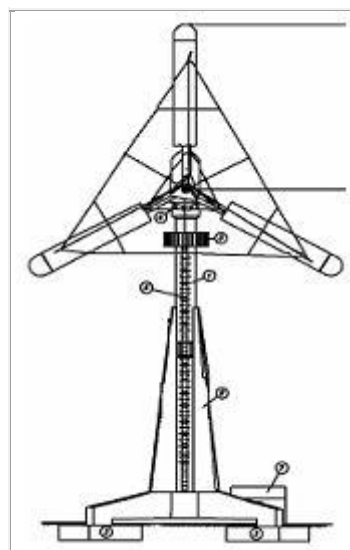


Πρωτοπόρος στην αιολική ενέργεια θεωρείται ο Roul la Cour (1846-1908), μετεωρολόγος όπου στην συνέχεια σχεδίασε τα πρώτα συστήματα αιολικής ενέργειας.

Κατά την διάρκεια του 2ου Παγκοσμίου πολέμου η δανέζικη τεχνική εταιρεία F.L.Smith κατασκεύασε συστήματα αιολικής ενέργειας με 2 ή 3 λεπίδες.



Ο μηχανικός Johannes Joul ήταν ένας από τους πρώτους μαθητές του Roul la Cour σε σειρά μαθημάτων το 1904 με τίτλο «Ηλεκτρονικοί του Ανέμου».



Α/Γ τύπου GEDSER

Στη συνέχεια αναφέρονται οι κυριότεροι χρονικοί σταθμοί της εξελικτικής πορείας του ανεμόμυλου.

- 1200 μ.Χ. Ανεμόμυλοι οριζόντιου άξονα χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη για το άλεσμα σιταριού.
- 1500 μ.Χ. Στα πεδινά της Ολλανδίας εμφανίζονται οι πρώτοι ανεμόμυλοι. Ο Don Quixote τους φέρνει στην Ισπανία
- 1600 μ.Χ. Άποικοι κατασκευάζουν ανεμόμυλους ευρωπαϊκού τύπου στα ανατολικά παράλια της Αμερικής.

- 1700 μ.Χ. Οι ατμομηχανές αρχίζουν να αντικαθιστούν τους ανεμόμυλους.
- 1860 Οι Αμερικανοί κατασκευάζουν πολύπτερους ανεμόμυλους (multi bladed) για να χρησιμοποιηθούν για κίνηση αντλιών.
- 1870 Το Σικάγο γίνεται κέντρο βιομηχανικής παραγωγής ανεμόμυλων.
- 1900 Οι Δανοί παράγουν ηλεκτρισμό από τον άνεμο.
- 1920 Ανεμόμυλοι μεταλλικής κατασκευής χρησιμοποιούνται στην Αμερική για ηλεκτροδότηση στα αγροτικά σπίτια.
- 1930 Οι ανεμόμυλοι στις αγροτικές περιοχές αντικαθίστανται από την επέκταση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.
- 1940 Στο Vermont (Η.Π.Α.) κατασκευάζεται για πρώτη φορά πειραματικός ανεμοκινητήρας αρκετά μεγάλης ισχύος με δύο πτερύγια.
- 1950 Η ατομική ενέργεια μειώνει το ενδιαφέρον για χρησιμοποίηση της αιολικής ενέργειας.
- 1960 Η μόλυνση του περιβάλλοντος από τις υπάρχουσες πηγές ενέργειας (άνθρακας- πετρέλαιο) αρχίζει να γίνεται έντονη.
- 1970 Η έλλειψη καυσίμων αναζωογονεί το ενδιαφέρον για αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου.
- 1976 Τεχνολογικά αναπτυγμένες χώρες διαθέτουν για πρώτη φορά μεγάλο ύψος χρημάτων για προγράμματα γύρω από την τεχνικοοικονομική διερεύνηση των ανεμοκινητήρων.
- 1983 Κατασκευή ανεμοκινητήρων ισχύος 3 MW.
- 1990 Κατασκευή ανεμοκινητήρων ισχύος 7 MW.

Στα χρόνια που ακολούθησαν το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο η χρήση της ατομικής ενέργειας και οι χαμηλές τιμές του πετρελαίου περιόρισαν δραστικά το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Όμως η ρύπανση του περιβάλλοντος και οι διαδοχικές ενεργειακές κρίσεις υποχρέωσαν ξανά τις τεχνολογικά αναπτυγμένες χώρες να ενδιαφερθούν έντονα για αυτή τη καθαρή και αρχαία ενεργειακή πηγή του πλανήτη μας, τον άνεμο.



## 8.2 Οι Αιολικές μηχανές στην Ελλάδα

Στη χώρα μας η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στη ναυσιπλοία ήταν καθιερωμένη από αρχαιοτάτων χρόνων, ενώ ιστορικές μαρτυρίες αναφέρουν ότι και οι ανεμόμυλοι ήταν ήδη γνωστοί στα νησιά του Αρχιπελάγους και στην Κρήτη από το 2000 π.Χ. . Αρκετά χρόνια αργότερα και κυρίως στα ανατολικά τμήματα της ελληνικής επικράτειας, τα οποία είναι ιδιαίτερα ανεμώδη, η άλεση των δημητριακών κατά τη Βυζαντινή εποχή και κατά την τουρκοκρατία μέχρι τις αρχές του εικοστού αιώνα γινόταν αποκλειστικά με τη χρήση ανεμόμυλων και νερόμυλων. Ο αριθμός των ανεμόμυλων ήταν σημαντικός κυρίως στις Κυκλάδες, στη Ρόδο, στη Χίο, στην Ανατολική Κρήτη αλλά και γενικότερα στα νησιά του Αιγαίου, στα ανατολικά παράλια της ηπειρωτικής χώρας και στις υψηλές ορεινές περιοχές της ενδοχώρας. Στατιστικά στοιχεία εμπειριστατωμένης μελέτης με τίτλο «Ο ανεμόμυλος στις Κυκλάδες» αναφέρει την ύπαρξη 644 εν λειτουργία ανεμόμυλων στα νησιά των Κυκλάδων περί τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα.

Στην πατρίδα μας αναπτύχθηκε ένας τύπος ανεμόμυλου οριζόντιου άξονα, διαφορετικός από εκείνους άλλων βορειοευρωπαϊκών χωρών, προσαρμοσμένος στις ανάγκες και στο κλίμα της περιοχής (Μεσογειακός ανεμόμυλος ). Οι ανεμόμυλοι αυτοί είναι πέτρινοι με πάνινα ( όπως και ο Πορτογαλικός ) πτερύγια. Βέβαια, σε ορισμένες περιοχές από τα υπάρχοντα πέτρινα κτίσματα φαίνεται ότι λειτούργησαν και ανεμόμυλοι κατακόρυφου άξονα, πιθανότατα τύπου «πανεμόνιο». Μάλιστα σε βιβλίο του 1486 περιγράφεται ανεμόμυλος με κατακόρυφο άξονα εγκατεστημένος στη Κρήτη. Πιο συγκεκριμένα, στη χώρα μας χρησιμοποιήθηκαν ανεμόμυλοι κυρίως στην ανατολική Κρήτη για την άντληση ποτιστικού νερού από πηγάδια. Οι ανεμόμυλοι αυτοί είναι σιδερένιοι με υφασμάτινα πανιά, και αναφέρονται συγκεντρωμένοι κυρίως στο οροπέδιο του Λασιθίου. Την εποχή της άνθησής τους, πριν το 1940, υπήρχαν έξι χιλιάδες ανεμόμυλοι, ενώ στα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα λειτουργούσαν περίπου χίλιοι. Οι κατασκευαστές των ανεμόμυλων αυτού του τύπου είναι ντόπιοι σιδηρουργοί, ενώ το κόστος ενός τέτοιου ανεμόμυλου το 1960 ήταν περίπου πέντε χιλιάδες δραχμές. Κάθε ανεμόμυλος στο Λασιθί αντλεί κατά μέσο όρο 35 έως 50 m<sup>3</sup> από ένα μέσο βάθος 15m (μέση παροχή 4 m<sup>3</sup>/h) εργαζόμενος 9÷10 ώρες ημερησίως. Παράλληλα, στη Σητεία (ανατολική Κρήτη) αναφέρθηκε μια ενδιαφέρουσα μέθοδος αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας, η οποία διερευνάται ως προς την οικονομικοτεχνική ελκυστικότητα της και σήμερα. Στην περίπτωση της Σητείας η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται για την άντληση νερού με την βοήθεια ανεμόμυλων, το οποίο αποθηκεύεται σε υψηλή δεξαμενή. Στη συνέχεια η διαθέσιμη υδατόπτωση χρησιμοποιείται κατά βούληση σε προσκείμενους νερόμυλους.

Ομως, αν και ο μεγαλύτερος αριθμός ανεμόμυλων στη χώρα μας ήταν εγκατεστημένος στην ανατολική Κρήτη, οι γνωστότεροι ανεμόμυλοι, κυρίως για λόγους τουριστικούς, είναι οι ανεμόμυλοι της Μυκόνου. Η ύπαρξη των ανεμόμυλων στη Μύκονο είναι εξακριβωμένη από τον 15<sup>ο</sup> αιώνα, με πρώτη αναφορά στον ανεμόμυλο της θέσης «Κάστρο», του οποίου τα θεμέλια διεσώζοντο μέχρι πρόσφατα.

Ιστορικά η λειτουργία των ανεμόμυλων μνημονεύεται αρχικά στο διάταγμα της Βενετίας της 8<sup>ης</sup> Μαρτίου 1518, όπου μεταξύ των αιτημάτων των Μυκονίων που γίνονται αποδεκτά περιλαμβάνεται και η άρση της απαγόρευσης άλεσης από τους αλευρόμυλους κατά τις βραδινές ώρες του Σαββάτου και της Κυριακής.

Αργότερα ο Tournefort (1700) στο σχεδιάγραμμα του λιμανιού της Μυκόνου σημειώνει δέκα (10) ανεμόμυλους κατά παράταξη στην περιοχή με την τοπωνυμία «Κάτω Μύλοι» ή «Πολλοί Μύλοι». Το 1755 στο κτηματολόγιο της Μυκόνου μνημονεύονται δεκαεπτά (17) ανεμόμυλοι. Η επίσημη δε έκθεση του 1828 αναφέρει εικοσιεννέα (29) ανεμόμυλους. Τέλος, σύμφωνα με προφορικές παραδόσεις, ο μέγιστος αριθμός των ανεμόμυλων του νησιού έφθασε τους σαράντα (40).



**Σχήμα 8.5** Παραδοσιακός ανεμόμυλος στην παραλία Αϊ Γιάννης Λευκάδας. Τον 19<sup>ο</sup> αιώνα λειτουργούσαν εδώ επτά ανεμόμυλοι που έφεραν κυρίως ρώσικα ονόματα λόγω των δημητριακών που έρχονταν απ' τη Ρωσία για να αλέσουν.

Η ικανότητα αλέσματος των ανεμόμυλων στις διάφορες θέσεις της χώρας κυμαίνεται από 20÷70 kg σιτηρών την ώρα, ανάλογα με το προσανατολισμό της πτερύγωσης και την ταχύτητα του ανέμου. Η δυναμικότητα ενός ανεμόμυλου της Μυκόνου εκτιμάται στον ένα τόνο σιταριού σε κάθε εργάσιμο δωδεκάωρο. Επομένως, θεωρώντας τη λειτουργία είκοσι (20) ανεμόμυλων για εξήντα (60) ημέρες ετησίως, η αλεστικότητα της Μυκόνου ανέρχεται σε τέσσερις χιλιάδες (4000) τόνους σιταριού το χρόνο. Επίσης, σύμφωνα με πληροφορίες, στο παρελθόν οι ανεμόμυλοι της Μυκόνου χρησιμοποιήθηκαν και για την άλεση του φλοιού πεύκου και βελανιδιών για χρήση στη βυρσοδεψία.

Αρκετοί ανεμόμυλοι (επτά) βρίσκονται και σήμερα στη θέση «Κάτω Μύλοι», είναι δε οικοδομημένοι επάνω στο έδαφος του «κοινού των Μυκονίων» και επομένως

ανήκουν στους σημερινούς τους ιδιοκτήτες μόνο κατά το κτίσμα και τις τεχνικές εγκαταστάσεις. Όσοι από αυτούς βρίσκονται σε καλή κατάσταση χρησιμοποιούνται σήμερα ως κατοικίες. Ο μοναδικός ανεμόμυλος της περιοχής που βρίσκεται σε καλή κτιριακή και λειτουργική κατάσταση και είναι σε θέση να λειτουργεί και σήμερα είναι ο γνωστός «Μύλος του Γερώνυμου», όπου Γερώνυμος είναι το ψευδώνυμο του παλαιού του ιδιοκτήτη. Ο μύλος αυτός έχει ηλικία περίπου τριακοσίων (300) ετών και δε σταμάτησε να λειτουργεί από της ιδρύσεώς του. Ανατολικά του μύλου αυτού και κοντά στο δρόμο που οδηγεί στην Άνω Μερά βρίσκεται ένας άλλος ανεμόμυλος με την προσωνομία «Μύλος του Πεντάρα». Και οι δύο αυτοί ανεμόμυλοι δεν παρουσιάζουν αξιόλογες διαφορές, εκτός από το γεγονός ότι ο ανεμόμυλος του «Μύλου του Πεντάρα» έχει δέκα (10) αντένες έναντι των δώδεκα (12) του «Μύλου του Γερώνυμου», ο οποίος είναι και ο πλέον καθιερωμένος αριθμός. Τα τελευταία χρόνια σε όλα τα νησιά των Κυκλάδων λιγότεροι από δέκα ανεμόμυλοι συνεχίζουν να εξυπηρετούν τον αρχικό προορισμό τους (Φολέγανδρος, Σίκινος, Δονούσα) ή δουλεύουν εποχικά για κτηνοτροφίες (Τήνος, Νάξος) ή «λειτουργούν» για τουριστικούς λόγους (Μύκονος).



**Σχήμα 8.6** Το παρελθόν και το μέλλον παντρεμένα μαζί. Παραδοσιακός ανεμόμυλος και σύγχρονες ανεμογεννήτριες στο Κόρωνο Νάξου.

### 8.3 Μειονεκτήματα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας

Όπως προαναφέρθηκε, η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν από τον άνθρωπο, τόσο στη ναυτιλία όσο στην άρδευση και στη γεωργία. Αντικαταστάθηκε όμως από άλλες πηγές ενέργειας για ολόκληρο σχεδόν τον εικοστό αιώνα λόγω των σημαντικών μειονεκτημάτων που παρουσίαζε σε σύγκριση με τις υπόλοιπες «πυκνότερες» μορφές ενέργειας. Βέβαια, σήμερα οι χρησιμοποιούμενες μηχανές δεν έχουν καμία σχέση τόσο από αεροδυναμικής σκοπιάς όσο και από κατασκευαστικής αντοχής και ποιότητας με τους θρυλικούς ανεμόμυλους, εμφανίζουν δε αξιοσημείωτη συγκέντρωση ισχύος. Παρ' όλα αυτά είναι χρήσιμο να εξετάσουμε τα κυριότερα μειονεκτήματα που αποδίδονται στην αιολική ενέργεια, ώστε να αποκτήσουμε μια πλέον ολοκληρωμένη εικόνα. Για παράδειγμα:

- i. Η **χαμηλή ροή** αξιοποιήσιμης κινητικής ενέργειας του ανέμου ( $\text{Watt/m}^2$ ) κατατάσσει την αιολική ενέργεια στις «ραιίες» μορφές ενέργειας. Τυπικές τιμές ροής της αξιοποιούμενης αιολικής ισχύος κυμαίνονται μεταξύ  $200 \text{ W/m}^2$  και  $500 \text{ W/m}^2$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση είτε μεγάλου αριθμού ανεμοκινητήρων είτε μηχανών μεγάλων διαστάσεων, για την παραγωγή της επιθυμητής ποσότητας ενέργειας. Σήμερα καταβάλλονται προσπάθειες αύξησης της συγκέντρωσης ισχύος των αιολικών μηχανών, οι οποίες σε επιλεγμένες περιπτώσεις πλησιάζουν ή και υπερβαίνουν τα  $600 \text{ W/m}^2$ .
- ii. Η **αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης** της ταχύτητας και της διεύθυνσης των ανέμων δε μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε την απαραίτητη αιολική ενέργεια τη στιγμή που τη χρειαζόμαστε. Το γεγονός αυτό μας υποχρεώνει να χρησιμοποιούμε τις αιολικές μηχανές κυρίως σαν εφεδρικές πηγές ενέργειας σε συνδυασμό πάντοτε με κάποια άλλη πηγή ενέργειας (π.χ. σύνδεση με ηλεκτρικό δίκτυο, παράλληλη λειτουργία με μονάδες Diesel κλπ).
- iii. Σε **περιπτώσεις διασύνδεσης** της αιολικής εγκατάστασης με το ηλεκτρικό δίκτυο η παραγόμενη ενέργεια δεν πληροί πάντοτε τις τεχνικές απαιτήσεις του δικτύου με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η τοποθέτηση αυτοματισμών ελέγχου, μηχανημάτων ρύθμισης τάσεως και συχνότητας, καθώς και ελέγχου της άεργης ισχύος. Η εξέλιξη της τεχνολογίας σήμερα έχει δώσει λύσεις στα περισσότερα από τα αναφερόμενα προβλήματα, ιδιαίτερα με την κατασκευή ανεμογεννητριών μεταβλητού βήματος και μεταβλητών στροφών. Παρ' όλα αυτά υπάρχει κάποιο αυξημένο κόστος για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της παραγόμενης ενέργειας, το οποίο προστίθεται στο σημερινό κόστος της παραγόμενης Kwh. Τέλος, ακόμα και σήμερα εξακολουθούν να μας απασχολούν οι διαδικασίες ζεύξης-απόζευξης αιολικών μηχανών στο ηλεκτρικό δίκτυο λόγω των μεταβατικών φαινομένων που αυτές προκαλούν. Λόγω των τελευταίων προβλημάτων απαγορεύεται η διασύνδεση, πέραν ενός ορίου αποδιδόμενης ισχύος, αιολικών μηχανών σε μικρά τοπικά ηλεκτρικά

δίκτυα, τα οποία όμως αποτελούν και την πλειοψηφία των δικτύων του ελληνικού αρχιπελάγους.

iv. Αντίστοιχα, σε **περιπτώσεις αυτόνομων μονάδων** είναι απαραίτητη η ύπαρξη συστημάτων αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας, σε μια προσπάθεια να έχουμε συγχρονισμό της ζήτησης και της διαθέσιμης ενέργειας. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται αυξημένο αρχικό κόστος (λόγω της προσθήκης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας) και βέβαια επιπλέον απώλειες ενέργειας κατά τις φάσεις μετατροπής και αποθήκευσης, καθώς και αυξημένες υποχρεώσεις συντήρησης για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας.

v. Ένα ακόμα μειονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι η **περιορισμένη δυνατότητα αξιοποίησης** του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού. Στην πραγματικότητα αξιοποιούμε μερικώς μόνο την κινητική ενέργεια του ανέμου, η οποία αντιστοιχεί σε ένα περιορισμένο φάσμα ταχύτητας του ανέμου.

vi. Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψιν ότι από το σύνολο της απορροφούμενης από μια ανεμογεννήτρια αιολικής ενέργειας μόνο ένα **περιορισμένο μέρος της μετατρέπεται σε ωφέλιμη ενέργεια** λόγω των αεροδυναμικών και των μηχανικών απωλειών και των αντίστοιχων περιορισμών.

vii. Τέλος, θα πρέπει να επισημάνουμε το σχετικά **υψηλό κόστος της αρχικής επένδυσης** για την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας, ειδικά μάλιστα για μεμονωμένες περιπτώσεις αιολικών μηχανών μικρού μεγέθους. Στο σημείο αυτό πρέπει να προσθέσουμε ότι η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας και ο ανταγωνισμός μεταξύ των κατασκευαστών έχει τα τελευταία χρόνια συμπίεσει σημαντικά τις τιμές των ανεμογεννητριών, βελτιώνοντας ταυτόχρονα και την αξιοπιστία τους.



## 8.4 Πλεονεκτήματα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας

Αν και δεν είναι δυνατό να αγνοήσουμε τα μειονεκτήματα που συνοδεύουν την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, είναι επίσης σημαντικό να ληφθούν υπόψιν και οι παρακάτω παράγοντες, ορισμένοι από τους οποίους ισχύουν ιδιαίτερα στη χώρα μας, ώστε να διαμορφώσουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα για τις δυνατότητες και τους περιορισμούς αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα:

i. Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια **ανανεώσιμη πηγή ενέργειας**. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η αιολική ενέργεια δεν εξαντλείται σε αντίθεση με το σύνολο των συμβατικών καυσίμων, των οποίων τα βεβαιωμένα αποθέματα του πλανήτη μας αναμένεται να εξαντληθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα.

ii. Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια **καθαρή μορφή ενέργειας, ήπια προς το περιβάλλον**. Η χρήση της δεν επιβαρύνει τα οικοσυστήματα των περιοχών εγκατάστασης και παράλληλα αντικαθιστά ιδιαίτερα ρυπογόνες πηγές ενέργειας, όπως το κάρβουνο, το πετρέλαιο και η πυρηνική ενέργεια. Τα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα των περισσότερων αναπτυγμένων χωρών καθώς και της χώρας μας (π.χ. Αθήνα, Πτολεμαΐδα, Μεγαλόπολη κ.λ.π.) καθιστούν την αιολική ενέργεια ιδιαίτερα ελκυστική σε σχέση με τη προστασία του περιβάλλοντος.

Επιπλέον, **ειδικά για τη χώρα μας** ισχύουν και τα ακόλουθα στοιχεία:

iii. Η χώρα μας και κυρίως τα νησιωτικά συμπλέγματα του Αιγαίου διαθέτουν πολύ **υψηλό αιολικό δυναμικό** και μάλιστα άριστης ποιότητας. Πράγματι στα περισσότερα νησιά του Αρχιπελάγους εμφανίζονται άνεμοι υψηλής ταχύτητας και μεγάλης διάρκειας σχεδόν ολόκληρο το έτος.

iv. Η **περιορισμένη συμβολή των ανανεώσιμων πηγών** ενέργειας στο εθνικό ενεργειακό ισοζύγιο, με αμελητέα μάλιστα τη συμβολή της αιολικής ενέργειας, καθιστά προφανές τις σχεδόν απεριόριστες δυνατότητες σύστασης αιολικών εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας, σε μια αγορά με σημαντικό αριθμό αναξιοποίητων θέσεων εγκατάστασης.

v. Η **ισχυρή εξάρτηση της χώρας μας** από εισαγόμενα καύσιμα, τα οποία οδηγούν αφενός σε συναλλαγματική αιμορραγία τη χώρα μας, αφετέρου σε εξάρτησή της από χώρες εκτός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ας σημειωθεί ότι, η χώρα μας εξαρτάται κυρίως από το εισαγόμενο πετρέλαιο, που προέρχεται από χώρες υψηλού πολιτικό-οικονομικού κινδύνου και οι οποίες εμπλέκονται αρκετά συχνά σε πολιτικές και στρατιωτικές κρίσεις. Με τον τρόπο αυτό το μεσοπρόθεσμο κόστος παραγωγής ενέργειας, η οποία αποτελεί τον κυριότερο ίσως παραγωγικό συντελεστή για πλήθος βασικών αγαθών, δε μπορεί να προβλεφθεί με λογικά σενάρια, πράγμα που οδηγεί σε υπερβολική αβεβαιότητα τον αντίστοιχο σχεδιασμό της εθνικής οικονομίας.

vi. Η **υψηλή σεισμικότητα** της χώρας μας εγκυμονεί κινδύνους για τις θερμοηλεκτρικές και κυρίως τις πυρηνικές εγκαταστάσεις, με αποτέλεσμα να θεωρείται προβληματική στο άμεσο μέλλον η κατασκευή πυρηνικών μονάδων στη χώρα μας. Προφανώς, με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα είναι δυνατή η δημιουργία υψηλής ασφάλειας συμβατικών μονάδων, με δυσανάλογη όμως αύξηση του κόστους της παραγόμενης ενέργειας.

vii. Η σημαντική **διασπορά και ανομοιομορφία του κόστους παραγωγής** της ηλεκτρικής ενέργειας στα διάφορα τμήματα της χώρας μας έχει ως αποτέλεσμα, ακόμα και στην περίπτωση που η μέση τιμή διάθεσης της ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα μας είναι ελαφρώς κατώτερη του οριακού κόστους της παραγόμενης αιολικής Kwh, σε αρκετά νησιά το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας να είναι πολλαπλάσιο, ενίοτε και υπερδεκαπλάσιο του οριακού κόστους παραγωγής της Δ.Ε.Η. .

Από τα διαθέσιμα στοιχεία, ενώ το οριακό κόστος παραγωγής της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού κυμαίνεται μεταξύ των 0,068 και των 0,072 Euro/Kwh για τα έτη 2000 και 2002, τιμή που βασίζεται σε ιστορικά στοιχεία, το αντίστοιχο μέσο κόστος λειτουργίας των αυτόνομων σταθμών παραγωγής «ΑΣΠ» κυμαίνεται το ίδιο διάστημα μεταξύ 0,13 και 0,15 Euro/Kwh. Την ίδια στιγμή προκύπτει ότι υπάρχουν ΑΣΠ, των οποίων και μόνο η συμμετοχή του καυσίμου στο κόστος παραγωγής υπερβαίνει κατά πολύ το οριακό κόστος παραγωγής της επιχείρησης.

Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι είναι δυνατή η αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων από την αιολική ενέργεια, τουλάχιστον στις παραπάνω νησιωτικές περιοχές, δεδομένου μάλιστα ότι αυτές διαθέτουν και το καλύτερο αιολικό δυναμικό.

viii. Η δυνατότητα **τόνωσης της ελληνικής κατασκευαστικής δραστηριότητας** με προϊόντα υψηλής Εγχώριας Προστιθέμενης Αξίας (Ε.Π.Α.) και συγκριτικά χαμηλού επενδυτικού κόστους, όπως θα μπορούσε να αποτελέσει η απόφαση συμπαραγωγής ανεμογεννητριών στη χώρα μας, συνεισφέροντας ταυτόχρονα και στη μείωση της ανεργίας.

ix. Η **υψηλή Ε.Π.Α.**, η οποία συνοδεύει την απόφαση εγχώριας παραγωγής ανεμογεννητριών. Η εκτιμώμενη Ε.Π.Α. μπορεί να φθάσει και να υπερβεί με τη σταδιακή απόκτηση εμπειρίας και στο 90% του συνολικού κόστους μιας ανεμογεννήτριας, ενισχύοντας ταυτόχρονα την εθνική οικονομία.

x. Η **αξιόλογη εγχώρια ηλεκτρο-μηχανολογική εμπειρία**, καθώς και το σημαντικό επιστημονικό-ερευνητικό ενδιαφέρον και δραστηριότητα στη γνωστική περιοχή της αιολικής ενέργειας.

xi. Η **δυνατότητα αξιοποίησης επενδυτικών προγραμμάτων**, που χρηματοδοτούνται εν μέρει από ελληνικούς και κοινοτικούς φορείς, δεδομένων των υψηλών επιχορηγήσεων και του συγκριτικά χαμηλού συνολικού κόστους που συνοδεύουν παρόμοιες επενδύσεις σε τομείς αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών

ενέργειας. Επιπλέον, είναι δυνατή στη περίπτωση ίδρυσης αιολικών πάρκων η σταδιακή εγκατάσταση των μηχανών, με διαχρονική κατανομή του κόστους επένδυσης σύμφωνα με το σχεδιασμό του επενδυτή.

xii. Η **έλλειψη ισχυρών ελληνικών οικονομικών συμφερόντων**, που έχουν επενδύσει σε άλλες μορφές ενέργειας, όπως για παράδειγμα, η πυρηνική ενέργεια στη Γαλλία, το πετρέλαιο στις Αραβικές χώρες, και τα όποια θα μπορούσαν να αποθαρρύνουν τυχόν κυβερνητικό ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Πράγματι, τα τελευταία χρόνια με την ενθάρρυνση της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η πολιτεία έχει δείξει αυξημένο ενδιαφέρον για τη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στην εγχώρια ενεργειακή αγορά, με τη θέσπιση νομικού πλαισίου (π.χ. νόμος 2244/94, 2773/99) αλλά και τη χρηματοδότηση αντίστοιχων έργων (π.χ. νόμος 2234/94 ή 2601/98), χωρίς βέβαια να αρθούν πλήρως οι αντιξοότητες που συνοδεύουν τη λειτουργία της κρατικής μηχανής και των αντίστοιχων γραφειοκρατικών μηχανισμών. Αρνητική επίσης εξέλιξη αποτελεί η πολιτική επιλογή της Ελληνικής πολιτείας υπέρ της αυξημένης διείσδυσης του εισαγόμενου φυσικού αερίου στο εγχώριο ενεργειακό ισοζύγιο.

xiii. Η **δυνατότητα αποκεντρωμένης ανάπτυξης** μέσα από αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας, γεγονός που μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την οικονομική δραστηριότητα των τοπικών κοινωνιών.

xiv. Η **αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας**, που περιορίζει τις απώλειες και το κόστος μεταφοράς και συνεισφέρει στην υποστήριξη των τοπικών δικτύων με έγχυση ηλεκτρικής ισχύος πλησίον των περιοχών υψηλής κατανάλωσης.

Συνοψίζοντας τα ανωτέρω πιστεύουμε ότι τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας είναι ασυγκρίτως περισσότερα και σοβαρότερα από τα υπάρχοντα μειονεκτήματα. Για το λόγο αυτό η στρατηγική απόφαση να αξιοποιηθεί στη χώρα μας το υπάρχον αιολικό δυναμικό, καθώς και να αναπτυχθούν κατασκευαστικές μονάδες παραγωγής ανεμογεννητριών μπορεί κάλλιστα να οδηγήσει σε οικονομικά βιώσιμες αλλά και ελκυστικές επενδύσεις, μη λαμβάνοντας στους ισολογισμούς μας υπόψιν τα παράλληλα οφέλη, που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος και την οικονομική ανεξαρτησία της χώρας μας.

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψιν την τοπογραφία της χώρας μας και την αφθονία των μικρών νησιών και των απομονωμένων αγροκτημάτων, πρέπει να ενθαρρύνουμε και την εγκατάσταση ανεμογεννητριών μικρών-μεσαίων διαστάσεων από ιδιώτες. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τους πιο συντηρητικούς υπολογισμούς της Ε.Ε., υπάρχουν στην Ευρωπαϊκή ένωση πάνω από πεντακόσιες εξήντα χιλιάδες (560.000) ιδιωτικές απομονωμένες αγροικίες, από τις οποίες περίπου το 10% ανήκει στη χώρα μας. Οι αγροικίες αυτές δεν έχουν πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο, με αποτέλεσμα η πιθανή εγκατάσταση ανεμογεννητριών να συνεισφέρει στην επίλυση των ενεργειακών τους προβλημάτων.

Τέλος στην περίπτωση κατά την οποία θα αποφασιστεί η εγχώρια παραγωγή



σημαντικού αριθμού ανεμογεννητριών, οι αντίστοιχες κατασκευαστικές εταιρίες θα έχουν τη δυνατότητα να επωφεληθούν και από τα λεγόμενα «φαινόμενα οικονομίας κλίμακας», τα οποία συνοδεύουν τη μαζική παραγωγή προϊόντων.

## 8.5 Εφαρμογές των ανεμοκινητήρων σήμερα

Η κλιμάκωση των ανεμοκινητήρων σύμφωνα με τις κατασκευές που έχουν γίνει σήμερα γίνεται βάσει της ισχύος τους και διακρίνονται σε:

- Ανεμοκινητήρες μικρής ισχύος μέχρι 20 KW
- Ανεμοκινητήρες μέσης ισχύος 20-250 KW
- Ανεμοκινητήρες μεγάλης ισχύος >250 KW

Οι ανεμοκινητήρες μικρής ισχύος χρησιμοποιούνται σε απομονωμένες περιοχές για κάλυψη αγροτικών αναγκών,- ιδιαίτερα για άντληση και θέρμανση νερού, θέρμανση κατοικίας, φωτισμό και άλλες μικροεφαρμογές. Τις περισσότερες φορές η λύση αυτή είναι οικονομικότερη. Οι ανεμοκινητήρες του τύπου αυτού είναι ανεξάρτητοι, μη συνδεδεμένοι με δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιούν γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που φορτίζει τους συσσωρευτές.

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με ανεμοκινητήρες μέσης και μεγάλης ισχύος μπορεί να γίνεται σε συνεργασία με δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

- (α) Λειτουργία ανεμοκινητήρα για εξοικονόμηση καυσίμου. Ο τρόπος αυτός λειτουργίας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη νησιωτική Ελλάδα όπου επικρατούν ισχυροί άνεμοι, και το κόστος της παραγόμενης KWh είναι υψηλό λόγω του αυξημένου κόστους του kg καυσίμου λόγω της θαλάσσιας μεταφοράς και του μικρού μεγέθους του σταθμού.
- (β) Λειτουργία ανεμοκινητήρα ως σταθμού βάσης θεωρώντας ότι η εγκατεστημένη ισχύς της Diesel μειώνεται κατά ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του ανεμοκινητήρα.
- (γ) Λειτουργία ως αντλητικού σταθμού για αποθήκευση νερού, και χρησιμοποίηση του στην υδροηλεκτρική του εκμετάλλευση.

Ειδικότερα συμπληρώνονται τα ακόλουθα:

### 8.5.1 Εφαρμογές άντλησης

Χαρακτηριστική περίπτωση είναι «το οροπέδιο με τους 10.000 ανεμόμυλους» όπως αποκαλείται το οροπέδιο του Λασιθίου της Κρήτης λόγω του αριθμού των ανεμόμυλων που χρησιμοποιούνται εκεί για άρδευση. Μια πιο μοντέρνα παραλλαγή εφαρμογής άντλησης είναι το σύστημα άντλησης με ανεμόμυλους που σχεδιάστηκε στον Καναδά με σκοπό την άντληση νερού και κατόπιν την με μεγάλη πίεση εκτόξευση του ως τεχνητή βροχή για πότισμα. Στις εφαρμογές άντλησης μπορούν να αναφερθούν και σύγχρονα συστήματα αφαλάτωσης στα οποία ο ανεμοκινητήρας μέσω αντλιών προωθεί (υπόγλυκο-θαλασσινό) νερό δια μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης και παράγει πόσιμο νερό.

Εκτός των αυτόνομων αυτών μονάδων στις εφαρμογές άντλησης, τον τελευταίο καιρό πολλά πειραματικά κέντρα μελετούν την συνεργασία αιολικών συστημάτων με ντιζελοκινητήρες ή ηλεκτροκίνητες μονάδες άντλησης με σκοπό την εξοικονόμηση καυσίμου. Από τα μέχρι τώρα αποτελέσματα προκύπτει ότι υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Τέλος μελετάται η συνεργασία αιολικών μηχανών και μικρών υδροστροβίλων για τη δημιουργία αυτόνομων υδροηλεκτρικών σταθμών. Στην περίπτωση αυτή οι ανεμογεννήτριες θα προωθούν νερό στον ταμιευτήρα υψηλής ενεργειακής στάθμης απ' όπου και όταν απαιτείται θα τροφοδοτείται ο υδροστρόβιλος του σταθμού. Το ενεργειακό αυτό σχέδιο είναι ελκυστικό δεδομένου ότι λύνει το πρόβλημα της αποθήκευσης της ενέργειας ενώ παρέχει συγχρόνως αυτονομία.

### 8.5.2 Εφαρμογές θερμότητας

Η μηχανική κίνηση που παράγεται από την ενέργεια του ανέμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας στην παραγωγή θερμότητας είτε με την τριβή μεταξύ των στερεών είτε κατάθλιψη υγρών. Η θερμότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση χώρων, θερμοκηπίων, στη βιομηχανία, στην αποξήρανση γεωργικών προϊόντων κ.α.. Αξιόλογη ήταν η προσπάθεια που έγινε σε χωριό της Δανίας, όπου οι μαθητές και καθηγητές σχολείου κατασκεύασαν μια ανεμογεννήτρια 2 MW για θέρμανση των κτιριακών εγκαταστάσεων του σχολείου και για παροχή ζεστού νερού.

### 8.5.3 Εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρισμού

Η μηχανική ενέργεια του δρομέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κίνηση γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το παραγόμενο ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιείται για τη φόρτιση συσσωρευτών (μικρές μονάδες) ή να διοχετεύεται απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε στην περίπτωση αυτή γίνεται εξοικονόμηση καυσίμου από τον κεντρικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής. Μια άλλη δυνατότητα με πολύ καλές προοπτικές είναι η χρήση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για ηλεκτρόλυση νερού και η αποθήκευση του παραγόμενου υδρογόνου. Το υδρογόνο θα μπορούσε να μεταφερθεί σε άλλες θέσεις για καύση (π.χ. κινητήρες αυτοκινήτων) με προϊόν καύσης το νερό.

## 8.6 Προοπτικές εφαρμογής ανεμοκινητήρων στην Ελλάδα

Η χώρα μας βρίσκεται στην εύκρατη ζώνη όπου επικρατούν καλής ταχύτητας άνεμοι, συγχρόνως όμως έχει και ευνοϊκή διαμόρφωση εδάφους που συμβάλει στην επαύξηση της αιολικής ενέργειας. Οι παραλιακές περιοχές, και ιδιαίτερα οι νησιωτικές, προσφέρονται για εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου, και εξασφαλίζουν ικανοποιητικό συντελεστή χρησιμοποίησης της εγκατάστασης. Επομένως τα νησιά μας διεκδικούν πρωταρχική θέση στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, γι' αυτό και εκεί παλαιότερα γινόταν σε μεγάλη κλίμακα εκμετάλλευση της ενέργειας αυτής, αλλά και γιατί δεν υπήρχαν πρωτογενείς μορφές ενέργειας.

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας θα μπορούσε να καλύψει ένα μεγάλο μέρος των αναγκών των νησιών μας και να γίνει πηγή εθνικού πλούτου. Στο νησιωτικό χώρο εξ άλλου δεν εμφανίζονται τυφώνες και υπάρχει πνοή ανέμου όλο το χρόνο με ελάχιστες ημέρες άπνοιας.

Σήμερα οι ανάγκες των νησιών σε ενέργεια καλύπτονται από τους αυτόνομους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι είναι τοπικοί Ντιζελοηλεκτρικοί σταθμοί, εκτός από Κρήτη και Ρόδο, ενώ μερικά νησιά που είναι κοντά στην ηπειρωτική πλευρά έχουν συνδεθεί και τροφοδοτούνται από τα κεντρικά δίκτυα. Ένας αριθμός νησιών έχουν συνδεθεί μεταξύ τους και τροφοδοτούνται από κεντρικούς αυτόνομους σταθμούς. Για χρόνια προβλέπεται ότι τα νησιά που είναι απομακρυσμένα από την ηπειρωτική Ελλάδα, θα στηρίζουν την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών στην αυτόνομη παραγωγή και θα παραμένουν ανεξάρτητα από το εθνικό δίκτυο.

Οι δαπάνες για προμήθεια και εγκατάσταση μονάδων παραγωγής, αγορά και μεταφορά καυσίμων, λειτουργία και συντήρηση των μονάδων, στρεφόμενη και εγκαταστημένη εφεδρεία για την εξυπηρέτηση μικρών φορτίων με μεγάλες μεταβολές, επιβαρύνουν υπέρμετρα το κόστος παραγωγής. Αλλά και η ανάγκη επέκτασης των δικτύων για εξυπηρέτηση των διασπαρμένων καταναλωτών δημιουργεί κόστος. Για όλα αυτά χρειάζεται διερεύνηση και αναζήτηση της πιο πρόσφορης λύσης μέσα σε πλαίσιο οικονομικά αποδεκτό. Περιοχές που βρίσκονται μακριά από τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ή μικρά νησάκια που δεν δικαιολογείται η εγκατάσταση αυτόνομου σταθμού μπορούν να εξυπηρετηθούν με μικρές ανεμογεννήτριες ικανές να καλύψουν ανάγκες φωτισμού, άντλησης νερού, θέρμανσης νερού και κατοικίας, και ψύξης για συντήρηση τροφίμων. Οι ανεμογεννήτριες της ισχύος αυτής λειτουργούν και σε μικρές ταχύτητες ανέμου, έχουν απλή και ανθεκτική κατασκευή και για τις ανάγκες φωτισμού όταν υπάρχει άπνοια χρησιμοποιούν συστοιχία συσσωρευτών. Σ' αυτόν τον τύπο που από παλιά χρησιμοποιείται έχουν γίνει τελευταία σημαντικές βελτιώσεις στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α.. Η χρήση του έχει επιβληθεί με ασφάλεια στη ναυτιλία για φωτοσημάνσεις,

που οποιαδήποτε άλλη λύση θα ήταν υπερβολικά δαπανηρή. Ο ελληνικός θαλάσσιος χώρος έχει 700 φωτοσημάνσεις, από τις οποίες οι 70 είναι επιτηρούμενες και από αυτές μόνο οι 15 ηλεκτροδοτούνται. Επισημαίνεται η ανάγκη χρησιμοποίησης της αιολικής ενέργειας για ηλεκτροδότηση τουλάχιστον στις επιτηρούμενες φωτοσημάνσεις όπου το προσωπικό έχει πρόσθετες ανάγκες ρεύματος.

Επομένως οι ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενεργειακή εξυπηρέτηση απομακρυσμένων περιοχών, τόσο στο νησιωτικό όσο και στην ηπειρωτικό χώρο.

Ο τύπος της ανεμογεννήτριας ο οποίος μας ενδιαφέρει είναι αυτός των μέσων ισχύων, ο οποίος λειτουργεί παράλληλα με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα η λειτουργία παράλληλα με το δίκτυο γιατί όπως αναφέρθηκε προηγουμένως για πολλά ακόμα χρόνια τα περισσότερα νησιά θα στηρίζουν την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών στην αυτόνομη παραγωγή με μηχανές DIESEL. Στην περίπτωση αυτή σκοπός της ανεμογεννήτριας είναι η εξοικονόμηση καυσίμου, ενώ οι μηχανές DIESEL θα αναπληρώνουν την ανεμογεννήτρια στο δίκτυο όταν η πνοή του ανέμου είναι χαμηλή, καθώς επίσης θα καλύπτουν και τα φορτία αιχμής της περιοχής ή του νησιού. Στην ανεμογεννήτρια μέσης ισχύος υπάρχει ένα όριο στην ισχύ της σε σχέση με το μέγεθος και την κατανομή των φορτίων του δικτύου στο οποίο πρόκειται να συνδεθεί. Αυτό συμβαίνει γιατί οι απότομες και μεγάλου εύρους μεταβολές της ισχύος της ανεμογεννήτριας επηρεάζουν τη λειτουργία του αυτόνομου σταθμού, και ειδικότερα τους ρυθμιστές στροφών των μηχανών DIESEL και τους ρυθμιστές τάσεως των γεννητριών με αποτέλεσμα την εμφάνιση ταλάντωσης τάσεως και συχνότητας στο δίκτυο.

Η ονομαστική ισχύς ανεμογεννήτριας (μέγιστη δυνατή ισχύς) θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι μικρότερη από το ελάχιστο φορτίο του εικοσιτετραώρου. Η τιμή αυτή της ονομαστικής ισχύος καθορίζεται από την επιτρεπτή αύξηση των στροφών της γεννήτριας, λόγω μείωσης φορτίου, ώστε η αύξηση αυτή να μην επιφέρει ουσιαστική μεταβολή στη συχνότητα του ρεύματος. Για την καμπύλη φορτίου του νησιού με μέγιστη ισχύ  $P$  (φορτίο αιχμής) εάν επιτρέπεται σχετική αύξηση της συχνότητας του ρεύματος κατά  $\delta$  θα πρέπει:

$$\delta = \frac{\eta - \eta_{FL}}{\eta_{FL}}$$

Όπου  $\eta_{FL}$  οι στροφές πλήρους φορτίου.

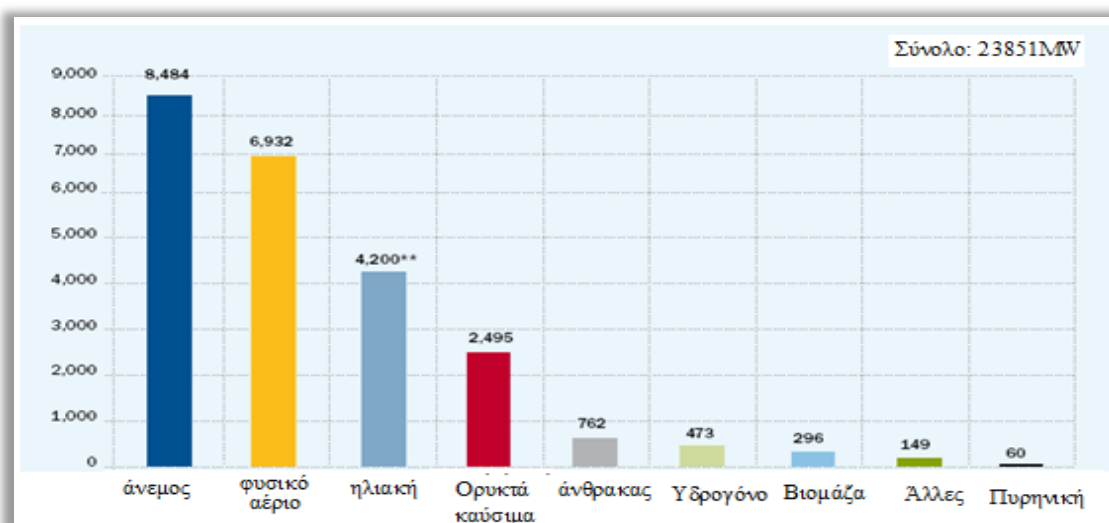
## 8.7 Κινητικότητα στον διεθνή και ελληνικό χώρο

Η Δανία υπήρξε η πρώτη Ευρωπαϊκή χώρα που υιοθέτησε μια επιτυχημένη πολιτική ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας και παρέμεινε η κυρίαρχη χώρα αναφορικά με την παραγωγή ηλεκτρισμού από αιολική ενέργεια μέχρι σήμερα. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η κλίμακα ανεμογεννητριών μεγέθους 300 με 500 KW άρχισε να εισάγεται με επιτυχία στην υπόλοιπη Ευρώπη, σηματοδοτώντας την έκρηξη της αιολικής ενέργειας στη Γερμανία. Κατά τη διάρκεια της ραγδαίας αυτής αύξησης, η Γερμανική βιομηχανία αιολικής ενέργειας έφτασε τα τεχνολογικά επίπεδα της Δανίας και τώρα διαδραματίζει πρωταγωνιστικό ρόλο στην παγκόσμια αγορά αιολικών συστημάτων. Παρόμοια πορεία ακολούθησε και η Ισπανία από τα μέσα της δεκαετίας του '90. Αυτή η ανάπτυξη κατέστη δυνατή λόγω της ύπαρξης ισχυρών αγορών με ασφαλείς συνθήκες για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά.

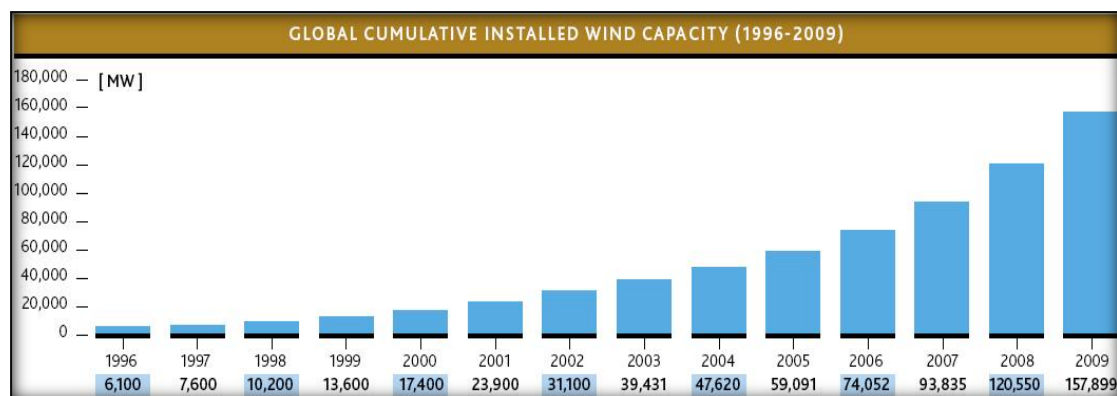
1973	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
0,2	7,3	19,3	24,6	35,3	59,6	53,4	26,1	35,4

Σχήμα 8.7 Χρηματοδότηση του προγράμματος αιολικής ενέργειας στις ΗΠΑ ( $10^6$  \$).

Η πορεία ανάπτυξης της αγοράς της αιολικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια υπήρξε συνεχής και εντυπωσιακή. Μέχρι το τέλος του 2008 περίπου 121 GW ανεμογεννητριών είχαν εγκατασταθεί και λειτουργούσαν σε 60 χώρες. Από αυτά τα 69,5 GW περίπου ήταν εγκατεστημένα στην Ευρωπαϊκή Ένωση.



Σχήμα 8.8 Εγκατεστημένη ισχύς στην ΕΕ το 2008.



Σχήμα 8.9 Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας 1996-2009.

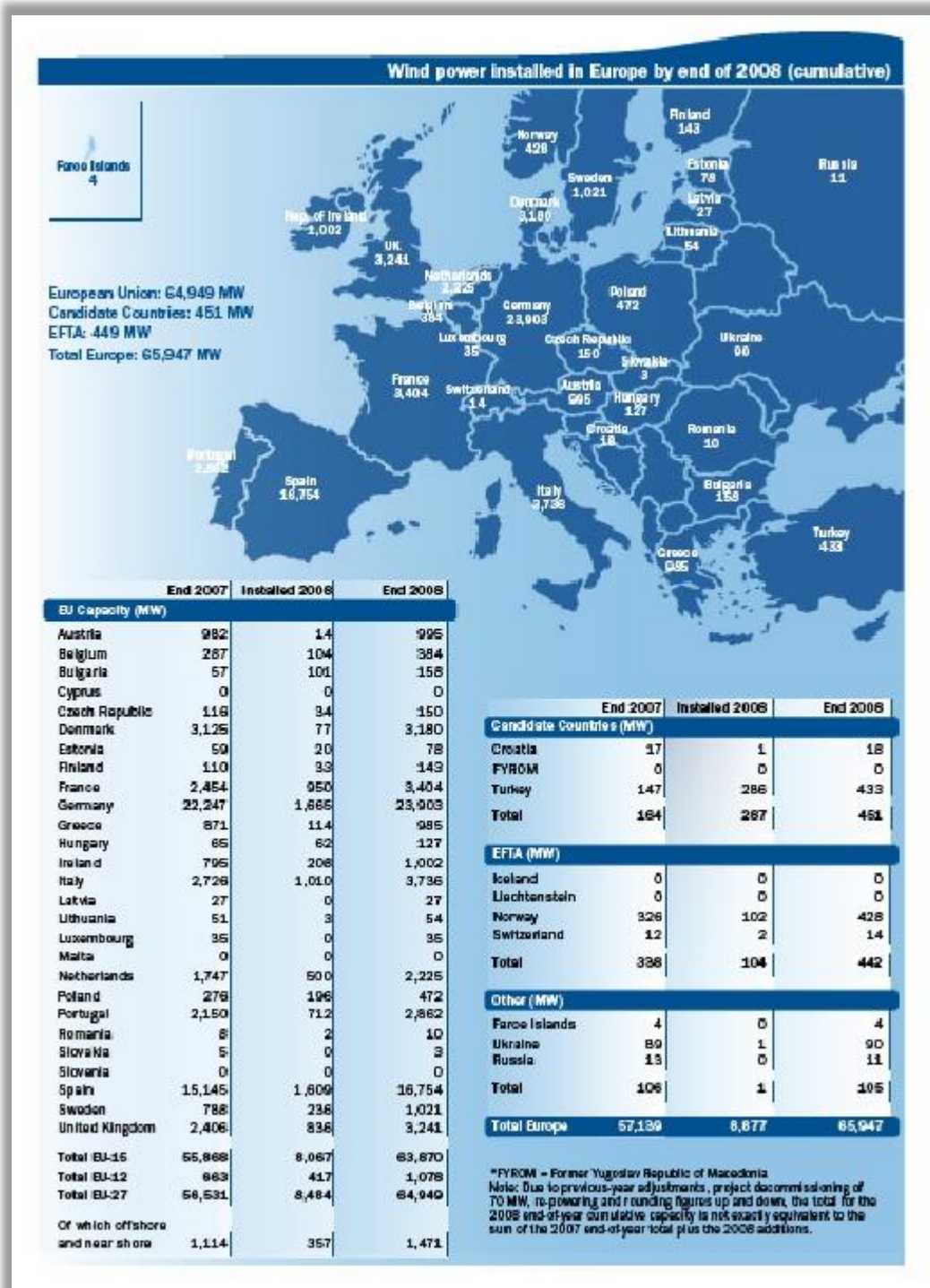
Οι πέντε σημαντικότερες αγορές αιολικής ενέργειας (Η.Π.Α., Γερμανία, Ισπανία, Κίνα και Ινδία) κάλυπταν περίπου το 72% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος το 2008. Οι παραδοσιακά κυρίαρχες στον τομέα χώρες της Ευρώπης (Γερμανία, Ισπανία και Δανία), πλαισιώνονται πλέον από την Ιταλία, τη Γαλλία, τη Μεγάλη Βρετανία, την Πορτογαλία και την Ολλανδία, οι οποίες έχουν εμφανίσει σημαντικούς ρυθμούς ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια. Η Γερμανική αγορά από μόνη της κατέχει περίπου το 36% της Ευρωπαϊκής αγοράς και το 20% της παγκόσμιας αγοράς.

Η ίδια τάση τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να διαφαίνεται όχι μόνο στην Ευρώπη όσο και σε άλλες περιοχές του κόσμου. Στο τέλος του 2008 υπήρχαν 9 κράτη με εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 3000 MW, ενώ το 2007 ήταν μονάχα 6. Πέραν των παραδοσιακών μεγάλων αγορών της δεκαετίας του 1990 (Γερμανία, Η.Π.Α., Ισπανία και Δανία), η Η.Π.Α., η Κίνα και η Ινδία εμφανίζουν ραγδαίους ρυθμούς ανάπτυξης. Οι υπόλοιπες χώρες με εγκατεστημένη ισχύ άνω των 3000 MW είναι η Ιταλία, η Γαλλία και η Μεγάλη Βρετανία.

Όπως προκύπτει υπάρχουν χώρες με πολύ μεγάλους ρυθμούς ανάπτυξης όπως η Γαλλία, η Ιταλία, η Μεγάλη Βρετανία και η Πορτογαλία που δεν κατατάσσονται στις 5 σημαντικότερες αγορές, αλλά εμφανίζουν μεγάλη δυναμική. Ειδικότερα, στην Ευρώπη αν και την τελευταία πενταετία έχουν κυριαρχήσει η Γερμανία και η Ισπανία, σταδιακά το ποσοστό εγκατάστασης στις δύο αυτές χώρες μειώνεται λόγω της αύξησης των άλλων αγορών που αναφέρθηκαν πιο πάνω, αν και το 2007 η τάση αυτή προσωρινά ανακόπτεται λόγω της σημαντικής αύξησης των εγκαταστάσεων στην Ισπανία.

Η βιομηχανία των ανεμογεννητριών αναπτύχθηκε σε εκείνες τις χώρες που δημιούργησαν και στήριξαν την ανάπτυξη των αιολικών εγκαταστάσεων. Σήμερα οι χώρες προέλευσης των βιομηχανιών που προμηθεύουν την παγκόσμια αγορά ταυτίζονται με αυτές που έχουμε τις περισσότερες εγκαταστάσεις. Τα τελευταία χρόνια παράλληλα με την σημαντική αύξηση της αγοράς παρατηρείται και η συγκέντρωση της παραγωγής σε όλο και λιγότερους και μεγαλύτερους κατασκευαστές. Οι τέσσερις μεγαλύτεροι κατασκευαστές (τρεις από τους οποίους είναι Ευρωπαίοι) κάλυπταν τα 3/5 της παγκόσμιας αγοράς το 2007. Οι Ευρωπαίοι κατασκευαστές στο σύνολό τους καλύπτουν περίπου τα 2/3 της παγκόσμιας αγοράς.

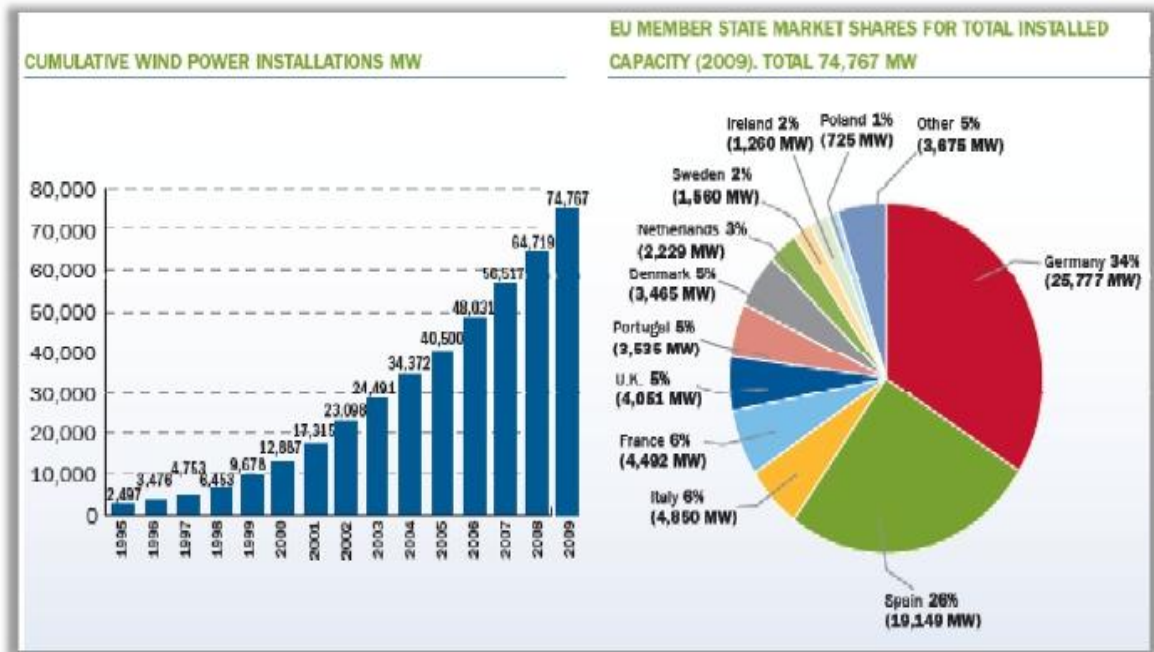
Τα τελευταία χρόνια παρατηρούμε επίσης την είσοδο στον τομέα της κατασκευής ανεμογεννητριών ,μεγάλων εταιριών του ενεργειακού χώρου (General Electric, Siemens) κυρίως μέσω της εξαγοράς υπαρχόντων κατασκευαστών



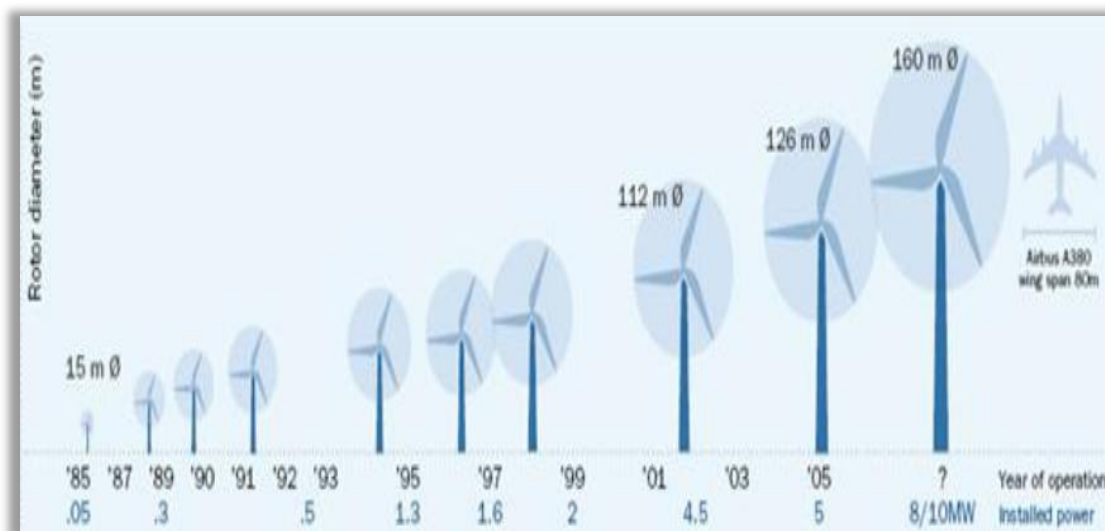
Σχήμα 8.10 Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ευρώπη το 2008.

Η τεχνολογία είναι πλέον διαθέσιμη και εξελίσσεται συνεχώς και τα κόστη έχουν μειωθεί σημαντικά. Στα 25 χρόνια ύπαρξης των ανεμογεννητριών στην αγορά, το μέγεθός τους εκατονταπλασιάστηκε όσον αφορά την ονομαστική ισχύ (από 50

KW σε 500 KW) και οχταπλασιάστηκε όσον αφορά την διάμετρό τους (από 15m σε 124m). Το μέσο μέγεθος ανεμογεννητριών που εγκαθίσταται ετησίως αυξάνεται συνεχώς: από 240 KW το 1993 σε 890 KW το 2000 και σε 1492 KW το 2007.

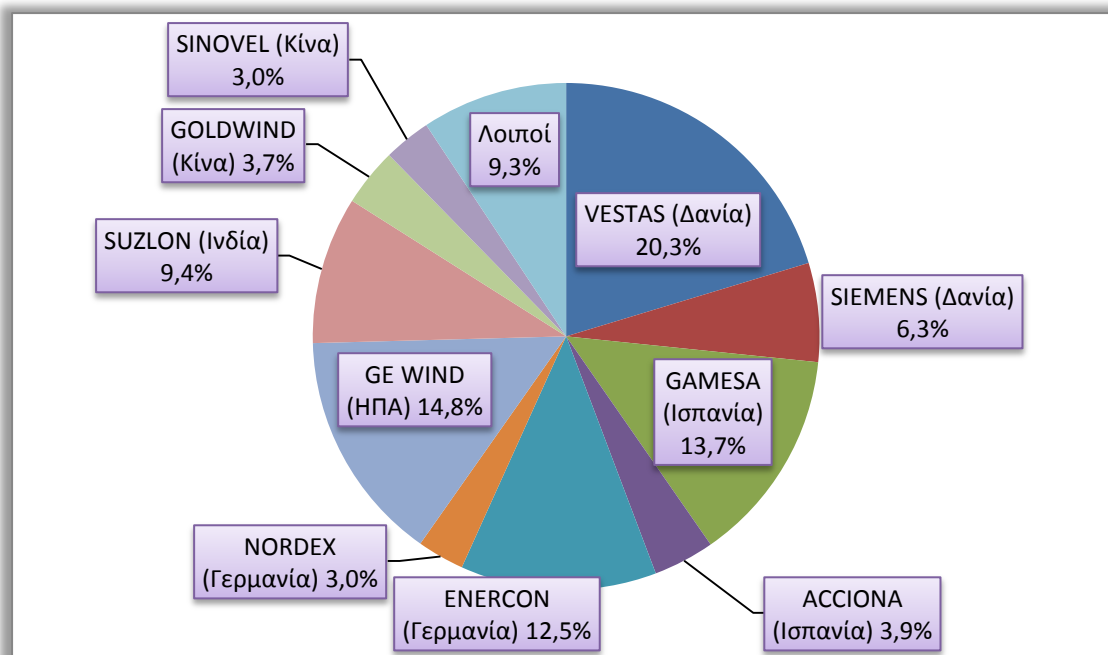


Σχήμα 8.11 Συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην ΕΕ το 2009.



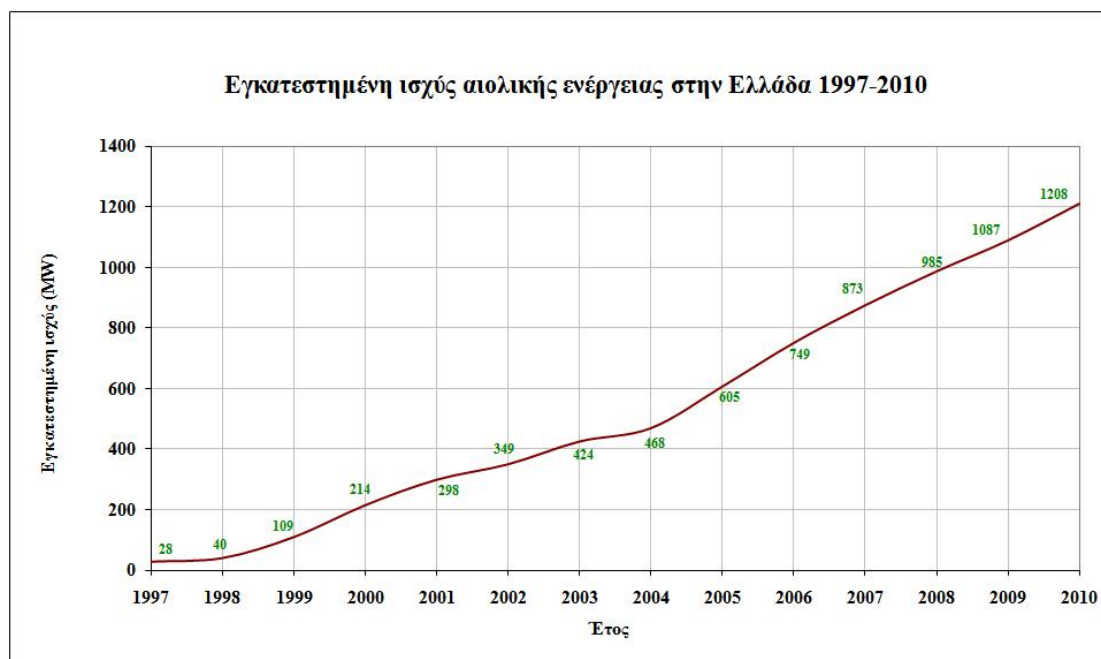
Σχήμα 8.12 Εξέλιξη μεγέθους ανεμογεννητριών.





**Σχήμα 8.13** Οι σημαντικότεροι κατασκευαστές στον κόσμο-Ποσοστά επί τοις ετήσιας εγκατεστημένης ισχύος (2007.)

Τα 52,9% των ανεμογεννητριών που εγκαταστάθηκαν το 2007 είχαν εγκατεστημένη ισχύ άνω των 1,5 MW και το 98,7% άνω των 750 KW. Το 2001 τα αντίστοιχα ποσοστά ήταν 17% και 68%.



**Σχήμα 8.14** Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα 1997-2010.

Θα πρέπει πάντως να παρατηρήσουμε ότι η αύξηση αυτή δεν γίνεται με τον ίδιο τρόπο σε όλες τις χώρες. Οι συνθήκες της αγοράς αλλά και η τοπογραφία και οι υποδομές παίζουν σημαντικό ρόλο. Στην Αμερική και την Ισπανία διαμορφώνεται

σε 1,7 και 1,5 GW αντίστοιχα, ενώ παραμένει σημαντικά χαμηλότερο στην Ινδία και την Κίνα με το μέσο μέγεθος που εγκαταστάθηκε το 2006 να είναι 900KW.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή στη Λευκή Βίβλο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, έθεσε ως στόχο για την αιολική ενέργεια τα 40 GW εγκατεστημένης ισχύος μέχρι το 2010. Ο στόχος αυτός επιτεύχθηκε στο τέλος του 2005. Για το λόγο αυτό, προτάθηκαν από την Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας νέοι στόχοι, πιο ρεαλιστικοί δεδομένης της παρούσας κατάστασης ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας. Οι στόχοι αυτοί είναι 80 GW για το 2010, 180 GW για το 2020 και 300 GW για το 2030. Η αιολική ενέργεια συνεισφέρει σήμερα το 4% περίπου της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ε.Ε.. Αν οι στόχοι αυτοί επιτευχθούν η αιολική ενέργεια θα παράγει το 13% το 2020 και το 23% το 2030.

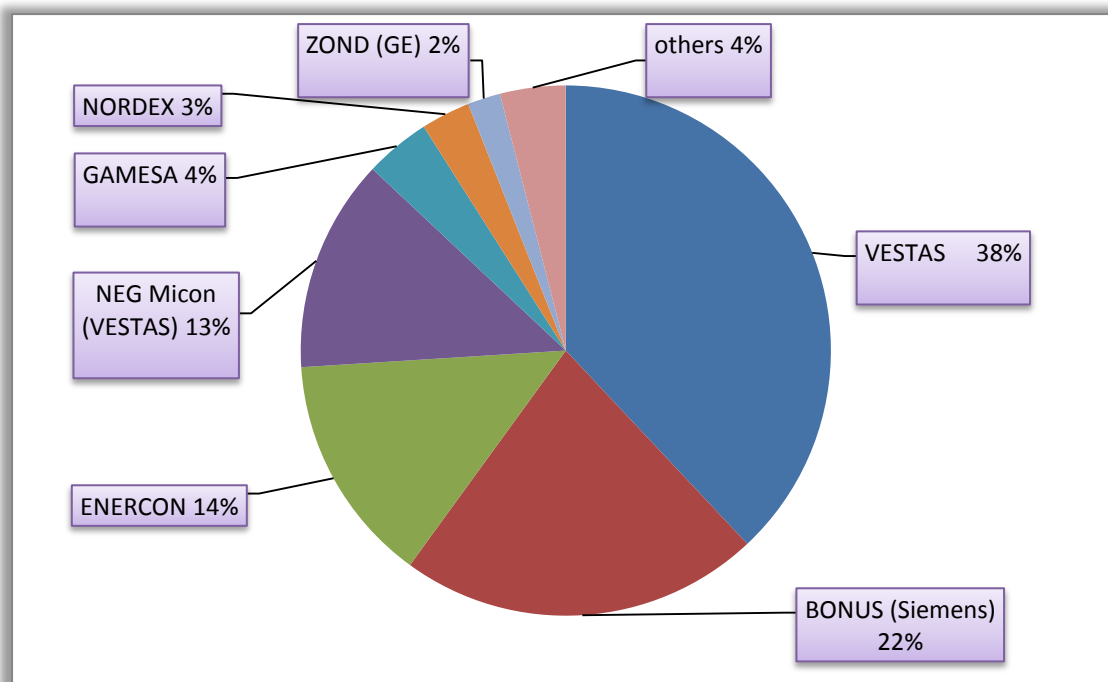
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ	ΙΣΧΥΣ (MW)	Αριθμ. Α/Γ	%
VESTAS	321,37	270	36,9%
BONUS (SIEMENS)	193,00	258	22,2%
ENRCON	123,94	163	14,2%
NEG Micon (VESTAS)	117,28	149	13,5%
GAMESA	31,45	37	3,6%
NORDEX	28,50	45	3,3%
ZOND	18,53	40	2,1%
JACOBS	12,00	20	1,4%
HMZ	10,80	36	1,2%
WINDMASTER			
NEDWIND	5,00	10	0,6%
EAB WINDMATIC	3,92	50	0,5%
NORDTANK	1,25	5	0,1%
TACKE	1,50	3	0,2%
OA	1,10	2	0,1%
WINCON	0,65	6	0,1%
MICON	0,63	2	0,1%
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>870,91</b>	<b>1096</b>	<b>100%</b>

**Σχήμα 8.15** Μερίδια κατασκευαστών ανεμογεννητριών στην Ελληνική αγορά (Στοιχεία ΕΛΕΤΑΕΝ, 2007.)

Στην Ελλάδα απ' την άλλη, πριν από το 1977 η δραστηριότητα στη περιοχή της αιολικής ενέργειας ήταν περιορισμένη, πλην ελαχίστων ατομικών προσπαθειών όπως του Ι. Χατζηβασιλειάδη της ΔΕΗ. Ο καθηγητής του Ε.Μ.Π. Γ. Μπεργελές, ανέπτυξε στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής του Ε.Μ.Π. ερευνητική δραστηριότητα μέσω διπλωματικών εργασιών και διδακτορικών εργασιών. Η δραστηριότητα ήταν και θεωρητική με την ανάπτυξη και πειραματική κάνοντας εκτεταμένη χρήση της αεροδυναμικής σήραγγας του εργαστηρίου.

Για τη διάδοση, αξιοποίηση και εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, δημιούργησε ήδη από το 1981

ιδιαίτερη Διεύθυνση Εναλλακτικών Μορφών Ενέργειας. Η διεύθυνση αυτή διεξάγει προκαταρκτικές ερευνητικές μελέτες για τη χαρτογράφηση του αιολικού δυναμικού της χώρας (ελληνικός αιολικός Άτλαντας), του εντοπισμού θέσεων, ιδιαίτερα στα νησιά υψηλού αιολικού δυναμικού για την εγκατάσταση αιολικών μηχανών. Παράλληλα με διεθνείς συνεργασίες ή και με συνεργασία με ελληνικά πανεπιστήμια και ελληνικούς κατασκευαστικούς οίκους προχώρησε και προχωρεί στην εγκατάσταση αιολικών μηχανών διαφόρων ισχύων.

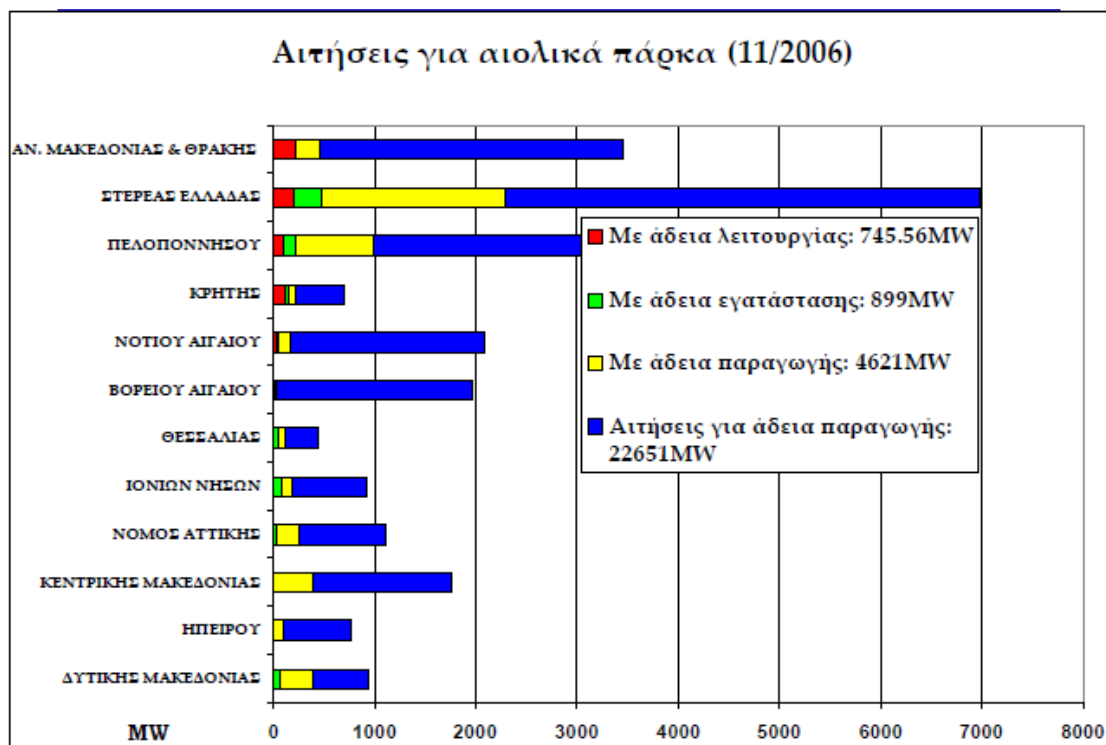


Σχήμα 8.16 Εγκατεστημένη ισχύς ανά κατασκευαστή (Στοιχεία ΕΛΕΤΑΕΝ, 2007).

Το πρώτο αιολικό πάρκο της χώρας που λειτούργησε επί 5 χρόνια και έδωσε σημαντική εμπειρία ήταν το αιολικό πάρκο της Κύθνου με 5 ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 20 KW έκαστη. Οι ανεμογεννήτριες αυτές αντικαταστάθηκαν ήδη από μεγαλύτερες ισχύος 33 KW.

Στη Μύκονο λειτουργεί από το 1988 ανεμογεννήτρια ισχύος 100 KW, ενώ στην Κάρπαθο, υπάρχει Α/Γ ισχύος 175 KW. Προβλέπεται σύντομα να εγκατασταθούν ανεμογεννήτριες 500 KW στο Λαύριο και στα Άνω Μούλια Κρήτης, ενώ στην Άνδρο προβλέπεται η εγκατάσταση Α/Γ ισχύος 350 KW. Στη Σκύρο εγκαταστάθηκε ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, και προβλέπεται η εγκατάσταση μιας κατακόρυφου άξονα, ισχύος 100 KW. Και οι δύο ανεμογεννήτριες είναι ελληνικής σχεδίασης (εργαστήριο αεροδυναμικής Ε.Μ.Π.) και ελληνικής κατασκευής.

Τέλος προβλέπεται να εγκατασταθούν αιολικά πάρκα στη Άνδρο (1500 KW), στη Λήμνο (440 KW), Σάμο (900 KW), Χίο (1 MW), Εύβοια (5 MW), Κρήτη (5 MW), Λέσβο (5 MW) κλπ.



Σχήμα 8.17 Αιτήσεις για αιολικά πάρκα (11/2006).

Κατασκευαστής	Τύπος	Ισχύς
Bonus (Δανία)	CT/CS // CT/AS	600 kW // 1-2.3 MW
DeWind (Γερμανία / Αγγλία)	VTDI	600 kW - 2 MW
Enercon (Γερμανία)	VTDD	300 kW - 4.5 MW
GE Wind Energy (ΗΠΑ/ Γερμανία)	CT/CS // VTDI	600 kW // 900 kW - 3.6 MW
Lagerwey (Ολλανδία)	VT/AGP // VTDD	250 kW // 750 kW - 2 MW
Jeumont Industrie (Γαλλία)	VTDD	750 kW - 1.5 MW
MADE (Ισπανία)	CT/CS // VTSGP	660 kW - 1.3 MW; 2 MW
NEG Micon (Δανία)	CT/CS // CT/AS // VTDI	600 kW - 1.5 MW // 1.5-2 MW // 2.75 MW
Nordex (Γερμανία)	CT/CS // VTDI	600 kW - 1.3 MW // 1.5-2.5 MW
REpower Systems (Γερμανία)	CT/CS // CT/AGP // VTDI	600 - 750 kW // 1.5-2 MW 1050 kW
Vestas (Δανία)	SVT/OSP // VTDI	660 kW - 2.75 MW // 850 kW - 3 MW

**CT/CS** = Σταθερών Στροφών, Σταθερό βήμα έλικας  
**CT/AS** = Σταθερών Στροφών, Ενεργό stall (αρνητικό μεταβλητό βήμα έλικας, 3-5 degrees)  
**VTDI** = Μεταβλητής ταχύτητας (+ έλεγχος pitch), Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης  
**VTDD** = Μεταβλητής ταχύτητας, Σύγχρονη Γεννήτρια + έλεγχος pitch (Enercon + Lagerwey + 1.5 MW Jeumont), Σταθερό βήμα έλικας (Jeumont J48 (750 kW))  
**VTSGP** = Μεταβλητής ταχύτητας + έλεγχος pitch, με Σύγχρονη Γεννήτρια  
**VT/AGP** = Μεταβλητής ταχύτητας /+ έλεγχος pitch, με Ασύγχρονη Γεννήτρια (100% τροφοδότηση μέσω των μετατροπέων)  
**CT/AGP** = Σταθερών Στροφών + έλεγχος pitch με Ασύγχρονη Γεννήτρια  
**SVT/OSP** = Ημι-μεταβλητής ταχύτητας + έλεγχος pitch (Σύστημα OptiSlip)

Σχήμα 8.18 Κατασκευάστριες Εταιρείες, Τύποι Ανεμογεννητριών και επίπεδα ισχύος.

Σήμερα η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς ανέρχεται στα 600 KW ενώ προβλέπεται στην τρέχουσα δεκαετία να αυξηθεί στα 150 MW.

Για σύγκριση να αναφερθεί ότι η σημερινή εγκαταστημένη αιολική ισχύς στη Ευρωπαϊκή Κοινότητα είναι 340 MW με πρόβλεψη μέχρι το 2000 να αυξηθεί στα 4000 MW, δηλαδή η Δ.Ε.Η. με το αιολικό της πρόγραμμα θα βρίσκεται στην ευρωπαϊκή πρωτοπορία.

Η σημαντική αυτή αύξηση οφείλεται ουσιαστικά στο ενδιαφέρον των ευρωπαϊκών κοινοτήτων για την μείωση της ενεργειακής εξάρτησης που μέσω χρηματοδοτούμενων ενεργειακών προγραμμάτων επιχειρείται η ανάπτυξη μιας ευρωπαϊκής ενεργειακής τεχνολογίας.

# Κεφάλαιο 9

---

*Το Αιολικό Δυναμικό*

---

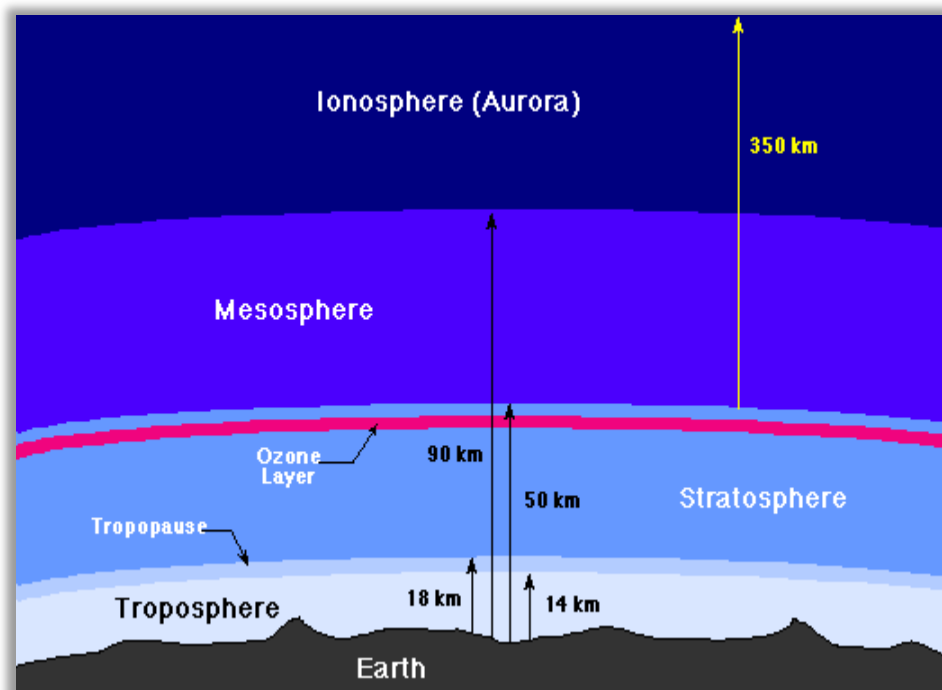
## ΤΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

### 9.1 Γενικά για την ατμόσφαιρα

Ατμόσφαιρα ονομάζεται ο χώρος μέσα στον οποίο δημιουργούνται και εκδηλώνονται τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Ο χώρος αυτός ορίζεται ως το σφαιροειδές αέριο περίβλημα που περικλείει ένα ουράνιο σώμα. Οι δυνάμεις που τη συγκρατούν σε υδροστατική ισορροπία γύρω από το σώμα αυτό είναι οι βαρυτικές δυνάμεις του πλανήτη. Οι διάφορες διαταραχές και τα φαινόμενα που αυτές συνεπάγονται, οφείλονται σε μικρές αποκλίσεις από αυτή τη κατάσταση ισορροπίας.

Το μείγμα των αερίων που συνιστούν την ατμόσφαιρα της Γης εκτείνεται μέχρι ύψους 800 με 1000 km από την επιφάνεια του εδάφους με μεγαλύτερο ύψος (ή βάθος) στον ισημερινό και μικρότερο στους πόλους. Τα συνιστώσα αέρια είναι ανομοιόμορφα κατανομημένα στο ύψος αυτό με τρόπο ώστε το 99,9% της ολικής μάζας της ατμόσφαιρας να βρίσκεται στα πρώτα 50 km και το 0,099% στην περιοχή μεταξύ 50 και 100 km ύψους.

Τα σπουδαιότερα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας, εκτός από τη σύνθεσή της είναι η θερμοκρασία, η πίεση και η πυκνότητα. Τα χαρακτηριστικά αυτά υπόκεινται σε σημαντικές μεταβολές που εξαρτώνται από το υψόμετρο, την ώρα, την ηλιακή επίδραση (δηλαδή την εποχή) και άλλους παράγοντες.



Σχήμα 9.1 Η σύνθεση της ατμόσφαιρας.

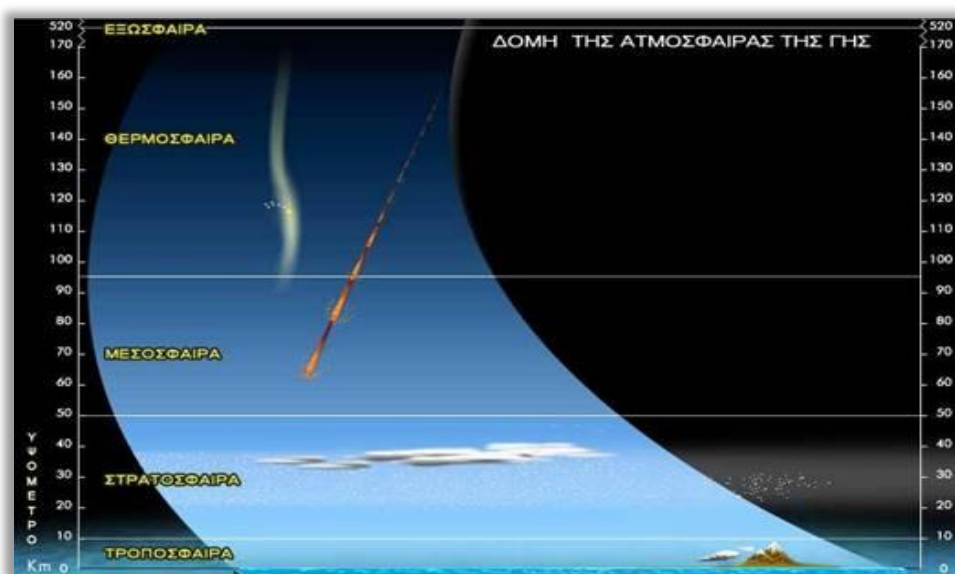
Η θερμοκρασία στην ατμόσφαιρα μεταβάλλεται από ένα ελάχιστο  $-138^{\circ}\text{C}$  που μετρήθηκε σε ύψος 85 km, μέχρι ένα μέγιστο, σε περιόδους μέγιστης ηλιακής

επίδρασης  $1227^{\circ}\text{C}$  σε ύψη μεγαλύτερα των 400 km. Οι θερμοκρασίες αυτές, κατά ένα μέρος, εξαρτώνται από την έκταση στην οποία τα διάφορα αέρια των περιοχών αυτών απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που εκπέμπουν στη συνέχεια.

Η πίεση της ατμόσφαιρας, που εξαρτάται από το ολικό βάρος του αέρα που βρίσκεται από πάνω της, μειώνεται προοδευτικά καθώς το ύψος αυξάνεται. Πιο συγκεκριμένα, ενώ στην επιφάνεια της θάλασσας έχει μια μέση τιμή 760 mmHg, σε ύψος 100 km πέφτει στα  $2,26 \cdot 10^{-4}$  mmHg, στα  $1,00 \cdot 10^{-6}$  mmHg, στο ύψος των 200 km και ούτω καθ' εξής.

Η πυκνότητα της ατμόσφαιρας κατά τον ίδιο τρόπο μειώνεται με την αύξηση του υψόμετρου. Στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας βρίσκεται μια τιμή  $1,226\text{kg/m}^3$  ενώ στα 100 km η μέση πυκνότητα είναι μόνο  $4,97 \cdot 10^{-7}$   $\text{kg/m}^3$  και στα 200 km έχει μειωθεί στα  $3,32 \cdot 10^{-10}$   $\text{kg/m}^3$ .

Για ευκολία στη μελέτη των διαφόρων ατμοσφαιρικών φαινομένων, η ατμόσφαιρα υποδιαιρείται σε ζώνες. Ο διαχωρισμός που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι αυτός που στηρίζεται στην κατανομή της θερμοκρασίας με το ύψος. Η πρώτη περιοχή που εκτείνεται από το επίπεδο του εδάφους μέχρι το πρώτο ελάχιστο της θερμοκρασίας, καλείται Τροπόσφαιρα. Η επόμενη περιοχή που εκτείνεται μέχρι το δεύτερο μέγιστο της θερμοκρασίας (το πρώτο μέγιστο της θερμοκρασίας βρίσκεται στο επίπεδο του εδάφους), καλείται Στρατόσφαιρα. Η πιο πάνω περιοχή, που φθάνει μέχρι το δεύτερο θερμοκρασιακό ελάχιστο, είναι η Μεσόσφαιρα. Η τέταρτη περιοχή που ακολουθεί, είναι η Θερμόσφαιρα. Πέρα από τη Θερμόσφαιρα βρίσκεται άλλη μια περιοχή η οποία όμως, δεν ορίζεται από τη θερμοκρασία της, καλείται Εξώσφαιρα και πιστεύεται ότι αρχίζει σε ύψος περίπου 400 km.



Σχήμα 9.2 Η δομή της ατμόσφαιρας.

Ο κύριος όγκος της γήινης ατμόσφαιρας είναι ηλεκτρικά ουδέτερος. Ωστόσο, σε ύψος πάνω από 50 km περίπου, ένα μικρό τμήμα της ατμόσφαιρας είναι ιονισμένο,



περιέχοντας ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η περιοχή αυτή της ατμόσφαιρας καλείται Ιονόσφαιρα και υποδιαιρείται στις επιμέρους ζώνες D, E, F1 και F2. Η κύρια αιτία ιονισμού των στοιχειωδών σωματιδίων της ατμόσφαιρας είναι η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλιακού φάσματος.

Τέλος σύμφωνα με έναν άλλο τρόπο χωρισμού, η ατμόσφαιρα διαιρείται σε μια περιοχή όπου δεν υπάρχει σχεδόν καμιά μεταβολή στη χημική της σύνθεση, την Ομόσφαιρα και μια άλλη περιοχή, πιο πάνω με σημαντικές μεταβολές στη σύνθεση την Ετερόσφαιρα.

Επίσης οι μεταβατικές ζώνες ανάμεσα σε μερικές από τις κύριες αυτές περιοχές, έχουν ιδιαίτερα ονόματα. Για παράδειγμα, η οριακή περιοχή ανάμεσα στην Τροπόσφαιρα είναι γνωστή ως Τροπόπαυση και η περιοχή ανάμεσα στη Στρατόσφαιρα και τη Μεσόσφαιρα ονομάζεται Στρατόπαυση.

Γενικά πάντως, ο πιο απλοποιημένος χωρισμός της ατμόσφαιρας είναι σε κατώτερη και ανώτερη ατμόσφαιρα. Η κατώτερη ατμόσφαιρα συνήθως θεωρείται ότι φθάνει μέχρι τη κορυφή της Στρατόσφαιρας – ένα ύψος περίπου 50 km. Κάθε τι πιο πάνω, ανήκει στην ανώτερη ατμόσφαιρα.

## 9.2 Ο Άνεμος

Οι άνεμοι αποτελούν κίνηση αέριας μάζας στην ατμόσφαιρα που κυρίως προκαλείται από την ηλιακή ακτινοβολία. Ειδικότερα είναι αποτέλεσμα των θερμοκρασιακών διαφορών που δημιουργούνται στην τροπόσφαιρα είτε λόγω του γεωγραφικού πλάτους είτε λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης. Οι διαφορετικές γεωγραφικές θερμοκρασίες οφείλονται σε δύο κυρίως παράγοντες:

Υψομετρική διαφορά δύο σημείων

Διαφορετική φύση της επιφάνειας (έδαφος ή νερό)

Οι άνεμοι που δημιουργούνται λόγω διαφορετικού γεωγραφικού πλάτους είναι φαινόμενα σχεδόν σταθερά ή μεταβλητά με μεγάλη περίοδο μεταβολής (εποχιακά). Λόγω των μεγάλων γεωγραφικών αποστάσεων που καλύπτουν οι κινήσεις αυτές καθώς και της μεγάλης ατμοσφαιρικής μάζας που μετακινείται, τα φαινόμενα αυτά επηρεάζονται και από την περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της.

Οι άνεμοι που οφείλονται στο δεύτερο παράγοντα χαρακτηρίζονται από μικρή χρονική διάρκεια (ωριαία ή ημερησία) και παρατηρούνται είτε κοντά σε ορεινούς όγκους, σε κοιλάδες ή σε λεκανοπέδια, είτε σε περιοχές κοντά σε θάλασσα ή λίμνη που υπάρχει διαφορετικός ρυθμός θέρμανσης ή ψύξης του εδάφους και του υδάτινου όγκου.

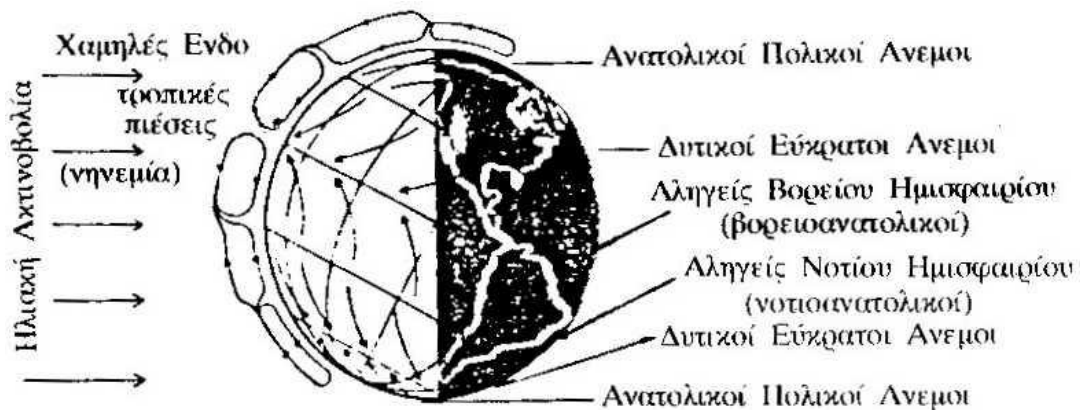
Η ένταση των τοπικών ανέμων και τα φαινόμενα που συνδέονται με αυτούς, εντείνονται ή εξασθενούν ανάλογα με τους συνοπτικούς ανέμους της πρώτης κατηγορίας.

Στην Ευρώπη οι άνεμοι που πνέουν επηρεάζονται από τα ανατολικά ρεύματα

του Ατλαντικού, τα ψυχρά βόρεια και τα θερμά τροπικά της Σαχάρας. Έτσι οι επικρατούντες άνεμοι είναι για τον μεν χειμώνα οι Νοτιοδυτικοί ενώ για το καλοκαίρι οι Δυτικοί και οι Βορειοδυτικοί. Ως προς την ένταση, οι άνεμοι της χειμερινής περιόδου είναι ισχυρότεροι καθώς το καλοκαίρι τα τοπικά συστήματα, όπως οι θαλάσσιες αύρες, έχουν μεγαλύτερη ένταση και μειώνουν την επίδραση του συνοπτικού πεδίου.



Σχήμα 9.3 Αν δεν υπήρχε η περιστροφή της γης, το πεδίο θα ήταν σταθερό.



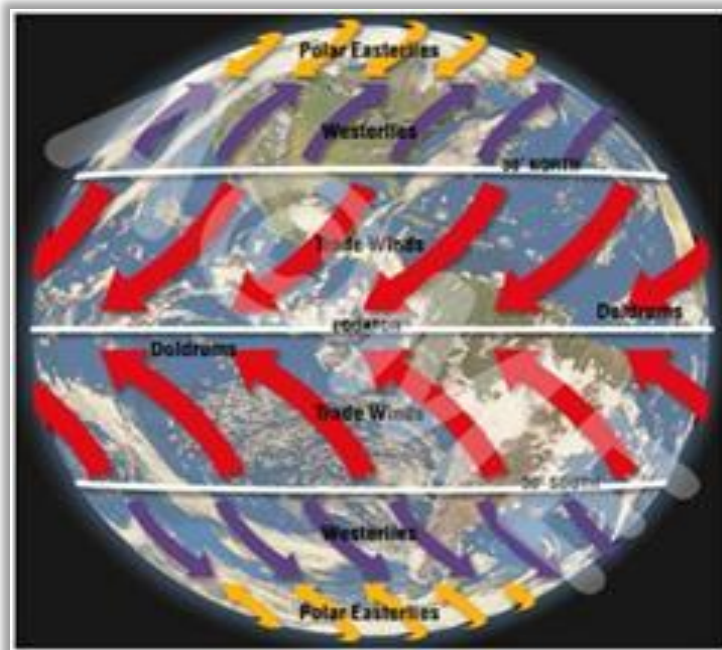
Σχήμα 9.4 Λόγω περιστροφής δημιουργείται μεταβλητό πεδίο τοπικών ανέμων.

Οι Δυτικοί και βορειοδυτικοί άνεμοι επικρατούν κατά κύριο λόγο στο χώρο της Μεσογείου καθώς στην περιοχή αυτή το γενικό πεδίο υφίσταται μικρότερη επίδραση από τα βόρεια ρεύματα που πνέουν από τη Ρωσία. Παρόλα αυτά, όμως, τα έντονα τοπικά συστήματα στις παράκτιες περιοχές μεταβάλλουν πολλές φορές τη γενική αυτή κατεύθυνση των ανέμων.

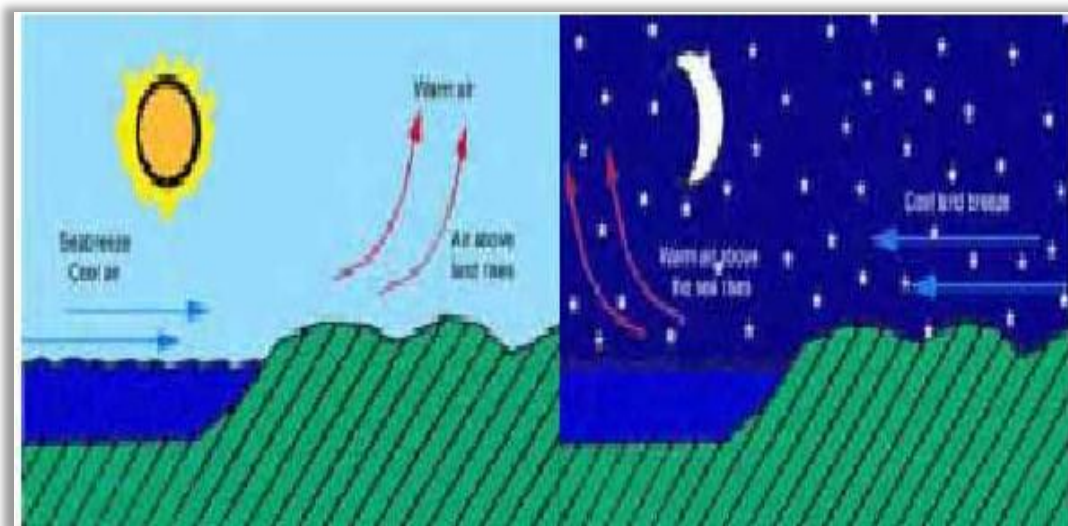
Στον ελλαδικό χώρο, λόγω και τη μορφολογία της Βαλκανικής Χερσονήσου, τη χειμερινή περίοδο επικρατούν τοπικοί Βόρειοι-Βορειοανατολικοί άνεμοι η ένταση των οποίων είναι μέση έως ισχυρή, την άνοιξη γίνονται νοτίων διευθύνσεων, ισχυρής επίσης έντασης, ενώ το καλοκαίρι η ένταση των ανέμων πέφτει με συνέπεια την εμφάνιση πολλών ημερών με νηνεμία.

Η ενέργεια που η αέρια μάζα λαμβάνει από τον ήλιο εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος, που η διαφοροποίηση στη θέρμανση εδάφους οδηγεί στη δημιουργία κλίσεων πίεσης που μαζί με τις δυνάμεις Coriolis και τις φυγόκεντρες εξισορροπούν τις αδρανειακές δυνάμεις .

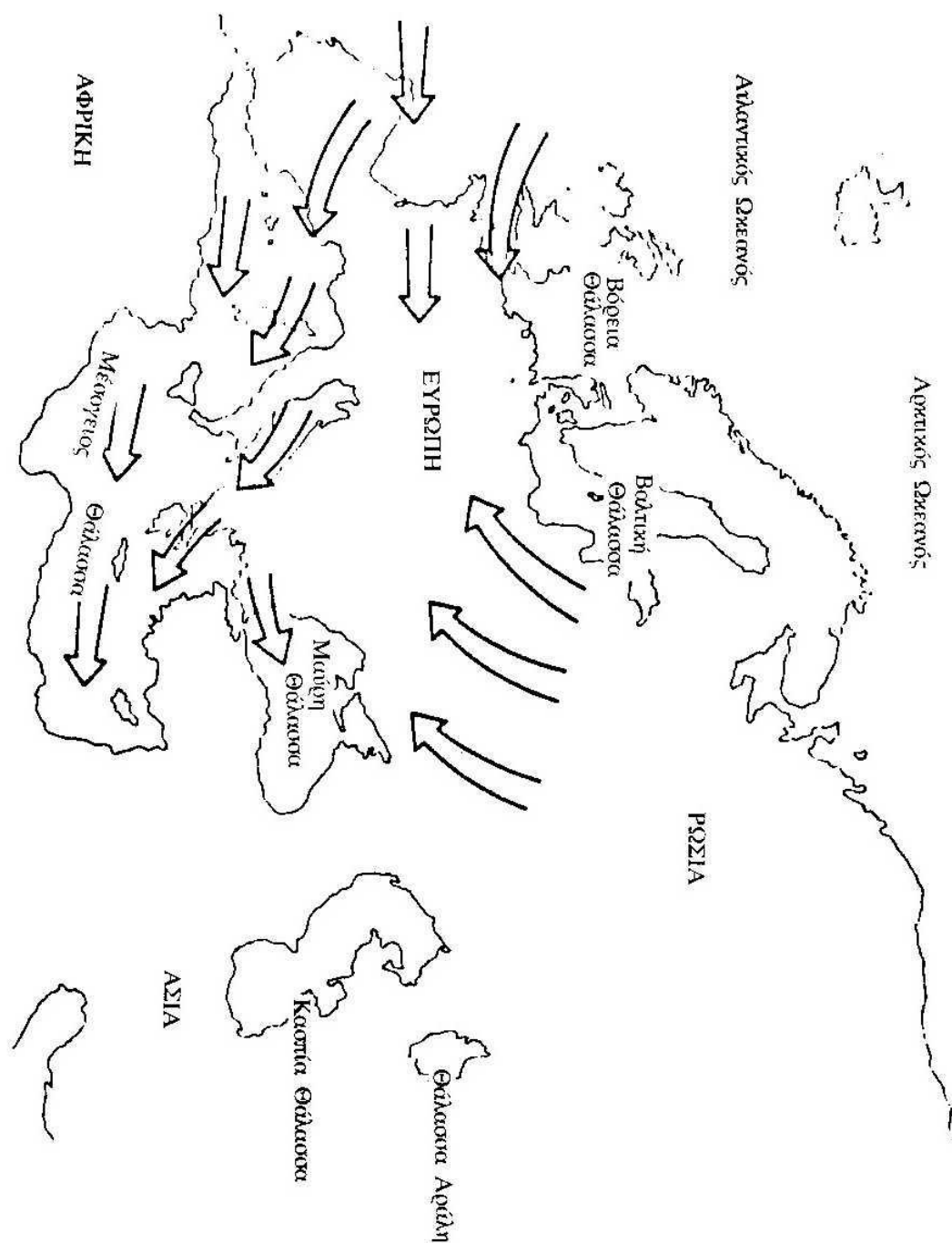
Από ιστορικούς λόγους έχει επικρατήσει στους μετεωρολόγους η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου στη κλίμακα Beaufort αντί του σωστού m/s.



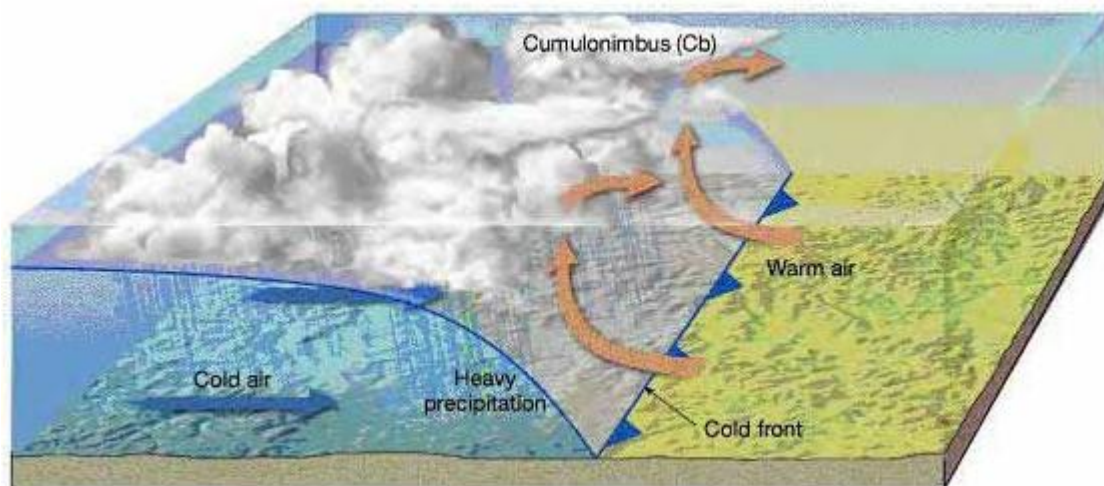
Σχήμα 9.5 Το πεδίο κυκλοφορίας των ανέμων στην επιφάνεια της γης.



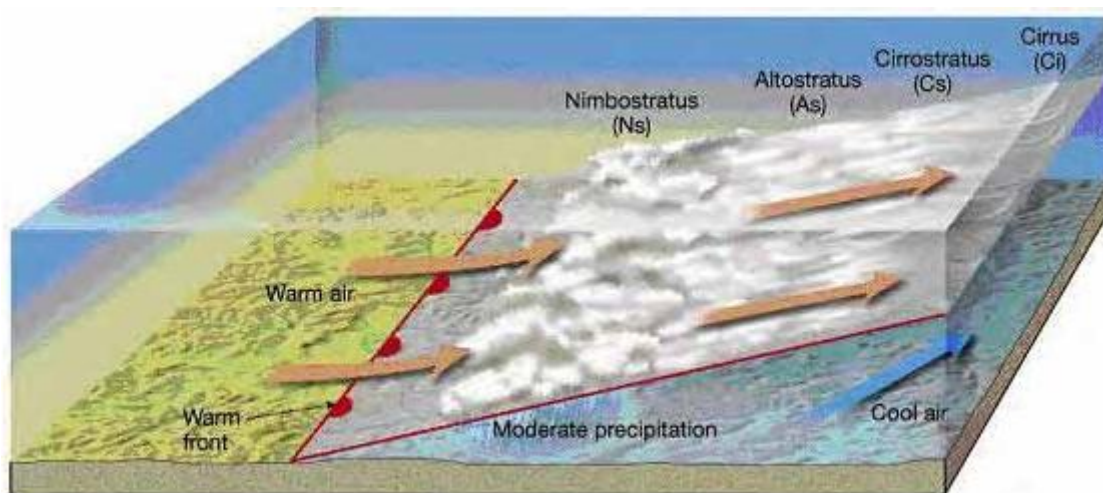
Σχήμα 9.6 Ροή του ανέμου.



Σχήμα 9.7 Οι συνοπτικοί άνεμοι που κατά κύριο λόγο πνέουν στην Ευρώπη.

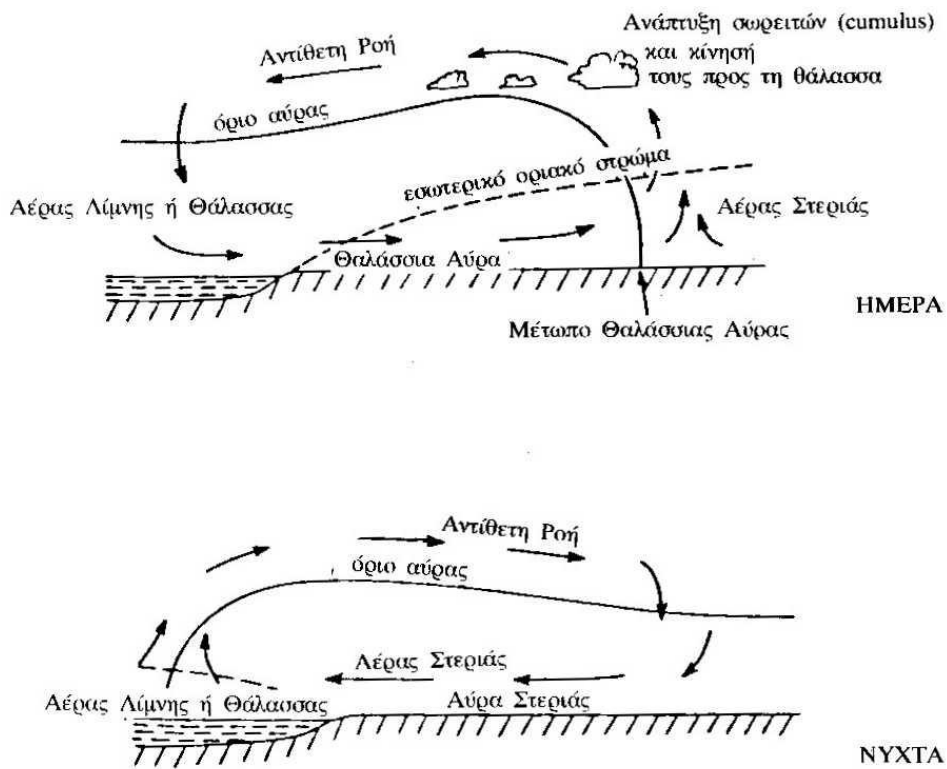
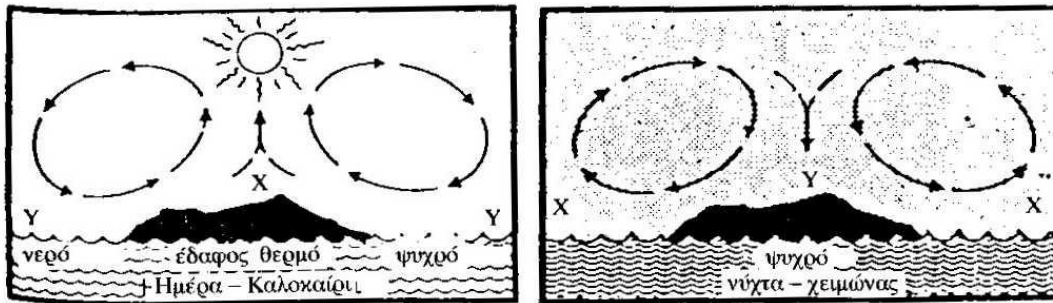


Σχήμα 9.8 Κάθετη τομή ενός ψυχρού μετώπου.



Σχήμα 9.9 Κάθετη τομή ενός θερμού μετώπου.

Από το σύνολο των κινήσεων του ανέμου η σπουδαιότερη σε σχέση με τον προσδιορισμό του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής είναι η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου. Βέβαια, για την επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας απαιτείται επιπλέον η γνώση της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου, να έχουν καταγραφεί οι επικρατούσες στην περιοχή αναταράξεις, ο στροβιλισμός και η τύρβη του ανέμου, καθώς και η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους από το έδαφος.



Σχήμα 9.10 Ημερήσια μεταβολή της αύρας λόγω διαφορετικού ρυθμού θέρμανσης – ψύξης του εδάφους και του νερού (θάλασσα ή λίμνη).

### 9.3 Χαρακτηριστικές παράμετροι του ανέμου

Η γνώση των χαρακτηριστικών του ανέμου είναι απαραίτητη στη μελέτη του αιολικού δυναμικού.

**α. Μέση ταχύτητα του ανέμου.**

Είναι ένα ιδιαίτερα μεταβλητό μέγεθος με σημαντική εξάρτηση από τα χαρακτηριστικά του εδάφους.

**β. Στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου.**

Είναι το άθροισμα της μέσης ταχύτητας και της διακύμανσης γύρω από τη μέση τιμή.

**γ. Μέγιστη ταχύτητα του ανέμου.**

Εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση της περιοχής και τα χαρακτηριστικά του εδάφους και καθορίζει την αντοχή μιας αιολικής μηχανής. Με βάση τις μετρήσεις ανά ώρα καθορίζεται η μέγιστη ημερήσια ταχύτητα του ανέμου και στη συνέχεια η μέγιστη μηνιαία και τέλος η μέγιστη ετήσια ταχύτητα του ανέμου που θα πρέπει να μελετηθεί σε βάθος χρόνου τουλάχιστον μιας δεκαετίας.

**δ. Ριπή του ανέμου.**

Είναι η ξαφνική και μικρής διάρκειας (περίπου 20 sec) αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου μετά το τέλος της ριπής επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα. Η ριπή συνήθως ξεπερνά τα 9 m/sec και διαφέρει από τα συνηθισμένα επίπεδα περίπου κατά 4-5 m/sec. Οι ριπές ανέμου καθορίζουν την κόπωση της μηχανής και αν διαρκέσουν περισσότερο από 30 sec, θα πρέπει ο μηχανισμός ασφαλείας να θέσει την ανεμογεννήτρια εκτός λειτουργίας.

**ε. Διεύθυνση του ανέμου.**

Ορίζεται από το σημείο του ορίζοντα από το οποίο φυσάει ο άνεμος σε σχέση με τη θέση την οποία μελετάμε. Η διεύθυνση του ανέμου εμφανίζει μικρότερες διακυμάνσεις από την ταχύτητα και εξαρτάται από το προσανατολισμό της τοποθεσίας, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τη βλάστηση (βουνό, κοιλάδα, λόφος, κτίρια κλπ).

Ως κύρια διεύθυνση του ανέμου ορίζεται η διεύθυνση που συνεισφέρει τουλάχιστον 10% στη συνολική διαθέσιμη αιολική ενέργεια. Ως επικρατούσες διευθύνσεις ανέμου ορίζονται οι διευθύνσεις που εμφανίζουν, στην περιοχή που μελετάμε τη μεγαλύτερη συχνότητα και αλλάζουν με την εποχή. Η διεύθυνση του ανέμου καθορίζεται με τη χρήση Ροδογράμματος

a/a	Beaufort	Ταχύτητα (cm/sec)	Μέση ταχύτητα (m/sec)	Ταχύτητα (Km/h)	Ονομασία	Ενδείξεις
1	0	0-0,2	0,10	2<	Νηνεμία	Ο καπνός ανεβαίνει κάθετα
2	1	0,3-1,5	0,90	2-6	Ελαφρός αέρας	Η διεύθυνση προσδιορίζεται από το καπνό. Η διεύθυνση δεν φαίνεται από ανεμοδείκτη
3	2	1,6-3,3	2,45	7-11	Ασθενής αέρας (Ηπια αύρα)	Γίνεται αισθητή στο πρόσωπο. Η διεύθυνση φαίνεται από ανεμοδείκτη
4	3	3,4-5,4	4,40	12-19	Λεπτός αέρας (Μέτρια αύρα)	Ξεδιπλώνει τη σημαία (λεπτό ύφασμα)
5	4	5,5-7,9	6,70	20-30	Μέτριος αέρας (Δροσερή αύρα)	Κινούνται τα μικρά κλαδιά των δέντρων και σηκώνει σκόνη
6	5	8-10,7	9,35	31-40	Λαμπρός αέρας (Ισχυρή αύρα)	Έχουμε ταλάντωση των μικρών δέντρων
7	6	10,8-13,8	12,30	41-50	Ισχυρός αέρας	Κινούνται τα μεγάλα κλωνάρια των δέντρων και σφυρίζουν τα τηλεφωνικά καλώδια
8	7	13,9-17,1	15,50	51-60	Σφοδρός αέρας	Κινούνται όλα τα δέντρα
9	8	17,2-20,7	18,95	62-74	Ορμητικός αέρας	Σπάζουν τα μικρά κλαδιά των δέντρων και εμποδίζεται το βάδισμα
10	9	20,8-24,4	22,60	75-87	Θύελλα	Υπάρχει κίνδυνος για ελαφρές κατασκευές
11	10	24,5-28,4	26,45	88-102	Ισχυρή θύελλα	Ξεριζώνονται δέντρα
12	11	28,5-32,6	30,55	103-120	Σφοδρή θύελλα	Έχουμε εκτεταμένες ζημιές
13	12	32,7-36,9	34,8	>120	Καταιγίδα	Έχουμε σοβαρές καταστροφές

Σχήμα 9.11 Μέτρηση ταχύτητας ανέμου στην κλίμακα Beaufort και μετατροπή σε m/sec.



**στ. Τραχύτητα του εδάφους.**

Η τραχύτητα εκφράζει το είδος του εδάφους. Η τραχύτητα εκφράζεται:

1. Από το μήκος τραχύτητας  $Z_0$ .
2. Από την κλάση (κατηγορία τραχύτητας).

Το μήκος τραχύτητας μπορεί να αλλάζει με τις εποχές, ορίζεται για επιφάνειες με ομοιόμορφη κατανομή στοιχείων τραχύτητας και επηρεάζεται από την πυκνότητα των εδαφικών χαρακτηριστικών. Για επίπεδη περιοχή, με τα στοιχεία τραχύτητας να καταλαμβάνουν το 10-20%, το  $Z_0$  συνοδεύεται με το μέσο ύψος ( $h$ ) των στοιχείων τραχύτητας με τη σχέση:

$$Z_0 = 0,15h$$

$$\text{Av} \quad Z_0 \leq 0,03, \text{ κλάση} = 1,698823 + \ln(z_0)/\ln(150),$$

$$\text{Av} \quad Z_0 > 0,03, \text{ κλάση} = 3,912489 + \ln(z_0)/\ln(3,333333),$$

**ζ. Ανατάραξη του αέρα (Τύρβη).**

Είναι διακύμανση της ταχύτητας του αέρα γύρω από τη μέση τιμή. Η ένταση της ανατάραξης εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους. Μπορεί να υπολογιστεί με βάση το μήκος της τραχύτητας  $Z_0$ .

Για  $Z_0 \leq 0,20m$ .

$$I = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}$$

Για  $Z_0 > 0,20m$ .

$$I = \frac{-0,14 \ln Z_0 + 0,78}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}$$

Όπου  $Z_0$  η τραχύτητα του εδάφους σε m,  $Z$  το ύψος αναφοράς σε m, και  $I$  η ένταση ανατάραξης αέρα καθαρός αριθμός.

**η. Στροβιλισμός του αέρα.**

Στροβιλισμός είναι η δημιουργία ανωμαλιών στη ροή του αέρα λόγω της ανατάραξης και των διαφόρων χαρακτηριστικών εμποδίων της επιφάνειας του εδάφους.

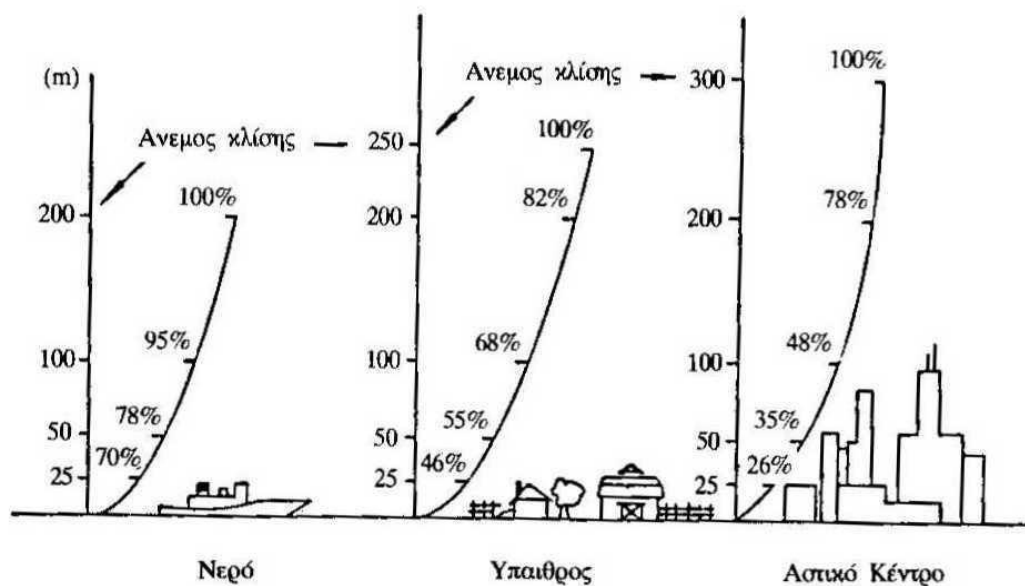
**θ. Κατανομή του ανέμου.**

Η κατανομή του ανέμου εκφράζει τις μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου σε συνάρτηση με το ύψος.

## 9.4 Γενικά για το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα

Καθώς η ατμόσφαιρα βρίσκεται σε σχετική κίνηση στο κατώτατο τμήμα της λόγω του ιξώδους του αέρα δημιουργείται ένα στρώμα αέρα, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, μέσα στο οποίο η σχετική ταχύτητα μεταβάλλεται από μηδέν πάνω στην επιφάνεια της γης, μέχρι μεγαλύτερες τιμές. Στο οριακό αυτό στρώμα δεν μπορούν να αγνοηθούν οι δυνάμεις τριβής, όπως η διαστατική ανάλυση δείχνει ότι μπορεί να γίνει για τον αέρα έξω από τη στοιβάδα αυτή.

Το ύψος (ή πάχος ή βάθος) του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (ΑΟΣ), δεν είναι σταθερό ούτε τοπικά ούτε χρονικά. Οι κύριοι παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται η τιμή αυτή είναι η μορφή του στερεού ορίου (τραχύτητα εδάφους), που είναι η επιφάνεια της γης, και η κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας. Στην ουδέτερη ατμοσφαιρική κατάσταση, όπου η ταχύτητα του αέρα σε ύψος δέκα μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους είναι μεγαλύτερη από  $5 \div 7 \text{ ms}^{-1}$ , δηλαδή  $U_{Z=10} \geq 5 \div 7 \text{ ms}^{-1}$ , ο δεύτερος παράγοντας εξαλείφεται και μένει ο προσδιορισμός του ύψους του ΑΟΣ ως συνάρτηση της μορφολογίας της επιφάνειας του εδάφους και πιο συγκεκριμένα της τραχύτητάς του. Για ομαλό έδαφος και αδύναμο άνεμο το πάχος του οριακού στρώματος μπορεί να είναι της τάξης των 200 μέτρων ενώ για ανώμαλη επιφάνεια (μεγάλη τραχύτητα) και έντονο άνεμο είναι δυνατό να φθάσει μέχρι 1200 μέτρα. Αντίθετα για πολύ ευσταθή κατάσταση της ατμόσφαιρας το πάχος του ΑΟΣ είναι της τάξης των 30 μέτρων ενώ σε συνθήκες που ευνοούν την έντονη ανάμιξη του αέρα (ανοδικά – καθοδικά ρεύματα) το ύψος του ΑΟΣ φθάνει μέχρι 3 km. Ωστόσο όμως, οι μετρήσεις που κατά καιρούς έγιναν στη φύση δίνουν διάφορες τιμές ακόμα και για επιφάνειες παρόμοιας τραχύτητας.



Σχήμα 9.12 Μεταβολή του ύψους του ατμοσφαιρικού στρώματος ανάλογα με την τραχύτητα του εδάφους.

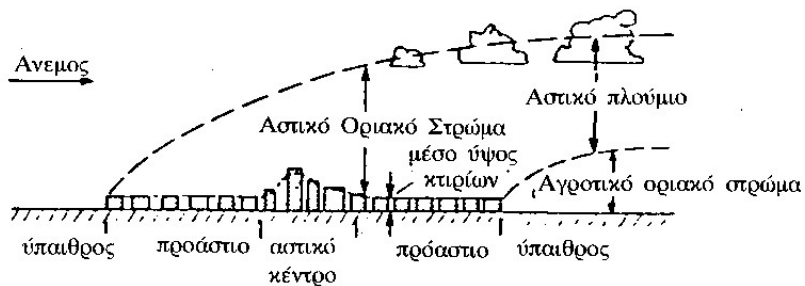
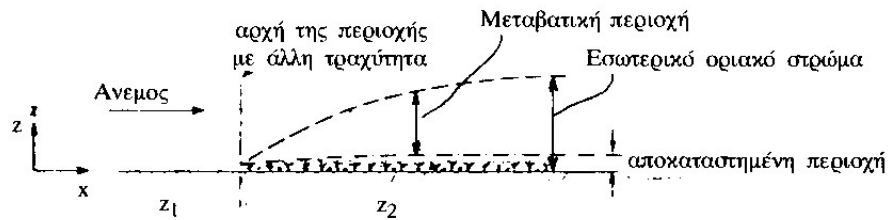
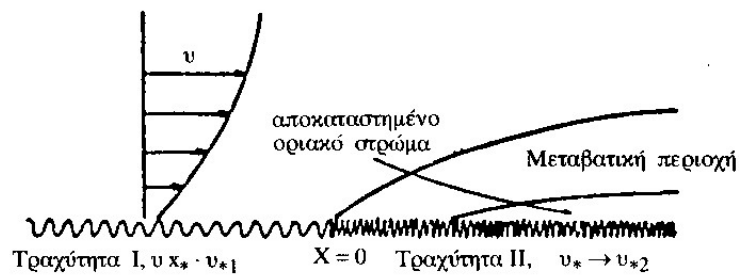
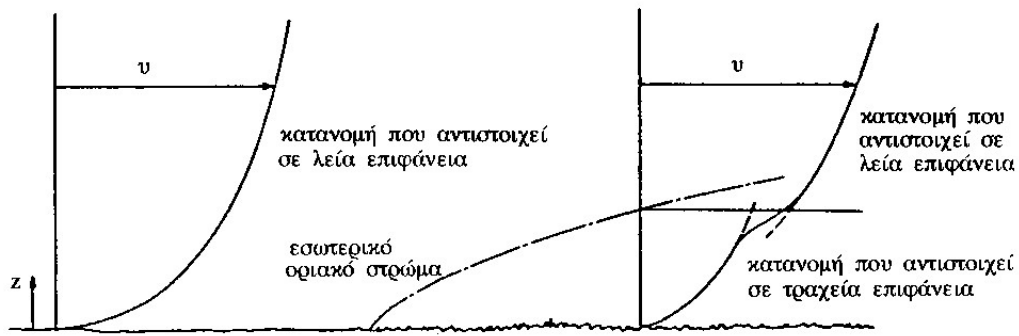
Η κυριότερη αιτία της ασυμφωνίας αυτής είναι ότι οι περιοχές που έχουν σχετικά μεγάλη έκταση και συγχρόνως παρουσιάζουν ομοιόμορφη τραχύτητα ώστε να αναπτυχθεί πλήρως το ΑΟΣ, περιορίζονται σε ορισμένες μόνο κατηγορίες (έρημος, θάλασσα, πεδιάδες με ομοιόμορφη κάλυψη). Αντίθετα οι περιοχές που ενδιαφέρουν συνήθως (αστικά ή βιομηχανικά κέντρα, παραθαλάσσιες ή παραλίμνιες περιοχές) εκτός του ότι ο αέρας που τις περιβάλλει σπάνια βρίσκεται σε ουδέτερη κατάσταση λόγω της θερμικής ανομοιομορφίας προς κάθε κατεύθυνση, παρουσιάζουν έντονες μεταβολές της τραχύτητας του εδάφους με αποτέλεσμα είτε να μην προλαβαίνει να αναπτυχθεί το ΑΟΣ είτε να δημιουργείται εσωτερικό οριακό στρώμα, που τροποποιεί την αρχική μορφή του οριακού στρώματος. Για να υπάρχει μια κοινή αναφορά, χωρίς όμως να περιορίζεται κάποια ευελιξία επιλογής, προτάθηκε από τον Counihan, για το ουδέτερο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα μια μέση τιμή για κάθε μορφή εδάφους ίση με 600 μέτρα.

Μετά τον έστω και τυπικό καθορισμό της τιμής του ύψους του στρώματος αυτού, μένει ο μαθηματικός προσδιορισμός της κατακόρυφης κατανομής των μεγεθών που σχετίζονται με τη ρευστομηχανική δομή του. Εξετάζεται η ουδέτερη ατμοσφαιρική κατάσταση όπου δεν εμφανίζονται θερμοκρασιακές αποκλίσεις από την αδιαβατική θερμοβαθμίδα, κατάσταση που κυρίως ενδιαφέρει για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού. Οι αποκλίσεις αυτές έχουν ως αποτέλεσμα, εκτός από τη μεταβολή του ύψους του ΑΟΣ, να επηρεάζουν και τη δομή του. Επίσης στην ουδέτερη κατάσταση και μέχρι το ύψος του ΑΟΣ η πυκνότητα του αέρα μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σταθερή καθώς επίσης και η υπόλοιπη φυσική κατάσταση του (πχ υγρασία) και η χημική του σύνθεση.

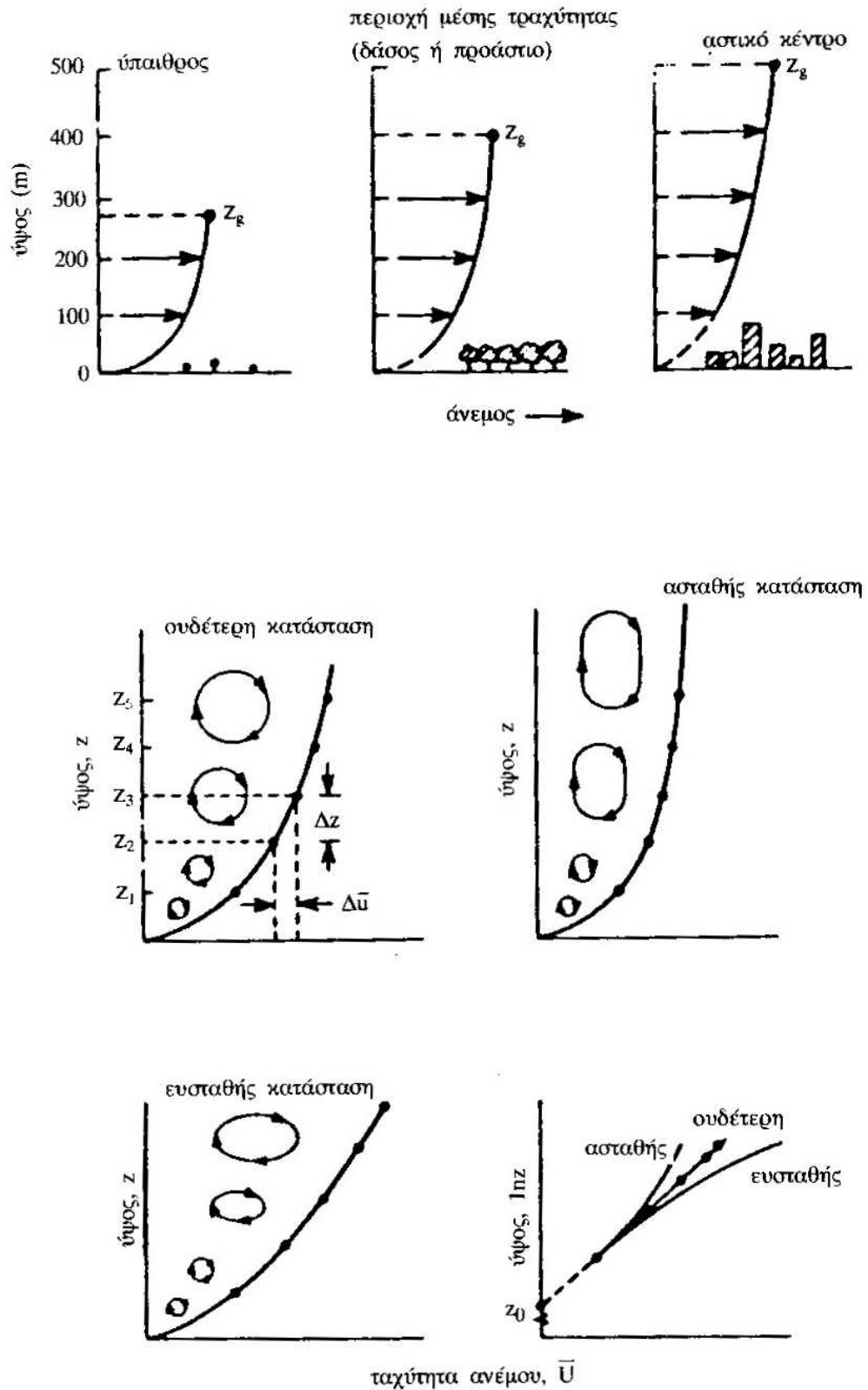
Κατ' αρχή θα πρέπει να προσδιοριστεί η φύση της ροής και αν όντως είναι ροή οριακού στρώματος. Αναφέρθηκε στην αρχή ότι, καθώς οι αέριες μάζες κινούνται ως προς την επιφάνεια της γης, δημιουργείται ένα οριακό στρώμα μέσα στο οποίο το διάνυσμα της ταχύτητας του αέρα μεταβάλλεται από μηδέν στην επιφάνεια της γης, μέχρι την τιμή που μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελεύθερη ροή. Η επιβράδυνση της ροής εξ αιτίας της επιφάνειας της γης, δημιουργεί μια ροή που μοιάζει με τη ροή του οριακού στρώματος όταν οι κλίσεις της πίεσης κατά μήκος (διαμήκης κατεύθυνση) της ροής είναι μεγάλες σε σύγκριση με τις κλίσεις που είναι κάθετες στη ροή. Αντίθετα, η ροή που δημιουργείται σε διαστάσεις μικροκλίμακας, λόγω τοπικών μεταβολών της θερμοκρασίας, παρουσιάζει ένα πεδίο ροής με μικρότερη ομοιότητα προς αυτό του οριακού στρώματος.

Παραδείγματα όπου η ροή του ανέμου δεν είναι τύπου οριακού στρώματος συναντώνται στις αποκολλημένες περιοχές στα υπήνεμα λόφων ή βουνών, στις καταιγίδες και στους κυκλώνες. Ωστόσο, τις περισσότερες φορές και ειδικότερα στην Ευρώπη, μέχρι ύψους 1000 μέτρων τουλάχιστον, η ροή είναι τύπου οριακού στρώματος επιτρέποντας έτσι να μιλάμε σχεδόν πάντα για ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ΑΟΣ).

Μέσα στο στρώμα αυτό μπορούν να διακριθούν τρία επιμέρους στρώματα. Σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του εδάφους βρίσκεται το στρωτό οριακό υπόστρωμα του οποίου το πάχος είναι το πολύ μερικά χιλιοστά. Ο αέρας που το αποτελεί προσκολλάται σε όλες τις επιφάνειες του στερεού ορίου. Το δεύτερο στρώμα πάνω

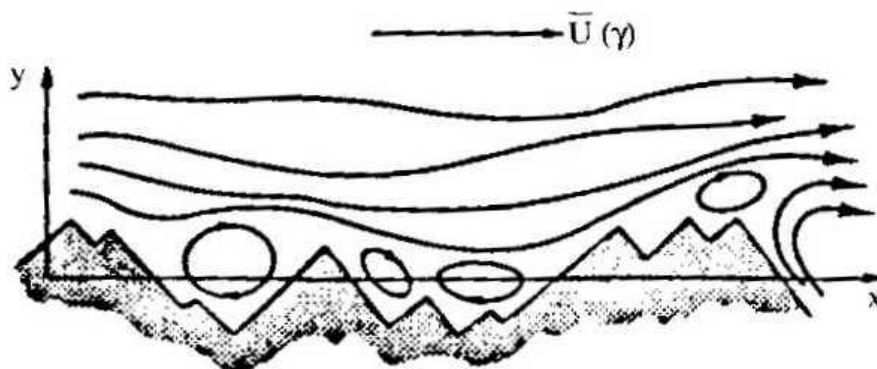


Σχήμα 9.13 Διαταραχές του ΑΟΣ και ανάπτυξη εσωτερικού οριακού στρώματος λόγω μεταβολών της τραχύτητας του στερεού ορίου.



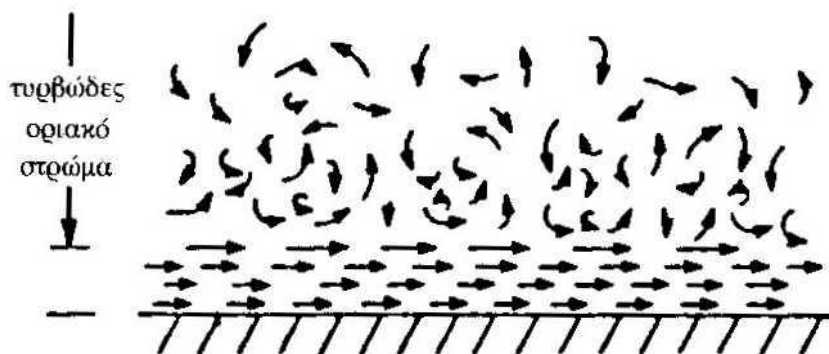
Σχήμα 9.14 Δομή του ΑΟΣ με την επίδραση της τραχύτητας του εδάφους και της ατμοσφαιρικής ευστάθειας ως προς το σχήμα και την μορφή των στροβίλων.

από οριακό υπόστρωμα, είναι τυρβώδες και η τύρβη που παράγεται οφείλεται σε μηχανικά αίτια (χαρακτηριστικό της ουδέτερης κατάστασης της ατμόσφαιρας) παρά σε θερμικά. Στην περίπτωση αυτή είναι χρήσιμο το τυρβώδες οριακό στρώμα να χωρίζεται σε δύο υποστρώματα, το επιφανειακό στρώμα και το στρώμα Ekman.



Σχήμα 9.15 Αίτια δημιουργίας του οριακού στρώματος – ροή πάνω από τραχεία επιφάνεια.

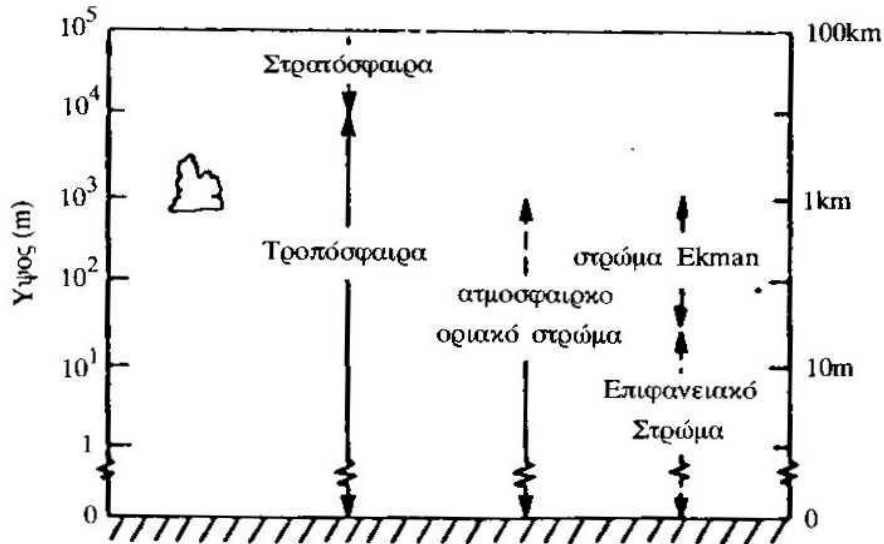
Το επιφανειακό τυρβώδες στρώμα, χαρακτηρίζεται από έντονη, μικρής κλίμακας, τύρβη που δημιουργείται κατά κύριο λόγο από την επιφανειακή τραχύτητα και κατά δεύτερο λόγο από τη μεταφορά θερμότητας λόγω ρευμάτων, ενώ η διανομή της ταχύτητας είναι τέτοια ώστε η οριζόντια διατμητική τάση να είναι σχεδόν σταθερή ανεξάρτητη από το ύψος. Το πάχος του επιφανειακού στρώματος κατά τη διάρκεια της ημέρας φθάνει μέχρι 100 μέτρα ενώ τη νύχτα, που το πάχος ολόκληρου του ΑΟΣ ελαττώνεται, το πάχος αυτό γίνεται μόνο μερικά μέτρα.



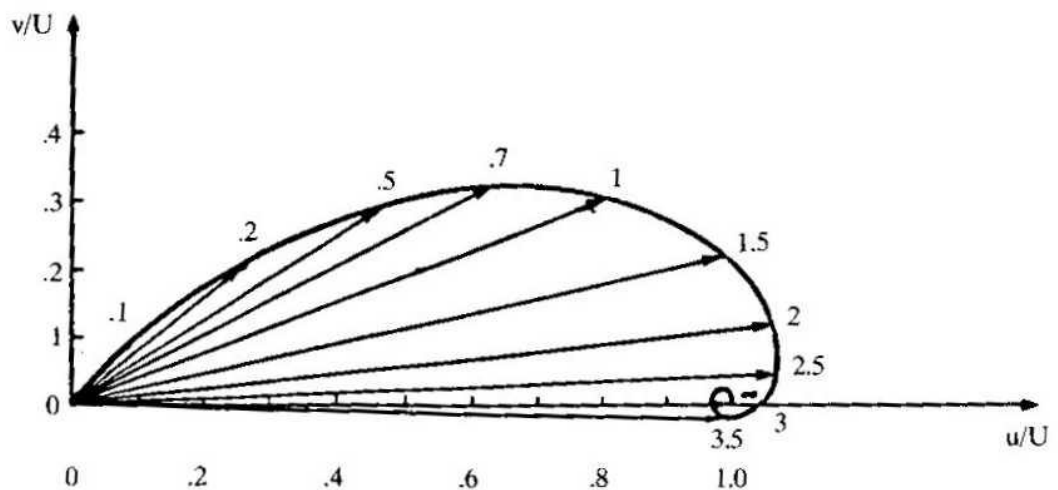
Σχήμα 9.16 Στρωτή και τυρβώδες κίνηση του αέρα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Το στρώμα Ekman που εκτείνεται από την κορυφή του επιφανειακού στρώματος μέχρι το ύψος του ΑΟΣ, είναι ένα στρώμα στο οποίο υπάρχει ισορροπία μεταξύ της δύναμης Coriolis, της δύναμης λόγω κλίσης της πίεσης και των διατμητικών τάσεων. Κύριο χαρακτηριστικό του στρώματος Ekman είναι η στροφή, καθώς αυξάνει το ύψος, του διανύσματος της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου γύρω από κατακόρυφο άξονα, με τρόπο ώστε, με προβολή των διανυσμάτων σε οριζόντιο επίπεδο, τα άκρα τους να βρίσκονται σε μια σπείρα, τη

σπείρα Ekman. Αυτό οφείλεται στο ότι το κάθε στρώμα του ρευστού επιβραδύνεται λόγω τριβής από το στρώμα που βρίσκεται από κάτω και σαν αντίδραση η ταχύτητα του επάνω στρώματος, λόγω της περιστροφής της γης, στρέφεται προς τα δεξιά της τάσης που εφαρμόζεται. Καθώς η τάση μεταβιβάζεται από το ένα στρώμα στο άλλο, το διάνυσμα στρέφεται σταδιακά. Έτσι όσο προσεγγίζεται το έδαφος το διάνυσμα της ταχύτητας στρέφεται προς τα αριστερά του διανύσματος της ταχύτητας που επικρατεί σε ύψος 1 km για το βόρειο ημισφαίριο της γης και δεξιά για το νότιο. Η ταχύτητα αυτή καλείται γεωστροφική.



Σχήμα 9.17 Διάκριση των στρωμάτων του ατμοσφαιρικού αέρα κοντά στο έδαφος.



Σχήμα 9.18 Η σπείρα του Ekman του διανύσματος της ταχύτητας. Ο λόγος του ύψους  $z$  προς το ύψος του στρώματος Ekman  $\delta E$  ( $z/\delta E$ ), που αντιστοιχεί σε κάθε διάνυσμα, σημειώνεται επάνω στην σπείρα.



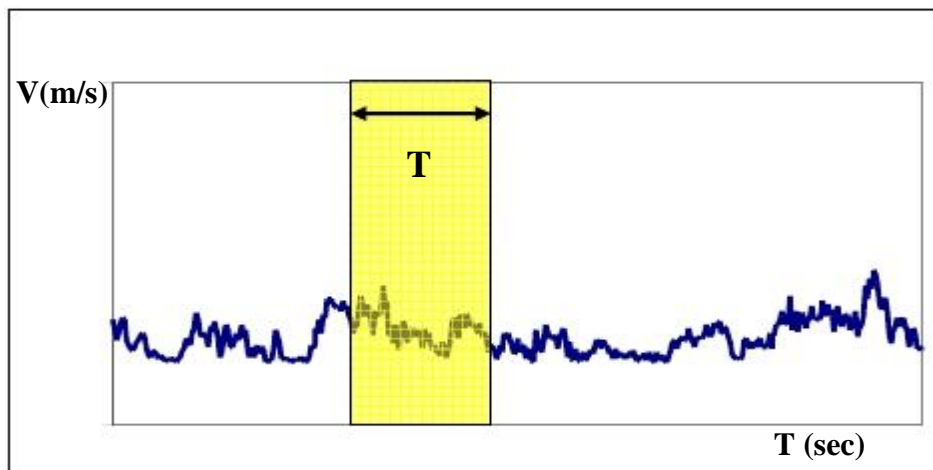
Το ιδανικό στρώμα Ekman που καλύπτει όλο το πάχος του ΑΟΣ παρατηρείται σπάνια λόγω του ότι ο συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας  $\mu_t$  (eddy viscosity coefficient) που επηρεάζει τις δύο συνιστώσες της οριζόντιας ταχύτητας ( $U, V$ )  $U/U_{ολ}$  και  $V/U_{ολ}$  της σπείρας, μεταβάλλεται συνεχώς και πολύ γρήγορα με το ύψος κοντά στο έδαφος. Με άλλα λόγια η μαθηματική έκφραση του στρώματος Ekman ισχύει μόνο επάνω από το επιφανειακό στρώμα. Έτσι, μια περισσότερο ικανοποιητική περιγραφή του ΑΟΣ, παίρνεται με το συνδυασμό της λογαριθμικής κατακόρυφης διανομής ταχύτητας, για το επιφανειακό στρώμα με τη σπείρα Ekman για τα μεγαλύτερα ύψη.

## 9.5 Ένταση του ανέμου

Η κίνηση του ανέμου ακολουθεί τους νόμους της μηχανικής ρευστών, οι οποίοι διέπουν την τυρβώδη ροή συνεκτικού ρευστού. Συνεπώς, η ταχύτητα του ανέμου είναι ένα ιδιαίτερα μεταβλητό μέγεθος, το οποίο εμφανίζει διακυμάνσεις τόσο σε χρονικά διαστήματα εκατοστών του δευτερολέπτου όσο και σε διαστήματα ωρών. Ακολουθώντας την ανάλυση που ισχύει για τυρβώδη πεδία ροής, η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου γράφεται σαν άθροισμα της μέσης ταχύτητας του ανέμου  $\bar{V}$  και μιας διακύμανσης  $V'(t)$  δηλαδή:  $V(t) = \bar{V} + V'(t)$  ενώ η **μέση ταχύτητα** του ανέμου σε μια χρονική περίοδο  $T$  δίνεται σαν:

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} V(t') d't$$

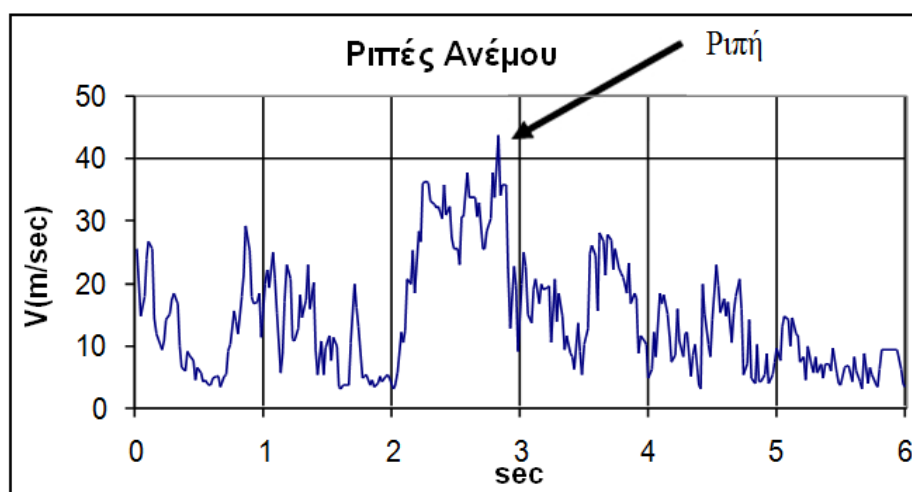
Εξετάζοντας το πεδίο ταχυτήτων μιας περιοχής, είναι σημαντικό να καταγραφούν και οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει σημαντικά την κατασκευαστική αντοχή του πύργου στήριξης της ανεμογεννήτριας, καθώς και τη μέγιστη φόρτιση των πτερυγίων της μηχανής. Όπως είναι λογικό, οι μέγιστες ταχύτητες του ανέμου εξαρτώνται από τη γεωγραφική θέση της περιοχής καθώς και από το τοπογραφικό της ανάγλυφο.



Σχήμα 9.19 Στιγμιαία ταχύτητα ανέμου.

Συνήθως, για τη στατική πρόβλεψη των μέγιστων ταχυτήτων χρησιμοποιούνται οι μέσες ωριαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου για μια σειρά ετών. Το στατιστικό δείγμα που προκύπτει αναλύεται με βάση το στατιστικό νόμο των «ακραίων τιμών», οπότε επιχειρείται ο προσδιορισμός της μέγιστης ταχύτητας του ανέμου, ο οποίος αναμένεται να εμφανισθεί σε μια χρονική περίοδο ορισμένων ετών, που σχετίζεται με το χρόνο ζωής μιας αιολικής μηχανής. Με τον τρόπο αυτό και με κάποια σημαντική βεβαιότητα (πιθανότητα) οι κατασκευαστές προσδιορίζουν τη μέγιστη καταπόνηση των τμημάτων της εγκατάστασης.

Προβλήματα στην ομαλή λειτουργία μιας αιολικής εγκατάστασης δημιουργούνται και από ξαφνικούς ανέμους ιδιαίτερα μεγάλης έντασης και μικρής διάρκειας, οι οποίοι καλούνται **ριπές ανέμου**. Συγκεκριμένα, **ριπή ανέμου** ορίζεται μια ξαφνική μικρής διάρκειας ( $\leq 20$  sec) αύξηση της ταχύτητας του ανέμου ( $\geq 9,3$  m/sec), η οποία διαφέρει από τη μέση τιμή της ταχύτητας στο διάστημα που προηγήθηκε και ακολουθεί κατά τουλάχιστον 4m/sec, ενώ η ταχύτητα του ανέμου επανέρχεται στη συνέχεια στα προηγούμενα επίπεδα τιμών. Οι ξαφνικές ριπές του ανέμου και η διάρκειά τους συνδέονται άμεσα με τη φόρτιση των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας. Επιπλέον, πρέπει να προστεθεί ότι στην περίπτωση που παρουσιασθούν ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες ανέμου με διάρκεια μεγαλύτερη των 30 sec, οι ανεμογεννήτριες τίθενται συχνά (για λόγους αυτοπροστασίας) εκτός λειτουργίας. Ο άνεμος είναι λιγότερο ριπαίος πάνω σε εκτεταμένες υδάτινες επιφάνειες και περισσότερο ριπαίος πάνω από επιφάνειες με έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο ή με υψηλά εμπόδια (πχ υψηλά κτίρια).



Σχήμα 9.20 Ριπές του ανέμου.

Για τον προσδιορισμό της μέσης μέγιστης ριπής του ανέμου  $\bar{V}_{max}$  σε ύψος  $z$  συναρτήσει της μέσης ωριαίας τιμής της ταχύτητας στο ίδιο ύψος, μπορεί να γραφεί ότι:  $\bar{V}_{max}(z) = \bar{V}(z) \cdot [1 + \gamma \cdot I_u(z)]$  όπου  $\gamma(t)$  ο συντελεστής ριπής και  $I_u$  η αδιάστατη τιμή της τύρβης κατά τη διεύθυνση του ανέμου. Ο συντελεστής ριπής δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma(t) = 0,42 \ln \left( \frac{3600}{t} \right)$$

Παρόμοια αποτελέσματα δίνονται από την εξίσωση, η οποία προσδιορίζει τη ριπή του ανέμου  $V_t$  χρονικής διάρκειας  $t$  δευτερολέπτων συναρτήσει της μέσης ωριαίας ταχύτητας στο ύψος μελέτης  $z$ , του συντελεστή τραχύτητας  $z_0$  της περιοχής και ενός χρονικού συντελεστή  $C(t)$ , δηλαδή:

$$V_t(z) = \bar{V}(z) \cdot \left[ 1 + 0,98 \left( \frac{C(t)}{\ln \left( \frac{z}{z_0} \right)} \right) \right]$$

Για διευκόλυνση της εφαρμογής της εξίσωσης δίνεται ότι:

$z_0 = 0,0005$  m για θάλασσες και λίμνες

$z_0 = 0,001$  m για επίπεδες επιφάνειες

$z_0 = 0,5$  m για πυκνόφυτες περιοχές και προάστια πόλεων

t (sec)	C(t)	t (sec)	C(t)
1	3,00	100	1,02
3	2,66	200	0,70
10	2,32	300	0,54
20	2,00	600	0,36
30	1,75	1000	0,16
50	1,35		

## 9.6 Μέτρηση έντασης ανέμου

Για τη μέτρηση της έντασης του ανέμου χρησιμοποιούνται τα **ανεμόμετρα ή οι ανεμογράφοι**. Τα πλέον απλά ανεμόμετρα είναι τα ανεμόμετρα ταχύτητας, στα οποία η ένταση του ανέμου προκύπτει από την ταχύτητα περιστροφής που επιβάλλει ο άνεμος σε ορισμένα τμήματα του οργάνου. Τα ανεμόμετρα αυτού του τύπου είναι αθροιστικά και μετρούν μέσες τιμές της έντασης του ανέμου. Για την καταγραφή των στιγμιαίων τιμών της έντασης του ανέμου χρησιμοποιούνται τα ανεμόμετρα πίεσης, στα οποία η ένταση προσδιορίζεται από την πίεση που ασκεί ο άνεμος σε ορισμένα τμήματα του οργάνου.

Επιπλέον των προαναφερομένων συνηθισμένων τρόπων μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιούνται και ανεμόμετρα θερμού στοιχείου καθώς και ανεμόμετρα τύπου laser, κυρίως σε πειραματικές εγκαταστάσεις υψηλής ακρίβειας, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση μελέτης του ομόρου ανεμογεννήτριας μέσα σε αεροδυναμική σήραγγα.

Από τα κλασικά ανεμόμετρα ταχύτητας, τα πλέον γνωστά είναι τα **κυπελλοφόρα ανεμόμετρα**. Αυτά αποτελούνται από έναν κατακόρυφο άξονα στην κορυφή του οποίου υπάρχουν τρεις ή τέσσερις οριζόντιοι βραχίονες συμμετρικά τοποθετημένοι. Στα άκρα κάθε βραχίονα είναι τοποθετημένο ένα ημισφαιρικό ή κωνικό κύπελλο, σε τρόπο ώστε η διαμετρική τομή του να είναι κατακόρυφη. Γνωρίζοντας ότι η αεροδυναμική αντίσταση της κοίλης πλευράς είναι σημαντικά μεγαλύτερη της κυρτής, το σύστημα περιστρέφεται υπό την επίδραση του ανέμου και ο αριθμός των περιστροφών του καταγράφεται δια μέσου του κατακόρυφου άξονα σε ένα καταγραφικό σύστημα. Για την καταγραφή των στροφών του κατακόρυφου άξονα χρησιμοποιούνται διάφορα συστήματα, που περιλαμβάνουν:

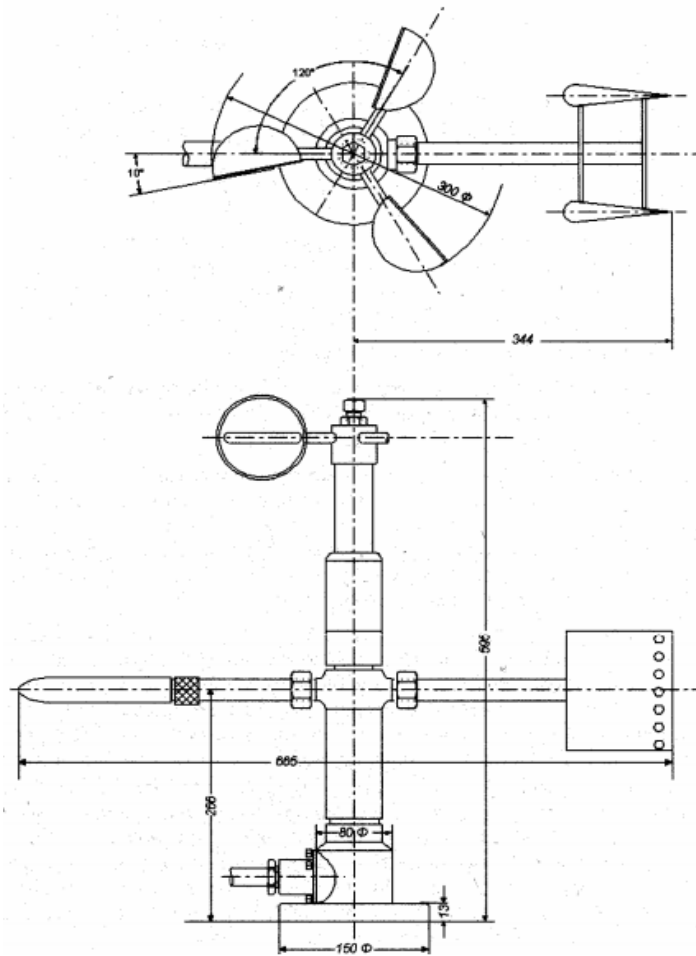
- α. Μηχανικό στροφόμετρο, που καταγράφει τον αριθμό των περιστροφών των κυπέλλων από τη στιγμή έναρξης λειτουργίας του οργάνου.
- β. Ηλεκτρική επαφή, η οποία κλείνει μετά από ένα ορισμένο αριθμό στροφών, και μέσω καταγραφικού δίνει απευθείας τη μέση ταχύτητα του ανέμου.
- γ. Μικρή ηλεκτρογεννήτρια, η οποία μετατρέπει την περιστροφική κίνηση του άξονα σε ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο και μετατρέπεται σε ένδειξη ταχύτητας.
- δ. Φωτοηλεκτρικό διακόπτη, ο οποίος μετατρέπει την ταχύτητα περιστροφής σε στιγμιαία ταχύτητα ανέμου στην έξοδο του συστήματος.

Μέχρι σήμερα έχουν αναφερθεί αρκετές προσπάθειες συσχέτισης της ταχύτητας του ανέμου  $V$  με τη γραμμική ταχύτητα  $u$  περιστροφής των κυπέλλων, πράγμα που αν επιτευχθεί, θα διευκολύνει τη βαθμονόμηση των ανεμομέτρων. Εν γένει ο λόγος  $V/u$  δεν είναι σταθερός. Ομαλότερη δε συμπεριφορά παρουσιάζουν ανεμόμετρα με:

α. Τρία κύπελλα αντί τεσσάρων, δεδομένου ότι η στρεπτική ροπή συστήματος με τρία κύπελλα είναι πιο ομοιόμορφη για όλο το πεδίο ταχυτήτων του ανέμου, ενώ εμφανίζει και μεγαλύτερες τιμές στρεπτικής ροπής ανά μονάδα βάρους.

β. Κωνικά κύπελλα έναντι των σφαιρικών.

γ. Στρογγυλεμένα χείλη των κυπέλλων, δεδομένου ότι είναι λιγότερο ευαίσθητα στις αναταράξεις του αέρα από ότι τα έχοντα αιχμηρά χείλη.



Σχήμα 9.21 Κυπελλοφόρο ανεμόμετρο.

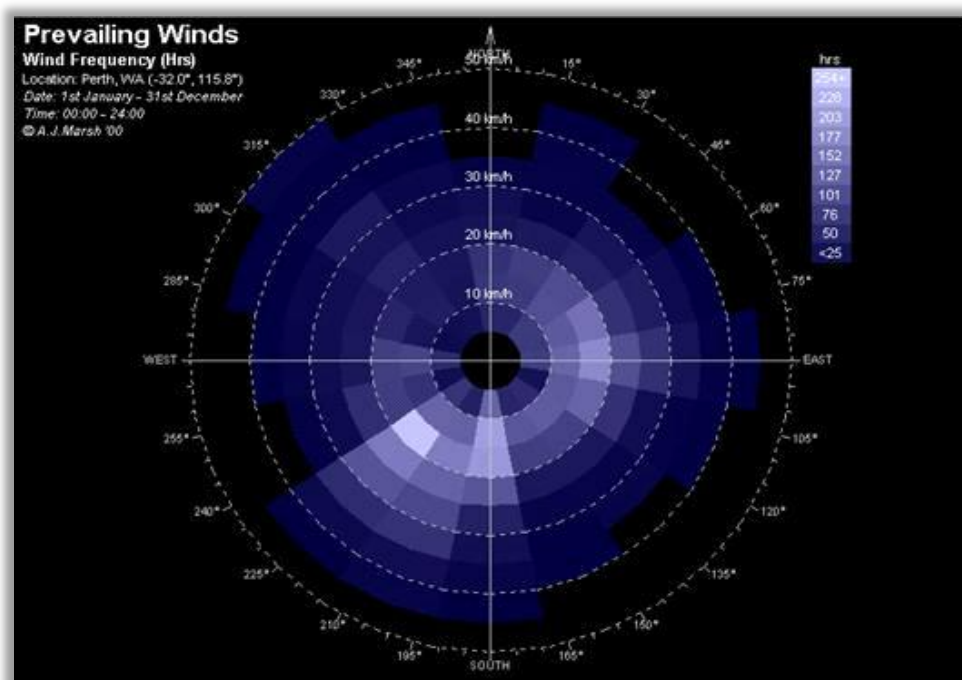
Ένα βασικό μειονέκτημα των ανεμομέτρων αυτού του τύπου οφείλεται στο γεγονός ότι δεν έχουν συμμετρική απόκριση στην αύξηση ή μείωση της έντασης του ανέμου, δεδομένου ότι τα κύπελλα οργάνου εξακολουθούν λόγω αδράνειας να περιστρέφονται ακόμα και όταν ο άνεμος σταματήσει. Στις περιπτώσεις αυτές οι ενδείξεις του οργάνου είναι μεγαλύτερες από την πραγματική ένταση του ανέμου.

Για κλιματολογικούς και πρακτικούς λόγους έχει συμφωνηθεί ότι σε μια ομοιογενή περιοχή (η οποία εκτείνεται 300 μέτρα γύρω από το όργανο), ο

ανεμογράφος πρέπει να τοποθετείται σε ύψος 10 μέτρα από το έδαφος, ώστε να επιτυγχάνεται μια αντιπροσωπευτική καταγραφή του αιολικού δυναμικού της περιοχής. Σε μια τοποθεσία με ομοιόμορφη κατανομή εμποδίων με μέσος ύψος εμποδίων  $H$ , το όργανο πρέπει να τοποθετηθεί σε ύψος  $10+H$  μέτρων από το έδαφος, όπου  $H_{\max} \leq 12$  m. Στην περίπτωση ύπαρξης εμποδίων γύρω από το όργανο, πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν στην εύρεση της βέλτιστης θέσης του οργάνου οι διαστάσεις των εμποδίων, εφόσον είναι απαραίτητο να γίνουν μετρήσεις στην περιοχή αυτή. Αντίστοιχες διορθώσεις πρέπει να ληφθούν υπόψιν στην περίπτωση υποχρεωτικής τοποθέτησης του ανεμομέτρου σε ειδικές θέσεις, όπως για παράδειγμα στην κορυφή ενός κτιρίου, δεδομένου ότι το ίδιο κτίριο διαταράσσει τη ροή του ανέμου.

## 9.7 Διεύθυνση του ανέμου

Η διεύθυνση του ανέμου σε μια θέση δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται συνεχώς, καθορίζεται δε με βάση το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος, σε σχέση με τη θέση μέτρησης. Η διεύθυνση του ανέμου είναι συνάρτηση του αληθούς βορρά και μετρείται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού, σε μοίρες ή σε τιμές που αντιστοιχούν σε ολόκληρο κυκλικό τομέα. Ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια χρησιμοποιούνται 8, 16 ή 32 τομείς όπου καθορίζονται οι κυκλικοί τομείς για κάθε μια από τις 32 διευθύνσεις.



Σχήμα 9.22 Διεύθυνση του ανέμου – Ροδόγραμμα.

Με βάση τις παρατηρήσεις της διεύθυνσης του ανέμου μπορούμε να χαράξουμε σε «πολικό διάγραμμα» (ή ανεμολόγιο ροζέτα) τις συχνότητες (%), σε σχέση με το σύνολο των παρατηρήσεων που διαθέτουμε, ανάλογα με το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος. Στο ίδιο διάγραμμα είναι δυνατό να παρασταθεί και η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά την εκάστοτε διεύθυνση. Επιπλέον, για μεγαλύτερη ακρίβεια είναι δυνατός ο υπό κλίμακα σχεδιασμός, ώστε να εμφανίζονται και τα διαστήματα έντασης του ανέμου για κάθε διεύθυνση. Τέλος, στο κέντρο του πολικού διαγράμματος και σε ειδικό κύκλο κατάλληλης ακτίνας καταγράφεται το ποσοστό της νηνεμίας.

Κατά την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, χαρακτηρίζουμε σαν **κύρια διεύθυνση** του ανέμου κάθε διεύθυνση η οποία συνεισφέρει τουλάχιστον 10% στη συνολική διαθέσιμη αιολική ενέργεια. Οι κύριες διευθύνσεις του ανέμου είναι διαφορετικές για κάθε τοποθεσία, δεδομένου ότι ο προσανατολισμός των λόφων, των βουνών, των κοιλάδων, η υπάρχουσα βλάστηση καθώς και η ύπαρξη κτιρίων ανάμεσα στα άλλα επηρεάζουν τις κύριες διευθύνσεις του ανέμου.

Η διεύθυνση του ανέμου, η οποία στην υπό μελέτη περιοχή έχει τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης, ονομάζεται **επικρατούσα διεύθυνση**. Η επικρατούσα διεύθυνση μεταβάλλεται συνήθως με την εποχή του χρόνου. Τέλος, ο χώρος μεταξύ του σημείου στο οποίο θέλουμε να εγκαταστήσουμε μια ανεμογεννήτρια και του σημείου του ορίζοντα από το οποίο πνέει συνήθως ο άνεμος (επικρατούσα διεύθυνση) μας προσδιορίζει την **προσήνεμη περιοχή**. Αντίστοιχα, η **υπήνεμη περιοχή** είναι αυτή η οποία είναι προστατευμένη από τον άνεμο (περιοχές που εκτίθενται σε ανέμους με ελάχιστη συχνότητα εμφάνισης) και είναι συχνά αντίθετη της προσήνεμης περιοχής. Στον Ελλαδικό χώρο η επικρατούσα κατά κανόνα διεύθυνση των ανέμων είναι η βόρεια και βορειοανατολική, ιδιαίτερα στην περιοχή του Αιγαίου, χωρίς βέβαια να αποκλείονται περιπτώσεις σε περιοχές με διαφορετική επικρατούσα διεύθυνση.

## 9.8 Καθορισμός της διεύθυνσης του ανέμου

Η διεύθυνση του ανέμου βρίσκεται συνήθως με τη βοήθεια των ανεμοδεικτών. Ο ανεμοδείκτης αποτελείται από ένα κατακόρυφο άξονα στο πάνω άκρο του οποίου περιστρέφεται ένας οριζόντιος άξονας με ένα ή δύο ελάσματα στο ένα άκρο του. Όταν η πίεση που ασκεί ο άνεμος εξισορροπηθεί και από τις δύο πλευρές του ελάσματος του ανεμοδείκτη, αυτός έχει στραφεί έτσι, ώστε ο δείκτης του ανεμοδείκτη (που βρίσκεται και το αντίβαρο εξισορρόπησης του ελάσματος) να διευθύνεται προς τη μεριά από την οποία φυσά ο άνεμος.

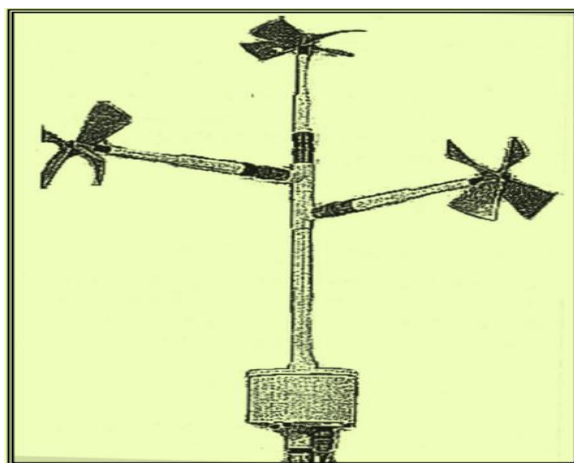
Ένας ακριβής ανεμοδείκτης έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- α. Περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του με ελάχιστες τριβές.

- β. Δεν παρουσιάζει τάσεις κλίσης προς μια διεύθυνση. Αυτό επιτυγχάνεται με την ακριβή αντιστάθμιση των ελασμάτων με τη χρήση αντίβαρου.
- γ. Εμφανίζει τη μέγιστη ροπή στρέψης για δεδομένη αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου σε σχέση με την αδράνεια του οργάνου.
- δ. Παρουσιάζει γρήγορη απόκριση στις διαρκείς διακυμάνσεις της διεύθυνσης του ανέμου.
- ε. Παρουσιάζει επαρκή απόσβεση των στρεπτικών ταλαντώσεων.



Σχήμα 9.23 Ανεμοδείκτης



Σχήμα 9.24 Τριαξονικός ανεμοδείκτης

Τέλος, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι, επειδή η διεύθυνση του ανέμου μετριέται συναρτήσει του αληθούς βορρά, το όργανο πρέπει να προσανατολιστεί με τη βοήθεια της χαραγής που υπάρχει επάνω του.



Για μικρομετεωρολογικές κυρίως εφαρμογές χρησιμοποιούνται πλέον εξελιγμένοι τύποι ανεμογράφων. Ο **τριαξονικός ανεμογράφος** χρησιμοποιείται για να καταγράψει και τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή μας δίνει ταυτόχρονα την ένταση και τη διεύθυνση του ανέμου.

Ο τριαξονικός ανεμογράφος αποτελείται από ένα κατακόρυφο άξονα, που στην κορυφή του έχει ένα σύστημα τριών αξόνων καθέτων ανά δύο μεταξύ τους. Στην άκρη του κάθε άξονα στρέφεται μια έλικα αποτελούμενη από τέσσερα ελάσματα κατάλληλης αεροδυναμικής σχεδίασης. Ο αριθμός των περιστροφών στη μονάδα του χρόνου καταγράφεται υπό τη μορφή ηλεκτρικών παλμών. Οι άξονες του οργάνου μπορεί να προσανατολισθούν προς το βορρά, προς την ανατολή και προς το ζενίθ του τόπου. Με τον τρόπο αυτό ο ανεμογράφος μετράει τις τρεις ορθογώνιες συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας του ανέμου. Με κατάλληλο προγραμματισμό είναι δυνατό να καταγράφονται οι στιγμιαίες και οι μέσες τιμές του διανύσματος της ταχύτητας. Οι ανεμογράφοι του τύπου αυτού θεωρούνται υψηλής ακρίβειας και δεν επηρεάζονται από την αύξηση ή τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Τέλος, η διεύθυνση του ανέμου μπορεί να υπολογισθεί και με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο, μέσα από τη μέτρηση των τριών συνιστωσών της ταχύτητας του ανέμου.

## 9.9 Στροβιλισμός και αναταράξεις του αέρα

Η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου γύρω από μια μέση ταχύτητα είναι χαρακτηριστικό φαινόμενο της τυρβώδους ροής. Μέτρο της διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου αποτελεί η διασπορά της ταχύτητας του ανέμου « $\sigma_v^2$ », η οποία ορίζεται σαν:

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} (V(t') - \bar{V})^2 \cdot dt'$$

Με τυπική χρονική περίοδο μέτρησης  $T=10$  min.

Ονομάζουμε **ένταση της ανατάραξης** και συμβολίζουμε με  $I$  το λόγο της διασποράς προς τη μέση ταχύτητα του ανέμου. Το μέγεθος αυτό χαρακτηρίζεται και σαν ένταση της τύρβης του ανέμου, προσδιορίζει δε και το επίπεδο της τύρβης της ατμόσφαιρας σε μια περιοχή. Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

$$I = \frac{\sigma_v}{\bar{V}}$$

Η ένταση της ανατάραξης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους της υπό μελέτη περιοχής, καθώς και από το γενικό επίπεδο τύρβης της ατμόσφαιρας. Εν γένει, η ένταση της ανατάραξης είναι ανάλογη της τραχύτητας του εδάφους και

αντιστρόφως ανάλογη του ύψους μελέτης από το έδαφος. Εάν χρησιμοποιήσουμε το αντιπροσωπευτικό μήκος  $z_0$  της μέσης τοπικής τραχύτητας, η ένταση της ανατάραξης προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$I = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

( $z_0 \leq 0,20$  m) και

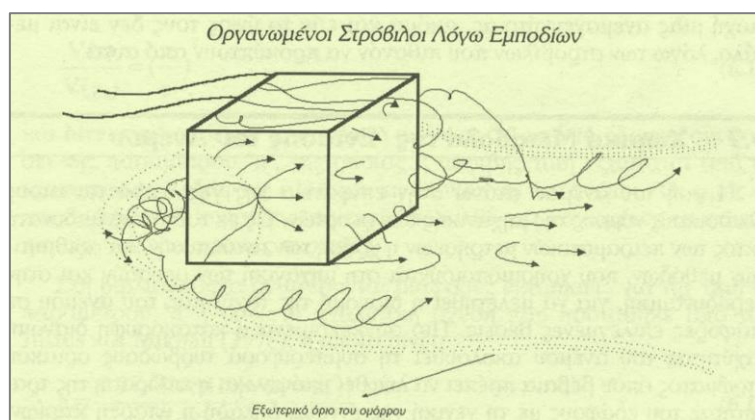
$$I = \frac{(0,78 - 0,14 \ln z_0)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

( $z_0 > 0,20$  m)

Η ένταση της ανατάραξης ή το επίπεδο της τύρβης του αέρα επηρεάζει σημαντικά τόσο την αεροδυναμική συμπεριφορά μιας ανεμογεννήτριας όσο και τα χαρακτηριστικά ολόκληρης της εγκατάστασης.

Οι αναταράξεις του ανέμου είναι το αποτέλεσμα των τυχαίων στροβιλισμών που υπάρχουν σε κάθε τυρβώδες πεδίο ροής, ενισχύονται δε από την τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους. Επιπλέον όμως του στροβιλισμού της τύρβης, η παρουσία εμποδίων κάτω από ορισμένες ανεμολογικές συνθήκες είναι δυνατόν να δημιουργήσουν **οργανωμένους στροβίλους**, οι οποίοι αλλοιώνουν συνολικά το πεδίο ταχύτητας του ανέμου.

Ο στροβιλισμός των οργανωμένων στροβίλων επηρεάζει τόσο την παραγόμενη ισχύ μιας ανεμογεννήτριας, όσο και τη δυναμική συμπεριφορά των κατασκευαστικών στοιχείων της εγκατάστασης. Γενικά, είναι σκόπιμο να μελετώνται λεπτομερώς τα εμπόδια που βρίσκονται στην περιοχή μιας ανεμογεννήτριας, ακόμα και εάν το ύψος τους δεν είναι μεγάλο, λόγω των στροβίλων που πιθανόν να προκύπτουν από αυτά.



Σχήμα 9.25 Οργανωμένοι στροβίλοι λόγω εμποδίων.

## 9.10 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος

Το πρόβλημα έκφρασης με κάποιο νόμο, εκθετικό ή λογαριθμικό, της κατακόρυφης μεταβολής του μέτρου της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου είναι θέμα αρκετών μελετών. Πολλές φορές η εκλογή φαίνεται αυθαίρετη καθώς υπάρχουν επιχειρήματα υπέρ και κατά και των δύο νόμων, του εκθετικού και του λογαριθμικού. Οι εκφράσεις που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιβλιογραφία για διανομή ταχύτητας μέσα στο επιφανειακό στρώμα είναι:

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^{1/a} \quad (\text{εκθετικός νόμος})$$

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{λογαριθμικός νόμος})$$

ή

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)$$

όπου  $U$ ,  $U_1$  και  $U_2$  η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας στα ύψη  $z$ ,  $z_1$  και  $z_2$  αντίστοιχα.

- $u_*$  η ταχύτητα τριβής (friction velocity)
- $1/a$  ο εκθέτης του εκθετικού νόμου
- $k$  η σταθερά von Karman (=0,35)
- $z_0$  η παράμετρος τραχύτητας ή μήκος τραχύτητας
- $d$  η μετατόπιση μηδενικού επιπέδου

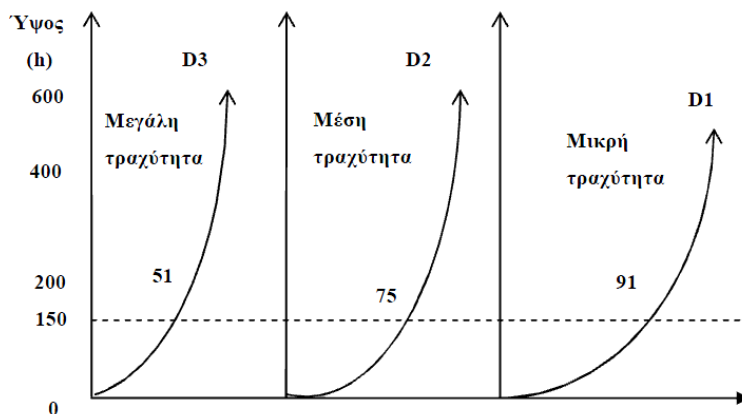
Συνήθως στα μετεωρολογικά προβλήματα χρησιμοποιείται ο εκθετικός νόμος λόγω του πιο εύκολου μαθηματικού χειρισμού του. Η τιμή του εκθέτη  $1/a$  αποτελεί μια ένδειξη της μορφής της επιφάνειας του εδάφους, αφού η τιμή αυτή είναι συνάρτηση μόνο της τραχύτητας ή του μήκους τραχύτητας που συνήθως χρησιμοποιείται.

Η εμπειρική σχέση μεταξύ ύψους τραχύτητας  $z_0$  και του εκθέτη  $a$  για τη διανομή ταχύτητας μεταξύ 10 έως 30 μέτρα

$$z_0 = 15,25 \exp\left(-\frac{1}{1/a}\right)$$

δίνει με ικανοποιητική ακρίβεια τη συσχέτιση ( $z_0$ ,  $a$ ) για ύψη τραχύτητας από  $10^{-4}$  m μέχρι 1m.

Η έκφραση, ωστόσο της κατακόρυφης κατανομής της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας με τον εκθετικό νόμο παρουσιάζει για ορισμένους ερευνητές πολλά τρωτά σημεία, ειδικά για τα πρώτα μέτρα του ΑΟΣ. Έχει διαπιστωθεί ότι στα πρώτα



Σχήμα 9.26 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σε συνάρτηση με το ύψος και τη τραχύτητα του εδάφους

μέτρα, η κατακόρυφη κατανομή ακολουθεί τον εκθετικό νόμο ενώ στα μεγαλύτερα ύψη ο λογαριθμικός νόμος δίνει ακριβέστερη μαθηματική έκφραση της κατανομής σε σύγκριση με τον εκθετικό νόμο. Το πρόβλημα επιπλέον στη χρησιμοποίηση του λογαριθμικού νόμου είναι η εύρεση της ακριβούς τιμής, σε κάθε τμήμα της φυσικής επιφάνειας, της ταχύτητας τριβής, της μετατόπισης του μηδενικού επιπέδου και της σταθεράς von Karman που επίσης δεν έχει σταθερή τιμή. Ο προσεγγιστικός προσδιορισμός των τιμών των μεγεθών αυτών εξαλείφει τα πλεονεκτήματα της ακριβούς μαθηματικής έκφρασης της κατακόρυφης κατανομής με το λογαριθμικό νόμο. Έτσι, όμως προκύπτει σφάλμα προσδιορισμού της κατανομής, παρόμοιας τάξης μεγέθους με αυτό που εμπεριέχεται στη χρησιμοποίηση του εκθετικού νόμου, με τον οποίο, όμως, υπάρχει το πλεονέκτημα του ταχύτερου προσδιορισμού και επιπλέον, της μεγαλύτερης ευελιξίας ένταξης της κατακόρυφης κατανομής, σε κάποια ομάδα κατανομών γνωστών επιφανειών οι οποίες έχουν ήδη μελετηθεί εκ των προτέρων.

Ο λογαριθμικός νόμος μεταβολής της ταχύτητας (και αναλογικά ο εκθετικός) για να χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερες αποστάσεις από το έδαφος πρέπει να διορθωθεί για τις επιδράσεις της περιστροφής της γης.

Ο τροποποιημένος λογαριθμικός νόμος για ύψη μέχρι τα 200 m περίπου που προτείνεται στη βιβλιογραφία είναι

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) + 5,75 \frac{z}{h} \right]$$

όπου:

$$h = u_*/6f$$

$f$  η παράμετρος Coriolis =  $2 \Omega \sin \varphi \cong 10^{-4} \text{ S}^{-1}$

$\Omega$  η γωνιακή περιστροφή της γης

$\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος

## 9.11 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο

Η ταχύτητα του ανέμου σε ορισμένη θέση στο χώρο δεν παραμένει σταθερή με τον χρόνο. Μεταβάλλεται και κατά μέγεθος και κατά διεύθυνση.

Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο για μια μεγάλη χρονική περίοδο περιέχει μεταβολές που οφείλονται σε εποχιακές διακυμάνσεις ταχύτητας, σε μεταβολές ταχύτητας που οφείλονται σε παροδικά κλιματολογικά συστήματα και σε μεταβολές ταχύτητας που οφείλονται στην ασταθή φύση της ροής. Η τελευταία έχει χαρακτηριστικές κλίμακες χρονικών μεταβολών μέχρι λίγων ωρών ενώ οι μεταβολές ταχύτητας λόγω κλιματολογικών συστημάτων έχουν χρονική κλίμακα ημερών. Με την ανάλυση της ταχύτητας του ανέμου στο φάσμα συχνοτήτων διαπιστώνει κανείς τις προηγούμενες περιοχές από τη διαφορετική ενεργειακή κατανομή του στο φάσμα.

Ορίζεται μέση ταχύτητα (χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης 10 min έως 1 ώρα) και τύρβη της ροής  $\overline{u'^2}$ , ως:

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \quad \overline{u'^2} = \frac{1}{T} \int_0^T (U(t) - \bar{U})^2 dt$$

Η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι απαραίτητη για ενεργειακούς σκοπούς, η τιμή της τύρβης της ροής απαιτείται για τον υπολογισμό των μεταβαλλόμενων φορτίων που επιδρούν στην ανεμογεννήτρια και που οδηγούν σε γήρανση υλικών.

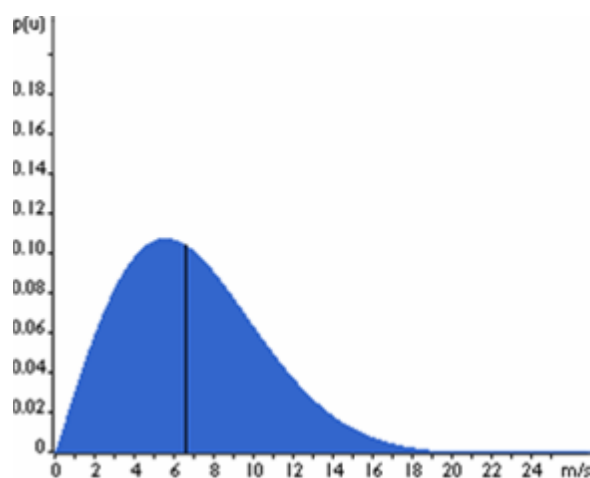
Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας έχει χαρακτηριστικό και τη διάρκειά της. Έτσι λοιπόν μια ριπή ανέμου χαρακτηρίζεται από τη μέση τιμή της κατά τη διάρκεια της ριπής. Συνήθως εξετάζεται ριπή ανέμου διάρκειας 3 sec ενώ είναι προφανής η μέση τιμή της ριπής για χρονική περίοδο ίση με τη χρονική περίοδο ολοκλήρωσης της μέσης ταχύτητας είναι η ίδια με τη μέση τιμή ταχύτητας για  $T = 1h$ .

Η μέση τιμή ταχύτητας σε μια περιοχή μπορεί να είναι ετήσια (καταγραφή των μέσων ετήσιων ταχυτήτων), εποχιακή (μέση τιμή χειμώνα) συγκεκριμένου ύψους ή ετών (μέση τιμή χειμώνων), ημερήσια (μέση τιμή ημέρας ή ημερών) και τέλος μέση ωριαία τιμή.

Οι εποχιακές και ημερήσιες τιμές επηρεάζονται από τη διαδοχή των εποχών και την εναλλαγή ημέρας και νύχτας. Η ενεργειακή απόδοση ανεμογεννήτριας με διάρκεια ζωής 20 τουλάχιστον ετών θα εξαρτηθεί από τη μέση ετήσια τιμή ταχύτητας ανέμου στη θέση εγκατάστασής της. Η μέση αυτή ετήσια τιμή θα προκύψει από μετρήσεις ταχυτήτων ανέμου για πολλά χρόνια προκειμένου να εξαχθεί η μέση ετήσια ταχύτητα. Μετρήσεις αποδεικνύουν ότι η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου κάθε χρόνο διαφέρει από μέρος σε μέρος και από χρόνο σε χρόνο, με αποτέλεσμα σήμερα να θεωρείται απαραίτητο να υπάρχουν ανεμολογικές μετρήσεις τουλάχιστον 3-5 ετών στη θέση εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας.

Η εποχιακή διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου αποτελεί χρήσιμο στοιχείο

για τον υπολογισμό της εποχιακής ενεργειακής απόδοσης της ανεμογεννήτριας και της ποιότητας προσαρμογής της καμπύλης ενεργειακής παραγωγής και ζήτησης .



Σχήμα 9.27 Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας των ταχυτήτων του ανέμου.

Η διάρκεια πνοής του ανέμου είναι από τα πλέον απαραίτητα στοιχεία που πρέπει να είναι γνωστά στη θέση εγκατάστασης της μηχανής. Η καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου, εκφράζει το ποσοστό του χρόνου (πχ τις ώρες του έτους από τις 8760) για τις οποίες πνέει άνεμος ταχύτητας μεγαλύτερης μιας συγκεκριμένης τιμής. Η καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας ταχύτητας  $P(V)$  αποτελεί μια άλλη καμπύλη ισοδύναμη με τη καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου και εκφράζει τη πυκνότητα πιθανότητας ο άνεμος να έχει ταχύτητα μεταξύ  $V - dV/2$  και  $V + dV/2$ .

Ο πίνακας διπλής εισόδου συχνότητας πνοής ανά διεύθυνση μπορεί να παρασταθεί γραφικά με το ροδόγραμμα ανέμου. Το ροδόγραμμα της θέσης είναι ένα αρκετά εποπτικό διάγραμμα που δίνει αμέσως τη κατεύθυνση ανέμου που επικρατεί στην περιοχή και τη διάρκεια πνοής ανέμου από κάθε κατεύθυνση.

## 9.12 Η τύρβη του ανέμου

Τυπικό ανεμογραφικό καταγραφικό μεταβολής του ανέμου δείχνει ότι ο φυσικός άνεμος μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από ένα ευρύ φάσμα υψηλής συχνότητας ριπών που επιτίθεται σε μικρότερης συχνότητας μεταβαλλόμενο άνεμο. Είναι προφανές ότι οι διαταραχές ταχύτητας του ανέμου είναι τυχαίες στον χαρακτήρα τους και δεν μπορούν να αναλυθούν με ντετερμινιστικό τρόπο. Προς το παρόν χρησιμοποιούνται στατιστικές τεχνικές για την περιγραφή των χαρακτηριστικών μεταβολής του ανέμου.

Από τον ορισμό της μέσης τιμής ταχύτητας προκύπτει ότι η τύρβη ορίζεται ως

η διαταραχή ταχύτητας (διαφορές στιγμιαίας ταχύτητας) με περίοδο μικρότερη από την περίοδο ολοκλήρωσης της μέσης τιμής. Η μέση τιμή ταχύτητας για περίοδο ολοκλήρωσης  $T$  ορίζεται ως:

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt$$

Η τύρβη συνεπώς ορίζεται ως:

$$u(t) = U(t) - \bar{U}$$

και η ένταση τύρβης:

$$\overline{u^2} = \frac{1}{T} \int_0^T [U(t) - \bar{U}]^2 dt$$

Όπου  $T$  η περίοδος ολοκλήρωσης της μέσης τιμής ταχύτητας. Μέτρο της μεταβλητότητας της τύρβης αποτελεί η ποσότητα:

$$I = \frac{\sqrt{\overline{u^2}}}{\bar{U}}$$

που αποτελεί και την αδιάστατη τιμή της τύρβης.

Μετρήσεις στο επιφανειακό οριακό στρώμα (50-100 μέτρα από το έδαφος) έδειξαν ότι η ένταση της τύρβης έχει άμεση σχέση με την ταχύτητα τριβής  $u_*$

$$\sqrt{\overline{u^2}} = 2,5u_*$$

οπότε ο λογαριθμικός νόμος μεταβολής της ταχύτητας δίνει τη μεταβολή της αδιάστατης τιμής της τύρβης με το ύψος

$$I(z) = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

Χρησιμοποιώντας την εμπειρική σχέση μεταξύ ύψους τραχύτητας  $z_0$  και του εκθέτη του νόμου μεταβολής της ταχύτητας καθ' ύψος προκύπτει ότι:

$$I(z) = \frac{a}{1 - a \ln\left(\frac{1\theta}{z}\right)}$$

και ότι

$$I(10m) = a$$

Συνεπώς μετρήσεις της έντασης της τύρβης στα 10 m από το έδαφος οδηγούν στην εκτίμηση του συντελεστή  $a$  του εκθετικού νόμου.

Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου είναι τυχαίες και μετρήσεις δείχνουν ότι η συνάρτηση της πυκνότητας πιθανότητας της διαταραχής ταχύτητας  $u$  ακολουθεί προσεγγιστικά την κατανομή Gauss

$$P(u) = \frac{1}{\sigma_u^2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma_u^2}\right)$$

Η στιγμιαία τιμή ταχύτητας αν θεωρηθεί περιοδική συνάρτηση με περίοδο  $T$  (το χρόνο μέσης τιμής) μπορεί να αναλυθεί κατά Fourier. Η κατανομή της ενεργείας διαταραχών ταχύτητας στο φάσμα συχνοτήτων έχει τυπική γραφική παράσταση με τη κλασική κλίση  $-5/3$  στην αδρανειακή περιοχή των μεγάλων συχνοτήτων.

### 9.12.1 Φάσμα τύρβης

Η συνάρτηση φασματικής πυκνότητας τύρβης ορίζεται έτσι ώστε:

$$S_u(n)dn$$

να αποτελεί την ενεργειακή συνεισφορά στη τύρβη  $u^2$  των συχνοτήτων  $n$ ,  $n + dn$ . Ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης σε ολόκληρο το φάσμα συχνοτήτων δίνει τη μεταβλητότητα τύρβης  $u^2$ :

$$u^2 = \int_0^{\infty} S_u(n)dn \quad \text{ή} \quad u^2 = \int_0^{\infty} n \cdot S_u(n)d(\ln n)$$

Η δεύτερη έκφραση είναι χρήσιμη στις γραφικές παραστάσεις λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων  $n$ . Διάφορες εμπειρικές θέσεις έχουν προταθεί για το  $S_u(n)$ . Η μορφή που γενικά γίνεται αποδεκτή ως η καλύτερη είναι αυτή του Von- Karman.

$$\frac{n \cdot S_u(n)}{u^2} = \frac{4\tilde{n}}{[1 + 70,8\tilde{n}^2]^{5/6}}$$

Η διαμήκης κλίμακα τύρβης είναι ένα μέτρο του μέσου μεγέθους της δίνης που συνήθως αναφέρεται ως οι δίνες που περιέχουν την ενέργεια της τύρβης. Η κλίμακα τύρβης μπορεί να εκτιμηθεί από

$$X_{Lu}(z) = 25 \frac{z^{0,35}}{z_0^{0,063}}$$

Υπάρχει μεγάλη διακύμανση στις δημοσιευμένες τιμές της κλίμακας τύρβης. Η προηγούμενη έκφραση βασίζεται σε στοιχεία που θεωρούνται τα πλέον αξιόπιστα. Πάντως εκφράζει τις μετρήσεις με ακρίβεια  $\pm 30\%$ .

Η περιοχή χαμηλών συχνοτήτων του φάσματος σχηματίζει την μακρομετεωρολογική πλευρά και οι μεταβολές οφείλονται σε κινήσεις αερίων μαζών μεγάλης κλίμακας όπως χαμηλά βαρομετρικά, αντικυκλώνες με περίοδο 4 περίπου



ημερών.

Η περιοχή υψηλών συχνοτήτων, περιοχή μεταβολής που οφείλεται στην ατμοσφαιρική τύρβη, σχηματίζουν την περιοχή της μικρομετεωρολογίας. Οι μεταβολές αυτές είναι αποτέλεσμα μηχανικής ανάμειξης των κατώτερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας από την τραχύτητα εδάφους και έχουν την ενέργειά τους κεντραρισμένη σε περίοδο 1 min.

### 9.12.2 Ριπές ανέμου

$$\text{Η μέση μέγιστη ριπή του ανέμου } \bar{U}_{\mu\epsilon\gamma}(z) = \bar{U}(z) + \gamma\sqrt{u^2}(z)$$

όπου  $\gamma$  ο συντελεστής ριπής. Η τιμή του  $\gamma$  εξαρτάται από την αδράνεια και το είδος του ανεμόμετρου καθώς και από το χρόνο που λαμβάνεται η μέση τιμή της ριπής του ανέμου. Ο  $\gamma$  είναι ανεξάρτητος του ύψους τραχύτητας  $z_0$  και ύψους  $z$ . Διαιρώντας με  $\bar{U}(z)$  προκύπτει:

$$\frac{\bar{U}_{\mu\epsilon\gamma}(z)}{\bar{U}(z)} = g(z) = 1 + \gamma I_u(z)$$

Ο συντελεστής ριπής δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma(t) = 0,42 \ln(3600/t)$$

όπου  $t$  διάρκεια μέτρησης της μέσης τιμής της ριπής.

Περίοδος ριπής $t$ (sec)	Συντελεστής ριπής $\gamma$	Λόγος ριπής $g$ (10 m)
1	3,44	1,6
3	2,98	1,51
5	2,76	1,48
10	2,47	1,43
20	2,18	1,38
30	2,01	1,35
60	1,72	1,3
600	0,75	1,13
3600	0	1

Για ριπή διάρκειας ολοκλήρωσης 3sec προκύπτει:  $\gamma = 2,98$ , οπότε ο λόγος ριπής είναι:

$$g_{3sec}(z) = 1 + 2,98 I_u(z)$$

Η σχέση αυτή προέκυψε από μετρήσεις στη Μ. Βρετανία.

Ο λόγος ριπής μπορεί να υπολογιστεί από τις ανεμολογικές μετρήσεις. Κατά συνέπεια μπορεί να προκύψει στο ύψος του ανεμομέτρου η τιμή της τύρβης, οπότε προκύπτει το ύψος τραχύτητας  $z_0$  και ο εκθέτης  $a$ . Για ύπαιθρο (ομαλό έδαφος)  $z_0 = 0,03$  m

$$g_{3sec} = 1 + 2,98 \frac{1}{\ln\left(\frac{10}{0,03}\right)} = 1,51$$

### 9.13 Χωρική μεταβολή της έντασης του ανέμου

Η ροή του ανέμου επάνω στην επιφάνεια της γης υπόκειται στους κλασικούς νόμους της μηχανικής των ρευστών. Ως εκ τούτου, είναι δυνατή εκτός των πειραματικών μετρήσεων η χρήση των αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων, που χρησιμοποιούνται στην μηχανική των ρευστών και στην αεροδυναμική, για να μελετηθεί η διανομή της ταχύτητας του ανέμου σε διάφορες επιλεγμένες θέσεις. Πιο συγκεκριμένα, η κατακόρυφη διανομή ταχύτητας του ανέμου ακολουθεί τη συμπεριφορά τυρβώδους οριακού στρώματος, όπου βέβαια πρέπει να ληφθεί υπόψη και η επίδραση της τραχύτητας του εδάφους με τη γενική της έννοια, δηλαδή η ύπαρξη κτιρίων, βράχων, δένδρων κλπ.

Για την περιγραφή της κατακόρυφης διανομής της ταχύτητας του ανέμου έχουν προταθεί διάφορες αναλυτικές σχέσεις, οι οποίες στηρίζονται στη θεωρία των οριακών στρωμάτων. Σαν γενική παρατήρηση πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει σημαντικά με το ύψος από το έδαφος στο οποίο αναφέρονται οι μετρήσεις. Συνήθως η μεταβολή αυτή είναι αξιοσημείωτη μέχρι τα πρώτα εκατό (100 m) μέτρα από το έδαφος, δηλαδή μέχρι το συνηθισμένο πάχος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.

Οι κυριότερες διανομές ταχύτητας που έχουν προταθεί είναι:

- α. η λογαριθμική διανομή (log-law) η οποία εκφράζεται σαν:

$$V(z) = k_1 \cdot \ln(z/z_0) + k_2$$

ή

$$\frac{V(z)}{V(z_1)} = \frac{\ln[(z - z^*)/z_0]}{\ln[(z_1 - z^*)/z_0]}$$

και δίνει την ταχύτητα σε ύψος  $z$  από το έδαφος συναρτήσει κάποιων αριθμητικών σταθερών, του τυπικού ύψους τραχύτητας της περιοχής  $z_0$  και του ύψους μετατόπισης μηδενικού επιπέδου  $z^*$ . Στην περίπτωση πολύπλοκου τοπογραφικού ανάγλυφου η παράμετρος  $z_0$  εξαρτάται και από τη διεύθυνση του ανέμου.

- β. η εκθετική διανομή (power law) η οποία εκφράζεται σαν:

$$\frac{V(z)}{V(z_1)} = \left(\frac{z}{z_1}\right)^a$$

και δίνει την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος  $z$  από το έδαφος συναρτήσει της παραμέτρου  $a$ , της οποίας η ακριβής τιμή εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους αλλά και την διεύθυνση του ανέμου. Οι τιμές της παραμέτρου  $a$  κυμαίνονται κατά κανόνα μεταξύ του 0,08 για παγωμένες επιφάνειες και του 0,45 για αστικές περιοχές.

Στην βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες εκτιμήσεις για την τιμή της παραμέτρου  $a$ , όπως η αναλυτική σχέση που προτάθηκε από τους Justus και Mikhail (1976), η οποία δίνει:

$$a = \frac{0,37 - 0,088 \ln[V(z = z_1)]}{1 - 0,088 \ln(z_1/10)}$$

Οι ίδιοι ερευνητές προτείνουν για γρήγορους υπολογισμούς μια μέση τιμή ίση με  $a = 0,023 \pm 0,03$ , ενώ ο Vadot προτείνει μια μέση τιμή ίση με  $a = 0,20$ . Από άλλους συγγραφείς έχει προταθεί συσχέτιση μεταξύ του ύψους τραχύτητας  $z_0$  και του εκθέτη  $a$  βάσει της σχέσης:

$$z_0 = 15,25 \exp\left(-\frac{1}{a}\right)$$

Ολοκληρώνοντας, πιστεύουμε ότι για σχετικά γρήγορους υπολογισμούς μια τυπική τιμή  $a = 0,20$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αρκετή ακρίβεια, εφόσον δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί για την υπό μελέτη τοποθεσία.

Όλες οι ανωτέρω εξισώσεις ισχύουν για επίπεδη επιφάνεια, η οποία ορίζεται βάσει των κάτωθι περιορισμών, δεχόμενοι πάντοτε ότι η θέση που γίνονται οι ανεμολογικές μετρήσεις συμπίπτει με τη θέση πιθανής εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας:

α. Η διαφορά ύψους μεταξύ της θέσης της ανεμογεννήτριας και του περιβάλλοντος χώρου σε ακτίνα 12 km να μην είναι μεγαλύτερη των 60 μέτρων.

β. Όλοι οι λόφοι με λόγο ύψους προς πλάτος μικρότερο από 0,016 σε ακτίνα 4 km πρέπει να έχουν διαφορά ύψους μεταξύ του υψηλότερου και χαμηλότερου σημείου το πολύ το 1/3 της διαφοράς ύψους μεταξύ του κάτω μέρους του στροφείου της ανεμογεννήτριας και του χαμηλότερου σημείου του εδάφους.

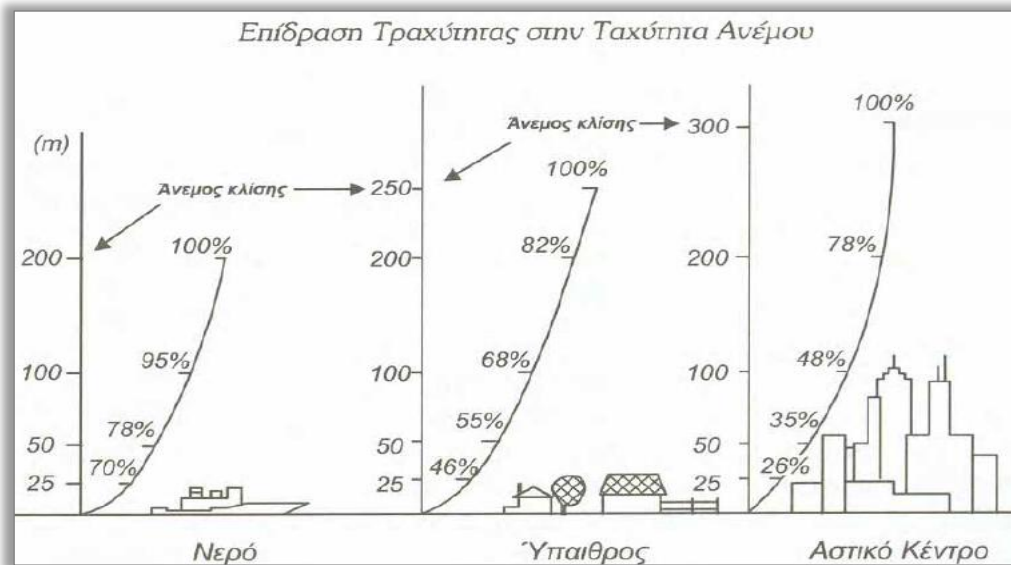
Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι σχεδόν πάντοτε απαραίτητη η αναγωγή των μετρήσεων των χαρακτηριστικών του ανέμου στο υπό μελέτη ύψος λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, δεδομένου ότι οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου παρουσιάζονται συνήθως ανηγμένες σε ύψος 10 ή 30 μέτρων. Όμως, πρέπει να τονισθεί ότι η εφαρμογή των εξισώσεων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, δεδομένης της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στην εκτίμηση των παραμέτρων  $z_0$  και  $a$ . Για το λόγο αυτό και για τον περιορισμό του σφάλματος κατά τη μέτρηση της καμπύλης ισχύος των ανεμογεννητριών, οι κανονισμοί IEA (International Energy Association) συνιστούν την τοποθέτηση των ανεμομέτρων στο ύψος της πλήμνης της μηχανής και

όχι τη χρήση των παραπάνω εμπειρικών αναγωγικών σχέσεων.

Τέλος, για τη χρησιμοποίηση των παραπάνω ημιεμπειρικών διανομών ταχύτητας για αποστάσεις μεγαλύτερες των 50 m από το έδαφος είναι σκόπιμο να συμπεριληφθούν και διορθώσεις λόγω περιστροφής της γης.

## 9.14 Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους

Είναι συνηθισμένο το φαινόμενο της μέτριας λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας, αν και έχει εγκατασταθεί σε περιοχή με υψηλό αιολικό δυναμικό. Στις περισσότερες από τις περιπτώσεις αυτές η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε έντονα μεταβαλλόμενο πεδίο ροής λόγω της υψηλής τύρβης της περιοχής. Η εμφάνιση υψηλής τύρβης, εξαρτάται εκτός από τις γενικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, τόσο από την ύπαρξη μεμονωμένων κτιρίων ή άλλων εμποδίων όσο και από την τραχύτητα του εδάφους της περιοχής. Άλλωστε, η τραχύτητα του εδάφους επηρεάζει άμεσα και την τιμή του συντελεστή  $a$  της εκθετικής διανομής της ταχύτητας.



Σχήμα 9.28

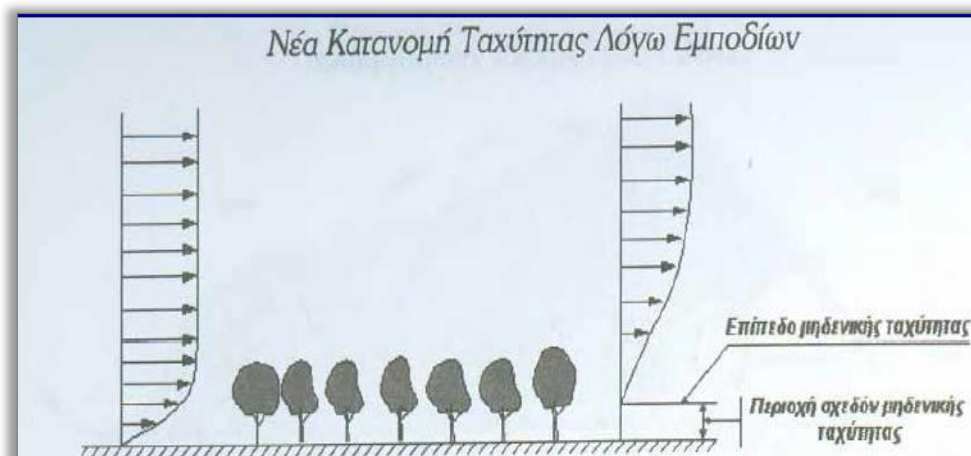
Επιφάνεια	Περιγραφή	$z_0$
Πάγος, Βούρκος	Λεία Επιφάνεια	$\approx 10^{-5}$
Ήρεμη Θάλασσα, Χιονισμένη περιοχή	Επίπεδη Λοφώδης περιοχή	$\approx 10^{-4}$
Άμμος, Έρημος, Υπήνεμη Παραλία	Εξαρτάται από μέγεθος κόκκων και την παρουσία αμμόλοφων ή κυματώσεων	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Χιονισμένη Αγροτική Περιοχή	Ομαλή Επιφάνεια	$\approx 10^{-3}$
Γυμνό Έδαφος	Μεγαλύτερες τιμές για οργανωμένο	$10^{-3} \div 10^{-2}$
Γρασίδι - Χόρτα	Ύψους 0.02 ÷ 0.1m Ύψους 0.25 ÷ 1.0m	$\approx 0.003 \div 0.01$ $\approx 0.04 \div 0.1$
Αεροδρόμιο-Διάδρομος	Περιοχή αεροδρομίου	$\approx 0.02$
Αγροτικές Καλλιέργειες	Εξαρτάται από την ένταση του ανέμου	$\approx 0.04 \div 0.20$
Τυπικές Αγροτικές περιοχές	Χωράφια με μεμονωμένα δένδρα και κτίρια	0.01 ÷ 0.1
Περιβόλι Οπωροφόρων	Εξαρτάται από τις εποχές	0.5 ÷ 1.0
Πολλά Δένδρα, Λίγα κτίσματα, Δενδρόφυτοι φράκτες	Εξαρτάται από το είδος των δέντρων	0.01 ÷ 0.03
Δάση	-	1.0 ÷ 6.0
Μικρές Πόλεις ή Προάστια	Χαμηλά σπίτια, δέντρα κλπ.	0.1 ÷ 2.0
Κέντρα πόλεων ή πολύ έντονο ανάγλυφο ορεινής περιοχής	Κτίρια ύψους 10 ÷ 50 m Ιδιαίτερα ανομοιόμορφη έκταση	1.0 ÷ 10.0

Σχήμα 9.29 Τυπικές τιμές τραχύτητας επιφανειών.

## 9.15 Επίδραση επιφανειακών εμποδίων

Για τη σωστή αεροδυναμική συμπεριφορά μιας αιολικής μηχανής είναι σκόπιμο η πτερωτή της ανεμογεννήτριας να βρίσκεται εκτός του πεδίου επιρροής

τυχόν επιφανειακών εμποδίων. Με τον τρόπο αυτό έχουμε μεγιστοποίηση της διαθέσιμης κινητικής ενέργειας του ανέμου, το πεδίο ροής είναι ελεύθερο στροβιλισμού και η τύρβη του ανέμου είναι η ελάχιστη δυνατή. Είναι συνεπώς σκόπιμο να εντοπίσουμε τις περιοχές επιρροής των κυριότερων επιφανειακών εμποδίων.



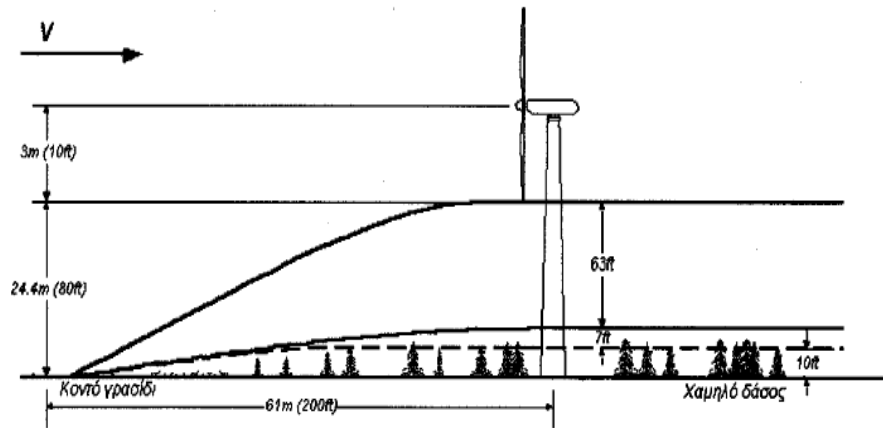
Σχήμα 9.30

Η παρουσία **συστοιχίας δένδρων** έχει ως αποτέλεσμα το μηδενισμό της ταχύτητας του ανέμου μέχρι και το ύψος κορυφής των δένδρων, ενώ το οριακό στρώμα φαίνεται να αναπτύσσεται από την κορυφή των δένδρων ως κατάντη. Στις περιπτώσεις αυτές το ύψος της ζώνης επιρροής είναι τουλάχιστον πέντε ως έξι ( $5\div 6$ ) φορές το μέσο ύψος των δένδρων. Τέλος, η τοποθέτηση της πτερωτής της ανεμογεννήτριας θα πρέπει εκτός του οριακού στρώματος, που αναπτύσσεται στην περιοχή της συστοιχίας.

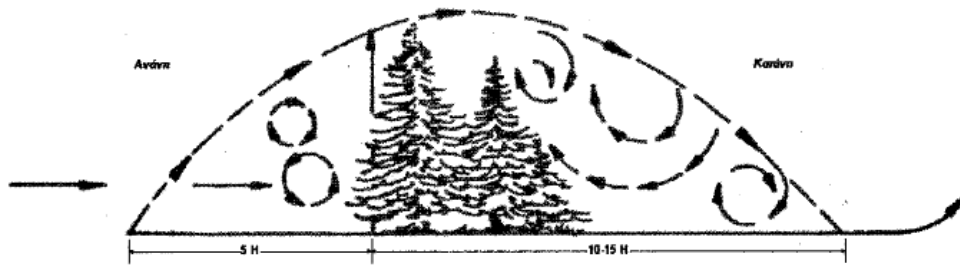
Πολύ συχνά και για περιπτώσεις **υψηλών δένδρων** αναφέρεται στην υπό μελέτη τοποθεσία η ύπαρξη περιοχών, όπου έχουμε μηδενισμού της ταχύτητας του ανέμου και δημιουργία έντονων στροβίλων ανακυκλοφορίας. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται «ανεμόφρακτες» και αποτελούν σαφή ένδειξη της ύπαρξης ανέμου υψηλών ταχυτήτων.

Τα **παρακείμενα κτίρια** αποτελούν ένα άλλο είδος εμποδίων, δεδομένου ότι η παρουσία τους διαταράσσει σε σημαντική έκταση το πεδίο ροής του ανέμου. Επιπλέον, οι οξείες γωνίες του κτιρίου αποτελούν την πηγή εκροής μεμονωμένων στροβίλων, με αποτέλεσμα την πλήρη τροποποίηση των χαρακτηριστικών του ανέμου.

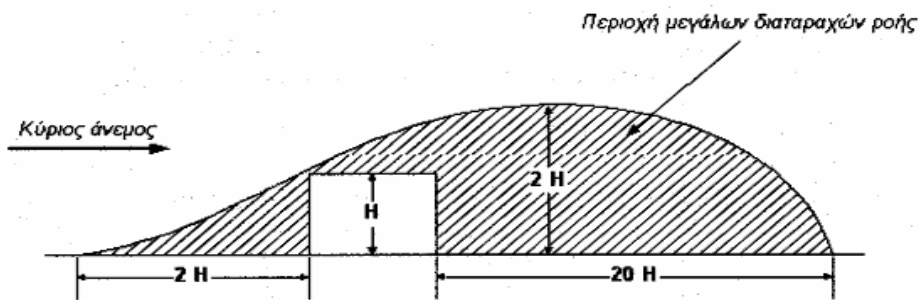
Εκτεταμένες έρευνες που αφορούν τη ροή γύρω από τα κτίρια κατέληξαν ότι η ζώνη επιρροής των κτιρίων περιλαμβάνει δύο φορές το ύψος του κτιρίου ανάντη, δέκα φορές το ύψος του κτιρίου κατάντη και ύψος τουλάχιστον διπλάσιο του κτιρίου



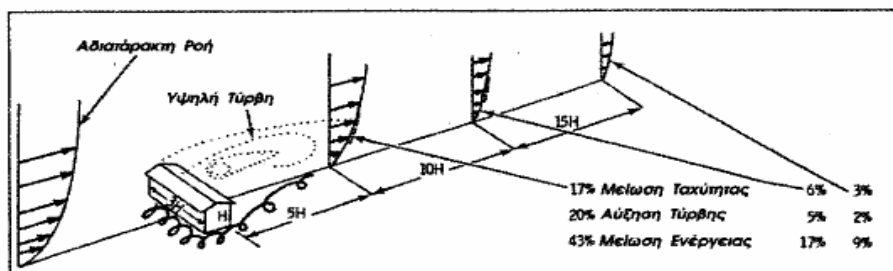
Σχήμα 9.31 Ζώνη επιρροής χαμηλών εμποδίων καθ' ύψος.



Σχήμα 9.32 Πεδίον ροής πλησίον ανεμοφράκτη.



Επίδραση Εμποδίου σε Ενέργεια-Τύρβη της Ροής



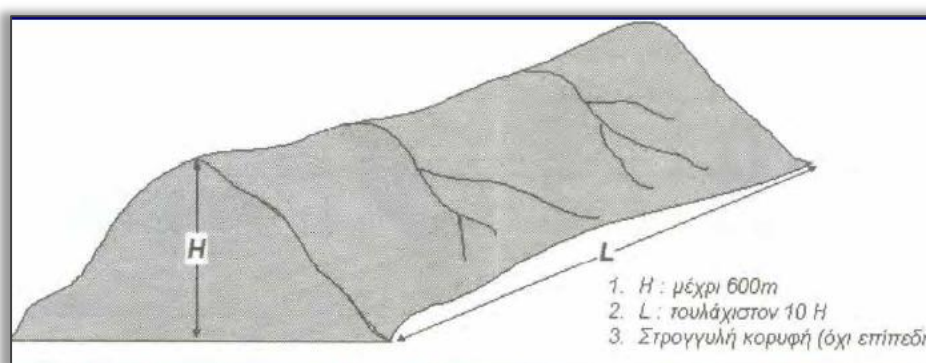
Σχήμα 9.33 Επίδραση εμποδίου σε Ενέργεια-Τύρβη της ροής.

στην περίξ του κτιρίου περιοχή. Σαν παράδειγμα αναφέρεται ότι σε απόσταση δεκαπλάσια του ύψους του κτιρίου έχουμε κατά 5% αύξηση του επιπέδου της τύρβης και κατά 6% μείωση της ταχύτητας του αέρα, η οποία και οδηγεί σε μείωση κατά 17% της διαθέσιμης ενέργειας του αδιατάρακτου ρεύματος στην ανάντη του κτιρίου.

## 9.16 Επίδραση του τοπογραφικού ανάγλυφου της περιοχής

Όπως προαναφέραμε, οι αναλυτικές σχέσεις που περιγράφουν τη διανομή ταχύτητας ισχύουν με μαθηματική ακρίβεια μόνο σε περιοχές που χαρακτηρίζονται ως «επίπεδες επιφάνειες». Όμως, η πλειοψηφία των περιοχών με υψηλό αιολικό δυναμικό χαρακτηρίζονται από έντονο ανάγλυφο. Συνεπώς, επειδή η διαμόρφωση του πεδίου ταχύτητας επηρεάζεται μεν από την τραχύτητα του εδάφους και τα επιφανειακά εμπόδια, πλην όμως μεγαλύτερη επίδραση έχουν οι εδαφολογικές ιδιομορφίες στην περιοχή της πιθανής θέσης εγκατάστασης μιας αιολικής μηχανής, είναι σκόπιμο να αναφέρουμε ορισμένα προκαταρκτικά στοιχεία, που αφορούν την παρουσία λοφοσειρών και περασμάτων στην υπό διερεύνηση περιοχή. Για ακριβέστερες αναλύσεις απαιτείται η μελέτη του τοπογραφικού ανάγλυφου της περιοχής είτε υπό κλίμακα σε αεροδυναμική σήραγγα είτε με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων πλήρους ανάλυσης του πεδίου ροής.

Η έννοια της λοφοσειράς λαμβάνεται κάθετη στην επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου. Το μέγιστο ύψος της λοφοσειράς δεν υπερβαίνει τα εξακόσια (600 m) μέτρα, ενώ το πλάτος της είναι τουλάχιστον δεκαπλάσιο του ύψους της λοφοσειράς. Η ανάλυσή μας βασίζεται στην υπόθεση ότι ο άνεμος περνάει επάνω από τη λοφοσειρά και δεν την παρακάμπτει κινούμενος πλαγίως.



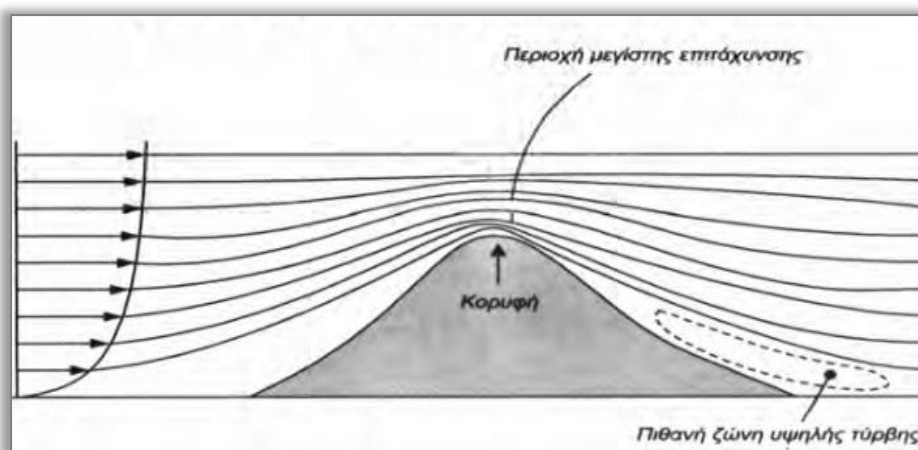
Σχήμα 9.34 Στοιχεία ορισμού λοφοσειράς.

Βασιζόμενοι στους κλασικούς νόμους της αεροδυναμικής υποηχητικών ταχυτήτων (πχ εξίσωση Bernoulli), μπορούμε να πούμε ότι η κορυφή της λοφοσειράς



είναι μια πολύ καλή θέση εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας, δεδομένης της συμπίεσης των γραμμών ροής, η οποία ισοδυναμεί με επιτάχυνση της αέριας δέσμης. Ένας πιθανός διπλασιασμός της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή της κορυφής ισοδυναμεί με οκταπλασιασμό της διαθέσιμης ισχύος του ανέμου στην εν λόγω περιοχή. Συχνά είναι προτιμότερο να εγκατασταθεί η ανεμογεννήτρια λίγο πριν την κορυφή της λοφοσειράς, ώστε να αποφευχθούν αφενός αρνητικές κλίσεις της ταχύτητας που συνοδεύουν τυχόν αποκόλληση της ροής, αφετέρου περιοχές υψηλής τύρβης.

Τέλος στη βιβλιογραφία ότι η ιδανική λοφοσειρά εμφανίζει κλίση περίπου  $15^\circ$  ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ενώ δεν είναι αποδεκτές λοφοσειρές χαμηλών κλίσεων. Σύμφωνα με την υφιστάμενη εμπειρία οι τριγωνικής διάταξης λοφοσειρές έχουν την καλύτερη επίδραση στο πεδίο ροής του ανέμου.



Σχήμα 9.35 Ταχύτητα ανέμου στην περιοχή υψώματος.

Ολοκληρώνοντας, πρέπει να επισημάνουμε ότι ιδιαίτερη επίδραση στη συνολική διανομή της ταχύτητας του ανέμου έχει η διαμόρφωση του εδάφους, δεδομένου ότι η παρουσία εμποδίων, στενώσεων ή ανοιγμάτων τροποποιεί σημαντικά τα αιολικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής. Αν και υπάρχουν αρκετές αναλυτικές ημιεμπειρικές σχέσεις που προτείνουν διορθώσεις της ταχύτητας του ανέμου παρουσία εμποδίων ή λόγω της τραχύτητας του εδάφους, ακριβείς υπολογισμοί μπορούν να γίνουν μόνο με την αριθμητική προσομοίωση της υπό εξέταση περιοχής και τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. **Σαν γενικός, τέλος, κανόνας πρέπει να τηρηθεί η αρχή ότι ο δρομέας (περωτή) μιας ανεμογεννήτριας πρέπει να βρίσκεται έξω από τη ζώνη επιρροής οποιουδήποτε επιφανειακού εμποδίου που βρίσκεται ανάντη της ανεμογεννήτριας, ώστε να μεγιστοποιηθεί η διαθέσιμη αιολική ενέργεια και να ελαχιστοποιηθεί η αναπτυσσόμενη ατμοσφαιρική τύρβη.**

## 9.17 Επεξεργασία των ανεμολογικών δεδομένων

Για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής δεν είναι αρκετό να γνωρίζουμε απλώς τη μέση ταχύτητα του ανέμου της περιοχής, αλλά απαιτείται η κατά το δυνατόν ακριβέστερη γνώση της κατανομής των συχνοτήτων εμφάνισης των διάφορων ταχυτήτων καθώς και των αντίστοιχων διευθύνσεων. Συνήθως για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης του ανέμου, εκτιμάται με ακρίβεια  $10^\circ$  η μέση διεύθυνση του ανέμου για χρονικά διαστήματα 10 min.

Για τον προσδιορισμό της έντασης του ανέμου επεξεργαζόμαστε τις καταγραφές της ταχύτητας του ανέμου. Εάν αυτές είναι στιγμιαίες, έχουμε τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε τόσο τις διακυμάνσεις όσο και τις τυχόν ριπές του ανέμου. Εάν ο ανεμογράφος είναι αθροιστικός, τότε δεν καταγράφονται οι διακυμάνσεις της ταχύτητας και προσδιορίζεται αθροιστικά η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια μιας προκαθορισμένης χρονικής περιόδου (πχ μιας ώρας).

Τέλος, στην περίπτωση που τα όργανα που μετρούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ανέμου είναι εγκατεστημένα σε κινούμενα με ταχύτητα  $u$  μέσα, πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι τα όργανα αυτά καταγράφουν τη σχετική  $W$  και όχι την απόλυτη  $V$  ταχύτητα του ανέμου. Για την εκτίμηση της πραγματικής (απόλυτης) ταχύτητας του ανέμου πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις της κινηματικής και πιο συγκεκριμένα η σχέση του Γαλιλαίου, δηλαδή:

$$\vec{V} = \vec{W} + \vec{u}$$

### 9.17.1 Ετήσια καμπύλη διάρκειας

Καταγράφοντας τις μέσες ταχύτητες του ανέμου ανά ορισμένη χρονική περίοδο (πχ μέσες ημερήσιες, μέσες ωριαίες) σε μια συγκεκριμένη θέση και σε ένα συγκεκριμένο ύψος στη διάρκεια ενός έτους, είναι δυνατή η δημιουργία της ετήσιας καμπύλης διάρκειας του ανέμου, η οποία μας δείχνει τον αριθμό των περιόδων του χρόνου, που ο άνεμος έχει ένταση μεγαλύτερη από μια ορισμένη τιμή.

### 9.17.2 Ετήσια καμπύλη συχνότητας

Στη θέση της καμπύλης ταχύτητας – διάρκειας, είναι δυνατή η χάραξη της αντίστοιχης καμπύλης (ή και ιστογράμματος) ταχύτητας – συχνότητας. Για παράδειγμα, η εν λόγω καμπύλη (ιστόγραμμα) μπορεί να προκύψει από τη καμπύλη διάρκειας (και αντίθετα) και δίνει το ποσοστό του έτους κατά το οποίο η μέση ταχύτητα του ανέμου βρίσκεται μέσα σε καθορισμένα όρια (πχ από 3 έως 4 m/s). Στην περίπτωση χρήσης συνεχούς καμπύλης και όχι ιστογράμματος, η αντιστοίχιση γίνεται για τη μέση ταχύτητα κάθε διαστήματος (πχ 3,5 m/sec). Η καμπύλη συχνότητας εμφανίζει εν γένει ένα ή το πολύ δύο μέγιστα, ενώ υπάρχουν αξιόλογες προσπάθειες αναλυτικής περιγραφής της, με τη χρήση κατάλληλων αναλυτικών παραμετρικών συναρτήσεων.

### 9.17.3 Καμπύλες διαστημάτων νηνεμίας

Η μελέτη των συνεχών χρονικών περιόδων (πχ ώρες, ημέρες) με νηνεμία ή με χαμηλές ταχύτητες του ανέμου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, δεδομένου ότι προσδιορίζει τις χρονικές περιόδους που η αιολική εγκατάσταση βρίσκεται εκτός λειτουργίας ή παρέχει μικρή ισχύ. Στις περιόδους αυτές οι ενεργειακές ανάγκες τις κατανάλωσης πρέπει να καλυφθούν είτε από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο είτε από αυτόνομες εφεδρικές πηγές ενέργειας είτε τέλος από αποθηκευμένη αιολική ενέργεια με τη χρήση συσσωρευτών. Για αυτόνομες εγκαταστάσεις, οι περίοδοι νηνεμίας καθορίζουν σε ένα βαθμό και το μέγεθος των συσσωρευτών και επιδρούν συνεπώς στο κόστος της εγκατάστασης.

Τα χρησιμοποιούμενα διαγράμματα, μας δίνουν στον οριζόντιο άξονα το πλήθος των συνεχών χρονικών περιόδων (πχ ημέρες) και στον κατακόρυφο άξονα τη συχνότητα επανάληψης των περιόδων της νηνεμίας. Στο διάγραμμα αυτό χαράζονται οι αντίστοιχες καμπύλες για ταχύτητες μικρότερες συγκεκριμένων τιμών.

## 9.18 Θεωρητικός υπολογισμός κατανομής συχνοτήτων ταχύτητας ανέμου

Για τον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού μιας θέσης απαιτείται η γνώση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας, ενέργειας που μεταβάλλεται όμως με το χρόνο. Αντιπροσωπευτική τιμή της όμως μπορεί να είναι η μέση ετήσια τιμή η οποία όμως για να υπολογισθεί απαιτεί τη γνώση της διάρκειας πνοής των ανέμων κάθε κατηγορίας ή κλίμακας ταχυτήτων.

Με την ύπαρξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι επιθυμητή για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού η ύπαρξη αναλυτικής έκφρασης της διάρκειας πνοής του ανέμου ή της πυκνότητας πιθανότητας πνοής ανέμων.

Γι' αυτό έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι προσαρμογής αναλυτικών εκφράσεων σε διαθέσιμες ανεμολογικές μετρήσεις. Από τις διάφορες προτάσεις φαίνεται ότι η αναλυτική σχέση Weibull για την πυκνότητα πιθανότητας έχει ευρύτερη προσαρμογή και γι' αυτό έχει γενικά καθιερωθεί.

Η κατανομή Weibull είναι μια διπαραμετρική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας με παραμέτρους  $c$  και  $k$  και έχει την αναλυτική έκφραση:

$$P(u) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k}$$

όπου  $V$  η ταχύτητα του ανέμου και  $c$  και  $k$  παράμετροι.

Η ποσότητα  $P(V)dV$  εκφράζει την πιθανότητα να φυσάει άνεμος στην περιοχή ταχύτητας μεταξύ  $V-dV/2$  και  $V+dV/2$  ή αλλιώς η ποσότητα  $8760 P(V)dV$  φανερώνει τις ώρες το χρόνο (1 έτος έχει 8760 ώρες) που φυσάει άνεμος ταχύτητας μεταξύ  $V -$

$dV/2$  και  $V+dV/2$ .

Είναι φανερό ότι η μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι:

$$\bar{V} = \int_{V=0}^{\infty} VP(V)dV$$

Οπότε εκτέλεση πράξεων οδηγεί στη σχέση:

$$\bar{V} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

Όπου  $\Gamma$  η συνάρτηση γάμα.

Η ετήσια μεταβλητότητα του ανέμου (προσοχή όχι τύρβη) που ορίζεται ως

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} [V - \bar{V}]^2 P(V)dV$$

με την εκτέλεση πράξεων εκφράζεται από τη σχέση:

$$\sigma^2 = c^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$$

Η μεταβλητότητα  $\sigma^2$  σχετίζεται με τη μέση τιμή ταχύτητας με τη σχέση:

$$\sigma^2 = \overline{V^2} - \bar{V}^2$$

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ημιεμπειρικές σχέσεις για τις παραμέτρους  $c$  και  $k$ , όπως:

$$c = \frac{1,39\bar{V}^2}{(\bar{V}-2)} - 2^{0,089} \quad \text{και} \quad k = 1 + 0,48(\bar{V} - 2)$$

Η αθροιστική κατανομή συχνοτήτων (ή διάρκεια πνοής ανέμου) δίνεται από τη σχέση:

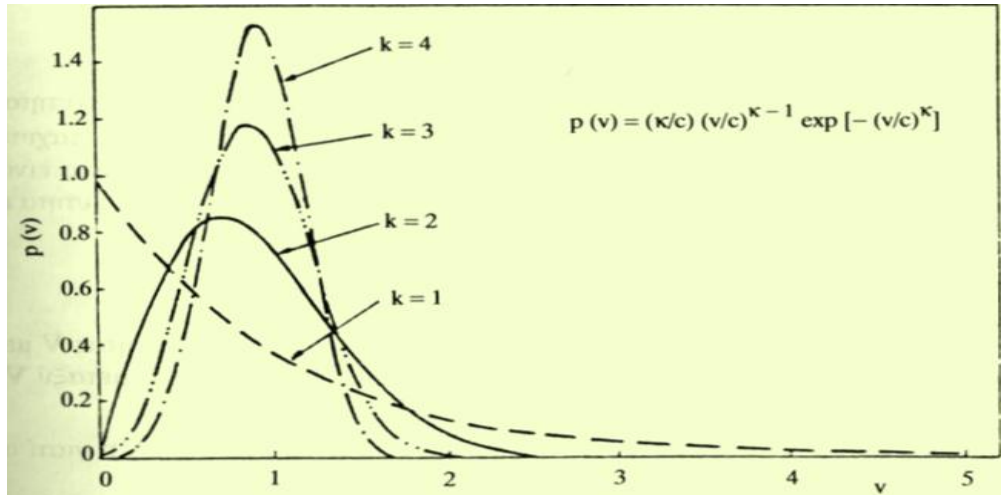
$$P(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} P(V)dV = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right]$$

Εκφράζει τη πιθανότητα να φυσάει άνεμος ταχύτητας μικρότερης τη  $V_x$  ή αλλιώς το ποσοστό του χρόνου που φυσάει άνεμος ταχύτητας μικρότερης της  $V_x$ .

### 9.18.1 Μέθοδος υπολογισμού των παραμέτρων $k$ και $c$

Οι παράμετροι κλίμακας ταχύτητας  $c$  και μορφής  $k$  της κατανομής

Weibull είναι δυνατόν να υπολογισθούν αν υπάρχουν μετεωρολογικές μετρήσεις στην περιοχή, προσαρμόζοντας με ελάχιστα τετράγωνα την αναλυτική σχέση στα πειράματα.

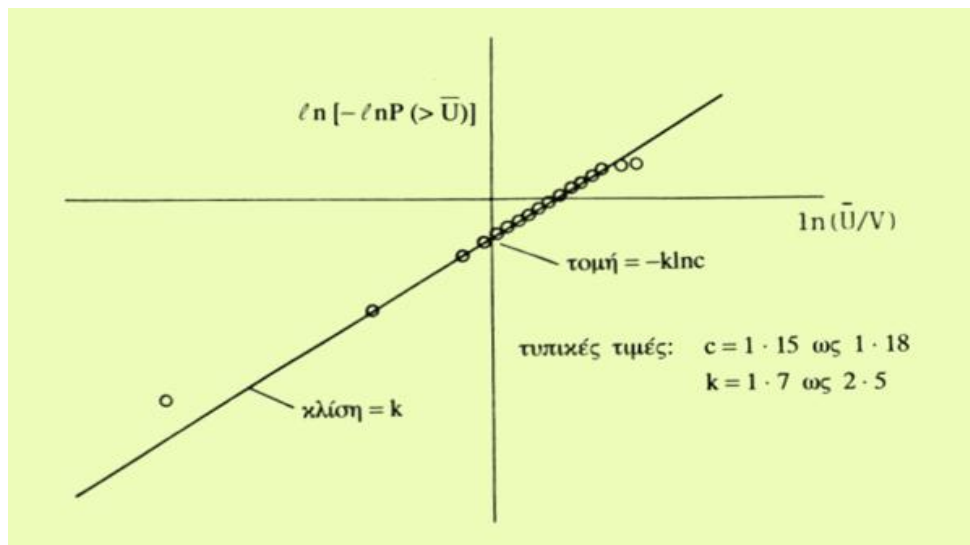


Σχήμα 9.36 Τυπική μορφή κατανομής Weibull.

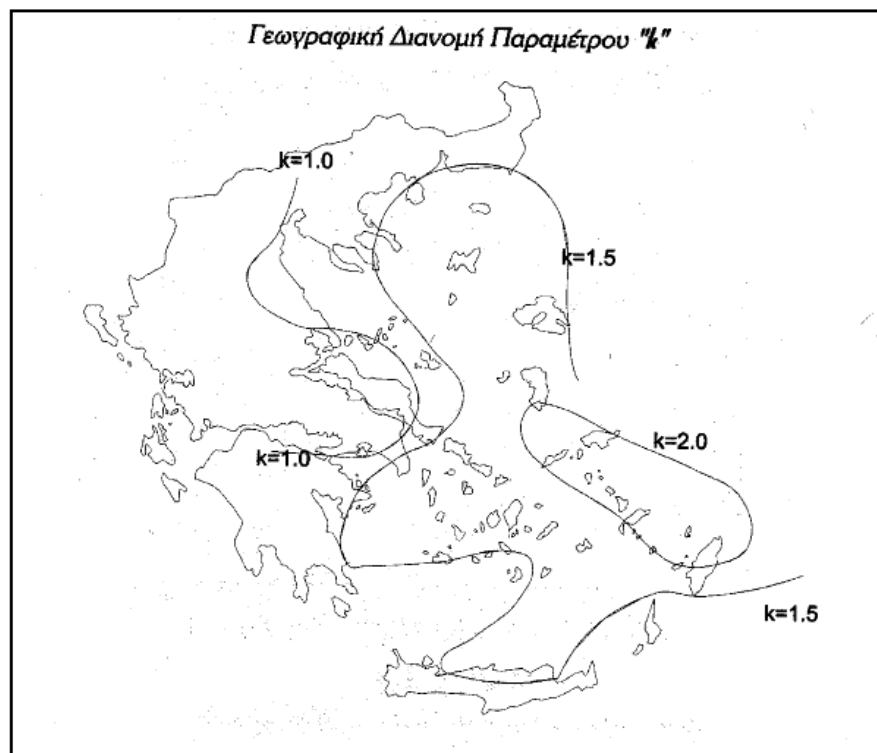
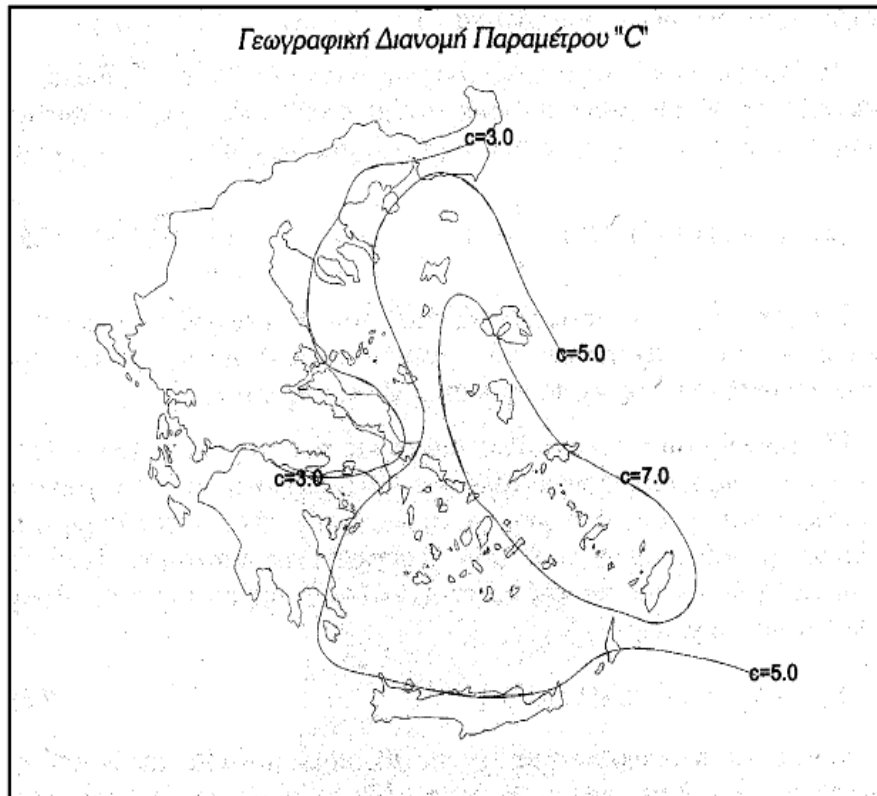
Συγκεκριμένα η αναλυτική σχέση διάρκειας πνοής ανέμου μπορεί να λογαριθμισθεί και να δώσει τη γραμμική σχέση:

$$\ln[-\ln[1 - P(V \leq V_x)]] = k \ln c + \ln V_x$$

οπότε οι ανεξάρτητες μεταβλητές  $k$  και  $c$  μπορούν να υπολογισθούν με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για διάφορες τιμές ταχυτήτων  $V_x$ .



Σχήμα 9.37 Η κατανομή Weibull σε λογαριθμική κλίμακα.



### 9.18.2 Ενέργεια και ισχύς ανέμου

Μια τοποθεσία χαρακτηρίζεται ανεμολογικά από τη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου  $\bar{V}$ , ταχύτητα η οποία προκύπτει από τη μέση τιμή των στιγμιαίων ταχυτήτων που δείχνουν τα ανεμογραφικά όργανα για μεγάλη περίοδο. Αν  $k$  και  $c$  είναι οι χαρακτηριστικές παράμετροι Weibull στην περιοχή τότε η μέση ετήσια ταχύτητα είναι:

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} VP(V)dV$$

Σχέση που ολοκληρώνει (μέση τιμή), το γινόμενο της στιγμιαίας ταχύτητας  $V$  με την πιθανότητα  $P(V)dV$  να υπάρχει τέτοια ταχύτητα (αυστηρά ταχύτητα μεταξύ  $V$  και  $V+dV$ ).

Η μέση ετήσια τιμή της ισχύος του ανέμου δεν είναι ίση με  $1/2\rho(\bar{V})^3$  γιατί απλά

$$(\overline{V^3}) \neq (\bar{V})^3$$

αλλά η μέση ετήσια τιμή της ισχύος του ανέμου θα προκύψει από τη σχέση:

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \rho V^3 P(V) dV$$

Εκτέλεση των πράξεων οδηγεί προσεγγιστικά στη σχέση:

$$\bar{P} = 2 \frac{\rho}{2} (\bar{V})^3$$

δηλαδή η μέση ετήσια ισχύς του ανέμου είναι διπλάσια αυτής που προκύπτει χρησιμοποιώντας τον κύβο της μέσης ετήσιας τιμής ταχύτητας του ανέμου.

Η συνολική ετήσια ενέργεια του ανέμου είναι τότε:

$$E = 8760\bar{P}$$

### 9.18.3 Διανομή Rayleigh

Η διανομή Rayleigh είναι μια ειδική μορφή της διανομής Weibull και προκύπτει από αυτή, όταν η παράμετρος  $k$  ληφθεί ίση με 2. Η προτεινόμενη τιμή της παραμέτρου  $k$  αποτελεί μια αρκετά ρεαλιστική τιμή για την περιοχή του Αιγαίου. Με τον τρόπο αυτό απλοποιούνται οι αναλυτικές σχέσεις και για τον προσδιορισμό της

διανομής χρειάζεται μόνο η μέση ταχύτητα του ανέμου στην υπό μελέτη περιοχή, δηλαδή:

$$f(V) = \frac{\pi V}{2\bar{V}^2} \cdot \exp\left[-\frac{\pi V^2}{4\bar{V}^2}\right]$$

Η διανομή Rayleigh χρησιμοποιείται εναλλακτικά στη θέση της διανομής Weibull, επειδή παρουσιάζει συγκρίσιμα αποτελέσματα με λιγότερες μαθηματικές πράξεις. Η διανομή Rayleigh, χρειάζεται μόνο τη μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας  $\bar{V}$  μιας περιοχής, η οποία μπορεί να υπολογιστεί βάσει των μετρημένων ποσοστών εμφάνισης των διάφορων τιμών της ταχύτητας. Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση:

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^{i=n} f_i(V) \cdot V_i$$

όπου  $n$  είναι το πλήθος των διακριτών τιμών ταχύτητας, που έχουμε λάβει υπόψη μας κατά τη διάρκεια της καταγραφής των μετρήσεων.

## 9.19 Εκτίμηση του αιολικού δυναμικού της Ελλάδας

### 9.19.1 Μεθοδολογία

Το αιολικό δυναμικό της χώρας εκτιμήθηκε για πρώτη φορά από το εργαστήριο αεροδυναμικής του Ε.Μ.Π. Στην έρευνα αυτή, το πρώτο βήμα αποτέλεσε η χάραξη καμπυλών ισοταχυτήτων ανέμου σε ολόκληρο τον ελλαδικό χώρο και σε κλίμακα χάρτου 1:100.000. Κατόπιν θεωρήθηκε η μέση απόσταση θέσεων εγκατάστασης ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους τα 5 km, οπότε οι κορυφές των ισοπλευρών τριγώνων αποτελούσαν πιθανές θέσεις εγκατάστασης ανεμογεννητριών. Στη συνέχεια πάνω στο χάρτη χαράχθηκαν οι γραμμές μέσης τάσης του εθνικού ηλεκτρικού δικτύου και σημειώθηκαν οι θέσεις εκείνες εγκατάστασης ανεμογεννητριών που γειτνιάζουν με το δίκτυο. Οι θέσεις αυτές εγκατάστασης ανεμογεννητριών είναι οι οικονομικότερες από άποψη κόστους για διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο.

### 9.19.2 Χάραξη καμπυλών ισοταχυτήτων ανέμου

Για τη χάραξη των καμπυλών μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου στον ελλαδικό χώρο χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας και οι μετρήσεις της ΔΕΗ.

Ορισμένα αποτελέσματα της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας βασίζονται σε παρατηρήσεις 20 – 40 ετών και προέρχονται από 100 μετεωρολογικούς σταθμούς. Σε 40 απ' αυτούς οι μετρήσεις γίνονται με ανεμογράφο είτε με ανεμόμετρο χειρός 8



Θέση	(3) ΔΕΗ	(4) ΔΕΗ	(5)	Ετησίως δεσμευόμενη αιολική ενέργεια kWh/m <sup>2</sup>
Αθήνα		4,0 (± 0,2)		141
Αθήνα (Αστεροσκοπείο)		2,3 (± 0,1)		27
Αλεξανδρούπολη		3,5 (± 0,5)		94
Άνδρος		-	6,7	662
Βόλος		3,9 (± 0,4)		130
Ζάκυνθος		-	6,6	632
Ηράκλειο		4,6 (± 0,8)		14
Θεσσαλονίκη		2,90 (± 0,6)		54
Θήρα		6,6 (± 0,8)		632
Καβάλα		1,6 (± 0,2)		9
Κύθηρα	6,2	5,5 (± 0,4)		429
Κύθνος		-	6,8	691
Κύμη		2,5 (± 0,1)		34
Κως	6,2	6,2 (± 0,5)		524
Λαύριο		-	6,4	576
Λήμνος	6,0	5,2 (± 0,4)		386
Μήλος		6,3 (± 0,4)		550
Μυτιλήνη	5,2	5,0 (± 0,6)		291
Νάξος	7,0	7,2 (± 0,6)		787
Ναύπλιο		3,9 (± 0,7)		130
Ρόδος		5,3 (± 0,6)	5,7	366
Σάμος	6,0	6,3 (± 0,5)		511
Σκύρος	7,0	6,5 (± 0,5)		677
Σητεία		3,3 (± 0,5)		79
Χανιά		2,4 (± 0,8)		30
Χίος		4,0 (± 0,3)	6,2	524

Σχήμα 9.38 Μέσες ταχύτητες ανέμου.

α/α	Περιοχή	V(m/s) Περίοδος μετρήσεων
1	Άνδρος (Καλυβάρι)	9,7 (1981 – 90)
2	Τήνος (Αγ. Μαρίνα)	9,5 (1987 – 90)
3	Μύκονος (Φάρος)	10,8 (1983 – 90)
4	Κρήτη (Ανω Μούλια)	8,1 (1981 – 83)
5	Λήμνος (Βούναρος)	8,1 (1986 – 90)
6	Λέσβος (Ματσινέλι)	8,7 (1987 – 90)
7	Χίος (Ποταμιά)	8,1 (1986 – 89)
8	Σάμος (Μαραθόκαμπος)	10,4 (1986 – 90)
9	Εύβοια (Αγ. Σπυρίδων)	9,2 (1989 – 90)
10	Κάρπαθος (Σπόα)	9,6 (1983 – 89)
11	Σκύρος (Ασπούς)	6,5 (1987 – 89)
12	Σαμοθράκη (Αγ. Ανδρέας)	6,6 (1986 – 89)

Σχήμα 9.39 Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμων (10 m από το έδαφος. Μετρήσεις ΔΕΗ).

φορές την ημέρα. Τα αποτελέσματα της εργασίας βασίστηκαν στη στατιστική επεξεργασία μετρήσεων 20 μετεωρολογικών σταθμών της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 150 km και καλύπτουν έτσι ικανοποιητικά την περιοχή του Αιγαίου πελάγους και επαρκούν για την χάραξη των ισοταχυτήτων ανέμου στην περιοχή αυτή.

Στο εσωτερικό της χώρας όμως δεν υπάρχει επαρκές δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών για την ακριβή χάραξη των ισοταχυτήτων ανέμου. Έτσι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται βασίστηκαν σε ανεπαρκή αριθμό μετεωρολογικών σταθμών.

Πρέπει να τονισθεί ότι σχεδόν όλες οι θέσεις μετεωρολογικών σταθμών είναι ακατάλληλες για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού επειδή διαφορετικοί είναι οι σκοποί που οι σταθμοί αυτοί εξυπηρετούν (πχ συνήθως θέσεις αεροδρομίων που είναι κατά κανόνα υπήνεμες θέσεις). Γι' αυτό για τη σωστή εκτίμηση του αιολικού δυναμικού απαιτείται η ακριβής γνώση της μορφολογίας του εδάφους, της παραμέτρου τραχύτητας και κατά συνέπεια του εκθέτη  $\alpha$  αναγωγής ταχυτήτων με το ύψος από το έδαφος.

Για ανεμογεννήτριες διαμέτρου δρομέα 50 m το τυπικό ύψος από το έδαφος εγκατάστασης τους είναι 50 m. Στο ύψος αυτό η ταχύτητα είναι κατά 31% μεγαλύτερη της ταχύτητας στο ύψος μετρήσεως 10 m. Ο εκθέτης  $\alpha$  λήφθηκε ίσος με 0,17 τυπική τιμή για την τοπογραφία του ελλαδικού χώρου. Ο πίνακας «τάδε» συνοψίζει τα αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν στη χάραξη των ισοταχυτήτων που φαίνονται στο σχήμα «τάδε». Ο πίνακας «τάδε» δείχνει επίσης την παντελή έλλειψη ανεμολογικών στοιχείων για το εσωτερικό του ελλαδικού χώρου.

Στο σχήμα «τάδε» παρουσιάζεται το αιολικό δυναμικό της χώρας καθώς και το αιολικό δυναμικό των άλλων μελών κρατών των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων.

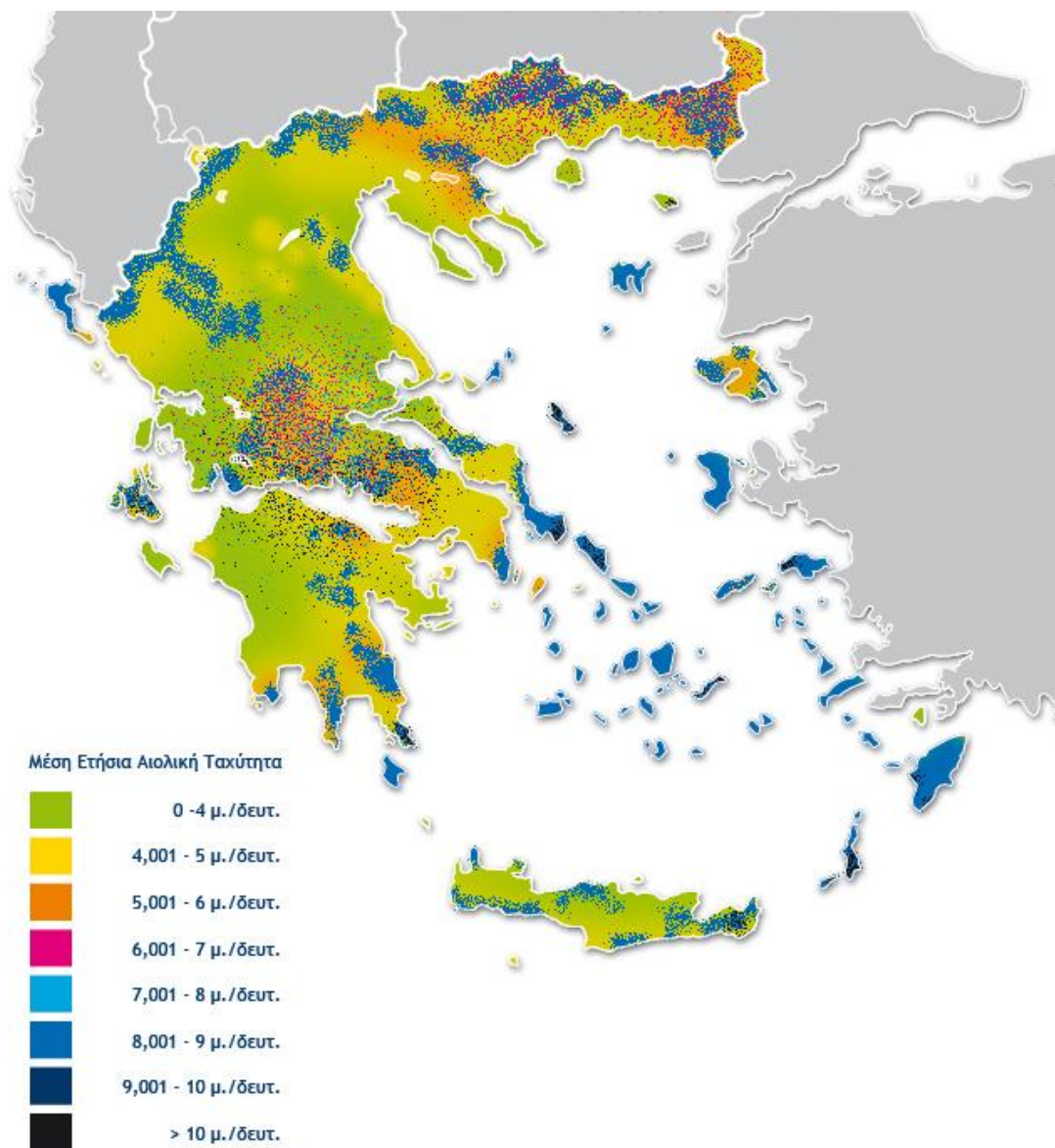
Από την απλή εξέταση των ισοταχυτήτων του σχήματος «τάδε» και από το σχήμα «τάδε» συνάγεται το ασφαλές συμπέρασμα της ύπαρξης υψηλού αιολικού δυναμικού στο νησιωτικό χώρο. Για την περιοχή αυτή η πυκνότητα πιθανότητας διανομής ταχύτητας εκφράζεται ικανοποιητικά με την καμπύλη διανομής Weibull και ότι η παράμετρος  $k$  είναι περίπου σταθερή ίση με  $k=2$ . Παραμετρική μελέτη αναφορικά με την επίδραση του  $k$  στο ετήσιο δεσμευόμενο αιολικό δυναμικό από ανεμοκινητήρα δείχνει ότι η παράμετρος αυτή έχει μικρή επίδραση και ότι τα ετήσια δεσμευόμενα αιολικά  $K_{wh}$  στο ύψος 10 m δίνονται από την έκφραση

$$E = 10,5\bar{V}^3 \quad KWh/\epsilon\tau\eta\sigma\acute{\iota}\omega\varsigma/m^2$$

όπου  $\bar{V}$  η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου σε m/s.

Με τις ισοταχείς καμπύλες του σχήματος «τάδε» και με τη βοήθεια της παραπάνω σχέσης μπορεί να εκτιμηθεί το αιολικό δυναμικό που μπορεί να δεσμευτεί από ανεμογεννήτριες σε μια περιοχή.

Πρέπει όμως να τονιστεί ότι οι καμπύλες ισοταχυτήτων είναι απλώς



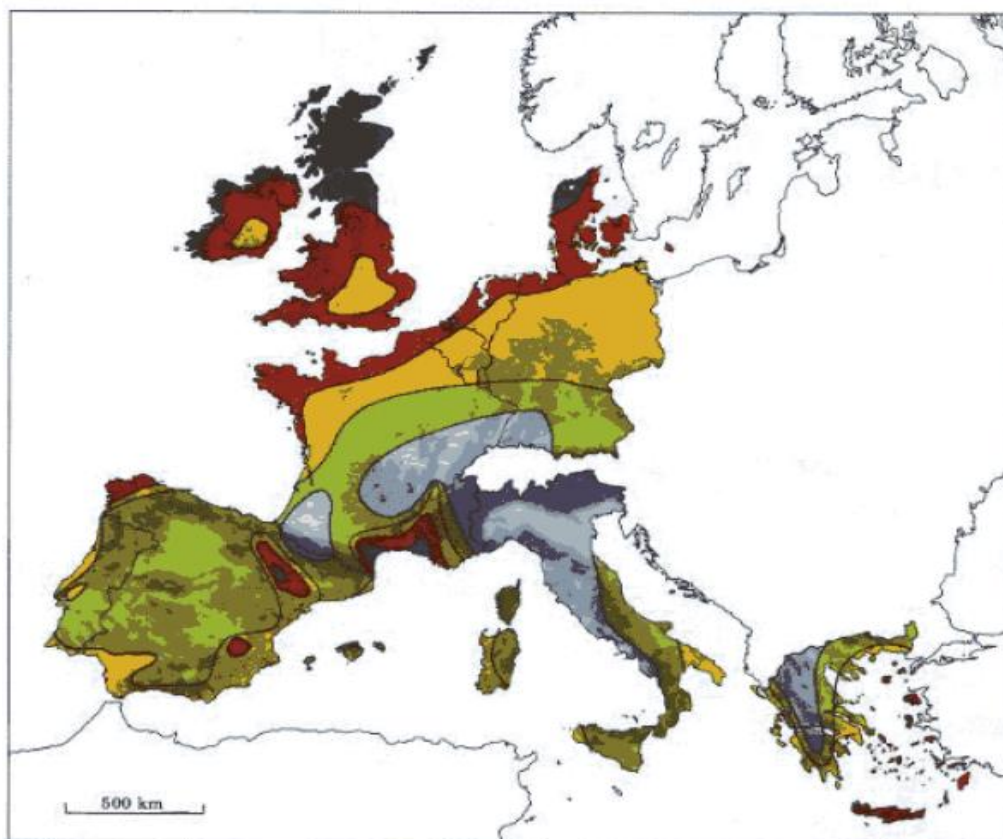
Σχήμα 9.40 Χάρτης αιολικού δυναμικού της Ελλάδας.

ενδεικτικές του αιολικού δυναμικού της χώρας και πρέπει να χρησιμοποιούνται ως πρώτη ένδειξη ότι σε μια περιοχή υπάρχει ή δεν υπάρχει ικανοποιητικό αιολικό δυναμικό γιατί η ακριβής τιμή του αιολικού δυναμικού σε κάθε θέση είναι ισχυρή συνάρτηση της τοπογραφίας της περιοχής

### 9.19.3 Εκτίμηση του αριθμού των ανεμογεννητριών

Η εκτίμηση του αριθμού των θέσεων εγκατάστασης ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους βασίστηκε στις ακόλουθες παραδοχές:

#### Μέση απόσταση ανεμογεννητριών 5 km



Wind resources <sup>1</sup> at 50 metres above ground level for five different topographic conditions									
Sheltered terrain <sup>2</sup>		Open plain <sup>3</sup>		At a sea coast <sup>4</sup>		Open sea <sup>5</sup>		Hills and ridges <sup>6</sup>	
ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>
> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

Μια θέση θεωρείται κατάλληλη για εγκατάσταση ανεμογεννητριών αν:

- (1) Η περιοχή έχει μέση ετήσια ταχύτητα (στα 10 m από το έδαφος), μεγαλύτερη των 4 m/s.
- (2) Η θέση βρίσκεται σε υψόμετρο μικρότερο των 1000 m και μεγαλύτερο των - 10 m.
- (3) Η θέση απέχει απόσταση μεγαλύτερη των 500 m από τα όρια μεγάλης πόλης.
- (4) Δεν υπάρχουν ιδιαίτεροι λόγοι μη εγκατάστασης, ως αρχαιολογικοί χώροι, ασταθή εδάφη, κεραιές αναμεταδόσεως, στρατιωτικές εγκαταστάσεις.

Επίσης μεταξύ ισοταχυτήτων μετρήθηκε και ο αριθμός των χωριών με κατοίκους της τάξεως των 1000 ώστε να εκτιμηθεί και ο αριθμός του μικρού μεγέθους ανεμογεννητριών που μπορούν να εγκατασταθούν.

Δεχόμενοι ότι οι μεγάλες ανεμογεννήτριες έχουν διάμετρο 50 m με τυπική ισχύ 750 KW και με ύψος πύργου 50 m μπορούμε να εκτιμήσουμε σε πρώτη

Περιοχή ή νησί	Α/Γ μεγάλου μεγέθους	Α/Γ μικρού μεγέθους	Εγκατεστημένη ισχύς (MW)		Ενέργεια ετησίως (MWH)	
			Αιολική (KW)	Ηλεκτρική (KW)	Αιολική (ΑΓ)	Ηλεκτρική
Πελοπόννησος πλην βορείου τμήματος	479	98	369000	–	1213	–
Βόρειος Πελοπόννησος	311	54	238650	–	613	–
Στερεά Ελλάδα	66	22	51700	–	872	–
Εύβοια	47	25	35250	–	1213	–
Θεσσαλία	264	42	202200	–	613	–
Ήπειρος	19	4	14650	–	875	–
Χαλκιδική – Θεσσαλονίκη - Πιερία	106	14	80900	–	1197	–
Κρήτη	240	86	18800	–	1213	–
Κάσος	4	2	3200	400	2666	528
Κάρπαθος	15	5	11750	3144	2666	3313
Κύθηρα	14	5	11000	–	1892	2076
Φολέγανδρος	2	1	1600	185,6	1894	140
Μήλος	9	3	1050	3400	2428	4402
Σίφνος	4	2	3200	1328	2666	1510
Αμοργός	7	3	1350	707	3330	1394
Ίος	7	–	5250	1192	3330	1394
Ανάφη	1	1	850	139,2	3330	92
Θήρα	6	3	4800	3200	2792	5227
Σίκινος	2	1	1600	196	2666	147
Κάλυμνος	4	2	3200	18224	3330	23202
Αστυπάλαια	5	1	3850	400	3330	568
Ρόδος	46	16	36100	11168	1614	7770
Κως	10	5	7900	–	2311	6395
Καστελόριζο	1	–	750	86,4	1213	–
Ζάκυνθος	20	5	15500	1000	2787	–
Σπέτσες	1	–	750	–	143	–
Πόρος	3	–	2250	–	143	–
Αίγινα	4	–	3000	–	143	–

Σχήμα 9.41 Πλήθος Α/Κ και ενεργειακή απόδοση.

προσέγγιση την εγκατεστημένη αιολική ισχύ, την ετήσια δεσμευόμενη αιολική ενέργεια κατά τόπους και συνολικά στον ελλαδικό χώρο. Στον πίνακα «τάδε» παρουσιάζεται επίσης για σύγκριση και εξαγωγή συμπερασμάτων η εγκατεστημένη ισχύς του αυτόνομου ντιζελοηλεκτρικού σταθμού σε κάθε νησί ως και η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Με εξέταση του πίνακα συμπεραίνεται ότι στον ελλαδικό χώρο μπορούν να εγκατασταθούν τουλάχιστον 2160 μονάδες ανεμογεννητριών μεγάλου μεγέθους και

479 μονάδες μικρού μεγέθους εκ των οποίων 1300 μονάδες στην ηπειρωτική Ελλάδα. Έτσι η συνολικά εγκατεστημένη αιολική ισχύς στον ηπειρωτικό χώρο είναι της τάξεως των 970 MW, τάξη μεγέθους που αποτελεί περίπου το 20% της σημερινής εγκατεστημένης ισχύος της ΔΕΗ.

Διαπιστώνεται επίσης από τον πίνακα «τάδε» ότι στα νησιά οι ανεμογεννήτριες μπορεί να αποδώσουν περισσότερη ενέργεια από τις ετήσιες ανάγκες ηλεκτρικής κατανάλωσης του νησιού. Φυσικά το μέγεθος της παρεχόμενης στο ηλεκτρικό δίκτυο του νησιού αιολικής ενέργειας θα εξαρτηθεί από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου του νησιού και του σταθμού παραγωγής και αυτό το θέμα αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερης μελέτης. Πάντως από τον πίνακα συμπεραίνεται ότι οι ενεργειακές ανάγκες των νησιών μπορούν τουλάχιστον κατά 25% να ικανοποιηθούν από μετατροπή αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω ανεμογεννητριών.

Στον ηπειρωτικό ελλαδικό χώρο όπου το εθνικό δίκτυο είναι διασυνδεδεμένο θα μπορούσε να γίνει δεκτό ότι ολόκληρη η δεσμευόμενη αιολική ενέργεια μπορεί να απορροφηθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο (αυτό βέβαια εξαρτάται και πάλι από την ελάχιστη απαίτησης ισχύος του δικτύου).

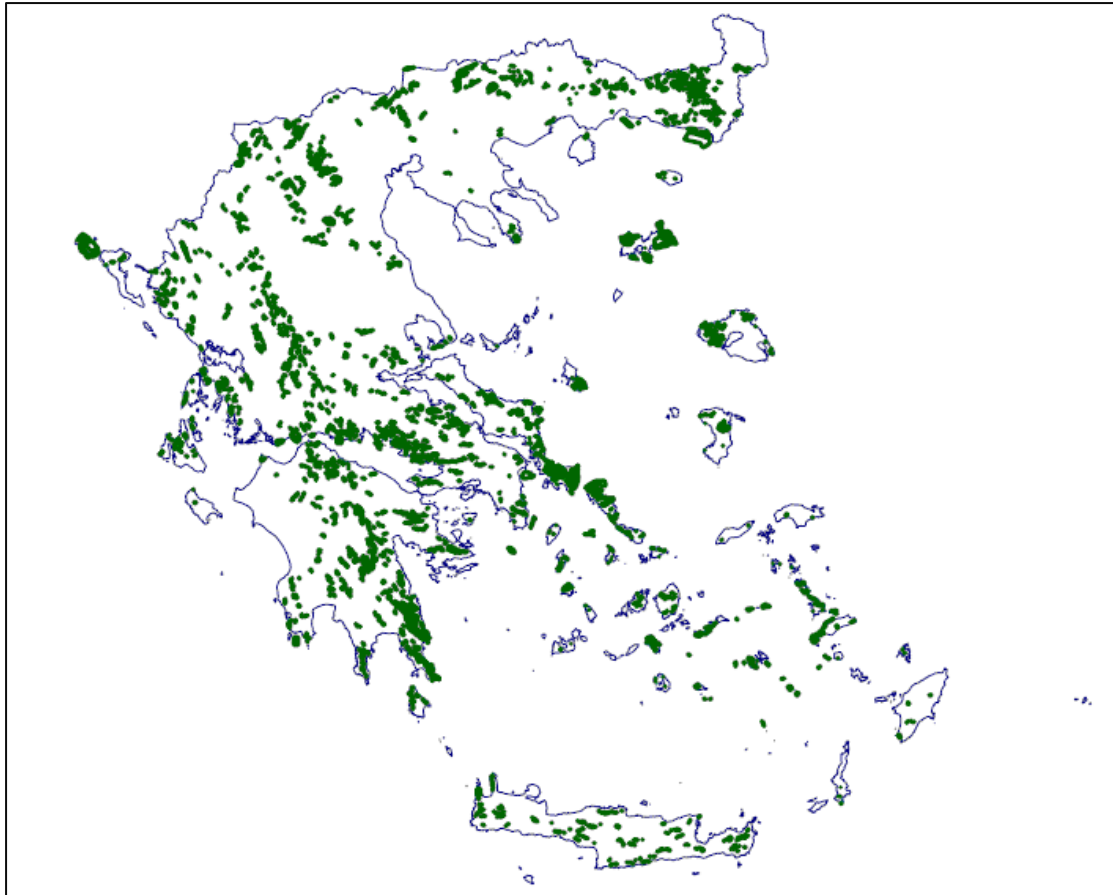
Στην περίπτωση αυτή η παρεχόμενη στο ηλεκτρικό δίκτυο αιολική ενέργεια ανέρχεται σε 1200 GWh το χρόνο που αποτελεί το 5% της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.

Θέση	Αριθμός μονάδων	(GWH)
Πελοπόννησο	200	190
Στερεά Ελλάδα	56	49
Θεσσαλία	104	64
Χαλκιδική	26	31
Κέρκυρα	14	12
Εύβοια	47	57
Σύνολο	447	403

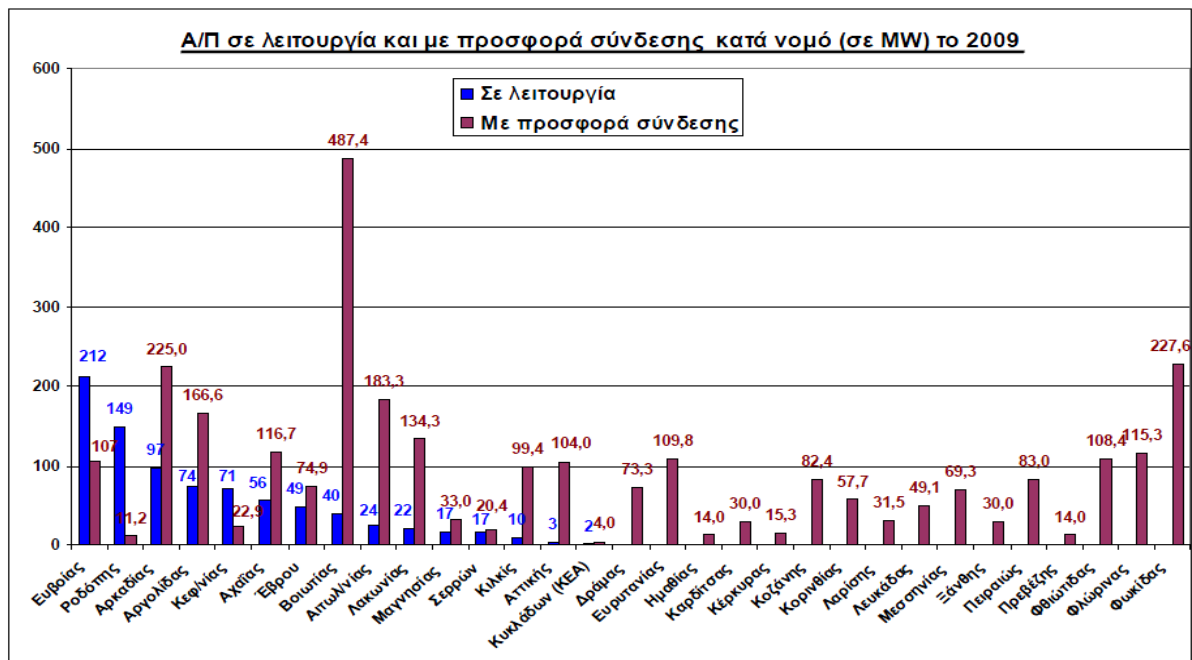
Σχήμα 9.42 Θέσεις Α/Γ κοντά σε γραμμή της ΔΕΗ.

Για τον ηπειρωτικό χώρο υπολογίστηκαν επίσης οι θέσεις εκείνες των ανεμογεννητριών που βρίσκονται πλησίον γραμμών μεταφοράς της ΔΕΗ μέσης τάσεως και οι οποίες απέχουν λιγότερο από 5 km. Οι θέσεις αυτές προσφέρονται οικονομικότερα για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας αφού μπορούν χωρίς μεγάλες δαπάνες διασύνδεσης να παρέχουν την ενέργειά τους στο διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα «τάδε».

Από τον πίνακα συμπεραίνεται ότι για την τυπική ανεμογεννήτρια διαμέτρου 50 m ισχύος 750 kW, η συνολική αιολική ισχύς ανέρχεται σε 447 MW δηλαδή ισχύς της τάξεως μεγέθους ενός μεγάλου θερμοηλεκτρικού σταθμού της χώρας με ετήσια παρεχόμενη στο ηλεκτρικό δίκτυο αιολική ενέργεια ίση με 403 GWH.



Σχήμα 9.43 Γεωγραφική αποτύπωση αιτήσεων για Α/Π.



Υποψήφιοι Επενδυτές	Ισχύς σε MW	Θαλάσσια περιοχή
Κοινοπραξία Αιολική Πλατεία Μαρθακίου - EN.ΤΕ.ΚΑ. Αιολικά Πάρκα ΑΕ-ENORA Ε.Ε. - Κ. Φιλιππίδης	55(30+25) MW	Πλατειά Κέρκυρας
Πλειάδες Αιολική Α.Ε.	450 MW	Κόλπος Πεταλιών Αττικής
ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή Α.Ε. - Αιολική Προβατά - Τραιανουπόλεως Ο.Ε.	585 MW	Θρακικό Πέλαγος νότια της Αλεξανδρούπολης
Θρακική Αιολική Α.Ε.	216 MW	Θρακικό, νότια της Αλεξανδρούπολης
Κοινοπραξία Αιολική Καλυδώνος	141 MW	Όρμος Καλυδώνος Αιτωλοακαρνανίας
Κύων ΕΠΕ	300 MW	Κύμη Εύβοιας
Ελληνική Τεχνοδομική Ανεμος Α.Ε.	162 MW	Κέρκυρα
Διαπόντια Αιολική - Μ.Ε. Τζαβάρας και Σία	125 MW	Διαποντίων Νήσων Κέρκυρας
Venergia Ενεργειακή Α.Ε.	96 MW	Διαποντίων Νήσων Κέρκυρας
Νησιωτικός Ανεμος Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας ΑΕ	350 MW	Κως
Argos Aiolos ΑΕ	150 MW	Θαλάσσια περιοχή της Εύβοιας
ΤΖΑΣΠΕΡ Αιολική Ελλάδος Α.Ε. και Σία,	495 MW	θαλάσσια περιοχή Διαποντίων Νήσων Κέρκυρας
City Electric Α.Ε.	500 MW	Βορειοανατολικά της Λήμνου
ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή ΑΒΕΤΕ	320 MW	Βορειοανατολικά της Λήμνου
ΤΖΑΣΠΕΡ Αιολική Ελλάδος Α.Ε. και Σία	445 MW	Βορειοανατολικά του Αγίου Ευστρατίου Λέσβου
ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή	98 MW	Βορειοανατολικά του Αγίου Ευστρατίου Λέσβου
Ρόκας Αιολική Βόρειος Ελλάς ΑΒΕΕ	484 MW	Βορειοανατολικά της Λήμνου
Μινωικά Θαλάσσια Αιολικά Πάρκα Α.Ε.	350 MW	Θαλάσσια περιοχή Κάσου Καρπάθου
ΤΖΑΣΠΕΡ Αιολική Ελλάδος Α.Ε. και Σία	306 MW	Βορειοανατολικά της Ανδρου

**Σχήμα 9.44** Υπάρχουσες επενδυτικές προτάσεις για υπεράκτια αιολικά πάρκα.



# Κεφάλαιο 10

---

*Τύποι και Υποσυστήματα  
Ανεμοκινητήρων*

---

## ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

### 10.1 Κατάταξη αιολικών μηχανών

Ο ανεμοκινητήρας από την εποχή της εμφάνισής του μέχρι σήμερα έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο του (οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα) όσο και ως προς τα υποσυστήματα του (πτερύγια, κιβώτιο ταχυτήτων, πύργος, αυτοματισμοί γεννήτρια κλπ). Εξελίξεις έχουν επίσης σημειωθεί και στον τρόπο δέσμευσης, αξιοποίησης, αποθήκευσης ή μεταφοράς της ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται από τον ανεμοκινητήρα σε άλλη «αναβαθμισμένη» μορφή ενέργειας.

Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμοκινητήρων ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Ως εκ τούτου, οι πλέον διαδεδομένοι τύποι ανεμοκινητήρων είναι οι ανεμογεννήτριες «οριζόντιου» και οι ανεμογεννήτριες «κατακόρυφου» άξονα.

Οι ανεμοκινητήρες οριζόντιου άξονα έχουν συνήθως τον άξονά τους παράλληλο προς την κατεύθυνση του ανέμου (head on), ενώ σε μερικές περιπτώσεις έχουμε ανεμογεννήτριες των οποίων ο άξονας είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης και κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου (cross – wind).

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα της αυτόματης προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου, δεδομένου ότι ο άξονάς τους είναι κάθετος σε αυτή, καθώς και στην επιφάνεια της γης. Επίσης, έχουν επινοηθεί και άλλοι τύποι ανεμοκινητήρων, όπως για παράδειγμα οι ανεμοκινητήρες τύπου μεταφοράς, αποτελούμενες από οχήματα που κινούνται σε μια καθορισμένη διαδρομή και είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρογεννήτριες.

Οι υφιστάμενες αιολικές μηχανές κατατάσσονται επίσης σε ταχύστροφες και σε αργόστροφες, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφή τους ή ακριβέστερα, ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου περιστροφής  $\lambda$ . Η ταχύτητα περιστροφής μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται εκτός από τις αεροδυναμικές παραμέτρους και από το μέγεθος των πτερυγίων της μηχανής, δεδομένου ότι πρέπει να ληφθούν υπόψιν λόγοι στατικής αντοχής, φαινόμενα δυναμικών καταπονήσεων και ταλαντώσεων, φυγόκεντρες δυνάμεις κτλ. Επιπλέον, καθοριστικό ρόλο παίζει και η διασύνδεση ή μη της εγκατάστασης με το ηλεκτρικό δίκτυο, δεδομένου ότι σε περιπτώσεις σύγχρονων ηλεκτρογεννητριών διασυνδεδεμένων με το δίκτυο, το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα πρέπει να έχει τη συχνότητα του κεντρικού δικτύου, δηλαδή 50 Hz για τη χώρα μας και τις υπόλοιπες χώρες τις Ε.Ε. και 60 Hz για τις ΗΠΑ.

Ένα μέγεθος που συνδέεται άμεσα με τη γωνιακή ταχύτητα μιας πτερωτής είναι η παράμετρος περιστροφής (tip – speed ratio) της μηχανής  $\lambda$ , η οποία εκφράζεται σαν:

$$\lambda = \frac{\omega_0 \cdot R}{V_W}$$

όπου R είναι η ακτίνα της πτερωτής  $\omega_0$  η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και  $V_W$  η ταχύτητα του ανέμου στον άξονα της μηχανής.

Ανάλογα με τη μηχανική ισχύ  $N_0$  που παρέχουν οι ανεμοκινητήρες στην έξοδό τους, κατατάσσονται από πλευράς μεγέθους σαν:

α. Μικροί, όταν για την ονομαστική ισχύ τους ισχύει ότι:

$$50W \leq N_0 \leq 30 KW$$

β. Μεσαίοι, όταν για την ονομαστική τους ισχύ έχουμε ότι:

$$30KW \leq N_0 \leq 300KW$$

γ. Μεγάλοι, όταν για την ονομαστική τους ισχύ έχουμε ότι:

$$300KW \leq N_0 \leq 5MW$$

Ο χαρακτηρισμός μιας ανεμογεννήτριας σε μικρή ή μεγάλη δεν ακολουθεί αυστηρά τις τιμές των εξισώσεων, δεδομένου ότι οι εν λόγω τιμές είναι ενδεικτικές, ενώ αλλάζουν από χρονική περίοδο, καθώς και από συγγραφέα σε συγγραφέα.

Τέλος, οι υφιστάμενες μηχανές κατατάσσονται και βάσει του αριθμού των πτερυγίων που διαθέτει η πτερωτή τους. Ως εκ τούτου, οι ανεμογεννήτριες διαχωρίζονται σε πολύπτερυγες, όπως οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι χαμηλών ταχυτήτων περιστροφής, και οι ολιγοπτερυγοί που αποτελούν την πλειοψηφία των σύγχρονων ανεμογεννητριών οριζόντιου και καθέτου άξονα, με αριθμό πτερυγίων που κυμαίνεται από ένα έως τρία πτερύγια για κάθε πτερωτή.

Μια παράμετρος που χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό και ταξινόμηση των ανεμοκινητήρων είναι η παράμετρος **στιβαρότητας**  $\sigma$  (solidity) της κατασκευής, η οποία για μηχανές οριζόντιου άξονα ορίζεται σαν:

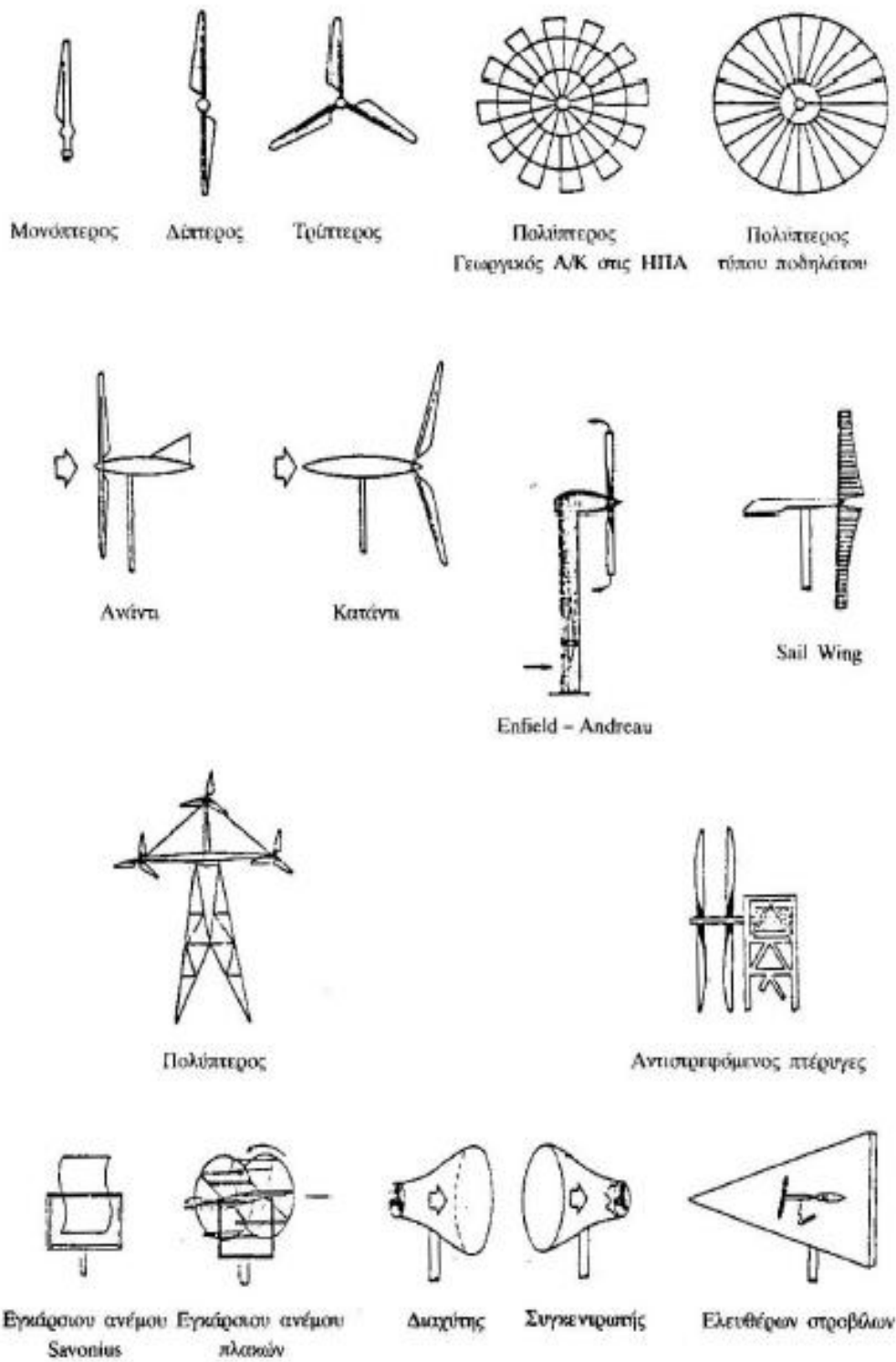
$$\sigma = \frac{z \cdot c \cdot R}{\pi \cdot R^2}$$

ενώ για μηχανές κατακόρυφου άξονα ορίζεται σαν:

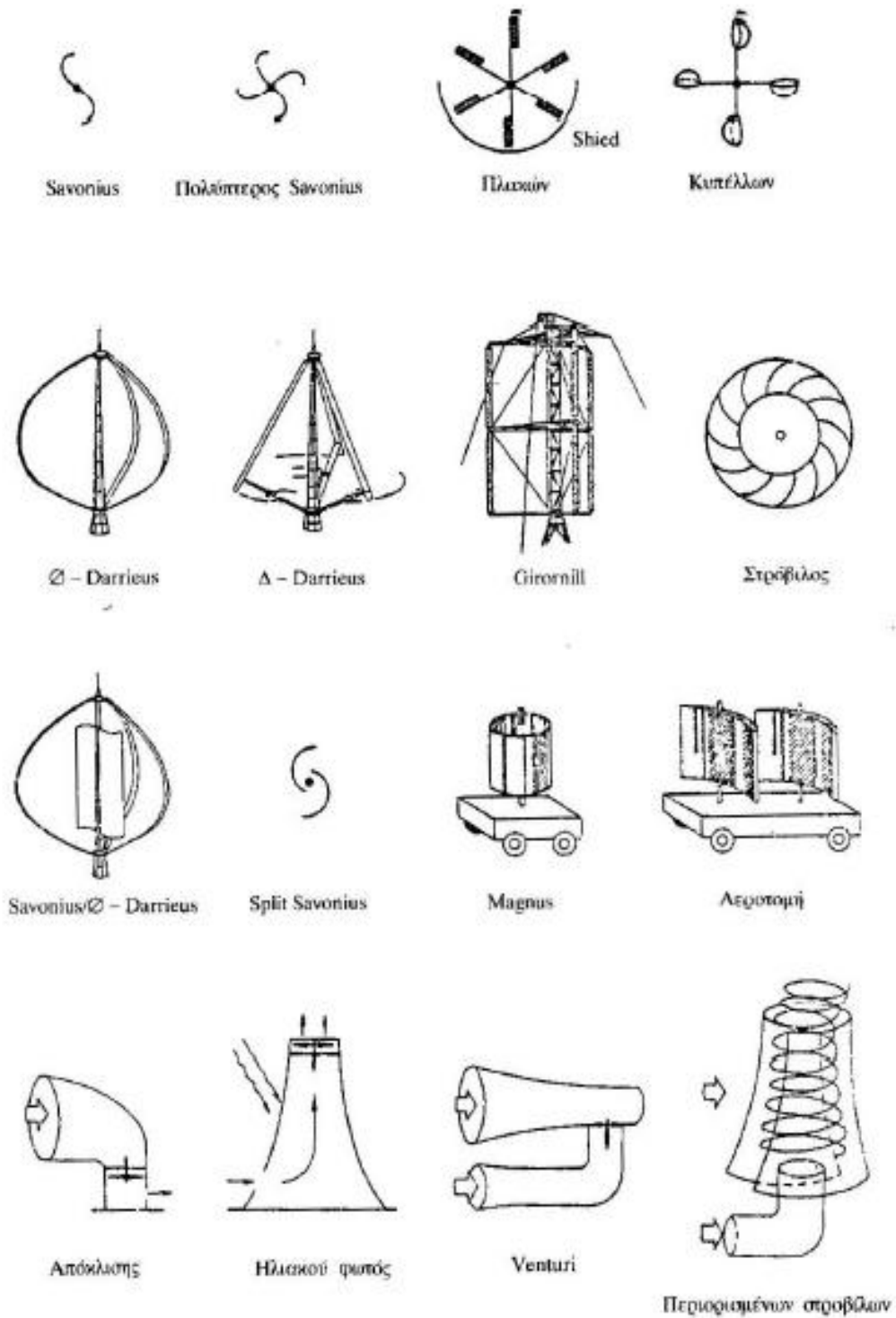
$$\sigma = \frac{z \cdot c}{R}$$

Όπου z αριθμός των πτερυγίων της πτερωτής, R η ακτίνα της πτερωτής και c η χορδή (πλάτος) των πτερυγίων της πτερωτής. Η παράμετρος στιβαρότητας δίνει το λόγο του εμβαδού όλως των πτερυγίων προς το εμβαδόν της επιφάνειας που διαγράφουν τα πτερύγια κατά την περιστροφή τους.

Κατά κανόνα οι ανεμογεννήτριες, αποδίδοντας τη μέγιστη ισχύ τους σε χαμηλές τιμές της παραμέτρου περιστροφής  $\lambda$ , έχουν σχετικά μικρό βαθμό απόδοσης, ενώ είναι ανθεκτικές με ελάχιστες ανάγκες συντήρησης. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλες δυνάμεις στα πτερύγια και συνεπώς μεγάλη ροπή στον άξονα



Σχήμα 10.1 Τύποι ανεμοκινητήρων οριζόντιου άξονα.



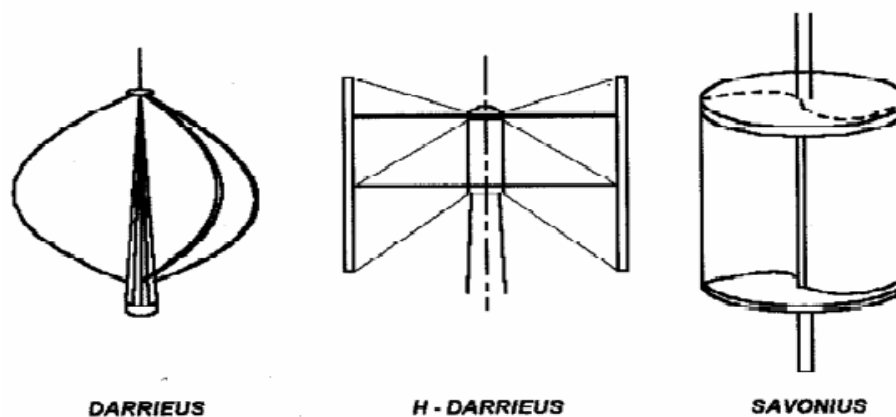
Σχήμα 10.2 Τύποι ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα.

περιστροφής, ξεκινούν μόνες τους, όταν αρχίζει να φυσάει ο άνεμος, είναι κατάλληλες για αγροτικές χρήσεις (πχ άντληση νερού) και στηρίζονται σε σχετικά απλή τεχνολογία.

Αντίθετα, οι ανεμογεννήτριες μικρής στιβαρότητας είναι μηχανές πολύστροφες, αποδίδοντας τη μέγιστη ισχύ τους σε μεγάλες τιμές της παραμέτρου  $\lambda$ , διαθέτουν σχετικά μεγάλο βαθμό απόδοσης, είναι πλέον ευπαθείς από τις μηχανές μεγάλης στιβαρότητας και χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρές δυνάμεις στα πτερύγια και περιορισμένη ροπή στον άξονά τους. Επίσης, οι μηχανές αυτές απαιτούν κάποτε σε ορισμένες περιπτώσεις εξωτερική βοήθεια για να ξεκινήσουν, είναι κατάλληλες για ηλεκτροπαραγωγή και θεωρούνται προϊόντα αρκετά υψηλής τεχνολογίας, ιδιαίτερα οι μεγαλύτερες από αυτές.

## 10.2 Μηχανές κατακόρυφου άξονα

Οι μηχανές κατακόρυφου άξονα εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα αυτόματης προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου, ως εκ τούτου αποτελούν και πιο απλές κατασκευές. Οι πλέον γνωστοί τύποι ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα είναι οι μηχανές τύπου Darrieus και οι μηχανές τύπου Savonius. Να σημειωθεί ότι οι μηχανές τύπου Darrieus αποτελούν έναν από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ανεμοκινητήρων στη διεθνή αγορά.



Σχήμα 10.3 Μηχανές κατακόρυφου άξονα.

Συνοπτικά, οι ανεμοκινητήρες κατακόρυφου άξονα περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα κάθετο τόσο στη διεύθυνση του ανέμου όσο και στο έδαφος. Οι αιολικές μηχανές του τύπου αυτού έχουν καλή αεροδυναμική απόδοση, ανεξαρτησία ως προς τη διεύθυνση του ανέμου, χαμηλό κόστος κατασκευής και σχετικά απλά συστήματα ελέγχου. Υπάρχει αρκετή ποικιλία δρομέων κατακόρυφου άξονα, όμως ο δρομέας τύπου Darrieus είναι ο περισσότερο εξελιγμένος και ως εκ τούτου και ο περισσότερο

διαδεδομένος. Με τη χρήση μηχανών του τύπου αυτού δίνεται η δυνατότητα να κατασκευασθούν μηχανές με ονομαστική ισχύ της τάξεως του ενός MW. Ένα άλλο πλεονέκτημα των μηχανών κατακόρυφου άξονα είναι ότι οι μηχανισμοί και η γεννήτρια βρίσκονται κατά κανόνα στο έδαφος, με αποτέλεσμα να απαιτείται ελαφρότερος πυλώνας και να διευκολύνεται η λειτουργία και η συντήρηση του όλου συστήματος.

Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης δε παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφορές σε σύγκριση με το αντίστοιχο σύστημα των μηχανών οριζόντιου άξονα, εκτός βέβαια από το γεγονός ότι τα εξαρτήματα είναι τοποθετημένα κατακόρυφως. Ο δρομέας στηρίζεται σε κατάλληλο έδρανο στη βάση του, το οποίο ακόμα και σε σταθερή ταχύτητα ανέμου καταπονείται από εναλλασσόμενα φορτία. Επίσης, η μηχανή διατηρείται σε κατακόρυφη θέση με τη βοήθεια καλωδίων, τα οποία συνδέουν την κορυφή του άξονα της μηχανής με το έδαφος.

Τέλος, οι ανεμοκινητήρες τύπου Darrieus έχουν ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες εκκίνησης και για μεγάλα συστήματα χρησιμοποιείται βοηθητικός κινητήρας για την εκκίνηση. Επιπλέον, οι μηχανές του τύπου αυτού παρέχουν τελικά χαμηλότερο μέσο ετήσιο συντελεστή ισχύος. Συνοπτικά, είναι αποδεκτό ότι οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα τύπου Darrieus θεωρούνται συγκρίσιμες σε οικονομικοτεχνική ελκυστικότητα με τις πλέον σύγχρονες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.

Αντίστοιχα, οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή ισχύος, μικρή ακραία περιφερειακή ταχύτητα, περιορισμένο μέγεθος, αλλά και εξαιρετική απλότητα και οικονομικότητα κατασκευής. Η απλότητα κατασκευής σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν απαιτείται σύστημα προσανατολισμού ως προς τη διεύθυνση του ανέμου, αποτελούν σημαντικά κίνητρα για την μελέτη και βελτιστοποίηση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών παρόμοιων μηχανών, πχ λόγος ύψους προς διάμετρο, αριθμός και σχήμα πτερυγίων κλπ.

### **10.3 Βασικά μέρη αιολικών μηχανών κατακόρυφου άξονα**

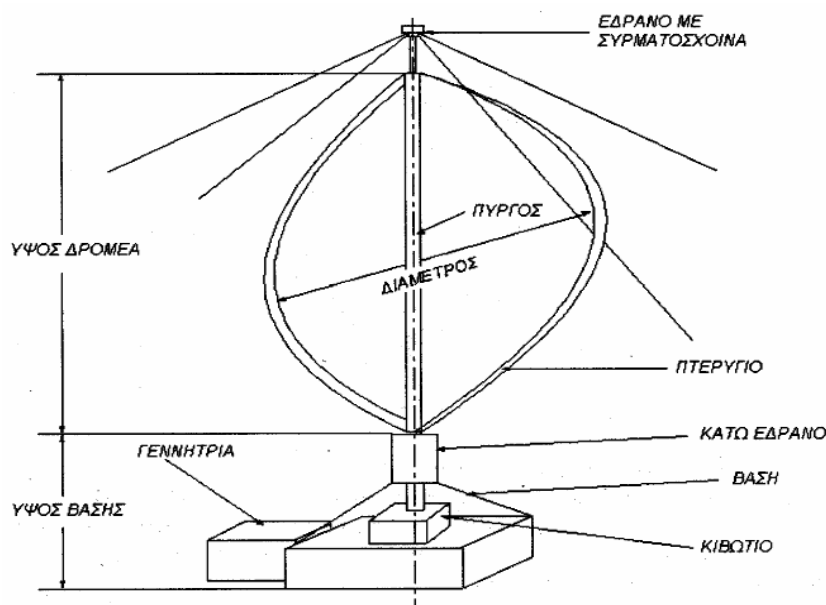
Στο σημείο αυτό θα επιχειρήσουμε να περιγράψουμε τους δύο κυριότερους αντιπροσώπους των ανεμοκινητήρων κατακόρυφου άξονα, οι οποίοι αποτελούν και τα πλέον διαδεδομένα μοντέλα αυτής της κατηγορίας, κατέχοντας περίπου το 16% με 82% της διεθνούς αιολικής αγοράς.

#### **10.3.1 Ανεμοκινητήρας τύπου Darrieus**

Ο ανεμοκινητήρας τύπου Darrieus πρωτοεμφανίστηκε το 1925 και εφευρέτης του ήταν ο Γάλλος G.J.M.Darrieus, ενώ είχε εκτεταμένη εφαρμογή στον Καναδά μέχρι τη δεκαετία του 1970. Η έρευνα πάνω στην εξέλιξη του αρχικού αυτού ανεμοκινητήρα επαναλήφθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1970, με πρωτοβουλία

του Εθνικού Συμβουλίου Ερευνών του Καναδά, ενώ ένα σημαντικό μέρος των ερευνών καλύπτεται από τα εργαστήρια Sandia των ΗΠΑ, στα πλαίσια του εθνικού προγράμματος αιολικής ενέργειας της χώρας αυτής. Σήμερα έχουν σχεδιασθεί διάφορες μορφές ης εν λόγω ανεμογεννήτριας, όπως η Φ – Darrieus, η Δ – Darrieus, η Υ – Darrieus και η ο – Darrieus.

Η ανεμογεννήτρια τύπου Darrieus χαρακτηρίζεται από καμπτόμενα πτερύγια και λειτουργεί με τη χρήση των δυνάμεων άνωσης που εξασκούνται πάνω από τα πτερύγια. Οι εν χρήσει ανεμοκινητήρες αποτελούνται από ένα, δύο, τρία ή και τέσσερα πτερύγια. Η μορφή των πτερυγίων δεν είναι σταθερή, δεδομένου ότι υπάρχουν και παραλλαγές του δρομέα με ευθύγραμμο κατακόρυφα πτερύγια. Λόγω όμως της περιστροφής οι φυγόκεντρες δυνάμεις δημιουργούν μεγάλες καμπτικές τάσεις στα πτερύγια. Αυτές οι καμπτικές τάσεις στα πτερύγια μειώνονται σημαντικά, εάν τα πτερύγια έχουν τη μορφή που αποκαλείται και σχοινοειδής. Αυτή είναι η μορφή που θα έπαιρνε κατά τη περιστροφή του ένα χαλαρό σχοινί ή ένα τελείως εύκαμπτο καλώδιο σταθερού μήκους με τα άκρα του προσαρμοσμένα, όπως και στην περίπτωση της υπό ανάλυση ανεμογεννήτριας, στον άξονα περιστροφής. Λόγω του σχήματος αυτού, τα πτερύγια καταπονούνται σε σταθερές εφελκυστικές μόνο δυνάμεις (εκμηδενίζονται σχεδόν οι καμπτικές τάσεις), με αποτέλεσμα τα πτερύγια του δρομέα Darrieus να έχουν λιγότερες κατασκευαστικές απαιτήσεις και το υλικό τους να υφίσταται μικρότερη κόπωση σε δυναμικές τάσεις.



Σχήμα 10.4 Ανεμοκινητήρας Darrieus, κατακόρυφου άξονα.

Τα άκρα των πτερυγίων του δρομέα είναι πακτωμένα στον άξονα περιστροφής, ενώ ο λόγος ύψους  $H$  προς διάμετρο  $D=2R$  του δρομέα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1 και 1,5. Η ακτίνα  $R$  του δρομέα καθορίζεται σαν η μέγιστη



απόσταση των πτερυγίων από τον άξονα μηχανής. Με δεδομένο το σχήμα των πτερυγίων επιδιώκεται ο δρομέας να σαρώσει ένα ρεύμα αέρα μέγιστης επιφάνειας, οπότε και επιδιώκεται να ισχύει  $H=D$ . Όμως, από την άλλη πλευρά, τεχνικοοικονομικοί λόγοι επιβάλλουν μεγαλύτερες τιμές του λόγου  $H/D$ .

Τα πτερύγια του δρομέα Darrieus δεν παρέχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας προσβολής και κατά συνέπεια βελτίωσης της αεροδυναμικής τους συμπεριφοράς, σε αντιδιαστολή με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα μεταβλητού βήματος. Οι μηχανές του τύπου αυτού έχουν κατά κανόνα δύο ή τρία πτερύγια σε διάταξη  $180^\circ$  ή  $120^\circ$ , αντίστοιχα. Για την επιλογή του πλήθους των πτερυγίων πρέπει να γνωρίζουμε ότι ο διπτέρυγος δρομέας παρουσιάζει έντονη κυκλική μεταβολή της αεροδυναμικής του ροπής, με έντονες αποκλίσεις από τη μέση τιμή (που φθάνουν μέχρι και το 100% από τη μέση τιμή) και οι οποίες μπορούν να περιορισθούν στο  $20 \div 25\%$  με κατάλληλη σχεδίαση του συστήματος κίνησης. Αντίθετα, η αεροδυναμική ροπή του τριπτέρυγου δρομέα είναι σχετικά σταθερή σε ολόκληρη σχεδόν την περιοχή λειτουργίας του. Επίσης, η αεροδυναμική απόδοση του τριπτέρυγου δρομέα είναι κατά κανόνα καλύτερη αυτής του διπτέρυγου, ο τελευταίος όμως είναι απλούστερος στην κατασκευή, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό στη μείωση του κόστους ίδρυσης και στη διευκόλυνση των εργασιών ανέγερσης στον τόπο εγκατάστασης.

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση του δρομέα μιας ανεμογεννήτριας τύπου Darrieus πρέπει να αναφέρουμε ότι τα πτερύγια που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως συμμετρικής διατομής, σταθερής χορδής και χωρίς συστροφή. Τα πτερύγια αυτά εργάζονται σε μεγάλες τιμές ( $4 \div 10$ ) της παραμέτρου περιστροφής  $\lambda$ , με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν υψηλή αεροδυναμική απόδοση. Ο πλέον χρησιμοποιούμενος τρόπος κατασκευής των πτερυγίων είναι η εξέλαση ειδικών κραμάτων αλουμινίου, ενώ η σχοινοειδής μορφή τους προσδίδεται στη συνέχεια με κάμψη των ευθύγραμμων τμημάτων.

Επειδή όπως προαναφέραμε ο δρομέας Darrieus δεν αναπτύσσει ικανοποιητική ροπή κατά την εκκίνηση, είναι απαραίτητη η ύπαρξη βοηθητικής πηγής ενέργειας για την εκκίνησή του. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται είτε η ηλεκτρική γεννήτρια σαν κινητήρας, είτε τοποθετούνται ένας ή δύο ομοαξονικοί δρομείς τύπου Savonius, οι οποίοι αναπτύσσουν υψηλή αεροδυναμική ροπή κατά την εκκίνηση. Μάλιστα στην τελευταία περίπτωση έχει αποδειχθεί ότι ο χρησιμοποιούμενος Savonius δεν επηρεάζει αρνητικά την αεροδυναμική απόδοση του Darrieus κατά την κανονική λειτουργία του συστήματος και το μόνο πρόβλημα που υπάρχει είναι το αυξημένο βάρος της κατασκευής.

Όπως και στην περίπτωση των μηχανών οριζόντιου άξονα, η πέδηση της πτερωτής του Darrieus σε περιπτώσεις υψηλών ταχυτήτων γίνεται και με αεροδυναμική πέδη, δηλαδή με τη φυγοκεντρική απελευθέρωση μιας επίπεδης πλάκας ή ενός τμήματος του δρομέα σε κάθετη θέση, αυξάνοντας σημαντικά της αεροδυναμική αντίσταση της πτερωτής και επιβραδύνοντάς την.

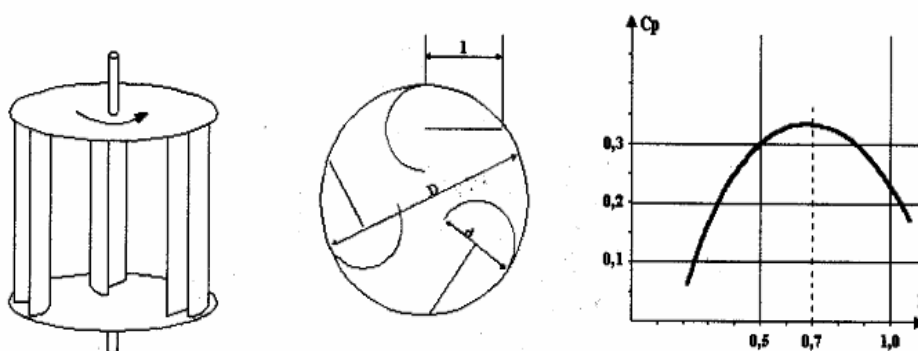
Το μηχανικό σύστημα κίνησης περιλαμβάνει τον άξονα του δρομέα και την έδρασή του, το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, ελαστικούς συνδέσμους για την απόσβεση των στρεπτικών ταλαντώσεων, το σύστημα πέδησης, την ηλεκτρική

γεννήτρια με τη βάση και το κέλυφος προστασίας των μηχανισμών αυτών. Οι επιμέρους περιγραφές των τμημάτων αυτών δε διαφέρουν ιδιαίτερα από τις αντίστοιχες περιγραφές, που ισχύουν για ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα και η λεπτομερής παράθεσή τους ξεφεύγει από τους σκοπούς του κεφαλαίου αυτού.

Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά στα έδρανα στήριξης των ανεμοκινητήρων κάθετου άξονα σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούνται σε μηχανές οριζόντιου άξονα. Πράγματι, και εδώ ο άξονας της μηχανής στηρίζεται σε δύο έδρανα. Το άνω έδρανο παραλαμβάνει κυρίως τις ακτινικές δυνάμεις που αναπτύσσονται πάνω στα πτερύγια, ενώ το κάτω έδρανο παραλαμβάνει μεγάλες ωστικές δυνάμεις συμπεριλαμβανομένου και του βάρους του δρομέα. Για τους λόγους αυτούς, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη σχεδιάσή τους, ενώ ορισμένοι κατασκευαστές χρησιμοποιούν ειδικά κατασκευασμένα ωστικά υδροδυναμικά έδρανα, τα οποία λειτουργούν με βάση τις αρχές της υδραυλικής σχέσης και παρουσιάζουν ελάχιστη αντίσταση τριβής, στη θέση των συνηθισμένων ένσφαιρων ωστικών εδράνων.

### 10.3.2 Ανεμοκινητήρας τύπου Savonius

Η πτερωτή της ανεμογεννήτριας αυτής ονομάζεται συχνά τύπου "S" λόγω του σχήματος της κάτωψης των πτερυγίων της. Η περιστροφή της πτερωτής από τον άνεμο δεν οφείλεται μόνο στη διαφορετική αντίσταση του κοίλου και του κυρτού πτερυγίου αλλά και στην ύπαρξη του διακένου "X" (ανάμεσα στα δύο πτερύγια), λόγω του οποίου ο αέρας επιστρέφει και αυξάνει την πίεση στο πίσω μέρος του κυρτού πτερυγίου, αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό τη ροπή που αναπτύσσεται γύρω από τον άξονα της μηχανής. Το πεδίο ταχυτήτων γύρω από την πτερωτή του "Savonius" είναι χρονικά μεταβαλλόμενο με περίοδο μεταβολής διπλάσια της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα, και συνεπώς εμφανίζει ιδιαίτερη δυσκολία κατά τη μελέτη του.



Σχήμα 10.5 Παραλλαγές – εφαρμογές κινητήρα Savonius.

Οι μηχανές "Savonius", όπως όλες οι μηχανές κατακόρυφου άξονα, παρουσιάζουν συμμετρία και αυτόματο προσαναεμισμό καταργώντας τις ακριβές διατάξεις προσανατολισμού, που έχουν οι μηχανές οριζόντιου άξονα. Επίσης ο

"Savonius" έχει όπως και ο "Darrieus" τα όργανα μετατροπής και μεταφοράς της μηχανικής ενέργειας στο έδαφος, παρουσιάζοντας ένα σημαντικό πλεονέκτημα κόστους σε σχέση με τις μηχανές οριζοντίου άξονα. Παράλληλα και ο πύργος στήριξης είναι απλούστερος και συνεπώς οικονομικότερος.

Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα του "Savonius", σε σύγκριση με τον "Darrieus", είναι ότι ο πρώτος παρουσιάζει μεγάλη ροπή εκκίνησης και λειτουργίας, χρησιμοποιούμενος για το λόγο αυτό και σαν εκκινητής του δεύτερου. Το πλεονέκτημα αυτό επιβεβαιώνεται γνωρίζοντας ότι το διάγραμμα της ροπής εκκίνησης του "Savonius" είναι θετικό σχεδόν για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης του ανέμου στην πτερωτή, πράγμα που εξασφαλίζει την αυτό-εκκίνηση της μηχανής.

Ένα δεύτερο πλεονέκτημα του "Savonius" είναι η απλότητα και συνεπώς η οικονομικότητα της κατασκευής του. Απλές μηχανές του τύπου αυτού κατασκευάζονται ακόμα και με διαίρεση σε δύο κομμάτια ενός βαρελιού και ενώνοντας τα κομμάτια σε σχήμα "S".

Στα μειονεκτήματα του "Savonius" περιλαμβάνεται ο χαμηλός βαθμός απόδοσής του, που δεν ξεπερνάει το 0.18, καθώς και η λειτουργία του σε μικρές τιμές της παραμέτρου περιστροφής, δηλαδή  $\lambda \approx 1.0$ . Τέλος ο "Savonius" έχει μεγάλο βάρος ανά μονάδα ονομαστικής ισχύος και η επιφάνεια των πτερυγίων του είναι έως και τριάντα φορές μεγαλύτερη από τους άλλους ανεμοκινητήρες με την ίδια ονομαστική ισχύ.

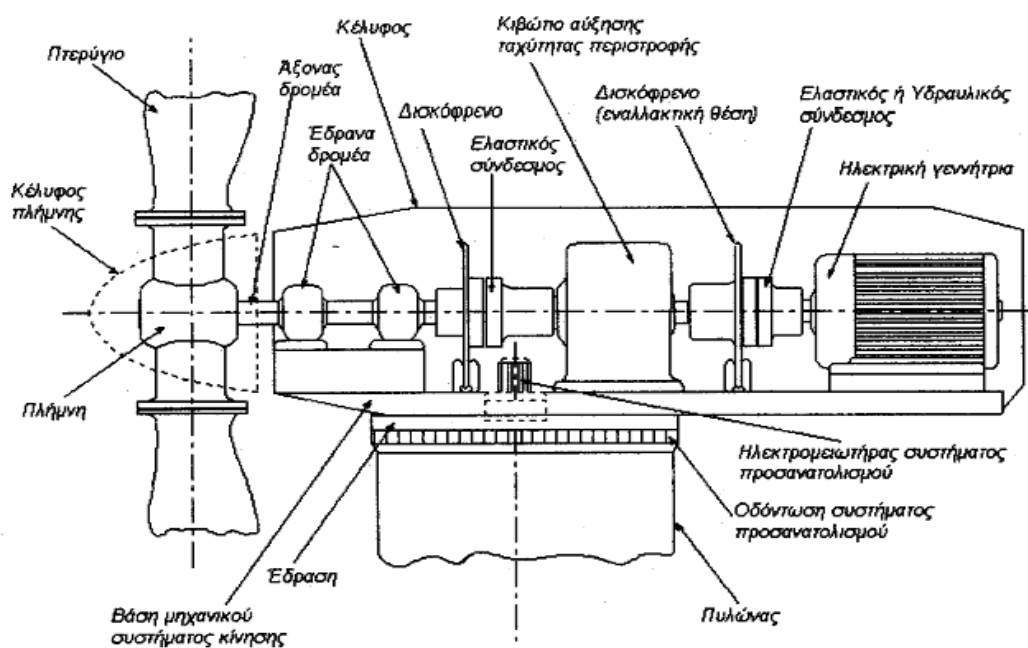
Συνοπτικά η ανεμογεννήτρια τύπου "Savonius", παρόλη τη χαμηλή της απόδοση, έχει σημαντικά πλεονεκτήματα με αποτέλεσμα να θεωρείται η ιδανική αιολική μηχανή για μικρές ισχύεις, για οικιακή χρήση αλλά και για παραγωγή ενέργειας σε φτωχές χώρες ή σε απομακρυσμένες περιοχές. Για το λόγο αυτό έχει δοθεί τελευταία αξιολογήσιμη ώθηση στη μελέτη και βελτιστοποίηση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των εν λόγω μηχανών, συμπεριλαμβανομένων του λόγου ύψους προς τη διάμετρο της πτερωτής, του αριθμού και του σχήματος των πτερυγίων, καθώς και της μορφής του διακένου μεταξύ των πτερυγίων της μηχανής.

## 10.4 Μηχανές οριζοντίου άξονα

Όπως προαναφέραμε οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα έχουν τον άξονά τους παράλληλο προς την επιφάνεια της γης και συνήθως παράλληλο και με τη διεύθυνση του ανέμου (head on), αν και κάποτε η διεύθυνσή τους είναι κάθετη προς τη διεύθυνση του ανέμου (cross-wind). Επιπλέον οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα μπορούν να έχουν ένα, δύο, τρία ή ακόμα και πενήντα πτερύγια, ενώ η πτερωτή τους μπορεί να τοποθετηθεί είτε σε προσήνεμη διάταξη (up-wind), δηλαδή μπροστά από τον πύργο στήριξης, είτε σε υπήνεμη διάταξη (down-wind), δηλαδή πίσω από τον πύργο στήριξης σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου.

Ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα συγκαταλέγονται οι

κλασικοί παραδοσιακοί ανεμόμυλοι (π.χ. τύπου Μυκόνου) καθώς και οι αργές μηχανές πολλών πτερυγίων "αμερικανικού τύπου", οι οποίες λόγω των περιορισμένων διαστάσεών τους και της χαμηλής περιφερειακής τους ταχύτητας έχουν εγκαταλειφθεί σήμερα, αν και εμφανίζουν σχετικά μεγάλες ροπές λειτουργίας. Στο παρελθόν κατασκευάστηκαν σε βιομηχανική κλίμακα αντίστοιχες μηχανές και βρήκαν ευρεία εφαρμογή για την άντληση νερού και άλλες γεωργικές χρήσεις.



Σχήμα 10.6 Τυπική μορφή ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.

Από την άλλη πλευρά στην κατηγορία των αιολικών μηχανών οριζόντιου άξονα περιλαμβάνονται και οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σήμερα (περίπου το 90% του συνόλου των εγκατεστημένων παγκοσμίως μηχανών), και οι οποίες ονομάζονται ανεμογεννήτριες τύπου "έλικας". Οι μηχανές αυτές εμφανίζουν σημαντικές περιφερειακές ταχύτητες, ενώ τα πτερύγιά τους, που είναι συνήθως ένα έως τρία, βασίζονται στην τεχνολογία των αεροπορικών ελίκων αλλά και σ' αυτή της έλικας των ελικοπτέρων. Ένα από τα βασικά τους χαρακτηριστικά είναι ο μεγάλος αεροδυναμικός βαθμός απόδοσής τους, αλλά και η βέλτιστη λειτουργία τους σε μεγάλες τιμές της παραμέτρου περιστροφής " $\lambda$ ", με αποτέλεσμα την αρκετά μεγάλη σχετική ταχύτητα προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο. Οι πρώτοι δρομείς που κατασκευάστηκαν είχαν πλατειά πτερύγια, ενώ σήμερα κατασκευάζονται μηχανές με αρκετά λεπτά πτερύγια.

Στις μηχανές τύπου "έλικας" γίνεται ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής της πτερωτής και για λόγους προστασίας της σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών ανέμων, είτε με τη χρήση ειδικών αεροδυναμικών βοηθημάτων (π.χ. "flaps") στην άκρη των πτερυγίων είτε με τη στροφή της πτερωτής υπό γωνία σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου. Η αιολική ισχύς από την πτερωτή μεταφέρεται είτε μέσω συστήματος

μετάδοσης κίνησης (οδοντωτοί τροχοί) στη βάση του πύργου στήριξης, είτε από τον άξονα της περύγωσης στην ηλεκτρική γεννήτρια, που βρίσκεται συνήθως και αυτή στον πύργο στήριξης. Οι μηχανές οριζόντιου άξονα συνεχίζουν να αναπτύσσονται και σήμερα, ενώ έχουν κατασκευασθεί ή κατασκευάζονται μονάδες με ισχύ, που κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες Watt έως και αρκετά MW.

Τέλος, έχουν επινοηθεί και προταθεί κατά καιρούς διάφορες μηχανές τύπου cross – wind, οι οποίες όμως δεν είναι περισσότερο αποτελεσματικές σε σύγκριση με τους άλλους τύπους. Αντίθετα, οι συγκεκριμένοι ανεμοκινητήρες παρουσιάζουν μειονεκτήματα, όσον αφορά τη συλλογή της παραγόμενης ενέργειας, καθώς και τη ρύθμιση της διεύθυνσης θέσης της περωτής σε περιπτώσεις έντονων μεταβολών της διεύθυνσης του ανέμου.

Ολοκληρώνοντας, πρέπει να κάνουμε μια αναφορά στα προβλήματα που αντιμετωπίζει η βιομηχανία κατασκευής ανεμοκινητήρων οριζόντιου άξονα και κυρίως οι μηχανές τύπου έλικας. Ανάμεσα στα προβλήματα που διερευνώνται σήμερα είναι:

i. Ο **βέλτιστος σχεδιασμός** του δρομέα, με σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας της μηχανής. Στόχος είναι να βρεθεί ένας βέλτιστος σχεδιασμός των παραμέτρων που συνθέτουν το δρομέα της ανεμογεννήτριας, δηλαδή του αριθμού περυγίων, της διανομής του πλάτους του περυγίου, της κατάλληλης αεροτομής που θα χρησιμοποιηθεί για τη σύνθεση του περυγίου, της συστροφής του περυγίου, της διανομής βήματος κλπ. Η υπάρχουσα εμπειρία στον τομέα των αιολικών μηχανών ενισχύεται με τα αποτελέσματα της σύγχρονης έρευνας, αν και θέμα βέλτιστου σχεδιασμού του δρομέα μιας μηχανής παραμένει και θα παραμείνει ανοιχτό για πολλά ακόμα χρόνια.

ii. Η **συμπεριφορά του δρομέα** σε ειδικές καταστάσεις, όπως η εκκίνηση, η επιτάχυνση, η επιβράδυνση, καθώς και άλλα δυναμικά φαινόμενα. Ένα κρίσιμο θέμα της κατηγορίας αυτής αποτελεί η ροπή εκκίνησης του δρομέα, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει και η συμπεριφορά της περωτής σε χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο ροής παρουσία τύρβης, αλλά και βάσει της διανομής της ταχύτητας τύπου οριακού στρώματος του ανέμου λόγω της επίδρασης του εδάφους.

iii. Η **ρύθμιση του βήματος** των περυγίων και οι αντίστοιχοι αυτοματισμοί, που σχετίζονται με την έναρξη και παύση λειτουργίας του ανεμοκινητήρα. Η ρύθμιση του βήματος γίνεται είτε σε ολόκληρο το περύγιο είτε σε μέρος του, με σκοπό αφενός το περιορισμό της ισχύος σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, αφετέρου τη διατήρηση σταθερών στροφών της μηχανής. Επίσης, μεταβολή του βήματος γίνεται με σκοπό την επίτευξη του μέγιστου βαθμού απόδοσης της περωτής για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και για τη μεγιστοποίηση της ροπής για διευκόλυνση της εκκίνησης της μηχανής. Επιπλέον, τα συστήματα αυτοματισμών πρέπει να επιτρέπουν την εκκίνηση της περωτής για ταχύτητα ανέμου ίση με την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και να διακόπτουν την λειτουργία της περωτής για πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου ή σε περιπτώσεις που η παραγόμενη αιολική ισχύς δε γίνεται αποδεκτή από το δίκτυο.

iv. **Προσανεμισμός του άξονα** του δρομέα προς την κατεύθυνση του ανέμου, ο οποίος επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση καθοδηγητικού πτερυγίου, είτε με κατάλληλα αισθητήρια που καταγράφουν τη στιγμιαία διεύθυνση του ανέμου και προσανατολίζουν ηλεκτρονικά με τη χρήση σερβομηχανισμού την πτερωτή στη διεύθυνση του ανέμου.

v. **Προβλήματα αντοχής** των υλικών που αφορούν την κατασκευή και την έδραση των πτερυγίων. Τα προβλήματα αυτά αποτελούν ίσως τα βασικότερα προβλήματα εμπόδια κατασκευής ανεμοκινητήρων υψηλής αξιοπιστίας, δεδομένου ότι ο άνεμος εξασκεί πάνω στα πτερύγια και στις αντίστοιχες εδράσεις τους σημαντικές δυνάμεις, ιδιαίτερα για μεγάλων διαστάσεων μηχανές. Ένας επιπλέον κίνδυνος προέρχεται από το γεγονός ότι οι εξασκούμενες τάσεις είναι εναλλασσόμενες, ενώ υπάρχει αυξημένος κίνδυνος ιδιοσυντονισμού της πτερωτής λόγω των εμφανιζόμενων ταλαντώσεων. Επίσης, δεν πρέπει να παραλείπεται το γεγονός ότι ο δρομέας μιας ανεμογεννήτριας βρίσκεται εκτεθειμένος σε αρκετά δύσκολες καιρικές συνθήκες, με αποτέλεσμα να έχουμε επιταχυνόμενη φθορά των υλικών. Συνεπώς, το πρόβλημα του υπολογισμού των τάσεων, καθώς και της επιλογής των κατάλληλων υλικών, που συνδυάζουν χαμηλό κόστος και επιθυμητή αντοχή, είναι καθοριστικό στην επιτυχία κάθε ανεμοκινητήρα στην ενεργειακή αγορά.

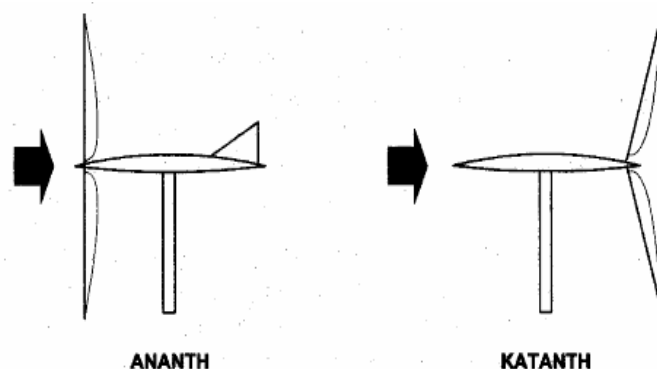
vi. **Καθορισμός του ύψους του δρομέα** επάνω από το έδαφος. Ο ακριβής καθορισμός του ύψους του δρομέα από το έδαφος πρέπει να συνεκτιμά τη μορφή του πεδίου ροής, που προσβάλλει τη πτερωτή (τραχύτητα εδάφους, εμπόδια κλπ.). Εν γένει, έχουμε αύξηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος, με παράλληλη όμως αύξηση και της δαπάνης κατασκευής της εγκατάστασης. Απαιτείται, συνεπώς, μια πλήρης οικονομικοτεχνική μελέτη για τον καθορισμό του βέλτιστου ύψους μιας ανεμογεννήτριας, αν και οι κατασκευάστριες εταιρίες σήμερα διαθέτουν τις μηχανές τους σε ένα ή δύο προκαθορισμένα ύψη, που ξεκινούν κατά κανόνα από την τιμή της διαμέτρου του δρομέα της μηχανής.

vii. **Κατασκευή του πύργου στήριξης** και θεμελίωσή του. Ο πύργος στήριξης πρέπει να συνδυάζει το κατάλληλο αεροδυναμικό σχήμα με την σταθερότητα και την αντοχή σε χρονικά μεταβαλλόμενες καταπονήσεις. Επιπλέον, πρέπει να μελετηθούν φαινόμενα αλληλεπίδρασης περιστρεφόμενων πτερυγίων και πύργου στήριξης, καθώς και η θεμελίωση ανεμοκινητήρων σε εδάφη περιορισμένης στερεότητας, όπως ο βυθός της θάλασσας. Τα προβλήματα αλληλεπίδρασης είναι πλέον σημαντικά για μηχανές με την πτερωτή τους σε υπήνεμη διάταξη.

viii. **Μελέτη του πεδίου ροής πίσω από την πτερωτή** και η επίδραση του ομόρου στο περιβάλλον καθώς και σε πιθανές επόμενες ανεμογεννήτριες. Στόχος της εν λόγω ανάλυσης είναι η μελέτη της αλληλεπίδρασης ανεμοκινητήρων σε διάφορες διατάξεις καθώς και ο καθορισμός της ελάχιστης επιτρεπτής απόστασης μεταξύ των μηχανών, με τον περιορισμό της χρήσης του ελάχιστου δυνατού εμβαδού, ώστε να μεγιστοποιείται η αξιοποίηση της γης.

## 10.5 Περιγραφή μηχανής οριζόντιου άξονα

Τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, είναι ο πύργος στηρίξεως, η πτερωτή, ο άξονας περιστροφής, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας, η ηλεκτρική γεννήτρια καθώς και το σύστημα προσανατολισμού της μηχανής.



Σχήμα 10.7 Ανάντη και κατάντη διάταξη δρομέα ανεμογεννήτριας.

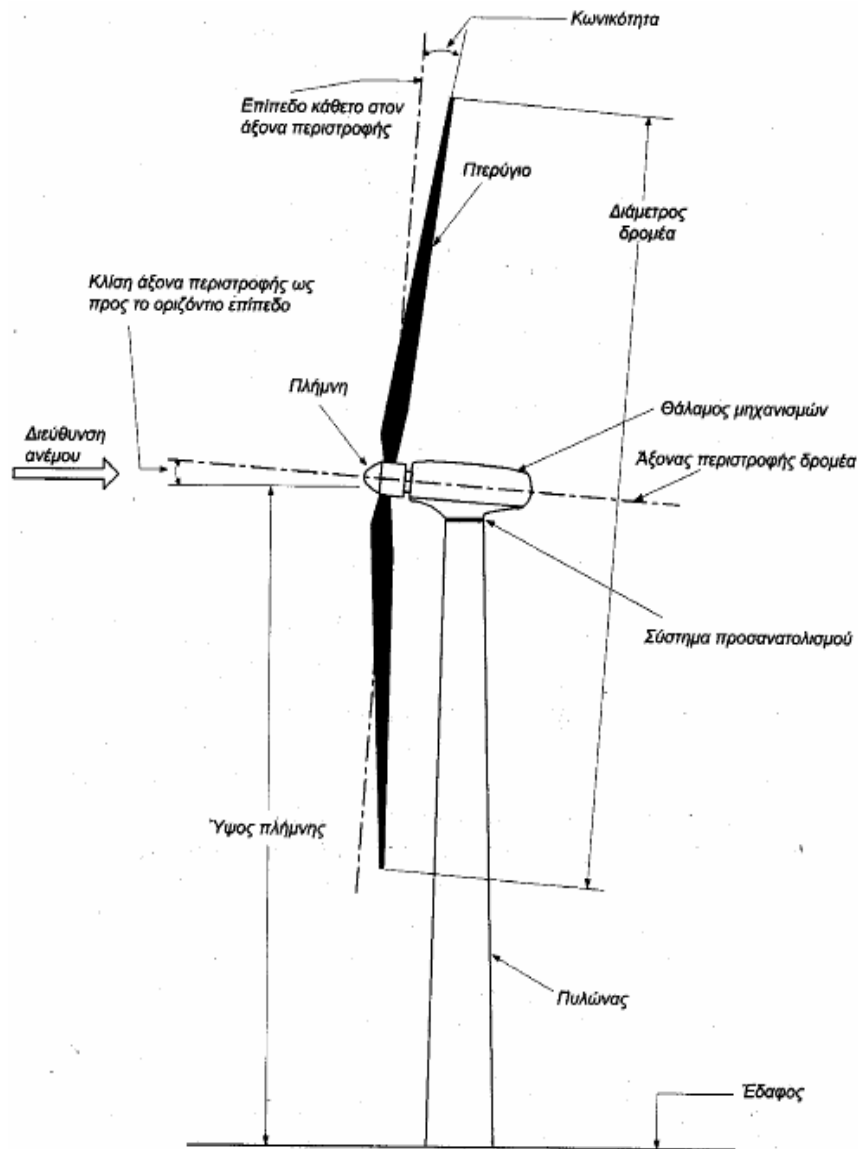
Στις περισσότερες περιπτώσεις, η πτερωτή της ανεμογεννήτριας αποτελείται από πτερύγια, των οποίων το σχήμα έχει προέλθει από αντίστοιχα πτερύγια αεροπορικών κινητήρων και είναι κατασκευασμένα συνήθως από ελαφρά κράματα μετάλλων, ενισχυμένο πολυεστέρα, αλλά και από ξύλο σε συνδυασμό με ειδικές ρητίνες. Μια τυπική μέθοδος κατασκευής πτερυγίων ανεμογεννήτριας βασίζεται στη συνδυασμένη χρήση χάλυβα και πλαστικού, όπου το κεντρικό χαλύβδινο τμήμα απορροφά τα καμπτικά και στρεπτικά φορτία, ενώ χρησιμοποιούνται πλαστικά κελύφη τα οποία προσδίδουν την επιθυμητή αεροδυναμική μορφή στα πτερύγια.

Όπως προαναφέραμε η πτερωτή τοποθετείται είτε στα ανάντη είτε στα κατάντη του πύργου στηρίξεως και τα πτερύγια καλύπτουν ένα μικρό ποσοστό (2% έως 10%) του εμβαδού της περιφέρειας που διαγράφουν. Όταν ο δρομέας λειτουργεί στα κατάντη του πύργου στηρίξεως έχουμε μεν αυξημένο επίπεδο αεροδυναμικού θορύβου, αλλά και αυτόματο προσανατολισμό της πτερωτής στη διεύθυνση του ανέμου. Στην ανάντη λειτουργία της πτερωτής εκλείπουν τα παραπάνω φαινόμενα, με αποτέλεσμα η διάταξη αυτή να προτιμάται σήμερα.

Η επιλογή του πλήθους των πτερυγίων σχετίζεται με την αεροδυναμική φόρτιση των πτερυγίων, με το βαθμό απόδοσής τους, με το κόστος κατασκευής της ανεμογεννήτριας καθώς και με θέματα αντοχής και συντονισμού λόγω ταλαντώσεων (πρόβλημα ιδιοσυχνότητων). Επιπλέον, θέματα που συνεκτιμούνται είναι η κυκλική μεταβολή της ροπής της μηχανής λόγω της καθ' ύψος μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και τα θέματα ζυγοστάθμισης των πτερυγίων. Για τον περιορισμό της κυκλικής μεταβολής του φορτίου των πτερυγίων δίνεται μια μικρή κλίση (έως και 10°) του άξονα περιστροφής ως προς το οριζόντιο. Τέλος, για λόγους περιορισμού

των καμπτικών τάσεων πάνω στα πτερύγια, επιβάλλεται συνήθως μια μικρή κωνικότητα αυτών που δεν ξεπερνά τις  $10^\circ$ .

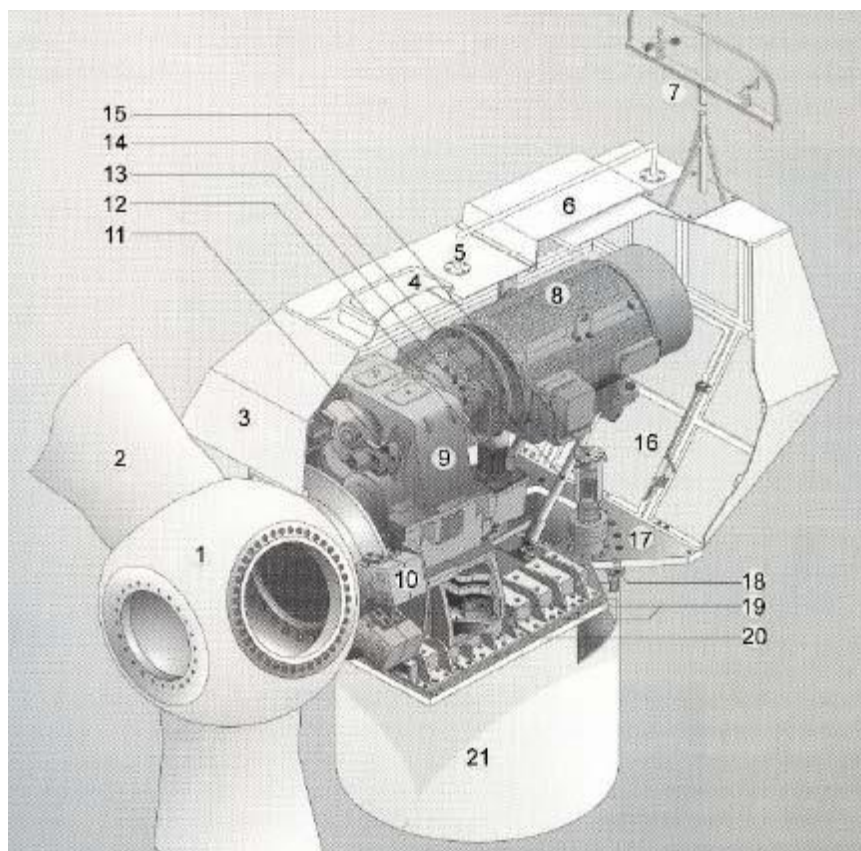
Για λόγους ασφάλειας της ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια είναι συνήθως εφοδιασμένα με συστήματα αεροδυναμικής πέδησης (αερόφρενα), τα οποία διακόπτουν τη λειτουργία της μηχανής σε έκτακτες περιπτώσεις. Σε ειδικές κατασκευές εκτός από την παρουσία των αερόφρενων (π.χ. επίπεδες πλάκες κάθετες στην επιφάνεια του πτερυγίου) χρησιμοποιούνται και μικρά αλεξίπτωτα, που απελευθερώνονται φυγοκεντρικά μετά από κάποιο όριο στροφών και επιβραδύνουν



Σχήμα 10.8 Τοποθέτηση ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.

την ανεμογεννήτρια.





- |   |   |
|---|---|
| 1. Πλήμνη δρομέα                              | 12. Υδραυλικά                                   |
| 2. Πτερύγια δρομέα                            | 13. Ελαστικός σύνδεσμος                         |
| 3. Κάλυμμα ατράκτου                           | 14. Αναρτήσεις γεννήτριας                       |
| 4. Φωταγωγός                                  | 15. Σύστημα προσανατολισμού                     |
| 5. Ράβδος ασφαλείας                           | 16. Θυρίδα επισκόπησης                          |
| 6. Εξαγωγή αέρα                               | 17. Εξέδρα                                      |
| 7. Αλεξικέραυνο και μετρητής ταχύτητας ανέμου | 18. Στεφάνη ρουλεμάν συστήματος προσανατολισμού |
| 8. Γεννήτρια                                  | 19. Φρένο συστήματος προσανατολισμού            |
| 9. Κιβώτιο ταχυτήτων                          | 20. Αποζεύκτης θορύβου                          |
| 10. Δισκόφρενα δρομέα                         | 21. Πύργος                                      |
| 11. Εφεδρικό φρένο                            |   |

**Σχήμα 10.9** Κύρια μέρη ατράκτου ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα 600 kW.

Για τη βελτίωση της συνολικής συμπεριφοράς μιας περωτής, χρησιμοποιούνται περωτές μεταβλητού βήματος σε αντιδιαστολή με τις απλούστερες περιπτώσεις περωτών σταθερού βήματος. Η μεταβολή του βήματος μιας περωτής συνίσταται στην περιστροφή του περυγίου γύρω από το διαμήκη άξονά του, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της γωνίας προσβολής του από τον άνεμο. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η διατήρηση σταθερής ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας, η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης των περυγίων, ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος, ο περιορισμός των δυνάμεων που καταπονούν τα

πτερύγια κ.α.

Η πλήμνη αποτελεί το δεύτερο συστατικό της πτερωτής (δρομέα) και περιλαμβάνει εκείνο το μέρος της ανεμογεννήτριας πάνω στο οποίο προσαρμολάζονται τα πτερύγια. Η τελική της μορφή εξαρτάται τόσο από το είδος της πτερωτής όσο και από τους επιθυμητούς βαθμούς ελευθερίας στη θέση σύνδεσης πτερυγίων και άξονα.

Ο άξονας της ανεμογεννήτριας κατασκευάζεται από ειδικό ενισχυμένο χάλυβα, ώστε να δύναται να μεταφέρει ισχυρές μη μόνιμες στρεπτικές και καμπτικές ροπές, ενώ η έδραση του γίνεται συνήθως σε δύο ένσφαιρα έδρανα ικανά να παραλαμβάνουν τόσο το βάρος του άξονα όσο και τα ενασκούμενα φορτία.

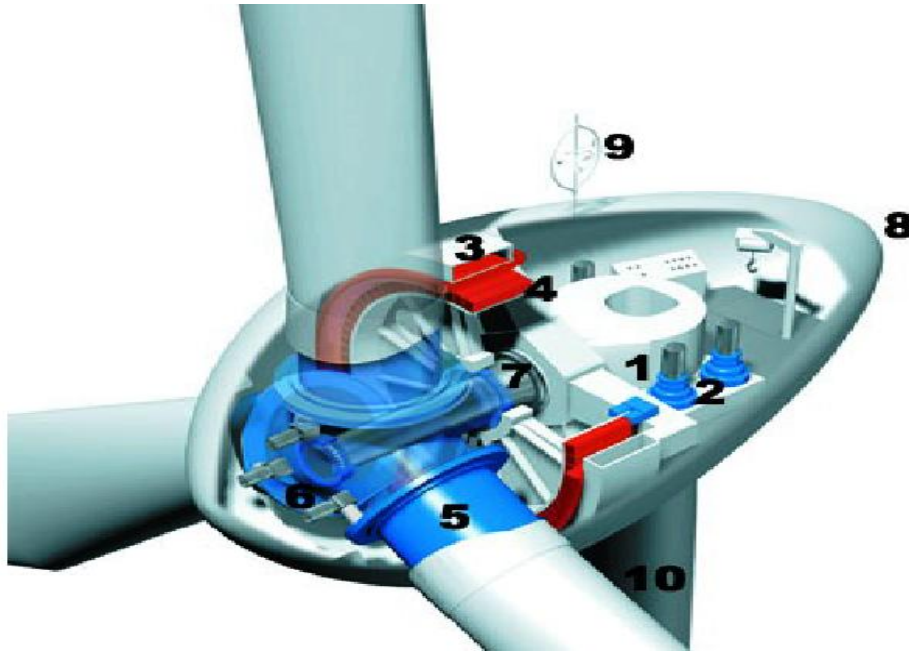
Η δυνατότητα περιστροφής του άξονα σε διεύθυνση παράλληλη προς αυτή του ανέμου εξασφαλίζεται με τη χρήση καθοδηγητικών πτερυγίων και ειδικών αυτοματισμών. Η πλέον σύγχρονη μέθοδος προσανατολισμού στηρίζεται στη χρήση ειδικού αισθητηρίου και σερβομηχανισμού, που περιστρέφει την άτρακτο της μηχανής (υπερκατασκευή) με τη βοήθεια οδόντωσης περιστροφής.

Ένα από τα σπουδαιότερα μέρη της ανεμογεννήτριας είναι το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, που περιλαμβάνει διβάθμιο ή τριβάθμιο κιβώτιο μετασχηματισμού της χαμηλής ταχύτητας περιστροφής της πτερωτής (συνήθως 20 έως 110rpm) σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής (άνω των 1000rpm), στις οποίες λειτουργούν συνήθως οι ηλεκτρικές γεννήτριες. Ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός διβάθμιου συστήματος μετάδοσης είναι περίπου 96%, ενώ για λόγους ασφαλείας η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας.

Το σύστημα κίνησης περιλαμβάνει επίσης, υδραυλικό ή μηχανικό φρένο και ελαστικούς συνδέσμους απορρόφησης στρεπτικών ταλαντώσεων. Το μηχανικό φρένο της ανεμογεννήτριας τοποθετείται είτε στον άξονα υψηλής ταχύτητας περιστροφής, οπότε απαιτείται μικρή σχετικά δύναμη πέδησης, αλλά δεν προστατεύεται η πτερωτή από απώλεια φορτίου ή θραύση του συστήματος μετάδοσης κίνησης, είτε στον άξονα χαμηλής ταχύτητας περιστροφής. Στην τελευταία περίπτωση λόγω της μεγάλης ροπής πέδησης απαιτείται φρένο αυξημένων διαστάσεων, βάρους και κόστους. Στην περίπτωση όμως αυτή προστατεύεται καλύτερα η πτερωτή και το κιβώτιο μετάδοσης, για αυτό και αποτελεί τη βέλτιστη τεχνικά λύση. Τέλος, για λόγους πρόσθετης ασφάλειας, απαιτείται η αυτόματη ενεργοποίηση του φρένου με τη βοήθεια ελατηρίου, στην περίπτωση πτώσης της υδραυλικής πίεσης ή της ηλεκτρικής τάσης για την περίπτωση ηλεκτρομαγνητικού συστήματος πέδησης.

Για την προστασία των τμημάτων της ανεμογεννήτριας από τις καιρικές συνθήκες χρησιμοποιείται ειδικό κέλυφος από σύνθετο υλικό, π.χ. ειδικά κράματα χάλυβα ή αλουμινίου, που στην περιοχή της πλήμνης πρέπει να έχει και αεροδυναμική μορφή. Επιπλέον, το κέλυφος της ανεμογεννήτριας πρέπει να έχει αντιδιαβρωτική προστασία.

Ο πύργος στηρίξεως της ανεμογεννήτριας αποτελείται συνήθως είτε από ένα μεταλλικό δικτύωμα, είτε από μια στήλη από μπετόν ή μεταλλικό σωλήνα για μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες. Στην τελευταία περίπτωση υπάρχει ειδική μέριμνα για εσωτερική σκάλα, ενώ για ανεμογεννήτριες μεγάλων διαστάσεων υπάρχει πρόσθετη



Σχήμα 10.10 Τα κύρια μέρη μιας ανεμογεννήτριας τεχνολογίας Enercon.

1. Γεννήτρια
2. Στάτης γεννήτριας
3. Ρότορας γεννήτριας
4. Κύριος άξονας
5. Πτερωτές
6. Φλάτσα – βάση πτερωτής
7. Κινητήρας έλεγχου του Pitch Control
8. Κύριος φορέας (Yaw drive)
9. Ανεμόμετρο
10. Πύργος



Σχήμα 10.11 Δρομέας και άτρακτος τυπικής ανεμογεννήτριας.

μέριμνα για εγκατάσταση ανελκυστήρα. Το ελάχιστο ύψος του πύργου στηρίζεως είναι συνήθως ίσο με τη διάμετρο της πτερωτής, ενώ κατά την εκλογή του πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο το αυξημένο κόστος κατασκευής και θεμελίωσης για μεγάλα ύψη όσο και η δυνατότητα αξιοποίησης υψηλότερων ταχυτήτων του ανέμου, με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης της πτερωτής.

Ολοκληρώνοντας τη σύντομη περιγραφή των βασικών τμημάτων μιας ανεμογεννήτριας πρέπει να αναφέρουμε και την ύπαρξη των **ηλεκτρικών γεννητριών**, που χρησιμοποιούνται για μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, καθώς και των **συστημάτων αυτοματισμού**. Εν συντομία αναφέρουμε ότι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κυρίως σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσομένου ρεύματος και σπανιότερα ηλεκτρικές γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. Σχετικά πρόσφατα ορισμένοι κατασκευαστές υιοθέτησαν τη χρήση ηλεκτρικών γεννητριών μεταβλητών στροφών, η έξοδος των οποίων, αφού ανορθωθεί, οδηγείται σε κατάλληλο μετατροπέα συχνότητας, ο οποίος και αποδίδει στην κατανάλωση ηλεκτρική ενέργεια επιθυμητών χαρακτηριστικών.

## 10.6 Χαρακτηριστικά ανεμοκινητήρων οριζόντιου άξονα

### 10.6.1 Δρομέας

Ο σχεδιασμός του δρομέα είναι ίσως το πιο βασικό ζήτημα στη σχεδίαση του όλου συστήματος. Στόχος είναι να βρεθεί ένας βέλτιστος συνδυασμός των διαφόρων παραμέτρων που συνθέτουν τον δρομέα: ταχύτητα περιστροφής, διάμετρος δρομέα, αριθμός πτερυγίων, κατανομή πλάτους πτερυγίου, κατάλληλη αεροτομή ή αεροτομές, συστροφή, μέσο γεωμετρικό βήμα. Τα κριτήρια επιλογής είναι η μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής της. Η διάμετρος του δρομέα θα εξαρτηθεί από την απαιτούμενη ονομαστική ισχύ της μηχανής και το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης του ανεμοκινητήρα. Η γωνιακή ταχύτητα λειτουργίας του δρομέα επιλέγεται έτσι ώστε ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου προς την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται στην περιοχή της βέλτιστης τιμής συντελεστή ισχύος του ανεμοκινητήρα. Η κατανομή του πλάτους των πτερυγίων θα προκύψει από τη βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης του δρομέα ενώ το πλήθος των πτερυγίων (η στερεότητα του δρομέα) θα εξαρτηθεί από το είδος της εφαρμογής του ανεμοκινητήρα. Ανάλογα με τη μορφή του δρομέα διακρίνουμε δύο διαφορετικούς τύπους:

#### (α) Δρομείς με πολλά λεπτά πτερύγια (πολυπτέρυγους)

Χαρακτηριστικό των δρομέων αυτών είναι η μικρή διάμετρος, η μικρή περιφερειακή ταχύτητα και η μεγάλη ροπή. Στο παρελθόν κατασκευάστηκαν σε



*Σχήμα 10.12* Αμερικανικός πολυπτερυγος ανεμοκινητήρας.

βιομηχανική κλίμακα (οι γνωστοί Αμερικανικοί πολυπτερυγοί ανεμόμυλοι) και βρήκαν πλατειά εφαρμογή για άντληση νερού. Η κατασκευή τέτοιων ανεμοκινητήρων καθώς και η έρευνα προς την κατεύθυνση αυτή τείνουν να εγκαταληφθούν για πολλούς λόγους, όπως ο μικρός συντελεστής ισχύος και η μικρή διάμετρος που μπορούν να κατασκευαστούν.

### **(β) Δρομείς με λίγα πτερύγια**

Οι δρομείς αυτοί έχουν συνήθως δύο ή τρία πτερύγια (τελευταία κατασκευάστηκαν δρομείς με ένα πτερύγιο, μονόπτερος). Έχουν τη μορφή των πτερυγίων των ελίκων των αεροσκαφών με αρκετή συστροφή από τη βάση μέχρι το ακροπτερύγιο.



*Σχήμα 10.13* Ανεμογεννήτρια με τρία πτερύγια.

Η τεχνολογία κατασκευής του είναι παρόμοια με εκείνη των ελίκων αεροπλάνων, δανείζεται δε και μερικά στοιχεία από εκείνη του δρομέα των ελικοπτέρων. Τα βασικά χαρακτηριστικά του δρομέα είναι ο μεγάλος συντελεστής ισχύος και η βέλτιστη λειτουργία του σε μεγάλο σχετικά λόγο ταχυτήτων ακροπτερυγίου λ. Οι παλαιότεροι δρομείς είχαν πλατειά πτερύγια, ενώ οι σύγχρονοι

δρομείς, λόγω αεροδυναμικής βελτιστοποίησης, έχουν λεπτά πτερύγια. Οι αεροτομές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πτερυγίων είναι σύγχρονες αεροτομές που παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή άνωσης σε μικρές σχετικά γωνίες πρόσπτωσης ενώ συγχρόνως διατηρούν χαμηλό συντελεστή αντίστασης σε ευρεία περιοχή γωνιών πρόσπτωσης. Τυπικός εκπρόσωπος τέτοιων αεροτομών είναι η αεροτομή NACA 4412.

Οι δρομείς αυτοί είναι πιο ταχύστροφοι από τους παλαιότερους δρομείς και ελαφρώς οικονομικότεροι, παρουσιάζουν δε ευκολία στην επιτόπου συναρμολόγηση του ανεμοκινητήρα. Γενικά ο τρίπτερος δρομέας είναι κατά 5% περισσότερο αποδοτικός από τον δίπτερο και τα φορτία που ενεργούν σε κάθε πτερύγιο είναι μικρότερα, είναι όμως ακριβότερος. Αντίθετα ο μονόπτερος δρομέας είναι φθηνότερος, έχει 10% μικρότερη ενεργειακή απόδοση από τον δίπτερο, αλλά έχει θορυβώδη λειτουργία και η ζυγοστάθμιση του παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα.

### **(γ) Μέγεθος ανεμοκινητήρα**

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα κατασκευάζονται από ισχείς μερικών εκατοντάδων W μέχρι και πάνω από 3 MW. Διακρίνουμε μικρά μεγέθη (έως λίγα KW, διάμετρος έως 10 μέτρα), μεσαία μεγέθη (50 – 250 KW, διάμετρος έως 25 μέτρα), και μεγάλα μεγέθη (500 – 2500 KW). Είναι γενικά δύσκολο να ξεπεράσουμε την ισχύ των 2500 KW, γιατί απαιτείται κατασκευή δρομέων πολύ μεγάλης διαμέτρου (άνω των 80 m) κατασκευή που συνεπάγεται μεγάλα προβλήματα.

### **(δ) Υλικά πτερυγίων**

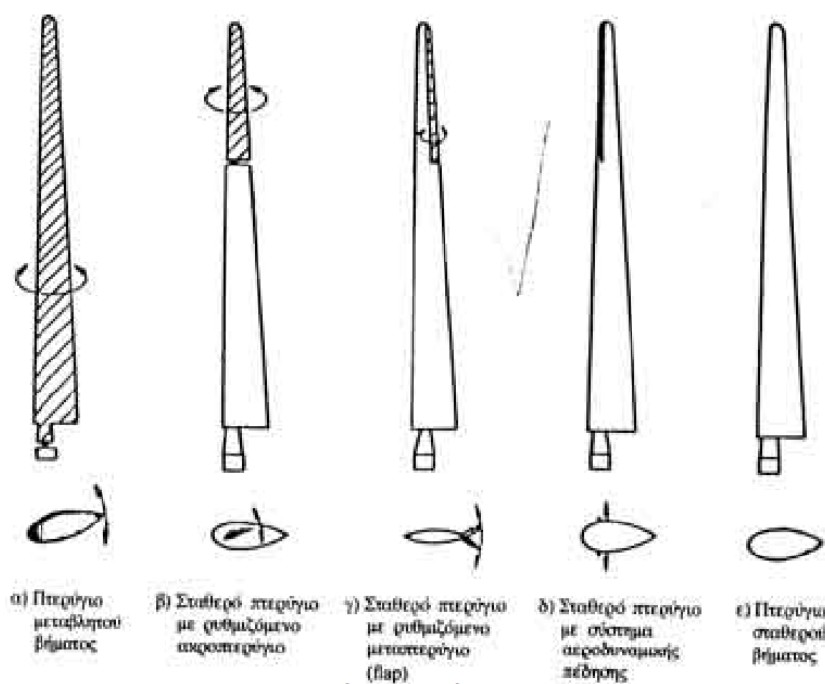
Τα υλικά κατασκευής των πτερυγίων των δρομέων δεν έχουν ακόμα ξεκαθαρίσει εντελώς. Στους μικρούς ανεμοκινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως πολυουρεθάνη, υαλόνημα και ξύλο, υλικά που δεν υποφέρουν από διάβρωση αλλά έχουν όμως άγνωστη συμπεριφορά σε εναλλασσόμενη φόρτιση, φόρτιση που οδηγεί σε πρόωρη γήρανση του υλικού. Στους μεσαίου μεγέθους δρομείς χρησιμοποιούνται υαλονήματα με εναλλαγή της κατεύθυνσης των υαλονημάτων σε πολλαπλές στρώσεις ενώ στους μεγάλου μεγέθους ανεμοκινητήρες χρησιμοποιείται η τεχνολογία των ελίκων των αεροσκαφών (ανθρακόνημα με μηχανές αυτόματου τυλίγματος – Hamilton Standard) ή ακόμα και ξύλο ή και τεχνολογία πτερυγίων αεροσκαφών.

### **(ε) Το βήμα του πτερυγίου**

Υπάρχουν δρομείς με πτερύγια:

- Μεταβλητού βήματος
- Σταθερού βήματος

Η μηχανική ρύθμιση ισχύος σε μια ανεμογεννήτρια έχει ως σκοπό να εξισορροπεί, για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από την ονομαστική, την ισχύ την παραγόμενη από την πτερύγωση με την ονομαστική ισχύ της εγκατάστασης (πχ γεννήτριας), ώστε η εγκατάσταση να μην υπερφορτίζεται.



**Σχήμα 10.14** Πτερόγια με αεροδυναμική πέδη. Η χρήση τους είναι και για τη ρύθμιση του βήματος πτερυγίου και κατ' επέκταση της ισχύος.

### (ζ) Τρόποι μηχανικής ρύθμισης ισχύος

- Είναι δυνατόν να μειωθεί το μέγεθος της παραγόμενης από την περυγώση ισχύος με την αλλαγή του προσανατολισμού ολόκληρου του πτερυγίου ή μέρους του (ακροπτερόγιο) ως προς την διεύθυνση του ανέμου. Ο τρόπος αυτός απαιτεί την ύπαρξη σερβομηχανισμού και έχει εφαρμογή στις ανεμογεννήτριες μικρής αλλά κυρίως μεγάλης ισχύος.
- Ρύθμιση με τη βοήθεια αεροδυναμικών φρένων στα άκρα των πτερυγίων. Η διάταξη αυτή αποτελεί περισσότερο μέσον προστασίας της ανεμογεννήτριας έναντι υπερτάχυνσης της και τίθεται σε λειτουργία όταν η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα υπερβεί την επιτρεπόμενη τιμή. Αυτό μπορεί να συμβεί σε περίπτωση υπερβολικής ταχύτητας ανέμου (μεγαλύτερης της ταχύτητας ανέμου στην οποία η ανεμογεννήτρια σταματάει,  $V_F$ ) ή όταν ο δρομέας παράγει έργο, ενώ δεν υπάρχει κατανάλωση.

Οι ανεμογεννήτριες με σύστημα ρύθμισης του βήματος του πτερυγίου παρουσιάζουν τεχνολογική πολυπλοκότητα στο ρυθμιστικό μηχανισμό και τα πτερόγια είναι σαφώς ακριβότερα και βαρύτερα. Παρουσιάζουν όμως καλή ρύθμιση ισχύος, μειωμένα αεροδυναμικά φορτία, ευκολία στην εκκίνηση της ανεμογεννήτριας και συγχρόνως μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για πέδηση.

Οι ανεμογεννήτριες που δεν έχουν μηχανική ρύθμιση ισχύος (πτερόγιο σταθερού βήματος) είναι απλούστερες τεχνολογικά και φυσικά φθηνότερες, έχουν όμως περίπου 5 – 10% μικρότερη παραγωγή ενέργειας, μεγαλύτερα φορτία

καταπόνησης και απαιτούν δισκόφρενα ασφάλειας αστοχίας ή αεροπέδες. Ανεμογεννήτριες σταθερού βήματος πτερυγίου είναι σχεδόν όλες οι ανεμογεννήτριες κατασκευής Δανίας μεσαίου μεγέθους.

### 10.6.2 Σύστημα αύξησης στροφών (Σ.Α.Σ)

Η σχεδίαση του συστήματος αύξησης των στροφών του δρομέα για να προσαρμοστεί ο δρομέας στις στροφές της γεννήτριας ή της αντλίας δεν αφορά άμεσα τη σχεδίαση της ανεμογεννήτριας. Η τεχνολογική εξέλιξη των ΣΑΣ, λόγω απαιτήσεων της βιομηχανίας, έχει δώσει πολλούς και καλούς τύπους κιβωτίου ταχυτήτων από άποψη αντοχής υλικού, φθοράς, μεταφερόμενης ισχύος και διαστάσεων.

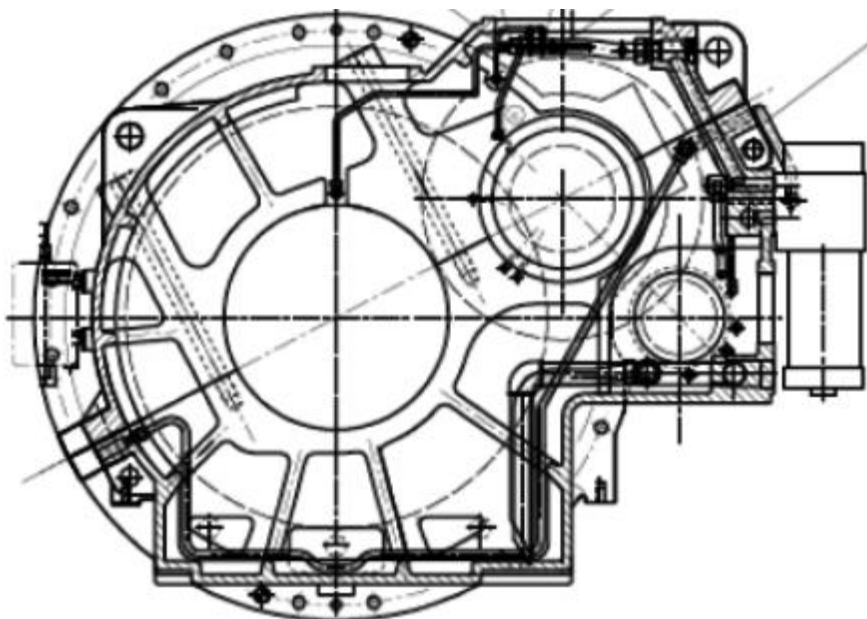


Σχήμα 10.15 Φωτογραφία του κιβωτίου ταχυτήτων του κύριου άξονα και του συστήματος φρένων.

Βασικά κριτήρια επιλογής του είναι η διάρκεια ζωής του, ο βαθμός απόδοσής του και ο θόρυβος λειτουργίας του. Λόγω της συνεχούς μεταβολής της ισχύος του ανέμου, το κιβώτιο ταχυτήτων λειτουργεί συνεχώς με κρουστικά φορτία τα οποία οδηγούν σε πρόωρη φθορά υλικού και μείωση της διάρκειας ζωής του κιβωτίου. Για το λόγο αυτό, το κιβώτιο ταχυτήτων της ανεμογεννήτριας επιλέγεται να έχει ονομαστικό μέγεθος ισχύος πολύ μεγαλύτερο από το ονομαστικό μέγεθος της μηχανής, ακόμα και ονομαστική ροπή 200% μεγαλύτερη της ονομαστικής ροπής της μηχανής. Διακρίνονται δύο είδη κιβωτίων. Το κιβώτιο με παράλληλες οδοντώσεις γραναζιών (κιβώτιο παραλλήλων αξόνων) και το κιβώτιο στο οποίο οι οδοντωτοί τροχοί που χρησιμοποιούνται έχουν ελικοειδή οδόντωση (συνήθως κιβώτιο με πλανητικό σύστημα οδοντωτών τροχών). Το πρώτο είδος κιβωτίου είναι απλούστερο κατασκευαστικά και έχει χαμηλότερο κόστος συντήρησης. Το κιβώτιο με ελικοειδή



οδόντωση έχει υψηλότερο κόστος αγοράς και συντήρησης αλλά και καλύτερο βαθμό απόδοσης και χαμηλότερη στάθμη θορύβου.



*Σχήμα 10.16 Βασικό μηχανολογικό σχέδιο κιβωτίου ταχυτήτων ανεμογεννήτριας.*

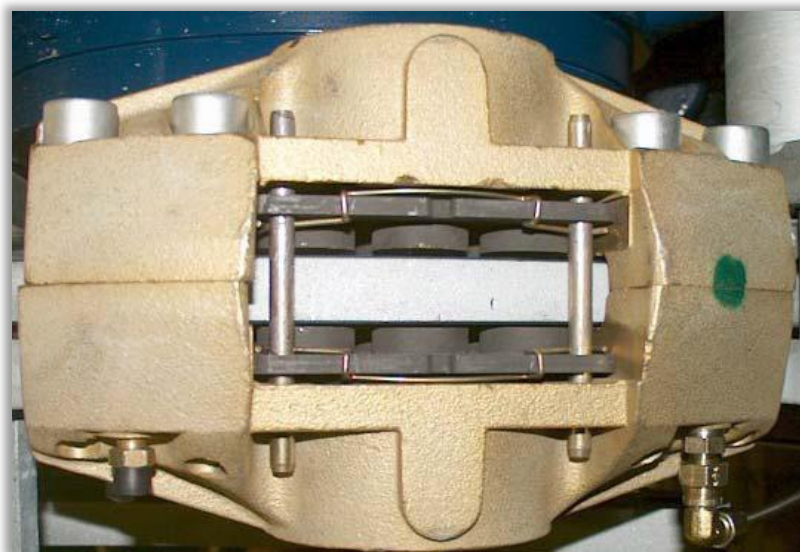
Για την αύξηση της ζωής του κιβωτίου και τη μείωση των κρουστικών φορτίων λειτουργίας, σε ορισμένες περιπτώσεις το κιβώτιο ταχυτήτων στηρίζεται πάνω σε ελατήρια απόσβεσης κραδασμών.

### **10.6.3 Σύστημα πέδησης άξονα δρομέα**

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ακινητοποίησης του δρομέα του ανεμοκινητήρα.

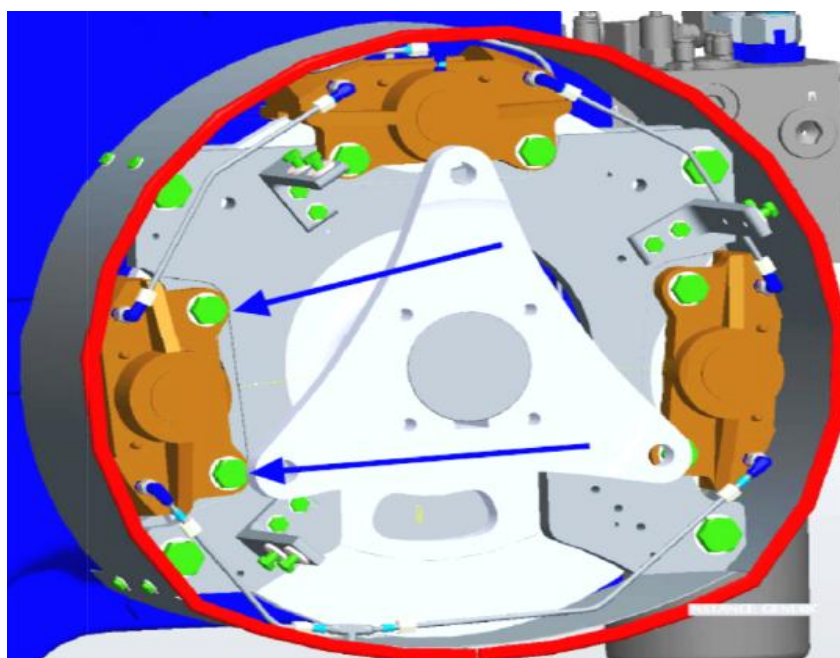
- Μεταβολή του βήματος του πτερυγίου ή του ακροπτερυγίου ή και ενεργοποίησης της αεροπέδης στο ακροπτερύγιο.
- Στροφή του ίδιου του δρομέα ώστε να γυρίσει παράλληλα προς τον άνεμο.
- Αύξηση της αεροδυναμικής αντίστασης του πτερυγίου με την ενεργοποίηση αεροπέδης (τύπου spoiler).
- Πέδηση του άξονα

Είναι φανερό ότι ο προτιμότερος τρόπος ακινητοποίησης της μηχανής είναι η σταδιακή μείωση των αεροδυναμικών φορτίων στη μηχανή με παράλληλη αύξηση της αντιρροπής. Με τον τρόπο αυτό δεν αναπτύσσονται κρουστικά φορτία στη φάση πέδησης της μηχανής. Σε περίπτωση αστοχίας όμως των μηχανισμών ρύθμισης του βήματος του πτερυγίου ή των άλλων μεθόδων ρύθμισης ισχύος απαιτείται η πέδηση του άξονα του δρομέα. Η πέδηση αυτή γίνεται συνήθως με δισκόφρενο τύπου ασφαλείας αστοχίας που ενεργεί αυτόματα στον άξονα. Το δισκόφρενο αυτό συνήθως



Σχήμα 10.17 Φωτογραφία της μιας δαγκάνας του μηχανικού φρένου.

τοποθετείται στον υψηλόστροφο άξονα της μηχανής (μετά το κιβώτιο ταχυτήτων) διότι έτσι η απαιτούμενη ροπή πέδησης είναι πολύ μικρή λόγω υψηλής γωνιακής ταχύτητας) και κατά συνέπεια το δισκόφρενο είναι μικρού κόστους. Συνήθως η πέδη αυτή είναι ηλεκτρομαγνητικού τύπου που ενεργοποιείται αυτόματα με τη διακοπή του ρεύματος, δηλαδή η πέδη παραμένει πάντα ανοικτή με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητών και σε περίπτωση διακοπής ρεύματος ενεργοποιείται από ελατήρια.



Σχήμα 10.18 3D σχέδιο ολόκληρου του συστήματος φρένου τοποθετημένου στον άξονα σύνδεσης της γεννήτριας.

Τοποθετώντας όμως την πέδη στον υψηλόστροφο άξονα υπερφορτίζουμε το κιβώτιο ταχυτήτων στη διάρκεια της πέδησης (η ακινητοποίηση της μηχανής γίνεται εντός 2 ή 3 πλήρων στροφών του δρομέα) ενώ συγχρόνως η αντικατάσταση, συντήρηση του κιβωτίου ή και η επισκευή του γίνεται προβληματική. Τοποθέτηση του δισκόφρενου στον χαμηλόστροφο άξονα απαιτεί ογκώδες δισκόφρενο και υψηλού κόστους. Το δισκόφρενο αυτό είναι συνήθως υδραυλικού τύπου ασφαλείας αστοχίας. Στην περίπτωση χρήσης υδραυλικού δισκόφρενου αντιμετωπίζονται προβλήματα διαρροής λαδιού, λειτουργίας αισθητηρίων μέτρησης στάθμης και θερμοκρασίας λαδιού κλπ.

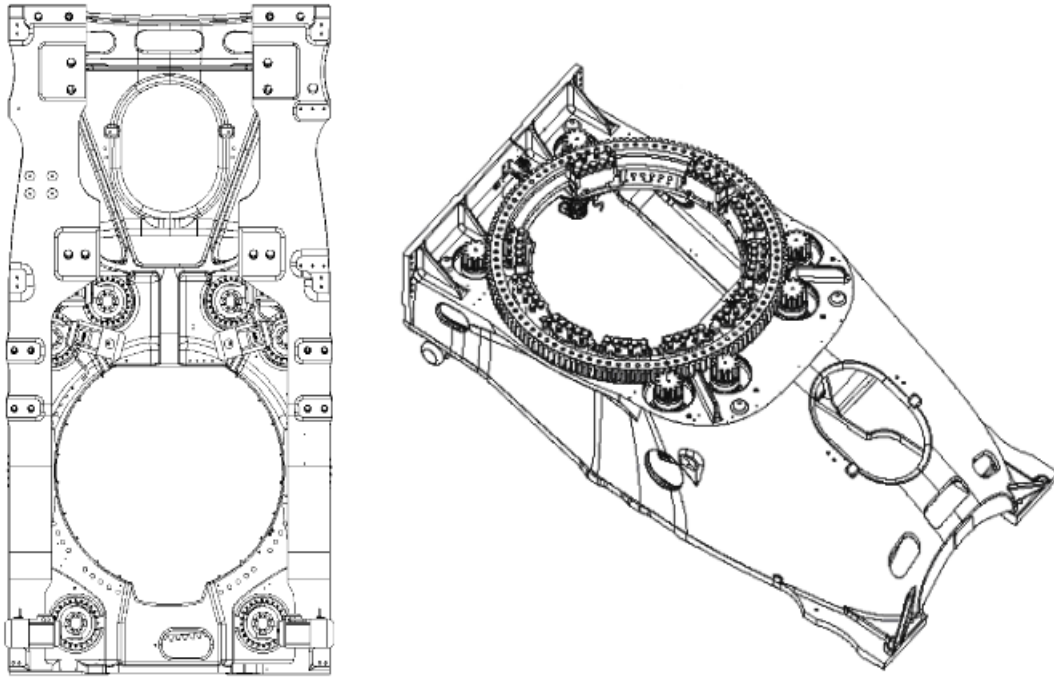
#### 10.6.4 Ελαστικοί σύνδεσμοι

Για τη σύνδεση αξόνων μεταξύ τους (πχ άξονας δρομέα με κιβώτιο ή δισκόφρενο με γεννήτρια κλπ) απαιτείται ελαστικός σύνδεσμος απορρόφησης κραδασμών. Συνήθως οι σύνδεσμοι αυτοί βασίζονται στην απορροφητική ικανότητα του καουτσούκ. Σε ακριβές κατασκευές χρησιμοποιείται και υδραυλικού τύπου συμπλέκτης ο οποίος συγχρόνως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μέσο προσαρμογής των στροφών του δρομέα στις στροφές της γεννήτριας και έτσι η μηχανή να δουλεύει σε σταθερές σύγχρονες στροφές ή σε στροφές μέγιστου συντελεστή ισχύος.

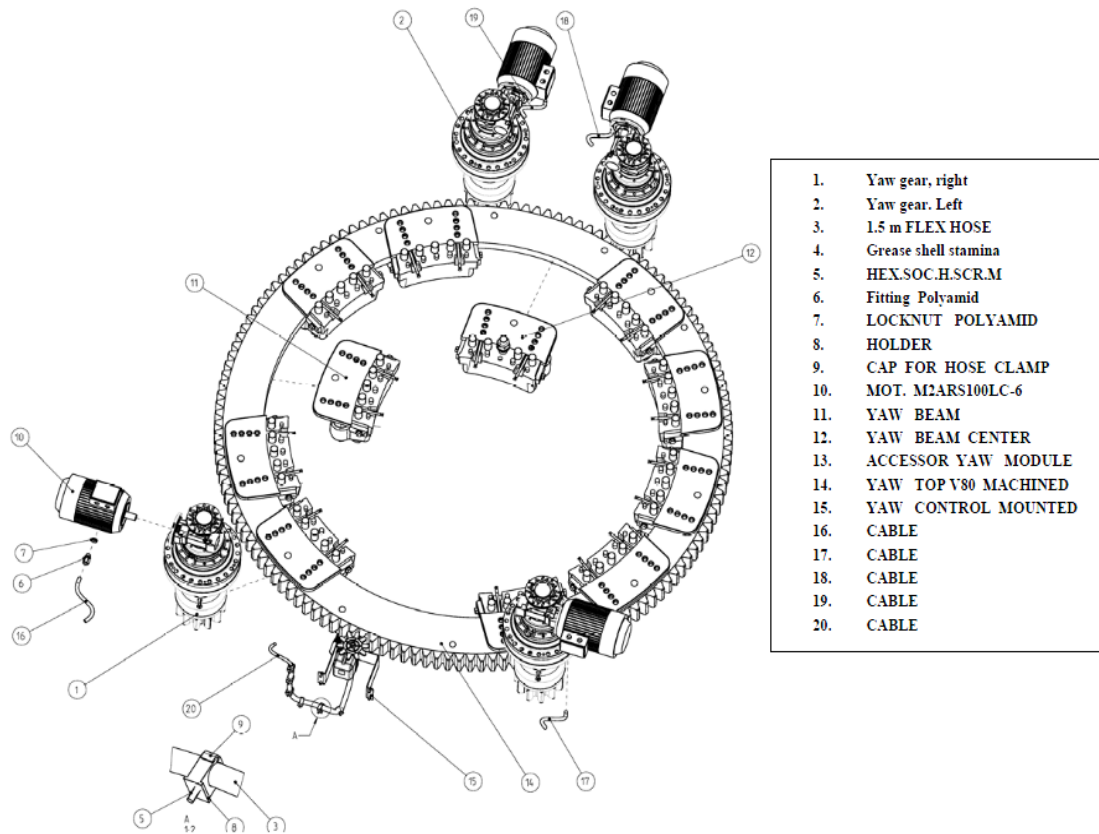
#### 10.6.5 Σύστημα προσανατολισμού

Όπως αναφέρθηκε, ο δρομέας μπορεί να βρίσκεται πριν από τον πύργο ή μετά από αυτόν (ανάντι και κατάντι μηχανές). Στους ανεμοκινητήρες με ανάντι τοποθέτηση του δρομέα απαιτείται σύστημα προσανατολισμού του δρομέα. Στις μικρού μεγέθους ή και σε μεσαίου μεγέθους ανεμογεννήτριες για τον προσανατολισμό χρησιμοποιείται καθοδηγητικό πτερύγιο (ουρά) που τόσο η επιφάνεια της ουράς όσο και η θέση της ως προς τον άξονα του πύργου επιλέγονται έτσι ώστε σε απόκλιση του ανέμου κατά το πολύ  $10^\circ$  να εξασκείται ροπή επαναπροσανατολισμού του δρομέα στον άνεμο ικανή να υπερνικήσει την αντιροπή λόγω γυροσκοπικού φαινομένου.

Στις ανεμογεννήτριες μεγάλου μεγέθους χρησιμοποιείται σερβοκινητήρας ο οποίος ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου και που προσανατολίζει το δρομέα κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου. Η τοποθέτηση του δρομέα κατάντι φαινομενικά τουλάχιστον φαίνεται να οδηγεί σε απλούστερη κατασκευή ανεμοκινητήρα γιατί δεν απαιτείται σύστημα προσανατολισμού, αλλά στην περίπτωση αυτή ο ανεμοκινητήρας είναι περισσότερο θορυβώδης στη λειτουργία του λόγω της σκίασης του πύργου πάνω στον δρομέα και επίσης δημιουργούνται αυξημένες καταπονήσεις στα πτερύγια λόγω της περιοδικότητας φορτίσεων του πτερυγίου καθώς αυτό σε κάθε περιστροφή σκιάζεται από τον πύργο. Τέλος απαιτείται κάποιο είδος αποσβεστήρα για τον περιορισμό των άσκοπων μετακινήσεων του κουβουκλίου λόγω πλευρικής «τύρβης» του ανέμου.



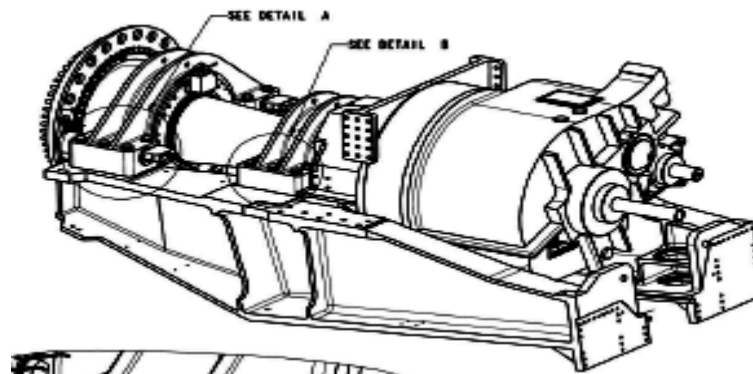
Σχήμα 10.19 Σύστημα προσανατολισμού



Σχήμα 10.20 Απεικόνιση του συστήματος προσανατολισμού μαζί με τα μοτέρ.

### 10.6.6 Κύριος άξονας

Ο κύριος άξονας είναι αυτός που μεταβιβάζει την ενέργεια από τον ρότορα στο σασμάν. Εσωτερικά από αυτόν περνάει ο άξονας του pitch. Ο κύριος άξονας στηρίζεται και περιστρέφεται συνήθως σε δύο σφαιρικά κυλινδρικά ρουλεμάν.



Σχήμα 10.21 Κύριος άξονας ανεμογεννήτριας.

### 10.6.7 Σύστημα γείωσης Α/Γ

Σε κάθε Α/Γ θα τοποθετηθεί θεμελιακή γείωση, η οποία θα συνδεθεί με τον οπλισμό της βάσης έτσι, ώστε να δράσει σαν ισοδυναμικό πλέγμα, κατά Φ.Ε.Κ. 8/1525/31-12-73. Το σύστημα της γείωσης αποτελείται ενδεικτικά από ένα ηλεκτρόδιο δακτυλίου και χάλκινα ηλεκτρόδια γείωσης (Ράβδοι 6 m (min.Ø16)). Τα πλεονεκτήματα που επιτυγχάνονται με αυτόν τον τρόπο είναι:

α) Γείωση προστασίας:

Το ηλεκτρόδιο δακτυλίου περιορίζει τις επικίνδυνες τάσεις επαφής για το προσωπικό που βρίσκεται κοντά στη βάση του πυλώνα, σε περίπτωση πλήξης κεραυνού στην Α/Γ.

β) Γείωση λειτουργίας:

Τα χάλκινα ηλεκτρόδια εξασφαλίζουν σταθερή και χαμηλή αντίσταση γείωσης για ολόκληρο το σύστημα γείωσης.

### 10.6.8 Αντικεραυνική προστασία της Α/Γ

Πάνω στην άτρακτο και στα περύγια της Α/Γ υπάρχουν αλεξικέραυνα, τα οποία συνδέονται με τη γεννήτρια, το Μ/Σ, τον πίνακα και όλα τα μεταλλικά μέρη της Α/Γ (κατά Ι.Ε.Κ 61024-1). Ο αγωγός που συνδέει όλα τα παραπάνω, καταλήγει στη θεμελιακή γείωση – ενιαία γείωση του αιολικού πάρκου. Για την προστασία της Α/Γ από κάθε είδους υπερτάσεις θα συνδεθούν αντικεραυνικά στοιχεία στον πίνακα Μ/Τ (σύμφωνα με over voltage category III DIN VDE 0110-1:1997-04).

### 10.6.9 Πύργος

Κριτήρια επιλογής του είδους του πύργου είναι, εκτός από το κόστος του, η ευκολία μεταφοράς του στον τόπο εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας και η ευκολία ανέγερσής του. Συνυφασμένο με το τελευταίο είναι και η διαδικασία στησίματος της μηχανής, ιδιαίτερα σε μεγάλες μονάδες, πράγμα που εξαρτάται από την ευκολία οδικής πρόσβασης στη θέση, την ύπαρξη ικανοποιητικού ανυψωτικού μέσου τόσο σε ανυψωτική ικανότητα όσο και σε ύψος ανύψωσης. Δύο είναι κυρίως οι τύποι πύργων που έχουν επικρατήσει, ο σωληνωτός και ο τύπου δικτυώματος.

Ο πύργος τύπου δικτυώματος είναι ευκολότερος στη επιτόπου συναρμολόγηση και ανάρτηση, ελαφρότερος και φθηνότερος. Επειδή έχει πολλά μικρά κομμάτια είναι ευκολότερο να υποστεί ψυχρό γαλβάνισμα σε μικρά γαλβανιστήρια.



*Σχήμα 10.22* Εσωτερική σκάλα πρόσβασης σε σωληνωτό πύργο ανεμογεννήτριας – ειδικός γερανός ανέγερσης πύργου ανεμογεννήτριας

Ο σωληνωτός πύργος είναι αισθητικά καλύτερος, το εσωτερικό του πύργου μπορεί να αποτελεί και το θάλαμο στέγασης όλων των οργάνων της ανεμογεννήτριας

και να έχει εσωτερική σκάλα ή και ασανσέρ πρόσβασης στο κουβούκλιο στην κορυφή του. Παρουσιάζει όμως δυσκολία στη μεταφορά του, ιδίως από κάποιο ύψος και πάνω, δυσκολία στην ανέγερσή του (απαιτείται οπωσδήποτε γερανός), και αν είναι μεγάλος πρέπει να γαλβανισθεί σε κομμάτια και να συγκολληθεί επί τόπου, αλλά τότε καταστρέφεται το γαλβάνισμα τοπικά.

Ο σωληνωτός πύργος έχει χαμηλή ιδιοσυχνότητα (μικρότερη από τη ιδιοσυχνότητα του δρομέα) γι' αυτό κατά την εκκίνηση του δρομέα η περιοχή ιδιοσυχνότητας του πύργου πρέπει να περνιέται γρήγορα για αποφυγή φαινομένων συντονισμού. Αντίθετα ο δικτυωτός πύργος έχει υψηλή ιδιοσυχνότητα ως προς την ιδιοσυχνότητα ή και τις πρώτες αρμονικές του δρομέα.

### 10.6.10 Έδρανα κύλισης

Τα έδρανα που συναντά κανείς σε μια ανεμογεννήτρια είναι τα έδρανα βήματος περυγίων (blade pitch bearing), το κύριο αξονικό έδρανο κύλισης (main shaft bearing), τα έδρανα του κιβωτίου ταχυτήτων (gearbox bearings), το έδρανο αλλαγής κατεύθυνσης (yaw bearing), και τα έδρανα της γεννήτριας (generator bearings). Τα έδρανα βήματος περυγίων και τα έδρανα αλλαγής κατεύθυνσης είναι στάσιμα ή αργά περιστρεφόμενα σε αντίθεση με τα έδρανα του κιβωτίου ταχυτήτων, της γεννήτριας και του κύριου αξονικού εδράνου που περιστρέφονται γρήγορα.



**Σχήμα 10.23** (α) Κύριο έδρανο κύλισης, (β) έδρανο κύλισης της γεννήτριας, (γ) έδρανο βήματος περυγίων, (δ) έδρανο συστήματος κλίσης.

### 10.6.11 Ηλεκτρικός ηλεκτρονικός πίνακας

Τοποθετείται συνήθως στη βάση του πύργου και με τις κατάλληλες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές διατάξεις, παρακολουθεί, ελέγχει και συντονίζει με ασφάλεια όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας.



*Σχήμα 10.24 Πίνακες ελέγχου ανεμογεννητριών τοποθετημένοι στη βάση (αριστερά) και στην άτρακτο (δεξιά).*

### 10.6.12 Βάση στήριξης (θεμελίωση)

Η βάση κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσα στο οποίο εγκιβοτίζεται ο κορμός του πύργου στήριξης. Το μέγεθος της βάσης στήριξης, (εξωτερικές διαστάσεις, διαστάσεις οπλισμού και κατηγορία σκυροδέματος) καθορίζεται μετά από προσεκτική μελέτη μηχανικού.



*Σχήμα 10.25 Κατασκευή βάσης στήριξης ανεμογεννήτριας από οπλισμένο σκυρόδεμα.*



## 10.7 Θεμελίωση – τοποθέτηση – στήριξη Α/Γ

Για την τοποθέτηση των Α/Γ απαιτείται προσεκτική στατική μελέτη τόσο για την κατασκευή της θεμελίωσης όσο και για τη συνολική στήριξη. Για αυτό το λόγο ακολουθούμε τα παρακάτω στάδια:

- α. Κατασκευή της θεμελίωσης. Η κατασκευή της βάσης θεμελίωσης γίνεται από οπλισμένο σκυρόδεμα, σύμφωνα με τη μελέτη θεμελίωσης.



*Σχήμα 10.26 Θεμελίωση πύργου ανεμογεννήτριας.*

- β. Ανύψωση του πύργου της Α/Γ. Ο πύργος ανυψώνεται και τοποθετείται τμηματικά πάνω στα θεμέλια.



*Σχήμα 10.27 Τμηματική τοποθέτηση πύργου ανεμογεννήτριας.*

Τα τμήματα του πύργου μεταφέρονται με μεγάλα οχήματα στο χώρο εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας.



*Σχήμα 10.28* Μεταφορά τμημάτων ανεμογεννήτριας.



*Σχήμα 10.29* Μεταφορά πύργου ανεμογεννήτριας με ειδικά διαμορφωμένα φορτηγά.



*Σχήμα 10.30* Μεταφορά τμημάτων ανεμογεννητριών με ειδικά διαμορφωμένα πλοία.

Η τοποθέτηση των τμημάτων γίνεται από εξειδικευμένα συνεργεία με τη βοήθεια ειδικού γερανού ανύψωσης. Η ύπαρξη σωστής και άνετης οδοποιίας αποτελεί τη βασική προϋπόθεση για την μεταφορά των τμημάτων του πύργου, της ατράκτου και των πτερυγίων του ρότορα στο σημείο εγκατάστασης της Α/Γ.



*Σχήμα 10.31 Τοποθέτηση εξαρτημάτων στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας.*

γ. Τοποθέτηση ατράκτου. Η άτρακτος ανυψώνεται και τοποθετείται στην κορυφή του πύργου.



*Σχήμα 10.32 Τοποθέτηση της ατράκτου στην κορυφή της ανεμογεννήτριας με τη βοήθεια ειδικού γερανού ανύψωσης.*

δ. Τοποθέτηση ρότορα. Ο ρότορας (συνήθως δίπτερος ή τρίπτερος) συναρμολογείται στη βάση του πύργου και στη συνέχεια ανυψώνεται και συνδέεται με την άτρακτο.



*Σχήμα 10.33 Τοποθέτηση ρότορα στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας.*

Τα αιολικά πάρκα στη θάλασσα αποτελούν την μοναδική διέξοδο για χώρες με υψηλό πληθυσμό και έλλειψη χώρου. Στα θαλάσσια αιολικά πάρκα έχουμε μεγαλύτερο κόστος κατασκευής αλλά και μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας.



*Σχήμα 10.34 Θαλάσσιο αιολικό πάρκο στο Horns Rev της Δανίας.*

# Κεφάλαιο 11

---

*Ηλεκτρικό σύστημα – Τύποι γεννητριών*

---

## 11.1 Ηλεκτρικό σύστημα – Τύποι γεννητριών

Το ηλεκτρικό σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει τη γεννήτρια, το διακοπτικό εξοπλισμό, τον εξοπλισμό προστασίας, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς καθώς και ένα σύστημα εποπτείας και ελέγχου. Η πρόοδος στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος, προσφέρει τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε διαφορετικές τοπολογίες ελέγχου ισχύος των ανεμογεννητριών, ανάλογα με την εφαρμογή. Οι δύο κύριες κατηγορίες των τοπολογιών αυτών είναι:

- οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας (fixed speed wind turbines)
- οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας (variable speed wind turbines).

Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών σταθερής συχνότητας, ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου, η ταχύτητα του ρότορα είναι σταθερή και καθορίζεται από τη συχνότητα του συνδεδεμένου δικτύου, τη σχέση του κιβωτίου ταχυτήτων και το σχεδιασμό της γεννήτριας. Σχεδιάζονται ώστε να παρουσιάζουν βέλτιστη αεροδυναμική απόδοση σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας αποτελούνται από μια επαγωγική γεννήτρια που συνδέεται κατευθείαν στο δίκτυο με μια διάταξη ομαλής εκκίνησης (soft starter) και μια συστοιχία πυκνωτών, για τη μείωση της κατανάλωσης έργου ισχύος. Είναι απλές κατασκευαστικά, στιβαρές και αξιόπιστες. Επίσης το κόστος των ηλεκτρικών της μερών είναι χαμηλό. Τα μειονεκτήματά της είναι η έλλειψη ελέγχου της έργου ισχύος, οι μηχανικές καταπονήσεις και τα προβλήματα ποιότητας ισχύος. Επειδή λειτουργούν σε σταθερή ταχύτητα, όλες οι ταλαντώσεις της ταχύτητας του ανέμου μεταδίδονται ως ταλαντώσεις στη μηχανική ροπή και στη συνέχεια ως ταλαντώσεις στην ηλεκτρική ισχύ στο συνδεδεμένο δίκτυο.

Για τους παραπάνω λόγους επικρατεί η τοπολογία της λειτουργίας των ανεμογεννητριών με μεταβλητές στροφές. Αυτές σχεδιάζονται ώστε να επιτυγχάνουν βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου. Μέσω της λειτουργίας με μεταβλητές στροφές γίνεται εφικτό να προσαρμόζεται η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα της ανεμογεννήτριας σε κάθε ταχύτητα ανέμου. Με τον τρόπο αυτό, ο λόγος ταχύτητας ακροπερυγίου λ διατηρείται σταθερός σε μία προκαθορισμένη τιμή που αντιστοιχεί στον συντελεστή μέγιστης αεροδυναμικής απόδοσης. Σε αντίθεση με τη διάταξη σταθερών στροφών, η διάταξη μεταβλητών στροφών διατηρεί τη ροπή της γεννήτριας σχεδόν σταθερή και οι διακυμάνσεις του ανέμου αποσβένονται μέσω της αλλαγής της ταχύτητας της γεννήτριας. Το ηλεκτρικό σύστημα μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών είναι πιο πολύπλοκο από το αντίστοιχο των σταθερών στροφών. Συνήθως αποτελείται από μια επαγωγική ή σύγχρονη γεννήτρια που συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ισχύος.

Τα πλεονεκτήματά αυτής της διάταξης είναι η αυξημένη απομάστευση ισχύος, η βελτιωμένη ποιότητα ισχύος και η μειωμένη καταπόνηση των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας. Τα μειονεκτήματά της είναι οι απώλειες στους μετατροπείς ισχύος, η πολυπλοκότητα και το αυξημένο κόστος.

## 11.2 Τύποι γεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να περιέχουν διάφορους τύπους γεννητριών, σύγχρονες ή ασύγχρονες (επαγωγικές).

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη ανεμογεννήτρια είναι η **ασύγχρονη**. Πλεονεκτήματά της είναι η στιβαρότητα, η κατασκευαστική απλότητα και το χαμηλό κόστος. Το κύριο μειονέκτημά της είναι ότι ο στάτης χρειάζεται ένα άεργο ρεύμα μαγνήτισης. Η ασύγχρονη μηχανή δεν περιέχει μόνιμους μαγνήτες και κύκλωμα διέγερσης. Το απαιτούμενο ρεύμα διέγερσης το λαμβάνει από μια άλλη πηγή, απορροφώντας άεργο ισχύ. Η άεργος ισχύς μπορεί να παρέχεται από το δίκτυο ή από μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος. Το μαγνητικό πεδίο της γεννήτριας αναπτύσσεται μόνο όταν συνδέεται με ένα ενεργό δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος. Στην περίπτωση που υπάρχει τέτοια διέγερση, το δημιουργούμενο μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με μια ταχύτητα που καθορίζεται από τον αριθμό των πόλων στα τυλίγματα και τη συχνότητα του ρεύματος, τη σύγχρονη ταχύτητα. Έτσι αν ο ρότορας περιστρέφεται με μια ταχύτητα που ξεπερνά τη σύγχρονη ταχύτητα, ένα ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται ανάμεσα στο πεδίο του ρότορα και το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, ανάλογο με τη σχετική ταχύτητα (ολίσθηση), που προκαλεί τα ρεύματα στα τυλίγματα του ρότορα. Η αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου του ρότορα με αυτό του στάτη έχει σαν αποτέλεσμα τη ροπή που ασκείται στο ρότορα. Οι ασύγχρονες γεννήτριες μπορεί να είναι:

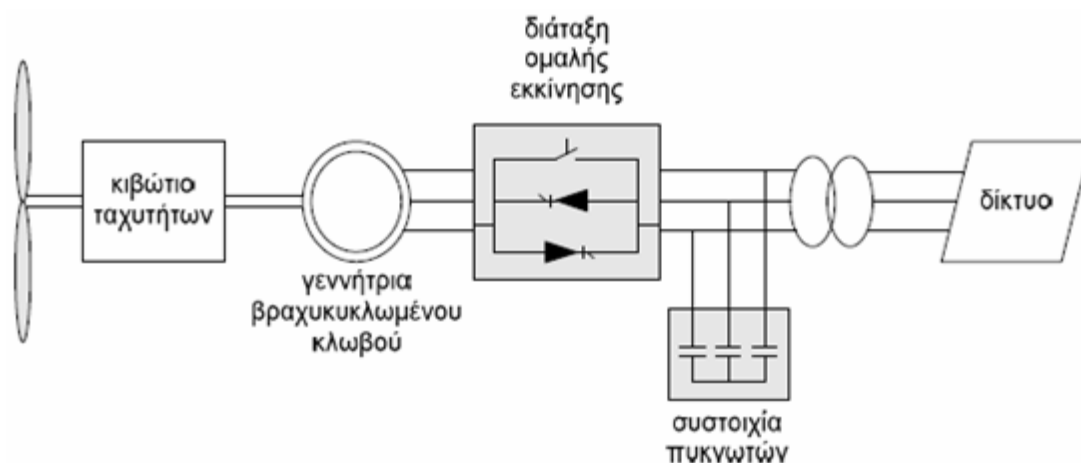
- βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel cage)
- δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor)

### 11.2.1 Ασύγχρονες γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού

Οι γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού επιλέγονται συχνά για αιολικές εφαρμογές, επειδή εμφανίζουν μηχανική απλότητα, υψηλή απόδοση και μικρές απαιτήσεις σε συντήρηση. Χρησιμοποιούνται σε διατάξεις είτε σταθερών είτε μεταβλητών στροφών. Σε διατάξεις σταθερών στροφών συνδέονται κατευθείαν στο δίκτυο όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Σε αυτήν την περίπτωση η ταχύτητά τους αλλάζει μόνο κατά ένα μικρό ποσοστό στις αλλαγές του ανέμου. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου μεταδίδονται κατευθείαν στο δίκτυο. Αυτές οι διακυμάνσεις είναι ιδιαίτερα κρίσιμες κατά τη διάρκεια της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο, όπου το ρεύμα εκκίνησης είναι περίπου 7-8 φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού. Σε ένα ασθενές δίκτυο αυτό το μεγάλο ρεύμα εκκίνησης μπορεί να προκαλέσει σοβαρές διαταραχές στην τάση. Για το λόγο αυτό η σύνδεση μιας τέτοιας γεννήτριας στο δίκτυο θα πρέπει να γίνεται σταδιακά ώστε να περιοριστεί το ρεύμα εκκίνησης.

Στις γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού, υπάρχει μια μοναδική αναλογία ανάμεσα στην πραγματική ισχύ, την άεργο ισχύ, την τερματική τάση και την

ταχύτητα του ρότορα. Αυτό σημαίνει ότι σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου η ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει παραπάνω πραγματική ισχύ μόνο αν η γεννήτρια τραβήξει από το δίκτυο παραπάνω άεργο ισχύ. Για τη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού που είναι απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο, η ποσότητα της απορροφούμενης άεργου ισχύος είναι ανεξέλεγκτη διότι ποικίλει ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Αν δεν υπάρχουν ηλεκτρικά στοιχεία για να παρέχουν την άεργο ισχύ, αυτή θα πρέπει να απορροφηθεί από το δίκτυο. Η άεργος ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο προκαλεί επιπρόσθετες απώλειες μεταφοράς και σε μερικές περιπτώσεις αστάθεια στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστοιχίες πυκνωτών και σύγχρονοι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος για τη μείωση της απορρόφησης άεργου ισχύος από το δίκτυο. Στην περίπτωση που η γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών, τα εναλλασσόμενα μεγέθη μεταβλητής συχνότητας που παράγονται από τη γεννήτρια, μετατρέπονται στα αντίστοιχα της επιθυμητής, σταθερής συχνότητας του δικτύου με τη χρήση μετατροπέων ισχύος.



Σχήμα 11.1 Γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο.

### 11.2.2 Ασύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα

Στην περίπτωση των γεννητριών δακτυλιοφόρου δρομέα τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ρότορα μπορούν να ελεγχθούν εξωτερικά και με τον τρόπο αυτό να επηρεαστεί η τάση του ρότορα. Τα τυλίγματα του ρότορα μπορούν να συνδεθούν εξωτερικά μέσω δακτυλιδιών και ψηκτρών ή μέσω εξοπλισμού ηλεκτρονικών ισχύος, ο οποίος μπορεί να απαιτεί ή όχι δακτυλίδια και ψήκτρες. Τα κύρια μειονεκτήματά της είναι το κόστος και η όχι και τόσο στιβαρή κατασκευή.

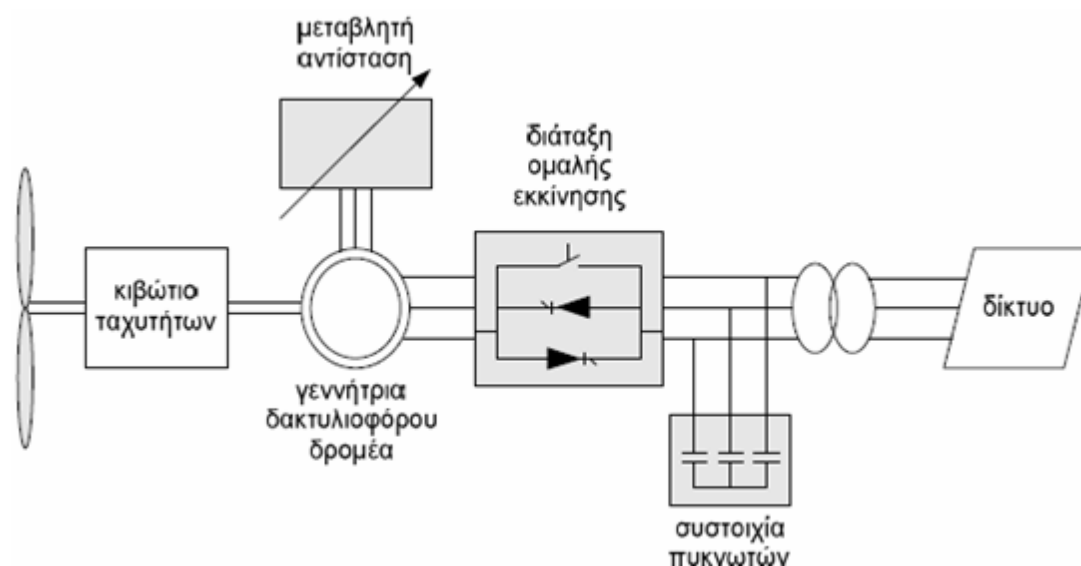
Οι κύριοι τύποι γεννητριών δακτυλιοφόρου δρομέα που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι:

- οι γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (σύστημα optislip)
- οι γεννήτριες διπλής τροφοδότησης (double fed).



Οι γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα έχουν ως σκοπό να ελαχιστοποιηθεί το φορτίο στις ανεμογεννήτριες κατά τη διάρκεια ριπών ανέμου. Με τον τρόπο αυτό, η γεννήτρια έχει τη δυνατότητα να μεταβάλει την ολίσθησή της (σε ένα μικρό εύρος τιμών) και να οδηγηθεί στη βέλτιστη ολίσθηση, εξασφαλίζοντας μικρότερες ταλαντώσεις στη ροπή εισόδου και στην ισχύ εξόδου. Οι γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα είναι γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα με μια μεταβλητή εξωτερική αντίσταση που συνδέεται στα τυλίγματα του δρομέα (Σχήμα 3.4). Η ολίσθηση του δρομέα αλλάζει μεταβάλλοντας τη συνολική αντίσταση του ρότορα μέσω ενός μετατροπέα, ο οποίος συνδέεται στον άξονα του ρότορα. Ο στάτης της γεννήτριας συνδέεται κατευθείαν στο δίκτυο. Η μεταβλητή ολίσθηση είναι ένας απλός, αξιόπιστος και οικονομικός τρόπος για να μειωθεί το φορτίο στην περίπτωση ριπών.

Τα μειονεκτήματά της είναι ότι το εύρος στο οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα περιορίζεται στο 0-10%, καθώς εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης του στάτη και ότι ο έλεγχος πραγματικής και άεργου ισχύος που επιτυγχάνεται δεν είναι αρκετά ικανοποιητικός. Επίσης ένα ποσοστό ισχύος καταναλώνεται στη μεταβλητή αντίσταση του ρότορα.

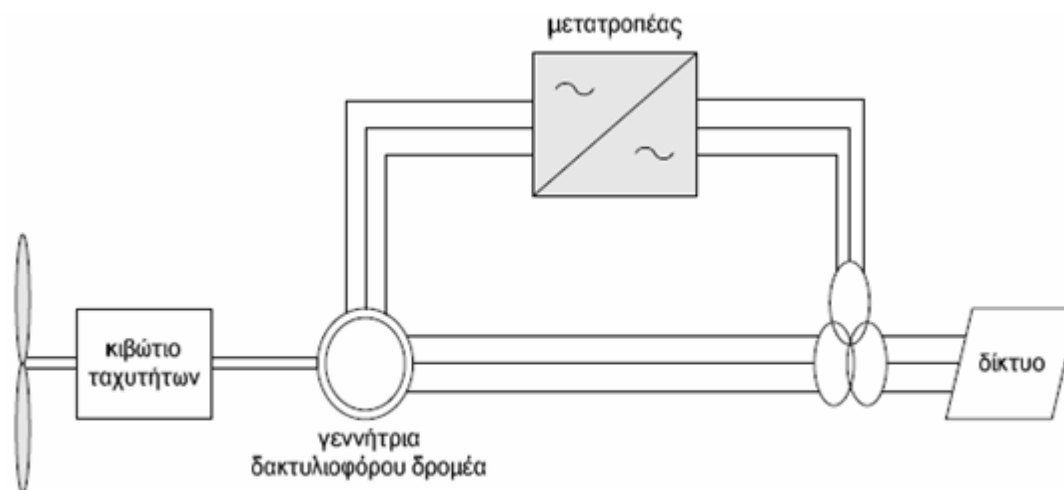


Σχήμα 11.2 Γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα.

Η γεννήτρια διπλής αποτελείται από μια γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με τα τυλίγματα του στάτη απευθείας συνδεδεμένα στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος και τα τυλίγματα του ρότορα συνδεδεμένα σε μια διάταξη διασύνδεσης Εναλλασσόμενου Ρεύματος /Συνεχούς Ρεύματος /Εναλλασσόμενου Ρεύματος (ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ) με μετατροπείς πηγής τάσης (Σχήμα 3.5). Ο όρος «διπλής τροφοδότησης» αναφέρεται στο γεγονός ότι η τάση στο στάτη εφαρμόζεται από το δίκτυο και η τάση στο ρότορα εφαρμόζεται από τον μετατροπέα ισχύος. Αυτό το σύστημα επιτρέπει τη λειτουργία υπό μεταβλητή ταχύτητα σε ένα μεγάλο, αλλά περιορισμένο, εύρος. Ο μετατροπέας αντισταθμίζει τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική συχνότητα εκχύνοντας στο ρότορα ένα ρεύμα με

μεταβλητή συχνότητα. Έτσι, κατά την κανονική λειτουργία αλλά και κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, η συμπεριφορά της γεννήτριας ελέγχεται από τον μετατροπέα ισχύος και τους ελεγκτές του. Η διάταξη των μετατροπέων αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης, ο ένας στην πλευρά του ρότορα και ο άλλος στην πλευρά του δικτύου, οι οποίοι ελέγχονται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Ο μετατροπέας που βρίσκεται στην πλευρά του ρότορα ελέγχει την πραγματική και την άεργο ισχύ ελέγχοντας τις συνιστώσες του ρεύματος του ρότορα, ενώ ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση ΣΡ ώστε η άεργος ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο να είναι ίση με μηδέν.

Ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας στο σύστημα οδήγησης, η ισχύς τροφοδοτείται στο ρότορα ή απορροφάται από αυτόν. Σε μια υπερσύγχρονη κατάσταση λειτουργίας, η ισχύς οδηγείται από το ρότορα μέσω του μετατροπέα στο δίκτυο, ενώ στην υποσύγχρονη κατάσταση λειτουργίας η κατεύθυνση της ισχύος είναι από το δίκτυο προς το ρότορα. Και στις δύο καταστάσεις ο στάτης τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο.



Σχήμα 11.3 Γεννήτρια διπλής τροφοδότησης.

Η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Έχει την ιδιότητα να ελέγχει ανεξάρτητα την πραγματική από την άεργο ισχύ μέσω του ρεύματος στο ρότορα. Δεν είναι αναγκαίο να μαγνητιστεί από το δίκτυο, καθώς μπορεί να μαγνητιστεί και από το δίκτυο του ρότορα. Έχει επίσης την ικανότητα να παράγει άεργο ισχύ, η οποία τροφοδοτείται στο δίκτυο μέσω του μετατροπέα που βρίσκεται προς την πλευρά του δικτύου. Παρόλα αυτά αυτός ο μετατροπέας υπό κανονικές συνθήκες λειτουργεί υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και δεν εμπλέκεται σε ανταλλαγή άεργου ισχύος ανάμεσα στην ανεμογεννήτρια και το δίκτυο. Στην περίπτωση που το δίκτυο είναι ασθενές με διακυμάνσεις στην τάση, η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να παράγει ή να καταναλώνει ένα ποσό άεργου ισχύος με σκοπό τον έλεγχο της τάσης. Το μέγεθος του μετατροπέα δεν σχετίζεται με τη συνολική ισχύ της γεννήτριας, αλλά με το επιλεγμένο εύρος

ταχυτήτων και άρα με την ολίσθηση. Η επιλογή του εύρους ταχυτήτων βασίζεται στην οικονομική βελτιστοποίηση και στην αυξημένη απόδοση.

Η **σύγχρονη** γεννήτρια είναι πιο πολύπλοκη και ακριβότερη σε σχέση με μια αντίστοιχη επαγωγική. Το σπουδαίο της πλεονέκτημα έναντι της επαγωγικής είναι ότι δεν απαιτεί άεργο ρεύμα μαγνήτισης. Το μαγνητικό πεδίο στη σύγχρονη μηχανή δημιουργείται μέσω μόνιμων μαγνητών ή με ένα συμβατικό τύλιγμα πεδίου. Δύο τύποι σύγχρονων μηχανών χρησιμοποιούνται σήμερα στις ανεμογεννήτριες:

- σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα
- σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών.

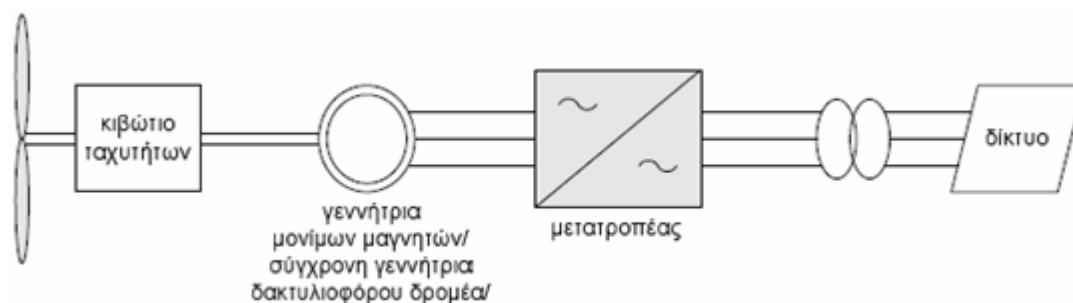
### 11.2.3 Σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα

Τα τυλίγματα του στάτη της σύγχρονης γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα συνδέονται κατευθείαν στο δίκτυο με αποτέλεσμα η ταχύτητα περιστροφής της να ορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου. Το τύλιγμα του ρότορα διεγείρεται με συνεχές ρεύμα. Αντίθετα με την επαγωγική γεννήτρια, η σύγχρονη γεννήτρια δεν χρειάζεται επιπλέον αντιστάθμιση άεργου ισχύος. Το τύλιγμα του ρότορα μέσα από το οποίο ρέει το συνεχές ρεύμα παράγει το πεδίο διέγερσης, το οποίο στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Η ταχύτητα της σύγχρονης γεννήτριας καθορίζεται από τη συχνότητα του στρεφόμενου πεδίου και από το πλήθος των ζευγών πόλων στο ρότορα.

Συνήθως συνδέονται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα (Σχήμα 3.6), μέσω του οποίου επιτυγχάνεται λειτουργία με μεταβλητές στροφές και ομαλότερη σύνδεση με το δίκτυο. Το κύριο μειονέκτημά της είναι το αυξημένο κόστος λόγω της κατασκευαστικής πολυπλοκότητας και του μεγάλου μετατροπέα ισχύος.

### 11.2.4 Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών

Οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών στις ανεμογεννήτριες, έχουν τη ιδιότητα να αυτοδιεγείρονται και έτσι μπορούν να λειτουργούν υπό υψηλό συντελεστή ισχύος και υψηλή απόδοση. Παρόλα αυτά τα υλικά που χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστούν αυτές οι μηχανές είναι ακριβά και παρουσιάζουν δυσκολία στην επεξεργασία τους κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Επίσης, ο μετατροπέας ισχύος που απαιτείται για τη μετατροπή της τάσης και συχνότητας που παράγεται από τη μηχανή στην τάση και συχνότητα του δικτύου, συνεισφέρει στην αύξηση του κόστους. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι τα μαγνητικά υλικά της μηχανής είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό, επιβάλλεται η επίβλεψη της θερμοκρασίας του ρότορα και η χρήση ενός συστήματος ψύξης.



**Σχήμα 11.4** Σύνδεση σύγχρονης γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα ή γεννήτριας μονίμων μαγνητών με το δίκτυο.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένας άλλος τύπος γεννήτριας που χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες, οι γεννήτριες **υψηλής τάσης**.

Συνήθως, η ονομαστική τάση των ανεμογεννητριών είναι τα 690 V και για το λόγο αυτό απαιτούν ένα μετασχηματιστή στην άτρακτο ή στη βάση του πύργου. Το κύριο κίνητρο για την αύξηση της τάσης της γεννήτριας είναι η μείωση των ρευμάτων το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των απωλειών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στη μείωση του μεγέθους της γεννήτριας και στην αύξηση της απόδοσής της ειδικά σε μεγάλα φορτία. Αν η τάση της μηχανής συμπίπτει με την τάση του δικτύου η σύνδεση του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί χωρίς μετασχηματιστή. Οι γεννήτριες υψηλής τάσης μπορεί να είναι είτε σύγχρονες είτε ασύγχρονες. Είναι μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση για τις μεγάλες ανεμογεννήτριες που ξεπερνούν τα 3 MW. Τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι το υψηλό κόστος του συνολικού συστήματος, η αβεβαιότητα σχετικά με τη μακροχρόνια επίδοσή τους και οι απαιτήσεις ασφαλείας, οι οποίες είναι πιο σύνθετες από τις απαιτήσεις μηχανών χαμηλότερης τάσης.

# Κεφάλαιο 12

---

*Συστήματα Ανεμογεννητριών*

---

## 12.1 Καθορισμός της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ

Η ονομαστική ισχύς  $P_{nom}$  της Α/Γ, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_n = \frac{1}{2} \rho_\alpha \cdot A \cdot C_p \cdot V_n^3 \cdot \eta_m$$

όπου,

$\rho_\alpha$  = πυκνότητα του αέρα σε  $\text{Kg/m}^3$ .

$C_p$  = συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας (καθαρός αριθμός).

$V_n$  = ονομαστική ταχύτητα του ανέμου, που υπολογίζεται από τη σχέση

$V_n = (1,5 \text{ έως } 1,9)$  του  $V_\mu$  και στην πράξη συνήθως λαμβάνεται  $V_n = 1,8V_\mu$ .

$\eta_m$  = μηχανικός βαθμός απόδοσης της Α/Γ που εξαρτάται από τις απώλειες κενού φορτίου, οι οποίες λαμβάνονται στο 100% περίπου της ονομαστικής ισχύος ( $P_{K\cdot\Phi} = 10\% P_n = 0,1P_n$ ).

$$\eta_m = \frac{P_n}{P_n + P_{K\cdot\Phi}}$$

και

$$\eta_m = \frac{P_n}{P_n + 0,1P_n} = 0,90$$

$P_n$  = ονομαστική ισχύς της Α/Γ σε W.

Μπορούμε να υπολογίσουμε τη διάμετρο της φτερωτής του δρομέα αν θεωρήσουμε ότι η ονομαστική ταχύτητα είναι  $V_n = 1,8 V_\mu$ , απ' τη σχέση:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

όπου

$$A = \frac{2P_n}{\rho_\alpha \cdot C_p \cdot \eta_m \cdot (1,8V_\mu)^3}$$

Στους υπολογισμούς λαμβάνουμε:

$C_p = 0,385$ ,  $\rho_\alpha = 1,25 \text{ Kg/m}^3$  και  $\eta_m = 0,9$ .

## 12.2 Καθορισμός της ταχύτητας στην οποία η Α/Γ αρχίζει να λειτουργεί

Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της Α/Γ  $V_{mi}$  εξαρτάται από τις απώλειες κενού φορτίου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{K\cdot\Phi} = \frac{1}{2} \rho_{\alpha} \cdot C_p \cdot A \cdot V_{mi}^3$$

οπότε,

$$V_{mi} = \sqrt[3]{\frac{P_{K\cdot\Phi}}{\frac{1}{2} \rho_{\alpha} \cdot C_p \cdot A}}$$

Και επειδή

$$P_{K\cdot\Phi} = 0,1 \cdot P_n$$

θα έχουμε:

$$V_{mi} = \sqrt[3]{\frac{0,2P_n}{\rho_{\alpha} \cdot C_p \cdot A}}$$

όπου,

$\rho_{\alpha}$  = πυκνότητα αέρα σε  $\text{Kg/m}^3$  (συνήθως λαμβάνεται  $\rho_{\alpha} = 1,25 \text{ Kg/m}^3$ ).

$C_p$  = συντελεστής ισχύος (συνήθως λαμβάνεται  $C_p = 0,385$ ).

$A$  = επιφάνεια σάρωσης της φτερωτής της Α/Γ σε  $\text{m}^2$ .

$P_n$  = ονομαστική ισχύς της Α/Γ σε  $\text{W}$ .

$V_{mi}$  = ταχύτητα έναρξης λειτουργίας σε  $\text{m/sec}$ .

## 12.3 Καθορισμός της ταχύτητας διακοπής λειτουργίας της Α/Γ

Η ταχύτητα διακοπής της λειτουργίας της Α/Γ,  $V_{mo}$ , καθορίζεται για το ύψος αναφοράς των 10m και κυμαίνεται από 22 μέχρι 25m/sec. Οι κατασκευαστές στα χαρακτηριστικά στοιχεία της Α/Γ μας δίνουν την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας, την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας και την ταχύτητα διακοπής. Στην πράξη για Α/Γ μέσης ισχύος, συνήθως έχουμε:

- Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας 3 – 5 m/sec.
- Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας 20 – 25 m/sec.
- Ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας 12 – 15 m/sec.

## 12.4 Ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος

Οι ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος κατασκευάζονται για ισχύ από 100W μέχρι 30KW. Είναι τρίπτερες και έχουν τη δυνατότητα εκμετάλλευσης ασθενούς αιολικού δυναμικού (χαμηλής ταχύτητας ανέμου). Οι ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος χρησιμοποιούνται σε αυτόνομα ή υβριδικά συστήματα για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και έχουν τη δυνατότητα σύνδεσης στο κεντρικό δίκτυο για τη διοχέτευση της ηλεκτρικής ενέργειας που πλεονάζει.

Έχουν γίνει αποδεκτές από το κοινωνικό σύνολο, τοποθετούνται σε αγροικίες (σε κήπους ή σε οροφές κατοικιών), ακόμη και σε οικιστικές ζώνες, παρέχοντας πράσινη ενέργεια (αποφυγή της έκλυσης περίπου δύο κιλών διοξειδίου του άνθρακα για κάθε KWh που παράγεται).

Τα βασικότερα μέρη μιας ανεμογεννήτριας μικρής ισχύος είναι ο δρομέας, η ηλεκτρογεννήτρια, το δισκόφρενο, το σύστημα προσανεμισμού, ο πυλώνας και το σύστημα λειτουργίας και ελέγχου.

Το βασικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας μικρού μεγέθους είναι η καμπύλη ισχύος, την οποία ο κατασκευαστής μας δίνει μαζί με τα υπόλοιπα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά, που είναι:

- Η ονομαστική ισχύς σε W ή σε KW
- Η ταχύτητα εκκίνησης της ανεμογεννήτριας σε m/sec
- Η ταχύτητα στην οποία έχουμε την ονομαστική ισχύ σε m/sec
- Η μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας σε m/sec
- Η ονομαστική τάση
- Ο αριθμός των πτερυγίων
- Η διάμετρος του ρότορα
- Το ύψος του ιστού
- Το σύστημα λειτουργίας και ασφάλειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την αιολική ενέργεια γίνεται πλέον αποδεκτή από την κοινωνία. Σε πολλές περιπτώσεις έχουμε τοποθέτηση Α/Γ μικρής ισχύος με χαμηλή όχληση μέσα σε κατοικημένες περιοχές.

Ο άνεμος είναι μια καθαρή και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος και είναι πλέον επιτακτική ανάγκη η χρήση του. Για τη χώρα μας είναι αναγκαία η συστηματική εκμετάλλευση του αξιόλογου αιολικού δυναμικού.



Για τη σωστή και ασφαλή λειτουργία της Α/Γ υπάρχει μια σειρά από όργανα και διατάξεις κατάλληλα συνδεδεμένα και τοποθετημένα στο εσωτερικό ηλεκτρικού πίνακα αυξημένης προστασίας (IP54). Στο εσωτερικό του πίνακα είναι τοποθετημένοι και οι μετατροπείς (inverter) για τη μετατροπή του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος σε εναλλασσόμενο με στοιχεία 230V/50Hz ή 3·400V/50Hz.

## 12.5 Βασικές προϋποθέσεις για την εγκατάσταση αιολικού συστήματος μικρής ισχύος

1. Η σωστή εκτίμηση των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής που πρόκειται να γίνει η εγκατάσταση.
2. Η σωστή επιλογή του τύπου και του μεγέθους της ανεμογεννήτριας, με βάση τα υπάρχοντα ή μετρούμενα ανεμολογικά στοιχεία. Θα πρέπει να γίνεται σύγκριση των στοιχείων των προδιαγραφών της ανεμογεννήτριας με παραμέτρους όπως η μέση και η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου, η ένταση του ανέμου, η τραχύτητα και τα χαρακτηριστικά του εδάφους.
3. Η σωστή επιλογή της θέσης τοποθέτησης της Α/Γ, με βάση τη μορφολογία του εδάφους και της γύρω περιοχής.
4. Ο σωστός υπολογισμός του πύργου (πυλώνα) εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας. Ο υπολογισμός θα πρέπει να γίνεται με βάση τα ακραία στατικά και κοπωτικά φορτία. Οι χαλύβδινοι πυλώνες να μελετηθούν και να κατασκευαστούν σύμφωνα με τα αναγνωρισμένα διεθνή πρότυπα. Οι χαλύβδινοι πυλώνες με τα συρματόσχοινα να προστατεύονται επαρκώς από τη διάβρωση.
5. Ο σωστό υπολογισμός της θεμελίωσης του πύργου (πυλώνα) της εγκατάστασης.
6. Αξιόπιστο σύστημα ελέγχου και ασφάλειας της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Τα σύστημα αυτό θα πρέπει να καθορίζει με ακρίβεια τις συνθήκες κάτω από τις οποίες θα μπορεί να λειτουργεί ή να τίθεται εκτός λειτουργίας με ασφάλεια μια Α/Γ.

Δεν πρέπει να γίνεται εγκατάσταση Α/Γ χωρίς να συνοδεύεται από προδιαγραφές που να είναι σύμφωνες με τα διεθνή πρότυπα και κανονισμούς. Ακόμη δεν πρέπει να γίνεται εγκατάσταση Α/Γ χωρίς την εκτίμηση των ανεμολογικών στοιχείων και των χαρακτηριστικών της περιοχής.

## 12.6 Αιολικά συστήματα ανεμογεννητριών μικρής ισχύος

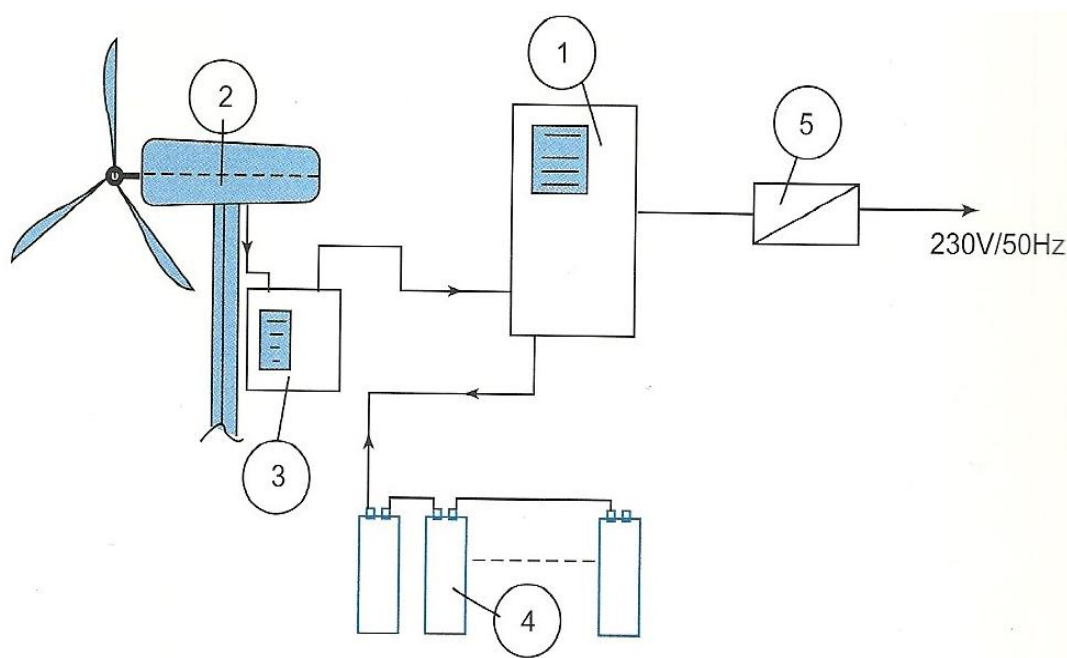
Τα αιολικά συστήματα, όπως και τα φωτοβολταϊκά, στην πράξη μπορούν να λειτουργήσουν:

- α. Ως αυτόνομα αιολικά συστήματα
- β. Ως διασυνδεδεμένα με το δίκτυο χαμηλής τάσης

### 12.6.1 Αυτόνομα αιολικά συστήματα

Τα αυτόνομα αιολικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε απομονωμένες κατοικίες ή αγρικές, σε τηλεπικοινωνιακούς σταθμούς, σε γεωτρήσεις, σε κτηνοτροφικές μονάδες, τροχόσπιτα αναμεταδότες κλπ.

Θα πρέπει να συνδέονται με συστοιχία συσσωρευτών, για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που περισσεύει και να συνδέονται μέσω ειδικών μετατροπέων συσσωρευτών COMPACT (με ενσωματωμένο φορτιστή και ρυθμιστή φόρτισης) με την κατανάλωση.

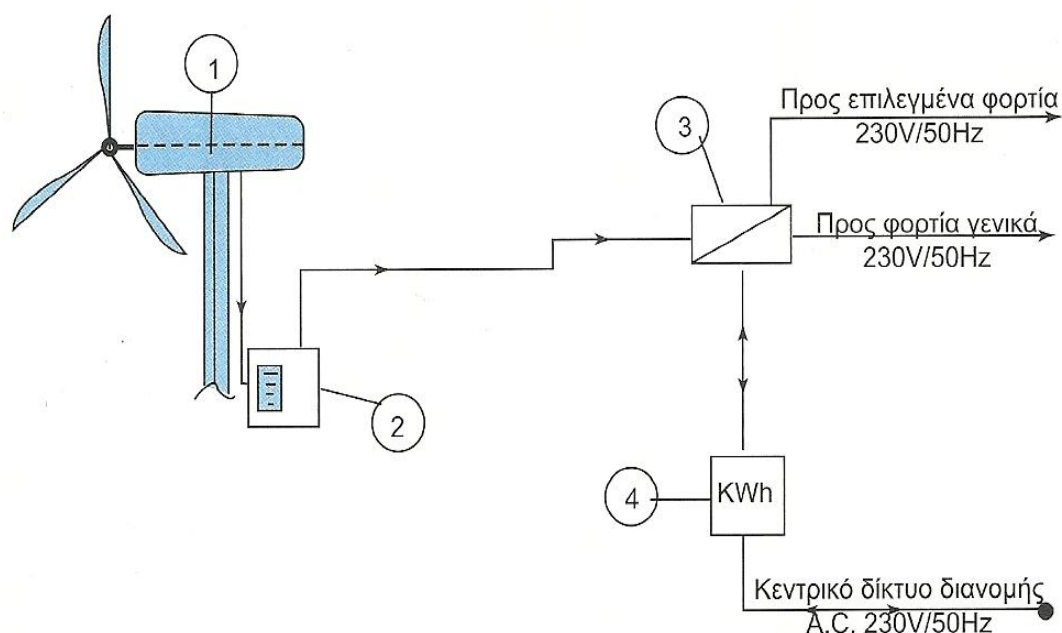


Σχήμα 12.1 Αυτόνομο αιολικό σύστημα.

1. Μετατροπέας COMPACT (με ενσωματωμένο φορτιστή και ρυθμιστή φόρτισης).
2. Ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος.
3. Πίνακας ελέγχου και λειτουργίας της Α/Γ.
4. Συσσωρευτές αποθήκευσης.
5. Πίνακας τροφοδοσίας καταναλώσεων 230V/50Hz.

## 12.6.2 Διασυνδεδεμένα αιολικά συστήματα

Τα διασυνδεδεμένα, με το δίκτυο χαμηλής τάσης, αιολικά συστήματα, μπορούν μέσω ειδικού πίνακα ελέγχου και λειτουργίας να τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τις καταναλώσεις και να στέλνουν την ενέργεια που περισσεύει ή εξολοκλήρου στο δίκτυο χαμηλής τάσης, μέσω διπλού ψηφιακού μετρητή.



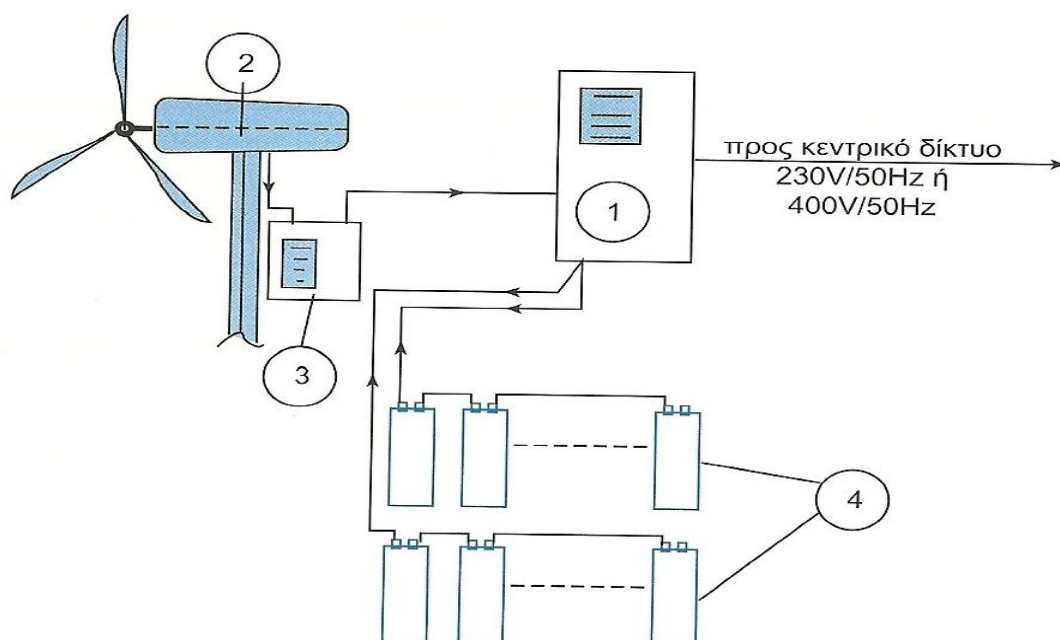
Σχήμα 12.2 Διασυνδεδεμένο αιολικό σύστημα.

1. Ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος.
2. Πίνακας ελέγχου και λειτουργίας Α/Γ.
3. Πίνακας λειτουργίας και ελέγχου της εγκατάστασης με δυνατότητα επιλογής φορτίων, δυνατότητα διοχέτευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που πλεονάζει, προς το κεντρικό δίκτυο διανομής και αυτόματης διακοπής της σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο διανομής, σε περίπτωση διακοπής ρεύματος.
4. Μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας διπλής εγγραφής.

## 12.6.3 Διασυνδεδεμένα αιολικά συστήματα με δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το κεντρικό δίκτυο διανομής γίνεται μέσω ενός ειδικού πολυμορφικού σταθμού στον οποίο συνδέονται και οι συσσωρευτές αποθήκευσης. Το σύστημα αυτό αυξάνει το συντελεστή διαθεσιμότητας του συστήματος, έχει τη δυνατότητα να παράγει ισχύ την περίοδο που η ανεμογεννήτρια

τίθεται εκτός λειτουργίας λόγω χαμηλής ή λόγω πολύ υψηλής ταχύτητας, έχει πολύ όμως αυξημένο κοστολόγιο λόγω των συσσωρευτών αποθήκευσης και της ειδικής πολυμορφικής μονάδας.



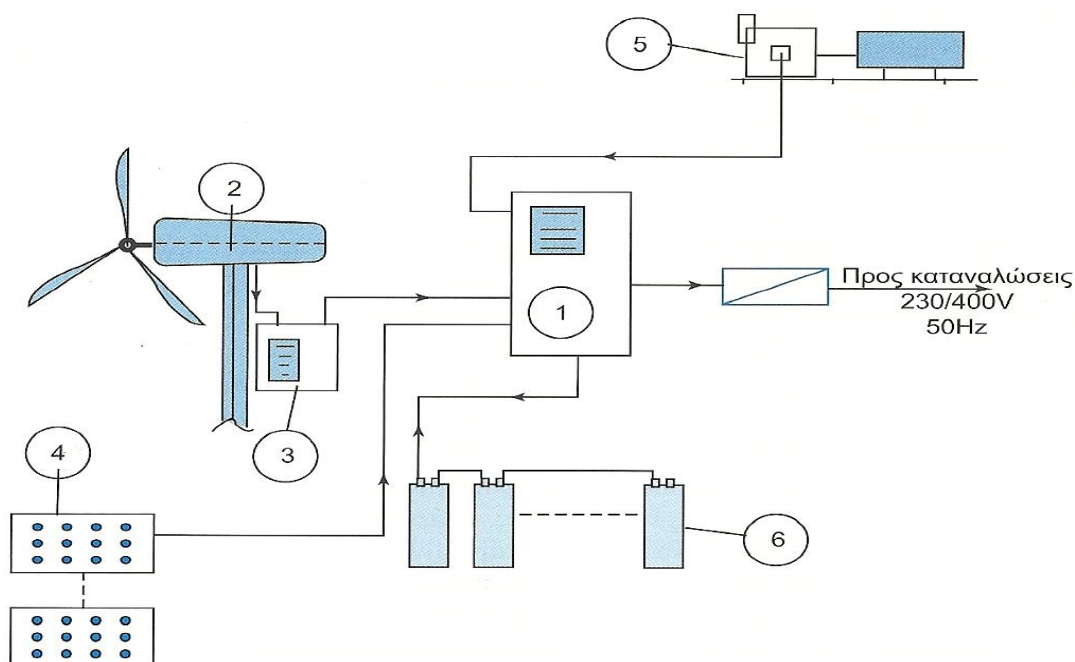
Σχήμα 12.3 Διασυνδεδεμένο αιολικό σύστημα με συσσωρευτές αποθήκευσης.

1. Ειδικός πολυμορφικός σταθμός ελέγχου και μετατροπή ισχύος.
2. Ανεμογεννήτρια μέσης ισχύος 230V/50Hz ή 400V/50Hz.
3. Πίνακας ελέγχου και λειτουργίας ανεμογεννήτριας.
4. Συστοιχίες συσσωρευτών αποθήκευσης.

## 12.6.4 Υβριδικά συστήματα με ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος

Για εγκαταστάσεις που πρέπει να λειτουργούν αδιάλειπτα, αλλά βρίσκονται πολύ μακριά από το δίκτυο διανομής, έχουμε συνδυασμό ανεμογεννήτριας, φωτοβολταϊκών συλλεκτών και ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (H/Z).

Σε ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις επιμέρους μονάδες, ελέγχεται από μια κεντρική μονάδα (πολυμορφικός σταθμός μετατροπής ισχύος και αδιάλειπτης λειτουργίας) η οποία δίνει εντολή στην ντιζελογεννήτρια να λειτουργήσει, όταν η παραγόμενη από τις άλλες μονάδες ή η αποθηκευμένη ενέργεια δεν επαρκεί.



Σχήμα 12.4 Υβριδικό σύστημα με ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος.

1. Πολυμορφικός σταθμός μετατροπής ισχύος και αδιάλειπτης λειτουργίας.
2. Ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος.
3. Πίνακας ελέγχου και λειτουργίας Α/Γ.
4. Φ/Β συλλέκτες.
5. Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (Η/Ζ).
6. Συστοιχία συσσωρευτών αποθήκευσης.
7. Πίνακας τροφοδοσίας καταναλώσεων (μονοφασικός ή τριφασικός).

### 12.6.5 Κατάταξη ανεμογεννητριών μικρής ισχύος

Ανάλογα με το εύρος της ισχύος οι ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες.

- α. Κατηγορία 1<sup>η</sup> με ισχύ από 0,1 μέχρι 1KW. Βασικό χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας είναι η παραγόμενη συνεχή τάση (12, 24, 48V) και η σύνδεση με συσσωρευτές αποθήκευσης μέσω ενός μετατροπέα συσσωρευτών.
- β. Κατηγορία 2<sup>η</sup> με ισχύ από 1 μέχρι 5KW. Βασικό χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας είναι η παραγόμενη μονοφασική τάση (1×230V/50Hz). Μπορούν να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια και τις καταναλώσεις αλλά και στο κεντρικό δίκτυο, όταν υπάρχει περίσσειμα ενέργειας. Στον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας των ανεμογεννητριών αυτής της κατηγορίας υπάρχουν μικροεπεξεργαστές για τη ρύθμιση της στρέψης των πτερυγίων

του δρομέα, τον έλεγχο των στροφών της γεννήτριας κλπ. Όταν εξυπηρετούν εγκαταστάσεις αδιάλειπτης λειτουργίας συνδέονται και με συστοιχία συσσωρευτών αποθήκευσης. Η σύνδεση με το δίκτυο γίνεται μέσω ειδικού μετατροπέα δικτύου.

- γ. Κατηγορία 3<sup>η</sup> με ισχύ από 5 μέχρι 30KW. Βασικό χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας είναι η παραγόμενη τριφασική τάση (3×400V/50Hz). Συνδέονται κατά κύριο λόγο με το κεντρικό δίκτυο διανομής μέσω ειδικών ηλεκτρονικών διατάξεων. Στον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας της μονάδας, υπάρχουν μικροεπεξεργαστές μεγάλων υπολογιστικών δυνατοτήτων, παρέχοντας υψηλής πιστότητας ρυθμίσεις στα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη της Α/Γ. Σε ειδικές περιπτώσεις μπορούν να συνδεθούν και με συσσωρευτές αποθήκευσης, μέσω ενός ειδικού πολυμορφικού σταθμού ελέγχου και μετατροπής ισχύος, αυξάνοντας τον συντελεστή διαθεσιμότητας της εγκατάστασης.

## 12.7 Ανεμογεννήτριες μέσης και μεγάλης ισχύος

Οι ανεμογεννήτριες χαρακτηρίζονται μέσης ισχύος όταν κατασκευάζονται για ισχύ από 30 μέχρι 200KW και μεγάλης όταν κατασκευάζονται πάνω από τα 200KW. Είναι συνήθως σύγχρονες, οριζόντιου άξονα και ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων του ρότορα διακρίνονται σε:

- Μονόπτερες
- Δίπτερες
- Τρίπτερες

Οι ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος τοποθετούνται κατά κύριο λόγο σε αιολικά πάρκα, τα οποία αποτελούν την πιο οικονομική εφαρμογή αιολικής ενέργειας, λόγω σημαντικής μείωσης του κόστους κατασκευής και συντήρησης.

Επειδή η αιολική ενέργεια σε μια Α/Γ, είναι ανάλογη του μήκους των πτερυγίων που θα χρησιμοποιηθούν, η τοποθέτηση μεγάλων Α/Γ, βελτιώνει την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής. Το κύριο κατασκευαστικό στοιχείο που καθορίζει το μέγεθος μιας Α/Γ είναι το εμβαδόν της φτερωτής ή διαφορετικά η επιφάνεια σάρωσης, καθώς απ' αυτό εξαρτάται η διαθέσιμη αιολική ενέργεια την οποία πρέπει να αξιοποιήσει η Α/Γ.

Η Α/Γ μεγάλης ισχύος τοποθετείται σε μεγάλο ύψος από το έδαφος (πύργος ή πυλώνας με μεγάλο ύψος) στο οποίο η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη και επομένως και η ισχύς που παράγεται (είναι ανάλογη της ταχύτητας στον κύβο) είναι αρκετά μεγαλύτερη.

Επειδή η χώρα μας χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα σύνθετη τοπογραφία με μεγάλες υψομετρικές εναλλαγές, υπάρχουν περιοχές με αξιόλογο αιολικό δυναμικό

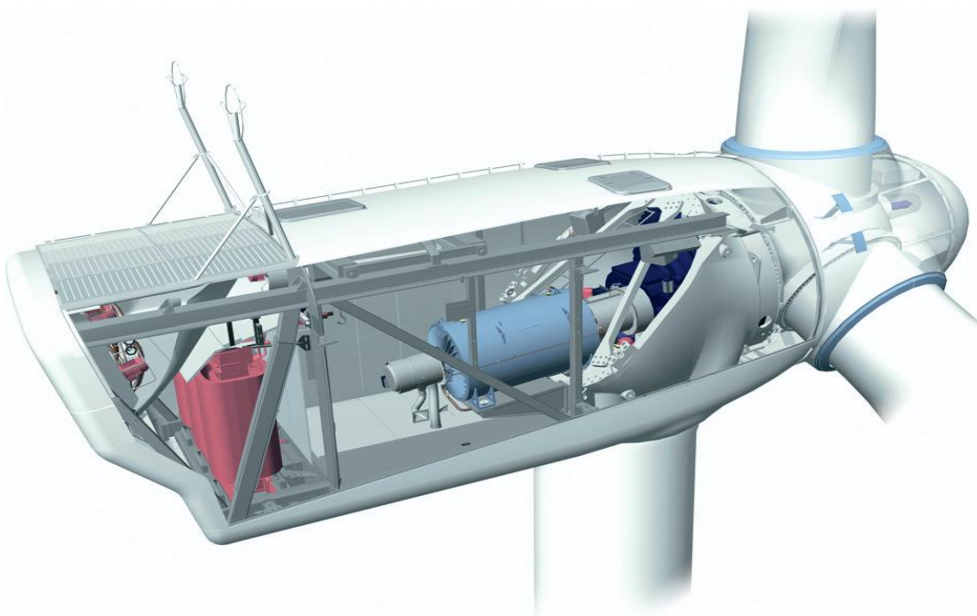
όπου δεν ευνοείται η χρήση μεγάλων Α/Γ και είναι προτιμότερη η τοποθέτηση μηχανών με ονομαστική ισχύ από 300 μέχρι 600KW περίπου.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι για τις περιοχές όπου η μορφολογία του εδάφους το επιτρέπει (ιδίως στις κορυφογραμμές) είναι επιτακτική η ανάγκη τοποθέτησης Α/Γ με ισχύ πάνω από 1MW.

Αν θελήσουμε να συγκρίνουμε τη μέγιστη ενεργειακή αξιοποίηση μιας κορυφογραμμής μήκους 2km με υποτιθέμενη μέση ταχύτητα ανέμου 8,5m/sec, χρησιμοποιώντας δύο μεγέθη Α/Γ, θα έχουμε:

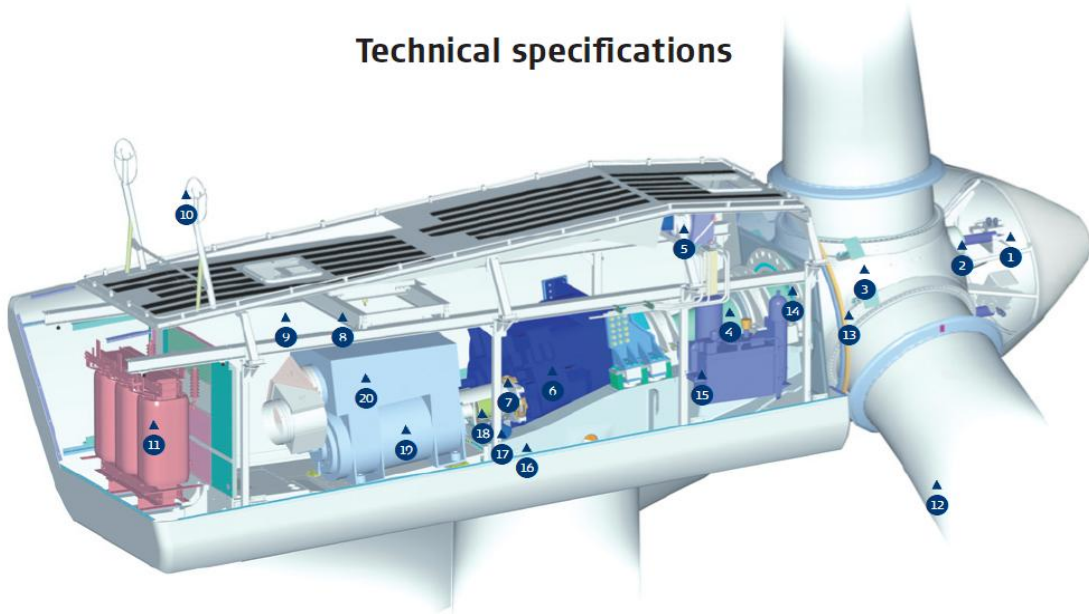
- α. Ανεμογεννήτρια με μήκος πτερυγίων  $r = 23,5\text{m}$  με το οποίο έχουμε ονομαστική ισχύ περίπου 660KW. Αριθμός Α/Γ στο μήκος των 2km για ελάχιστη απόσταση  $l \geq 3D$ ,  $N = (L/3D)+1 = (L/6r)+1 \rightarrow N = (2000/6 \cdot 23,5) + 1 = 15,18$  και  $N = 15$ . Από τη χαρακτηριστική της ενεργειακής παραγωγής μιας Α/Γ των 660KW, για μέση ταχύτητα 8,5m/sec, έχουμε μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας  $E = 2,3\text{GWh}$ , και συνολικά  $E_{\text{ολ}} = 15 \cdot E = 34,5 \text{ GWh}$ .
- β. Ανεμογεννήτρια με μήκος πτερυγίων  $r = 45\text{m}$  με το οποίο έχουμε ονομαστική ισχύ περίπου 3MW. Αριθμός Α/Γ στο μήκος των 2km,  $N = (2000/6 \cdot 45) + 1 = 8,4$  και  $N = 8$ . Από τη χαρακτηριστική της ενεργειακής παραγωγής μιας Α/Γ των 3MW, για μέση ταχύτητα 8,5m/sec, έχουμε μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας  $E = 9,7\text{GWh}$  και συνολικά  $E_{\text{ολ}} = 8 \cdot E = 77,6\text{GWh}$ .

Επομένως στην ίδια κορυφογραμμή με Α/Γ των 3MW, σε ετήσια βάση, έχουμε 2,25 φορές περισσότερη ενέργεια.



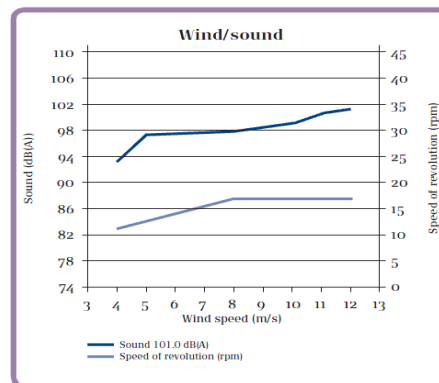
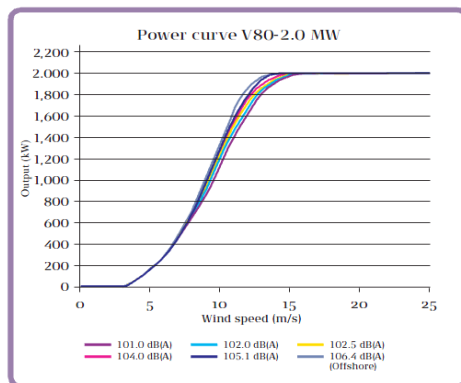
Εσωτερική διάταξη εξαρτημάτων και συσκευών Α/Γ V90 – 3,0MW/Vestas

## Technical specifications



Εσωτερική διάταξη εξαρτημάτων και συσκευών Α/Γ V80 – 2,0MW/Vestas

- |   |  |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Σύστημα ελέγχου κεντρικού τμήματος ρότορα</li> <li>2. Επιφάνεια βήματος γραναζιών</li> <li>3. Κεντρικός βραχίονας ρότορα</li> <li>4. Κύριος άξονας μετάδοσης κίνησης</li> <li>5. Ψυγείο λαδιού</li> <li>6. Κιβώτιο μετάδοσης κίνησης με γρανάζια</li> <li>7. Μηχανικό δισκόφενο</li> <li>8. Μηχανισμός διατήρησης και ρύθμισης ισχύος</li> <li>9. Έλεγχος αέρα οροφής με μηχανισμό ρύθμισης ανοίγματος</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>10. Υπερηχητικός αισθητήρας</li> <li>11. Μετασχηματιστής υψηλής τάσης</li> <li>12. Πτερύγιο ρότορα</li> <li>13. Βραχίονας πτερυγίου ρότορα</li> <li>14. Σύστημα διάταξης (σύνδεσης) του ρότορα</li> <li>15. Υδραυλική μονάδα</li> <li>16. Βάση μηχανής</li> <li>17. Σύστημα περιστροφής οδοντωτών τροχών</li> <li>18. Σύνθετος δίσκος σύνδεσης</li> <li>19. Σύστημα “optiSpeed” γεννήτριας</li> <li>20. Σύστημα ψύξης γεννήτριας</li> </ol> |
|---|--|



Χαρακτηριστικές καμπύλες ανεμογεννήτριας V80 – 2,0MW/Vestas (στοιχεία κατασκευαστή).



## 12.8 Βασικές προϋποθέσεις για την εγκατάσταση αιολικού συστήματος με Α/Γ μέσης ή μεγάλης ισχύος

Επειδή η τοποθέτηση Α/Γ, μέσης και ιδιαίτερα μεγάλης ισχύος, κοστίζει πάρα πολύ και οι απαιτήσεις για υψηλές αποδόσεις είναι πολλές, η μελέτη για την εγκατάσταση και λειτουργία απαιτεί πολλά και προσεκτικά βήματα καθώς και υπολογισμούς μεγάλης ακρίβειας.

### A. Επιλογή της θέσης εγκατάστασης της Α/Γ

Σε ένα αιολικό σύστημα για να γίνει προσδιορισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή το κατά προσέγγιση κόστος αυτής, θα πρέπει να είναι γνωστή η ακριβής θέση εγκατάστασης των Α/Γ. Οι παράμετροι που καθορίζουν την επιλογή της θέσης εγκατάστασης των Α/Γ, είναι:

#### 1. Το αιολικό δυναμικό

Η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού γίνεται από στοιχεία που έχουμε:

- Από τυχόν αιολικούς χάρτες της περιοχής
- Από τους υφιστάμενους ανεμογράφους της περιοχής
- Από πιθανούς δείκτες εκτίμησης του αιολικού δυναμικού της περιοχής

Για να είναι ακριβής η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, εκτός από τη μέση ταχύτητα του ανέμου, θα πρέπει να έχουμε και αναλυτικές πληροφορίες για την κατανομή της πιθανότητας εμφάνισης των διάφορων τιμών ταχύτητας του ανέμου, στη διάρκεια του έτους.

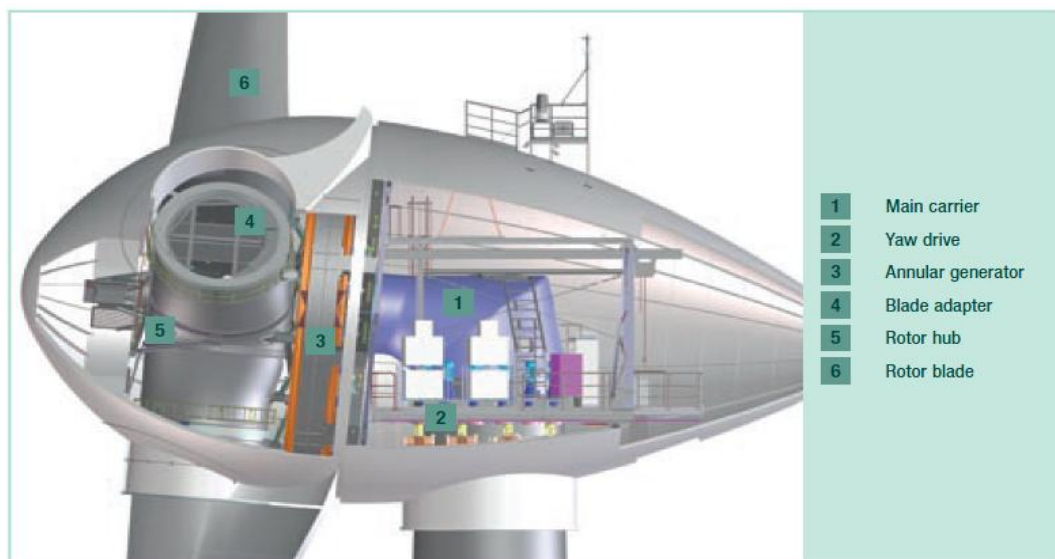
Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στα χρονικά διαστήματα που έχουμε τιμές ταχυτήτων για τις οποίες η Α/Γ δεν εργάζεται (χαμηλές ταχύτητες), καθώς και διαστήματα με εμφάνιση πολύ ισχυρών ανέμων (πολύ υψηλές ταχύτητες), για τις οποίες, για λόγους ασφαλείας, θα πρέπει η Α/Γ να μην λειτουργεί. Για αυτά τα χρονικά διαστήματα πρέπει να υπάρξουν εναλλακτικές λύσεις (συσσωρευτές αποθήκευσης ή άλλα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας).

Με βάση όλα τα διαθέσιμα ανεμολογικά στοιχεία, πρέπει να γίνει στατική επεξεργασία και να δημιουργηθεί το διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας και διάρκειας των ανέμων.

Όταν σε μια περιοχή δεν υπάρχουν μακροχρόνιες μετρήσεις (αξιόπιστα ανεμολογικά στοιχεία), για την αποφυγή του μεγάλου χρονικού διαστήματος που απαιτούν οι αναλυτικές μετρήσεις, μπορούμε να κάνουμε χρήση των ημιεμπειρικών αναλυτικών μοντέλων που μπορούν να περιγράψουν το αιολικό δυναμικό της περιοχής, βάση μικρού αριθμού παραμέτρων. Θα πρέπει να τονισθεί ότι η χρήση ημιεμπειρικών αναλυτικών μοντέλων παρουσιάζει στην πράξη προβλήματα ακρίβειας και σε ορισμένες περιπτώσεις, σε τοπικό επίπεδο, και προβλήματα αξιοπιστίας.

Όπως αναφέρθηκε, η διανομή Weibull περιγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά της εύκρατης ζώνης, στην οποία ανήκει η χώρα μας, για ύψος από το έδαφος μέχρι 100m. Η διανομή Weibull με τη χρήση μόνο δύο

παραμέτρων (C και K) προσδιορίζει τη πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται σε μια περιοχή της ταχύτητας V. Εκτός των παραπάνω χαρακτηριστικών, που αφορούν τη δύναμη του ανέμου, βασικό επίσης στοιχείο είναι να γνωρίζουμε τις κύριες διευθύνσεις που πνέουν οι άνεμοι, επειδή βάση αυτών γίνεται ο προσανατολισμός των Α/Γ για να αποφύγουμε συχνές και απότομες μεταβολές της διεύθυνσης, που μειώνουν την απόδοση.



Σχήμα 12.5 Ανεμογεννήτρια Enercon E – 126 7,5MW.

## 2. Η δυνατότητα πρόσβασης και τα απαιτούμενα έργα υποδομής

Για την δυνατότητα πρόσβασης και τα απαιτούμενα έργα υποδομής, θα πρέπει να γίνει:

- Προεκτίμηση της ευκολίας πρόσβασης στην περιοχή, μελετώντας προσεκτικά τους υπάρχοντες, σχετικούς με το θέμα, χάρτες της περιοχής.
- Προεκτίμηση του κόστους των τεχνικών έργων που απαιτούνται για να έχουμε πρόσβαση στην περιοχή.
- Προεκτίμηση της διαδρομής που θα ακολουθηθεί κατά τη μεταφορά του εξοπλισμού στον τόπο εγκατάστασης.

Η εγκατάσταση στο συγκεκριμένο μέρος θα πρέπει να μην έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και να πληρεί τις αποστάσεις από τους πλησιέστερους οικισμούς και τα αεροδρόμια.

## 3. Τα υφιστάμενα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή που εξετάζουμε.

Για τη μελέτη των υφιστάμενων δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να ζητηθούν στοιχεία από τη δημόσια επιχείρηση ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), όπως χάρτες ή άλλα τεχνικά δεδομένα και αφού μελετηθούν προσεκτικά, θα πρέπει να γίνει:

- Προεκτίμηση της θέσης σύνδεσης της αιολικής εγκατάστασης (αιολικό πάρκο), με το υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς.

- Προεκτίμηση του τρόπου σύνδεσης, με το υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς
4. **Οι πιθανές εμπλοκές στη διαδικασία που απαιτείται για την αδειοδότηση της εγκατάστασης.**

Πρέπει να μελετηθούν προσεκτικά χάρτες της περιοχής που έχουν στοιχεία για αρχαιολογικούς χώρους, στρατιωτικές εγκαταστάσεις, τουριστικές εγκαταστάσεις κλπ. Οι υπηρεσίες από τις οποίες θα ζητηθούν εγκρίσεις είναι:

- Πολεοδομία
- Γενικό Επιτελείο Εθνικής Άμυνας
- Διεύθυνση δασών
- Οι εφορίες αρχαιοτήτων (Κλασσικών, Βυζαντινών, Νεωτέρων Μνημείων)
- Πολιτική αεροπορία
- Εθνικός Οργανισμός Τουρισμού (ΕΟΤ)
- Οργανισμός τηλεπικοινωνιών Ελλάδος



Σχήμα 12.6 Ανεμογεννήτρια Enercon E – 101 3MW.

5. **Η ιδιοκτησία των εδαφικών εκτάσεων που απαιτούνται για την εγκατάσταση και η δυνατότητα χρήσης γης.**

Οι υπηρεσίες από τις οποίες θα πρέπει να ζητηθούν στοιχεία για το ιδιοκτησιακό καθεστώς της περιοχής όπου θα γίνει η εγκατάσταση των Α/Γ (αιολικό πάρκο), είναι:

- Η διεύθυνση Γεωργίας
- Η διεύθυνση Δασών
- Πολεοδομία
- Εφορίες Αρχαιοτήτων

Θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν κανονισμούς και νόμους που πιθανόν να εμποδίζουν τη χρησιμοποίηση γης για εγκατάσταση Α/Γ. Τέτοιοι νόμοι μπορεί να

είναι σχετικοί με την προστασία του περιβάλλοντος, με την προστασία ιστορικών μνημείων και άλλων αρχαιολογικών χώρων.

### **B. Ονομαστική ισχύς ανεμογεννητριών.**

Για να γίνει σωστή επιλογή του τύπου και του μεγέθους των Α/Γ, θα πρέπει να γίνει σύγκριση των χαρακτηριστικών στοιχείων και της καμπύλης ισχύος με τα υπάρχοντα ή τα μετρούμενα ανεμολογικά στοιχεία (μέση και μέγιστη ταχύτητα ανέμου, ένταση ανέμου, τραχύτητα και χαρακτηριστικά εδάφους). Για περιπτώσεις τοποθέτησης σε κορυφογραμμές και με δεδομένα τα χαρακτηριστικά στοιχεία των Α/Γ, θα πρέπει να γίνει επιλογή όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος. Βασικό στοιχείο επίσης για το μέγεθος των Α/Γ είναι το κόστος και η δυνατότητα σύνδεσης με το δίκτυο της μέσης τάσης. Η επιλογή του τύπου και του μεγέθους των Α/Γ θα πρέπει να αποτελεί οικονομικά βιώσιμη λύση.

### **Γ. Πλήθος ανεμογεννητριών – Χωροθέτηση**

Ο αριθμός των Α/Γ που θα τοποθετηθούν έχει σχέση με τη διαθέσιμη έκταση, στην οποία υπάρχουν ευνοϊκά σημεία εγκατάστασης, με τους περιορισμούς για την αποφυγή της σκίασης. Η διαθέσιμη έκταση θα πρέπει να ανήκει μέσα σε περιοχή που πληρεί τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Έχει επαρκές αιολικό δυναμικό, ώστε να έχουμε οικονομική βιωσιμότητα
- Έχει σταθερούς ανέμους σε θέσεις χωρίς εμπόδια (φυσικά ή τεχνητά)
- Έχει ομογενή τοπογραφικά χαρακτηριστικά

Για να προσδιορισθούν τα σημεία τοποθέτησης των Α/Γ, μέσα στη διαθέσιμη έκταση της ευρύτερης περιοχής, θα πρέπει: α) Να εξετάσουμε προσεκτικά τη διαθέσιμη έκταση, παίρνοντας υπόψιν όλα τα στοιχεία που έχουμε. β) Να προσδιορίσουμε τις τοποθεσίες με τα υψηλότερα αιολικά δυναμικά μέσα στη διαθέσιμη έκταση. γ) Να επιλέξουμε τα σημεία εγκατάστασης για κάθε τοποθεσία. Για κάθε σημείο τοποθέτησης θα πρέπει να προσδιοριστούν:

- Οι συντεταγμένες  $\chi$  και  $\psi$
- Το υψόμετρο
- Το ύψος του πύργου (πυλώνα) της Α/Γ
- Η ταχύτητα του ανέμου για το ύψος του πύργου

Όταν έχουμε περιοχές στις οποίες οι καλές αιολικές ζώνες αποτελούν ένα μικρό τμήμα, θα πρέπει πρώτα να προσδιορισθούν οι ζώνες και στη συνέχεια να γίνει έρευνα για τους περιορισμούς από τη χρήση της γης κλπ. Όταν έχουμε περιοχές με το αιολικό δυναμικό να είναι παντού σχεδόν το ίδιο, θα πρέπει πρώτα να γίνει έρευνα για τους περιορισμούς από τη χρήση γης κλπ. Για να αποφύγουμε, όσο το δυνατόν περισσότερο, τις απώλειες που έχουμε από την επίδραση στην ομαλή ροή του αέρα,

στα πτερύγια μιας Α/Γ, λόγω της λειτουργίας των άλλων Α/Γ (ομόρους Α/Γ), θα πρέπει:

- α. Όταν τοποθετούνται σε σειρά και ο άνεμος σε ετήσια βάση, φυσάει μόνο από μια διεύθυνση, η απόσταση ανάμεσά τους να είναι περίπου τριπλάσια της διαμέτρου της φτερωτής ( $l_a = 3D$ ). Όταν ο άνεμος φυσάει σε περισσότερες διευθύνσεις, η απόσταση ανάμεσά τους να είναι περίπου δεκαπλάσια της διαμέτρου της φτερωτής ( $l_b = 10D$ ).
- β. Όταν τοποθετούνται σε διαφορετικές σειρές, η απόσταση ανάμεσα στις σειρές να είναι περίπου δεκαπλάσια της διαμέτρου της φτερωτής ( $l_b = 10D$ ).



Σχήμα 12.7 Ανεμογεννήτρια Enercon E –82 E3, 3MW.

#### Δ. Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε μια Α/Γ, θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{A/\Gamma} = P_{\mu} \cdot t$$

όπου:

$P_{\mu}$  = η μέση ισχύς της Α/Γ

$t$  = ο χρόνος σε ώρες ( $t = 8760$ )

Η ετήσια διαθέσιμη στο δίκτυο ηλεκτρική ενέργεια, για κάθε Α/Γ, θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{\Delta A/\Gamma} = P_{\mu} \cdot t \cdot h$$

όπου

$$h = \eta_{gp} \cdot \eta_{\Delta} \cdot \eta_{A} \cdot \eta_{ικ}$$

### **Ε. Επιλογή του βασικού εξοπλισμού**

Η επιλογή του βασικού εξοπλισμού γίνεται με βάση:

- α. Τη συνολική ονομαστική ισχύ των Α/Γ (ισχύς αιολικού πάρκου)
- β. Το μέγεθος των Α/Γ και τη δυνατότητα μεταφοράς και εγκατάστασης στα σημεία που έχουν καθοριστεί
- γ. Τις τεχνικές προδιαγραφές των Α/Γ και τη δυνατότητα εναρμόνισης με το δίκτυο
- δ. Τις οικονομικές προσφορές των εταιριών για τις Α/Γ και τις πρόσθετες παροχές

### **ΣΤ. Έργα υποδομής**

Τα έργα υποδομής που απαιτούνται για την εγκατάσταση και λειτουργία των Α/Γ είναι:

1. Οδοποιία
2. Πλατείες ανέγερσης Α/Γ
3. Θεμελίωση Α/Γ (βάσεις από οπλισμένο σκυρόδεμα)
4. Κτίριο ελέγχου (κύριοι, βοηθητικοί και αποθηκευτικοί χώροι)

### **Ζ. Ηλεκτρολογικά έργα**

Τα ηλεκτρολογικά έργα που απαιτούνται για την εγκατάσταση και λειτουργία των Α/Γ είναι:

1. Υποσταθμός χαμηλής τάσης/μέσης τάσης (Χ.Τ./Μ.Τ.) για κάθε Α/Γ, που τοποθετείται δίπλα ή εσωτερικά στη βάση του πυλώνα.
2. Υπόγειες γραμμές, μέσης τάσης (20KV), από κάθε υποσταθμό της Α/Γ προς τον κεντρικό υποσταθμό στο χώρο του κτιρίου ελέγχου.
3. Κεντρικός υποσταθμός μέσης τάσης (20KV) στο κτίριο ελέγχου.
4. Τηλεπικοινωνίες και συστήματα τηλεπαρακολούθησης.
5. Εναέρια γραμμή διασύνδεσης μέσης τάσης 20KV (αφορά τη ΔΕΗ).

### **Η. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις**

Οι βασικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στις οποίες πρέπει να γίνει αναφορά είναι:

1. Εκπομπές θορύβου
2. Επιδράσεις στα πουλιά
3. Ηλεκτρομαγνητικά κύματα
4. Εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο
5. Οπτική αρμονία



Σχήμα 12.8 Ανεμογεννήτρια Enercon E –82 E2 2,3MW.

### Θ. Οικονομική ανάλυση

Για να γίνει η οικονομική ανάλυση, θα πρέπει:

1. Να επιλεγεί το επενδυτικό σχήμα (επιχορήγηση – δανειοδότηση – ίδια συμμετοχή).
2. Να προσδιορισθούν:
  - α. Το αρχικό κόστος επένδυσης
  - β. Το ετήσιο οικονομικό όφελος
  - γ. Οι ετήσιες λειτουργικές δαπάνες
  - δ. Το καθαρό ετήσιο οικονομικό όφελος
  - ε. Το επιτόκιο αναγωγής
  - στ. Το αποπληθωρισμένο επιτόκιο
  - ζ. Η καθαρή παρούσα αξία
  - η. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης
  - θ. Το κριτήριο έντοκης περιόδου αποπληρωμής

## 12.9 Διάταξη Α/Γ αιολικού πάρκου

Η διάταξη των Α/Γ στο έδαφος (θέσεις και αποστάσεις) είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών σημείων με τα ευνοϊκότερα ανεμολογικά στοιχεία και του διαθέσιμου για την τοποθέτηση χώρου.

Στην πράξη, όταν υπάρχει διαθέσιμος χώρος και η περιοχή χαρακτηρίζεται από τα ίδια ανεμολογικά στοιχεία, τοποθετούμε τις Α/Γ σε απόσταση μεταξύ τους τουλάχιστον ίση με το δεκαπλάσιο της διαμέτρου του ρότορα ( $l \geq 10D$ ).

Η απόσταση από τα άκρα του αιολικού πάρκου (όρια αιολικού πάρκου), για



*Σχήμα 12.9 Διάταξη Α/Γ αιολικού πάρκου στο Πυργάρι Εύβοιας.*

λόγους ασφαλείας και σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία για περιοχές εκτός της οικιστικής ζώνης, θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τη διάμετρο του ρότορα ( $l \geq D$ ).

Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση ανάμεσα στις Α/Γ τόσο μικρότερη είναι η σκίαση. Πολλές φορές, για λόγους οικονομίας χώρου, η απόσταση ανάμεσα στις Α/Γ είναι μικρότερη από  $10D$  και συνήθως έχει τιμή  $l \geq 6D$ . Στην πράξη αυτό συμβαίνει όταν η διαθέσιμη έκταση είναι μοναδική και έχει συγκεκριμένες διαστάσεις.

Όταν οι Α/Γ είναι τοποθετημένες σε περιοχή με σταθερή τη διεύθυνση του ανέμου κατά τη διάρκεια του έτους, η μία απόσταση ανάμεσα στις Α/Γ μπορεί να κυμαίνεται από 2 έως 3 φορές τη διάμετρο του ρότορα ( $l_a \geq 2$  ή  $3D$  και  $l_b \geq 10D$ ).

## 12.10 Μετρήσεις θορύβου στην ανεμογεννήτρια

Οι μετρήσεις στην πηγή του θορύβου (ανεμογεννήτρια) γίνονται για να διαπιστωθούν τα επίπεδα του θορύβου που παράγονται από μια ανεμογεννήτρια νέου τύπου προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία πιστοποίησης της ή να επιβεβαιωθεί η εγγύηση ακουστικών εκπομπών τις οποίες δίνει ο κατασκευαστής και οι τιμές της οποίας χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των αναμενόμενων επιπέδων θορύβου στη γύρω περιοχή.

Η διαδικασία αυτών των μετρήσεων περιλαμβάνει εκτός των ακουστικών, τη μέτρηση μετεωρολογικών μεγεθών (ταχύτητα, διεύθυνση ανέμου, θερμοκρασία, βαρομετρική πίεση) και μεγεθών της ανεμογεννήτριας (παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, ταχύτητα περιστροφής ρότορα).

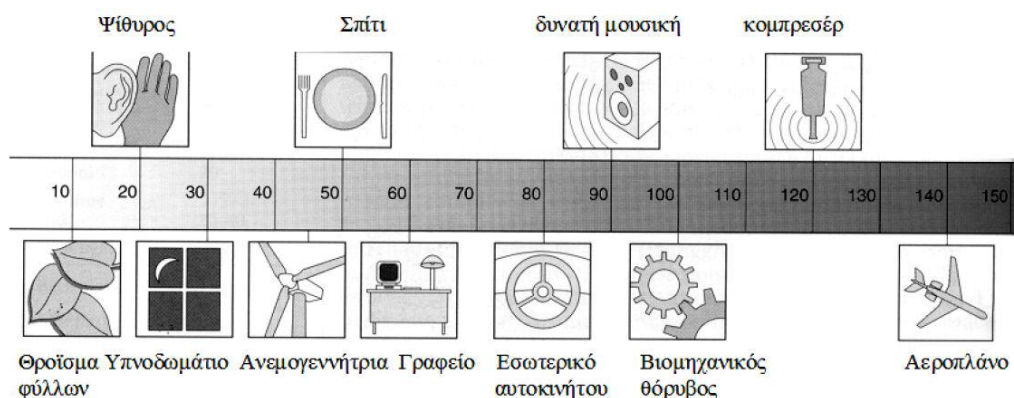
Η μέτρηση γίνεται σύμφωνα με τα πρότυπα:



- MEASNET: Acoustic Noise Measurement Procedure, Version 2, January 2005.
- IEC 61400 – 11: “Wind turbine generator systems – Part 11:Acoustic noise measurement techniques” (2<sup>nd</sup> edition, 12/2002).
- IEC 61400 – 11, 2002: Amendment 1 (05/2006).

## 12.11 Μετρήσεις θορύβου από Α/Γ στη θέση του αποδέκτη

Η μέτρηση του θορύβου της ανεμογεννήτριας στη θέση του αποδέκτη, είναι μία διαδικασία η οποία επιτρέπει την καταγραφή των επιπέδων του θορύβου, που εκπέμπεται από μία ή περισσότερες ανεμογεννήτριες και γίνεται αντιληπτός σε μία συγκεκριμένη θέση στο γύρω χώρο. Η διαδικασία αυτή γίνεται κυρίως για να ελεγχθεί, αν ο θόρυβος που παράγεται από την ανεμογεννήτρια ή το πάρκο, είναι εντός των αποδεκτών επιπέδων θορύβου, που ορίζονται από τη σχετική νομοθεσία.



Σχήμα 12.10 Στάθμες θορύβου από καθημερινές δραστηριότητες.

Η μέτρηση της ηχοστάθμης του θορύβου, που εκπέμπεται από τη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας ή αιολικού πάρκου στη θέση του αποδέκτη, σχετίζεται με τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του πνέοντος ανέμου στην περιοχή. Η μέτρηση γίνεται σύμφωνα με τα πρότυπα:

- ISO 1996 – 1: 2003, Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1:Basic quantities and assessment procedures.
- ISO 1996 – 2: 2007, Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels.
- IEA Recommendations, part 10 (1997), Recommended practices for wind turbine testing. Part 10: Measurement of noise immission from wind turbines at noise receptor locations.

# Κεφάλαιο 13

---

*Επιλογή θέσης εγκατάστασης  
ανεμογεννήτριας*

---

## Επιλογή θέσης εγκατάστασης ανεμογεννήτριας

Σε γενικές γραμμές η επιλογή θέσης εγκατάστασης Α/Γ παρουσιάζει τα ίδια προβλήματα με την επιλογή θέσης εγκατάστασης οποιουδήποτε συστήματος παραγωγής ενέργειας. Διαφέρει όμως σε ένα βασικό σημείο: είναι αδύνατο να προσδιορισθεί η καθαρή παραγωγή ενέργειας ή το κατά προσέγγιση κόστος αυτής, αν δεν είναι γνωστή η ακριβής θέση εγκατάστασης της Α/Γ. Ανεμογεννήτριες τοποθετημένες σε βιώσιμες θέσεις πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Η παραγωγή ενέργειας να είναι συμφέρουσα οικονομικά (το κόστος της παραγόμενης KWh να είναι μικρό).
- Η εγκατάσταση να μην έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.
- Η λειτουργία της Α/Γ να είναι συμβατή με τη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου.
- Να έχουν ληφθεί υπόψιν κατά το σχεδιασμό της Α/Γ οι πιθανές ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες της συγκεκριμένης θέσης (παγετοί, εξαιρετικά ισχυροί άνεμοι κλπ)
- Η επιλεγμένη θέση να είναι αποδεκτή από το κοινό

Το να προσδιορίσουμε μια τοποθεσία στην οποία πνέουν δυνατοί άνεμοι, δεν σημαίνει ότι βρήκαμε και τη βέλτιστη θέση για την εγκατάσταση της Α/Γ. Πολλές και σημαντικές είναι οι επιμέρους παράμετροι, που πρέπει να έχει υπόψιν του ο μηχανικός, προκειμένου να καταλήξει στην επιλογή της οριστικής θέσης εγκατάστασης. Και η επιλογή αυτή θα είναι η βέλτιστη, μόνον εφόσον γίνει σωστή και λεπτομερής αξιολόγηση των παρακάτω παραμέτρων:

### 13.1 Οικονομική αξία

Ο σημαντικότερος στόχος μιας Α/Γ είναι να μειώσει το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας γι' αυτό και η οικονομική βιωσιμότητα είναι η πρωταρχική ιδιότητα για την αποδοχή ή όχι μιας θέσης. Επειδή η Α/Γ παράγει ηλεκτρική ενέργεια μόνο όταν φυσάει άνεμος, χρησιμοποιείται συνήθως σαν εξοικονομητής καυσίμου. Ένας άλλος οικονομικός παράγοντας πρωταρχικού ενδιαφέροντος είναι το κόστος εγκατάστασης. Τούτο είναι αισθητά μειωμένο αν η εγκατάσταση γίνει κοντά σε υπάρχοντες δρόμους και γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

### 13.2 Επιδράσεις στο περιβάλλον

Γενικά, οι επιδράσεις των Α/Γ στο περιβάλλον είναι πολύ μικρές. Ωστόσο, σε ορισμένες μεμονωμένες περιπτώσεις μπορεί η Α/Γ να έχει αρνητικές επιδράσεις στο περιβάλλον. Οι επιδράσεις που ενδιαφέρουν περισσότερο είναι:

### **13.3 Οπτικοαισθητική επίδραση**

Η εγκατάσταση μιας τεράστιας ανεμογεννήτριας σε μια όχι και τόσο ανοιχτή περιοχή δημιουργεί άσχημη οπτική εντύπωση. Αντίθετα η εγκατάσταση της ίδιας Α/Γ σε μια αχανή έκταση περνάει σχεδόν απαρατήρητη.

### **13.4 Επιδράσεις στα πουλιά**

Καλό είναι να αποφεύγεται η εγκατάσταση Α/Γ σε μέρη που είναι νυκτερινά περάσματα αποδημητικών πουλιών.

### **13.5 Ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση**

Το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης δημιουργείται από την ανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πάνω στα περιστρεφόμενα πτερύγια της πτερωτής. Στις ΗΠΑ έχουν λάβει ευρεία δημοσιότητα τελευταία οι παρεμβολές στις τηλεοπτικές μεταδόσεις.

### **13.6 Γενικοί κανονισμοί και περιορισμοί στη χρησιμοποίηση της γης**

Όταν προσπαθούμε να βρούμε κατάλληλες θέσεις για την εγκατάσταση Α/Γ, πρέπει να έχουμε υπόψιν μας κανονισμούς και νόμους που πιθανόν να εμποδίζουν τη χρησιμοποίηση γης για εγκατάσταση μεγάλων Α/Γ. Τέτοιοι νόμοι μπορεί να είναι σχετικοί με την προστασία του περιβάλλοντος, την προστασία ιστορικών μνημείων, με τη γειτνίαση σε αεροδρόμια ή στρατιωτικές εγκαταστάσεις.

### **13.7 Μετεωρολογικά προβλήματα**

Κατά την επιλογή των θέσεων για την εγκατάσταση Α/Γ πρέπει να ληφθούν υπόψιν πιθανές ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες. Ορισμένες απ' αυτές μπορεί πράγματι να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές στην κατασκευή. Άλλες πάλι απλώς επηρεάζουν, το κόστος συντήρησης και τη διάρκεια ζωής της μηχανής.

### **13.8 Παγετός**

Η δημιουργία παγετού μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία της Α/Γ με διαφορετικούς τρόπους. Πρώτα απ' όλα η επικάθηση στις κατασκευές αυξάνει τα στατικά και δυναμικά τους φορτία. Όταν επικάθηνται σημαντικές ποσότητες πάγου στα πτερύγια, εκτός του ότι αυξάνεται το φορτίο τους, υπάρχει και ο κίνδυνος να εκτοξευτεί κάποιο κομμάτι πάγου καθώς τα πτερύγια περιστρέφονται. Ακόμα υπάρχει ο κίνδυνος, με το πάγωμα των ανεμομέτρων, να χαλάσουν τα συστήματα ελέγχου της Α/Γ. Καλό είναι λοιπόν κατά την εκλογή θέσης της Α/Γ να εκτιμάται από μετεωρολόγο η πιθανότητα και η συχνότητα εμφάνισης παγετών.



*Σχήμα 13.1 Χιονοσκέπαστο αιολικό πάρκο στον Πατριάρχη Θράκης.*

### **13.9 Υπερβολικά ισχυροί άνεμοι**

Η συχνότητα με την οποία παρουσιάζονται θυελλώδεις άνεμοι σε μια περιοχή, καθώς και η έντασή τους, μπορεί να υπολογιστεί από υπάρχοντα κλιματολογικά δεδομένα. Αυτή η πληροφορία είναι χρήσιμη για το σχεδιασμό κατάλληλης Α/Γ που να λειτουργεί όταν επικρατούν τέτοιοι θυελλώδεις άνεμοι. Βλέπουμε λοιπόν ότι ανάλογα με τη θέση που επιλέγουμε μεταβάλλεται και ο τύπος της ανεμογεννήτριας που θα εγκαταστήσουμε. Επομένως μεταβάλλεται και το κόστος κατασκευής αλλά και το κόστος της παραγόμενης ενέργειας.

### **13.10 Τύρβη**

Η τύρβη μπορεί να επηρεάσει τη διάρκεια ζωής ή το κόστος συντήρησης της μηχανής. Οι επιστήμονες γνωρίζουν ότι η τύρβη σε ροή πάνω από τραχύ, ανώμαλο έδαφος (βουνά, κοιλάδες, λόφοι κλπ) είναι διαφορετική από αυτήν που παρατηρείται στη ροή πάνω από επίπεδο, ομαλό έδαφος. Ωστόσο υπάρχουν ελάχιστα δεδομένα που να αποσαφηνίζουν αυτές τις διαφορές. Προς το παρόν, θα ήταν επιθυμητό, να διαλέγουμε θέσεις με όσο το δυνατόν χαμηλότερο επίπεδο τύρβης.

### **13.11 Υλικά μεταφερόμενα από τον αέρα**

Ανεμογεννήτριες που πρόκειται να εγκατασταθούν σε παραθαλάσσιες περιοχές υπόκεινται σε διάβρωση επειδή ο αέρας σ' αυτές τις περιοχές περιέχει σημαντικές ποσότητες αλάτων. Πρέπει λοιπόν ορισμένα τμήματα της κατασκευής να προστατευθούν ώστε να διαθέτουν αντισκωριακή προστασία.

Αν μια Α/Γ είναι τοποθετημένη σε άγονη περιοχή, είναι πιθανόν ο αέρας να μεταφέρει επάνω της σκόνη, άμμο, ψιλό χαλίκι κλπ. Τέτοια τραχιά υλικά μπορούν να

προξενήσουν ζημιές στα πτερύγια, τα προστατευτικά καλύμματα, τα λιπαντικά και αλλού. Προκειμένου να επιτύχουμε ικανοποιητική συντήρηση της μηχανής κάτω από τέτοιες συνθήκες, απαιτούνται σχεδιαστικές τροποποιήσεις και ειδικές διαδικασίες συντήρησης. Όλα τα παραπάνω αυξάνουν το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

### **13.12 Η σταθερότητα των ανέμων**

Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου κατά το χρονικό διάστημα μιας ώρας, σαφώς επηρεάζουν τη λειτουργία της μηχανής, ενώ μπορούν να επιδράσουν και στη διάρκεια ζωής της. Αλλά και οι αλλαγές στην κατεύθυνση του ανέμου, στη διάρκεια μιας ώρας, επηρεάζουν τη λειτουργία και τη συμπεριφορά της μηχανής. Μια μελέτη της NASA πάνω στο μοντέλο Α/Γ Clayton MOD – ΟΑ έδειξε ότι με την περιστροφή της μηχανής γύρω από τον κατακόρυφο άξονά της (yawing), προκειμένου αυτή να παρακολουθεί τις αλλαγές της κατεύθυνσης του ανέμου, αναπτύσσονται σημαντικά καμπτικά φορτία στα πτερύγια της μηχανής. Είναι επομένως φανερό ότι η λειτουργία μιας μηχανής σε μια θέση που παρουσιάζει συχνές αλλαγές στην διεύθυνση του ανέμου θα είναι μειονεκτικότερη μιας άλλης που είναι τοποθετημένη σε περιοχή με σταθερούς ανέμους.

### **13.13 Αξιοπιστία αιολικών δεδομένων – διάρκεια παρατηρήσεων**

Τα αιολικά δεδομένα που διαθέτουμε για ένα τόπο πρέπει να είναι αξιόπιστα. Δηλαδή να έχουν προκύψει έπειτα από μακροχρόνιες μετρήσεις.

### **13.14 Αποδοχή από τη πλευρά του κοινού**

Σε τελευταία ανάλυση, η επιτυχής επιλογή μιας τοποθεσίας για την εγκατάσταση Α/Γ εξαρτάται από την κοινή γνώμη. Το κοινό πρέπει να νιώσει ότι τα έργα υποδομής που θα γίνουν για την εγκατάσταση της Α/Γ δεν θα αλλοιώσουν το τοπίο και η ανεμογεννήτρια που θα εγκατασταθεί θα ταιριάζει με το σκηνικό των γύρω περιοχών. Η στάση του κοινού επηρεάζεται τόσο από τις αντιλήψεις του για τις Α/Γ γενικά, όσο και από τις αντιλήψεις του για τα οικονομικά οφέλη που θα προκύψουν από την εγκατάσταση Α/Γ στη συγκεκριμένη θέση.

### 13.15 Υπολογισμός της Μέσης Ετησίως Παραγόμενης Ενέργειας

Η μέση ετησίως παραγόμενη ενέργεια από μια αιολική μηχανή ονομαστικής ισχύος  $N_0$  μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$E = 8760 \cdot \Omega \cdot N_0 \quad (13.2)$$

όπου με  $\Omega$  συμβολίζουμε το μέσο ετήσιο συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης, ο οποίος ορίζεται σαν:

$$\Omega = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{N(V)}{N_0} \cdot \delta(t) \cdot dt$$

ενώ η παράμετρος  $T$  αναφέρεται στη χρονική περίοδο ενός έτους, δηλαδή 8760 h ή 31.536.000 sec. Ένας πλέον εύχρηστος τρόπος για τον υπολογισμό του μέσου συντελεστή ισχύος, ιδιαίτερα χρήσιμος για ενεργειακές προβλέψεις και προκαταρκτικούς υπολογισμούς, προκύπτει, εάν χρησιμοποιήσουμε τη μέση ετήσια διαθεσιμότητα  $\Delta$  της εγκατάστασης, καθώς και τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας εμφάνισης ανέμων,  $f(V)$ , για μια περιοχή. Με τη χρήση των παραπάνω μεγεθών η εξίσωση 13.2 γράφεται σαν:

$$E = 8760 \cdot \Delta \cdot \omega \cdot N_0 \quad (13.3)$$

όπου

$$\omega = \int_0^{\infty} \frac{N(V)}{N_0} \cdot f(V) \cdot dV \quad (13.4)$$

Επειδή όμως η παραγόμενη ενέργεια εκ μέρους της ανεμογεννήτριας είναι μηδενική για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ταχύτητας ενάρξεως λειτουργίας  $V_c$  και μεγαλύτερες της ταχύτητας διακοπής λειτουργίας  $V_F$ , η εξίσωση 13.4 γράφεται:

$$\omega = \int_{V_c}^{V_F} \frac{N(V)}{N_0} \cdot f(V) \cdot dV \quad (13.5)$$

Τέλος υπενθυμίζεται ότι:

$$\int_0^{\infty} f(V) \cdot dV = 1.0$$

Βάσει των εξισώσεων (13.3) και (13.5) η ακριβής τιμή του μέσου συντελεστή ισχύος είναι συνάρτηση αφενός του τοπικού αιολικού δυναμικού μιας περιοχής αφετέρου των λειτουργικών χαρακτηριστικών μιας υπό μελέτη ανεμογεννήτριας.

Επιπλέον, κάνοντας χρήση της εξίσωσης (13.5), είναι δυνατή η εκτίμηση της συνεισφοράς μέρους του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, πχ για  $V \leq V_0$ , στη μέση ενεργειακή παραγωγή μιας αιολικής μονάδος. Είναι δηλαδή δυνατόν να γραφεί ότι:

$$\omega(V_0) = \int_{V_c}^{V_0} \frac{N(V')}{N_0} \cdot f(V') \cdot d'V$$

### 13.16 Διάρκεια ζωής ανεμογεννήτριας

Όλοι οι ανεμοκινητήρες σήμερα σχεδιάζονται για διάρκεια ζωής τουλάχιστον 20 ετών και ίσως και 30. Με την τεχνολογική βελτίωση των υλικών, τη μεγαλύτερη αντοχή τους σε κόπωση, τη βελτίωση των μηχανουργικών επεξεργασιών, την αύξηση των γνώσεων σχετικά με την αλληλεπίδραση ανέμου και αιολικής μηχανής σε συνδυασμό με τη χρήση κωδίκων ηλεκτρονικού υπολογιστή που επιτρέπουν την ακριβή γνώση των φορτίων σε μεταβαλλόμενες ανεμολογικές συνθήκες, είναι περισσότερο από σίγουρο ότι οι αιολικές μηχανές θα επιτύχουν διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 20 έτη.

Δεδομένου ότι η διάρκεια ζωής του ανεμοκινητήρα έχει άμεση επίδραση στην οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης η παραδοχή ως διάρκεια ζωής του ανεμοκινητήρα 20 έτη αποτελεί συντηρητική εκτίμηση.



# Κεφάλαιο 14

---

*Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος*

---

## Η γεννήτρια Diesel

### 14.1 Ιστορική αναδρομή

Πρόδρομος του βενζινοκινητήρα θεωρείται η ατμομηχανή, που πρωτοεμφανίστηκε τον 18ο αιώνα. Η μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), που ακολούθησε τον 19<sup>ο</sup> αιώνα ως βελτίωση για πολλές εφαρμογές δεν μπορεί να αποδοθεί μόνο σε έναν εφευρέτη διότι γίνονταν πολλές παράλληλες προσπάθειες κατασκευής μιας ΜΕΚ. Η κεντρική ιδέα του κινητήρα εσωτερικής καύσης ήταν να πυροδοτηθεί ένα μίγμα εύφλεκτων αερίων ή υγρών, το οποίο θα εκρήγνυται μέσα σε ένα κύλινδρο και θα κινούσε ένα έμβολο. Το 1820 στην Αγγλία ένας κινητήρας λειτουργούσε με βάση την έκρηξη μίγματος αέρα-υδρογόνου.

Έτσι το 1816 παρουσιάστηκε ως ευρεσιτεχνία ο παλαιότερος κινητήρας εσωτερικής καύσης, γνωστός ως κινητήρας Stirling που λειτουργεί με υπέρθερμο αέρα και μπορεί να αξιοποιήσει οποιοδήποτε καύσιμο μέχρι και την ηλιακή ενέργεια. Υστερεί βέβαια έναντι των άλλων για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους. Το 1824, ο Γάλλος φυσικός Santi Carnot δημοσίευσε το κλασικό πλέον σύγγραμμα "Σκέψεις πάνω στην Ωστική δύναμη της θερμότητας" στο οποίο περιέγραψε τις βασικές αρχές της θεωρίας εσωτερικής καύσης.

Το έτος 1860 ο Γάλλος εφευρέτης Jean-Joseph-Etienne-Lenoir (1822-1900) κατασκεύασε τον πρώτο πρακτικά χρησιμοποιούμενο κινητήρα από τον οποίο προέρχονται όλοι οι άλλοι κινητήρες εσωτερικής καύσης. Τη χρονιά εκείνη παρουσιάστηκε ένα μικρό όχημα το οποίο εκκινείτο με τη μηχανή του. Το καύσιμο που χρησιμοποιούσε ήταν το φωταέριο το οποίο εισάγεται στον κύλινδρο αναμειγμένο με αέρα στο πρώτο στάδιο λειτουργίας, κατά το πρώτο μισό της διαδρομής του εμβόλου. Το μίγμα αυτό πυροδοτείται με ηλεκτρικό σπινθήρα και ωθεί το έμβολο στο υπόλοιπο κομμάτι της διαδρομής του. Κατά την επιστροφή του εμβόλου, στη μία πλευρά του απωθούνταν τα καυσαέρια, ενώ στην άλλη επαναλαμβανόταν η διαδικασία εισαγωγής του μίγματος φωταερίου-αέρα. Όμως ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα του Lenoir ήταν πολύ χαμηλός, αφού το προς καύση μείγμα συμπιεζόταν ελάχιστα πριν την ανάφλεξη πράγμα που δυσκόλεψε την οικονομική του αξιοποίηση.

Μια σημαντική εξέλιξη πραγματοποιήθηκε στο Παρίσι το 1862, όταν δημοσιεύτηκε η περιγραφή του ιδανικού κύκλου λειτουργίας μιας μηχανής εσωτερικής καύσης από τον Alphonse Eugene Beau de Rochas(1815-1893), ο οποίος ήταν και ο πρώτος που διατύπωσε τις συνθήκες για την άριστη απόδοση. Ο κινητήρας προέβλεπε τετράχρονο κύκλο, σε αντίθεση με το δίχρονο κύκλο (είσοδος- ανάφλεξη και ισχύς- έξοδος) του Lenoir. Όμως στα επόμενα 14 χρόνια ο τετράχρονος κινητήρας έμεινε στα χαρτιά.

Το 1876 από τη μηχανή του ξεκίνησε ο Γερμανός Nikolaus August Otto (1832- 1891) και κατασκεύασε ένα τετράχρονο βενζινοκινητήρα, αφού προηγουμένως είχε κατασκευάσει έναν ατμοσφαιρικό δίχρονο κινητήρα με ελεύθερο

έμβολο. Το 1867 ο δίχρονος αυτός κινητήρας παρουσιάστηκε στην έκθεση του Παρισιού και πήρε το χρυσό βραβείο γιατί είχε κατά 60% μειωμένη κατανάλωση καυσίμου. Το 1892 από τον Γερμανό μηχανικό Rudolf Christian Karl Diesel (1858-1913) ανακοινώθηκε ως ευρεσιτεχνία ο ομώνυμος κινητήρας και μελετήθηκε από το 1893 μέχρι το 1897.

Στον κινητήρα ντίζελ διαχέεται το καύσιμο με ισχυρό περίσσειμα αέρα, το οποίο συμπυκνώνεται σε μία σχέση 25:1 και αυτοαναφλέγεται σε θερμοκρασία 700 με 900° C.

Από περιβαντολογικής άποψης τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν υψηλές εκπομπές ρύπων, ιδιαίτερα σε οξειδία του αζώτου. Οι εκπομπές αυτές μπορούν να περιοριστούν με την εφαρμογή καταλυτικών μετατροπών ή με την τροποποίηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της ΜΕΚ. Και οι δύο όμως αυτές τεχνικές έχουν σαν αποτέλεσμα την ελάττωση του συντελεστή απόδοσης. Η χρήση παγίδων αιθάλης είναι επίσης υποχρεωτική σε κινητήρες ντίζελ ή άλλων βαρέων κλασμάτων πετρελαίου. Στα μειονεκτήματα των συστημάτων αυτών πρέπει να συμπεριληφθεί επίσης το υψηλό κόστος συντήρησης και τα υψηλά επίπεδα θορύβου, ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες.

Μια παγκόσμια έρευνα της ΙΕΑ για παραγγελίες σε συστήματα ηλεκτροπαραγωγής στο διάστημα από 6/2000 μέχρι 5/2001 έδειξε ότι έγιναν παραγγελίες συστημάτων ΜΕΚ 1 MW-30 MW για συνολική ισχύ 16,2 MW. Το 80% των παραγγελιών αυτών προέρχεται από χώρες του ΟΟΣΑ, ενώ πάνω από τα μισά συστήματα προορίζονται για εφαρμογές εφεδρικής ισχύος.

## 14.2 Υπάρχουσες Τεχνολογίες

Οι συμβατικοί θερμικοί σταθμοί χρησιμοποιούν καύσιμα όπως οι λιθάνθρακες, ο λιγνίτης, η τύρφη, το πετρέλαιο (ντίζελ και μαζούτ) και το φυσικό αέριο. Οι θερμικοί σταθμοί κατατάσσονται ανάλογα με το μέσο και τις μηχανές που χρησιμοποιούν για το θερμοδυναμικό τους κύκλο. Στην προκειμένη περίπτωση οι ντιζελοηλεκτρικοί κάνουν χρήση εμβολοφόρων μηχανών. Οι εμβολοφόρες ΜΕΚ, γνωστές και σαν ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, αποτελούν την πιο διαδεδομένη τεχνολογία διανεμημένης παραγωγής. Πρόκειται για μια παραδοσιακή και δοκιμασμένη τεχνολογία που συνδυάζει χαμηλό κόστος προμήθειας ανά εγκατεστημένο kW, μεγάλη διαθεσιμότητα σε μεγέθη, δυνατότητα γρήγορης εκκίνησης, υψηλούς συντελεστές απόδοσης και υψηλή λειτουργική αξιοπιστία. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με την ικανότητα των συστημάτων αυτών να εκκινούν χωρίς ηλεκτρική τροφοδότηση από το δίκτυο, το καθιστούν πρωταρχική επιλογή σε εφαρμογές εφεδρικής ισχύος (emergency stand-by-power). Επιπλέον αποτελούν σήμερα την πιο διαδεδομένη μορφή συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής για ισχείς μικρότερες από 1MW. Οι κινητήριες μηχανές λειτουργούν με αέρια ή υγρά καύσιμα. Οι μηχανές υγρών καυσίμων χρησιμοποιούν συνήθως πετρέλαιο αν και

υπάρχουν συστήματα βενζίνης ή βαρέων κλασμάτων πετρελαίου (τα βαρύτερα χρησιμοποιούνται για τους μεγαλύτερους κινητήρες) και βιοκαυσίμων.

Η ταξινόμηση των μηχανών ντίζελ μπορεί να γίνει ανάλογα με το μέγιστο αριθμό στροφών που αναπτύσσονται ανά λεπτό, διακρίνονται σε αργόστροφες, μέχρι 350 σ.α.λ, σε μεσαίων στροφών, μέχρι 1200 σ.α.λ και σε πολύστροφες που φτάνουν τις 5000 σ.α.λ. Ανάλογα με την ισχύ που αποδίδουν στις κανονικές στροφές λειτουργίας τους τις διακρίνουμε σε μηχανές μικρής ισχύος (μέχρι 25 ίππους ανά κύλινδρο), σε μηχανές μέσης ισχύος (από 25-200 ίππους ανά κύλινδρο) και σε μηχανές υψηλής ισχύος 9 πάνω από 200 ίππους ανά κύλινδρο. Επιπλέον ανάλογα με τον αριθμό των κυλίνδρων διακρίνονται σε μηχανές μονοκύλινδρες μέχρι και 24κύλινδρες. Ακόμη ανάλογα με τον αριθμό των χρόνων του κύκλου λειτουργίας τους χωρίζονται σε τετράχρονες και δίχρονες.

### 14.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Στις μηχανές ντίζελ η σχέση συμπίεσης είναι συνήθως 17:1 μέχρι 24:1. Λόγω της υψηλής συμπίεσης η πίεση στο χώρο καύσης των κυλίνδρων της μηχανής ντίζελ φτάνει τις 30-50 ατμόσφαιρες, ενώ η θερμοκρασία στους 700-900° C. Από την υψηλή πίεση του αέρα στους κυλίνδρους αυξάνεται η ισχύς του κινητήρα ντίζελ, ενώ από την υψηλή θερμοκρασία αναφλέγεται το μίγμα αέρα-καυσίμου. Επιπρόσθετα σε μία ντιζελομηχανή η αναλογία βάρους ανά ίππο είναι περίπου 2,8-3 κιλά/ίππο, η οποία είναι αρκετά υψηλή, συγκρινόμενη με μία βενζινομηχανή η οποία έχει αναλογία περίπου 1,3 κιλά/ίππο και οφείλεται στην αναγκαία αύξηση του κυβισμού της μηχανής ντίζελ και στη μεγαλύτερη αντοχή των μερών της στις υψηλές πιέσεις των κυλίνδρων της. Η μηχανή ντίζελ επιπλέον έχει αριθμό στροφών περίπου ίσο με τα 5/8 μιας βενζινομηχανής πράγμα που οφείλεται στη μικρή μέση ταχύτητα των εμβόλων της. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στη μηχανή ντίζελ το καύσιμο αυτοαναφλέγεται κατά το ψεκασμό του στους κυλίνδρους από την υψηλή θερμοκρασία του πεπιεσμένου αέρα χωρίς τη βοήθεια του σπινθήρα.

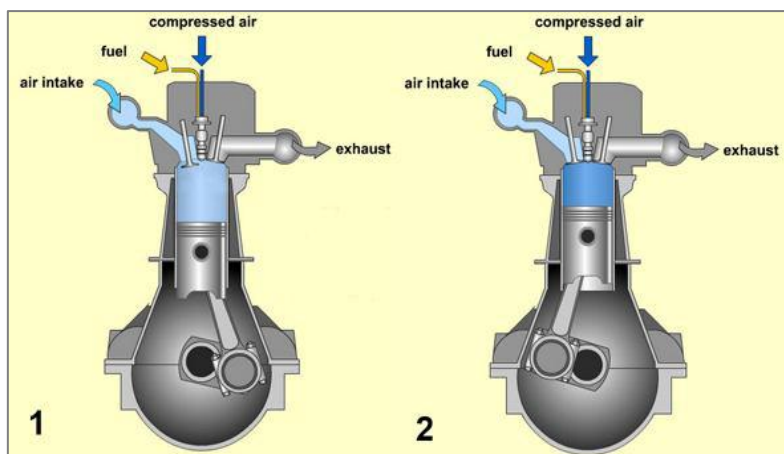
Η μηχανή ντίζελ ακολουθεί κατά τη λειτουργία της το θερμικό κύκλο του ντίζελ ο οποίος χρειάζεται τέσσερις ή δύο χρόνους για την ολοκλήρωση του και την επιτυχία μιας εκτόνωσης. Έχουμε λοιπόν τις φάσεις της: Εισαγωγής- Συμπίεσης- Εκτόνωσης- Εξαγωγής. Παρακάτω αναλύεται ο κύκλος λειτουργίας του τετράχρονου κινητήρα ντίζελ:

#### 1η φάση-εισαγωγής

Το έμβολο ακολουθεί καθοδική πορεία δημιουργώντας υποπίεση. Όση ώρα η βαλβίδα εισαγωγής παραμένει ανοικτή ο θάλαμος καύσης γεμίζει με ατμοσφαιρικό αέρα που μπορεί να περιέχει και καυσαέρια αν υπάρχει σύστημα επανακυκλοφορίας.

## 2η φάση-συμπίεσης

Τη στιγμή που όλες οι βαλβίδες κλείνουν, το πιστόνι κινείται προς τα πάνω μέχρι να φτάσει στο άνω νεκρό σημείο. Η αυξημένη συμπίεση (25-55bar) προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα (600-900° C) η οποία είναι σχεδόν η διπλάσια από τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου.



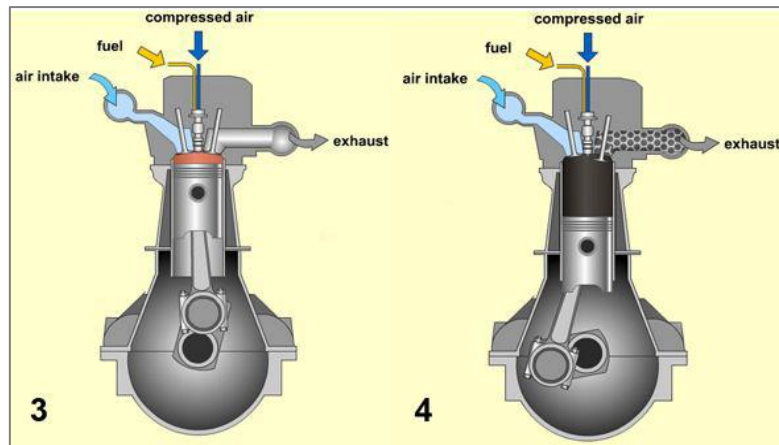
Σχήμα 14.1 Φάσεις εισαγωγής και συμπίεσης.

## 3η φάση-ανάφλεξη & εκτόνωση

Προς το τέλος του χρόνου συμπίεσης πραγματοποιούνται οι ψεκασμοί του καυσίμου στη μορφή ατμών οι οποίοι αναμειγνύονται με το θερμό αέρα. Τότε αυτοαναφλέγονται σε πύρινο περιβάλλον που φτάνει τους 2.500° C και σε πίεση μπορεί να αγγίξει και τα 100 bar. Από τη στιγμή που θα ψεκαστεί το καύσιμο, μέχρι την ανάφλεξη του, υπάρχει καθυστέρηση της αυτανάφλεξης που διαρκεί 0,5-2 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Για αυτό στα πρόσφατα συστήματα πραγματοποιείται από πριν ένας μικροψεκασμός που μειώνει και το χαρακτηριστικό κροτάλισμα των κινητήρων diesel.

## 4η φάση-εξαγωγή

Όταν η φάση εκτόνωσης πλησιάζει στην ολοκλήρωση της και αφού το πιστόνι έχει αρχίσει να ξανανεβαίνει ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής ώστε να βγουν τα καυσαέρια. Η πίεση μειώνεται απότομα στα 3-4 bar και προοδευτικά αγγίζει την ατμοσφαιρική και η βαλβίδα εξαγωγής κλείνει με ένα μικρό βαθμό επικάλυψης με τις εισαγωγής (συνήθως 20 μοίρες).



Σχήμα 14.2 Φάσεις ανάφλεξης- εκτόνωσης και εξαγωγής.

# Κεφάλαιο 15

---

*Το Ορειβατικό Καταφύγιο Φλαμπούρι*

---

## 15.1 Γενικά περί Καταφυγίων

Με βάση το νόμο 3105/2003 – Φ.Ε.Κ. 29 Α/10-2-2003, άρθρο 40 περί ορειβατικών καταφυγίων ορίζεται ότι:

1. Ορειβατικό καταφύγιο είναι κτιριακή εγκατάσταση με ογδόντα (80) το πολύ κλίνες, σε υψόμετρο πάνω από εννιακόσια (900) μέτρα που εξυπηρετεί την πεζοπορία, την ορειβασία και την αναρρίχηση. Τα ορειβατικά καταφύγια είναι εγκαταστάσεις ειδικής τουριστικής υποδομής κατά την έννοια της παρ. 3 του άρθρου 2 του Ν. 2160/1993.
2. Ορειβατικά μονοπάτια θεωρούνται τα μονοπάτια που χαράσσονται και χρησιμοποιούνται για πεζοπορία είτε στην ελληνική επικράτεια (εθνικά μονοπάτια) είτε αποτελούν τμήματα διεθνών μονοπατιών που διέρχονται από διάφορες χώρες (όπως τα ευρωπαϊκά μονοπάτια E4 και E6).
3. Η πρόσβαση προς τα ορειβατικά καταφύγια γίνεται από δημόσια ή δασική οδό, όπου ήδη υπάρχουν, ή κυρίως από ορειβατικά μονοπάτια. Την ευθύνη οροσήμανσης και συντήρησης των μονοπατιών έχουν οι φορείς διαχείρισης των καταφυγίων σε συνεργασία με τις αρμόδιες δασικές υπηρεσίες και την Ελληνική Ομοσπονδία Ορειβασίας – Αναρρίχησης (Ε.Ο.Ο.Α.) υπό την εποπτεία του Ε.Ο.Τ.
4. Φορέας διαχείρισης του ορειβατικού καταφυγίου μπορεί να είναι σωματεία ορειβατών, πεζοπόρων, αναρριχητών, η Νομαρχιακή και η Τοπική Αυτοδιοίκηση. Με κοινή απόφαση των Υπουργών Γεωργίας και Ανάπτυξης καθορίζεται ο φορέας διαχείρισης κάθε ορειβατικού καταφυγίου.
5. Η εγκατάσταση και λειτουργία νέων ορειβατικών καταφυγίων είναι επιτρεπτή, εφόσον προβλέπεται σε σχέδια τουριστικής ανάπτυξης, σε σχέδια ανάπτυξης ορεινών περιοχών ή σε σχέδια διαχείρισης δασικών συγκροτημάτων.
6. Για την εγκατάσταση ή την επέκταση ορειβατικού καταφυγίου απαιτείται :
  - α. επ' αόριστον παραχώρηση κατά χρήση δημόσιας δασικής έκτασης εμβαδού από 4 μέχρι 6 στρέμματα με απόφαση του Υπουργείου Γεωργίας ή άδεια επεμβάσεως εάν πρόκειται για ιδιωτική δασική έκταση.
  - β. άδεια της αρμόδιας Διεύθυνσης Τουρισμού.
  - γ. μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων και άδεια οικοδομής.

Δεν επιτρέπεται η παραχώρηση ή η άδεια επέμβασης σε προστατευόμενες περιοχές του άρθρου 18 του Ν. 1650/1986, σε εθνικούς δρυμούς, σε αισθητικά δάση και σε μνημεία της φύσης, εκτός εάν στα σχέδια διαχείρισης αυτών των περιοχών υπάρχει πρόβλεψη για εγκατάσταση και λειτουργία ορειβατικού καταφυγίου.
7. Η παραχωρούμενη δημόσια δασική έκταση διατηρεί το δασικό της χαρακτήρα και δεν επιτρέπεται η χρήση της για άλλους σκοπούς. Ο ίδιος περιορισμός ισχύει και για τα ορειβατικά καταφύγια επί ιδιωτικών εκτάσεων. Σε περίπτωση εγκατάλειψης ή αχρηστίας των εγκαταστάσεων αίρεται η



- παραχώρηση ή η άδεια επεμβάσεως και η παραχωρηθείσα έκταση ανακτά το δασικό της χαρακτήρα και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλους σκοπούς.
8. Με κοινή απόφαση των Υπουργών Ανάπτυξης και Γεωργίας καθορίζονται οι προδιαγραφές των κτιριακών εγκαταστάσεων και ο κανονισμός λειτουργίας των ορειβατικών καταφυγίων.
  9. Νομιμοποιούνται όλα τα υφιστάμενα ορειβατικά καταφύγια που δεν έχουν άδεια οικοδομής, εφόσον χρησιμοποιούνται για τους ανωτέρω σκοπούς. Η νομιμοποίηση συντελείται με κοινή απόφαση των Υπουργών Γεωργίας και Ανάπτυξης, η οποία εκδίδεται μετά από διαπιστωτική πράξη του Ε.Ο.Τ. Στην απόφαση νομιμοποίησης περιλαμβάνεται η κατά χρήση παραχωρούμενη έκταση (εφόσον αυτή δεν υπάρχει), η τεχνική περιγραφή των εγκαταστάσεων και υποδομών και προσαρτάται το τοπογραφικό διάγραμμα της έκτασης.
  10. Στο άρθρο 21 του Ν. 998/1979 (Φ.Ε.Κ. 289 Α) προστίθεται παράγραφος 5 ως εξής : Επιτρέπεται, στα πλαίσια της ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης του κοινού σε θέματα δασοπροστασίας και φυσικού περιβάλλοντος, η δημιουργία «δασικών χωριών» με την εγκατάσταση από τις δασικές υπηρεσίες λύομενων οικημάτων σε επιλεγμένες θέσεις και περιορισμένο αριθμό, μη δυνάμενο να υπερβεί τα τριάντα, για την παροχή καταλυμάτων σε επισκέπτες των δασών. Η μελέτη και εκτέλεση των παραπάνω έργων, λόγω της φύσης και του προορισμού τους, γίνεται αποκλειστικά από τις ειδικές διατάξεις των παραγράφων 1 και 2 του άρθρου 237 του Ν. Δ. 86/1969. Τα «δασικά χωριά» προστίθενται ως ειδική κατηγορία στα μη κύρια ξενοδοχειακά καταλύματα της περίπτωσης Β' της παρ. 1 του άρθρου 2 του Ν. 2160/1993. Οι προδιαγραφές κατασκευής και λειτουργίας των δασικών χωριών καθορίζονται με κοινή απόφαση των Υπουργών Γεωργίας και Ανάπτυξης.
  11. Με κοινές αποφάσεις των Υπουργών Ανάπτυξης και Γεωργίας καθορίζονται οι τεχνικές προδιαγραφές χάραξης, σήμανσης, διάνοιξης και συντήρησης των ορειβατικών μονοπατιών και ρυθμίζεται κάθε ζήτημα που αφορά τις σχετικές τουριστικές δραστηριότητες.
  12. Με απόφαση του Υπουργού Ανάπτυξης καθορίζονται τα απαιτούμενα προσόντα των φυλάκων των ορειβατικών καταφυγίων.



## 15.2 Το ορειβατικό καταφύγιο Φλαμπούρι

Το ορειβατικό καταφύγιο Φλαμπούρι βρίσκεται στην Πάρνηθα στην ομώνυμη κορυφή Φλαμπούρι σε υψόμετρο 1158 μέτρα. Το καταφύγιο υπάγεται στον Ορειβατικό Σύλλογο Αχαρνών. Το κτίριο του καταφυγίου αρχικά εξυπηρετούσε φυλάκιο του στρατού. Μετά το πέρας της χρησιμοποίησής του από το στρατό εγκαταλείφθηκε και παρέμεινε αχρησιμοποίητο για αρκετά χρόνια έως ότου ζητήθηκε από τον Ορειβατικό Σύλλογο Αχαρνών η παραχώρησή του από το Γενικό Επιτελείο Στρατού πράγμα που έγινε.



Βρίσκεται σε απόσταση 1,7 km βόρεια των Θρακομακεδόνων σε περιοχή κατάφυτη από έλατα, σε πείσμα των καιρών αφού οι πυρκαγιές της Πάρνηθας το 2007 το άφησαν ανέπαφο. Το καταφύγιο βρίσκεται μέσα στον εθνικό δρυμό της Πάρνηθας και απ' το σημείο που βρίσκεται φαίνεται όλο το λεκανοπέδιο Αττικής καθώς και οι κορυφές της Εύβοιας και της Πελοποννήσου.



Το καταφύγιο αποτελείται από δύο κτίρια ένα κύριο και ένα βοηθητικό καθώς και από μια ξύλινη αποθήκη. Κάθε κτίριο διαθέτει και σοφίτα. Ο χώρος μπροστά από το καταφύγιο είναι ανοικτός και έχουν τοποθετηθεί παγκάκια για του επισκέπτες.



Το καταφύγιο τροφοδοτείται από συσσωρευτές οι οποίοι φορτίζουν από φωτοβολταϊκά πάνελ. Υπάρχει και γεννήτρια όταν παραστεί ανάγκη για τη συνέχιση της τροφοδοσίας. Η θέρμανση του γίνεται από θερμοδυναμικό τζάκι και σώματα καλοριφέρ προσπαθώντας για τη λιγότερο δυνατή ρύπανση της ατμόσφαιρας. Η τροφοδότηση με νερό γίνεται από παρακείμενη πηγή με τη βοήθεια αντλίας νερού.

Διαθέτει οργανωμένη κουζίνα και προσφέρει φρεσκομαγειρεμένα φαγητά, γλυκά και ροφήματα. Υπάρχει η δυνατότητα διανυκτέρευσης μέχρι 40 ατόμων ανά βραδιά, στον επάνω όροφο του κυρίως κτιρίου, σε ένα χώρο με ξύλινο πάτωμα και ξύλινη οροφή. Παρέχονται για αυτό το λόγο στρώματα, μαξιλάρια και κουβέρτες.



Το καταφύγιο παραμένει ανοικτό όλο το χρόνο από Παρασκευή απόγευμα και το Σαββατοκύριακο ενώ είναι ανοικτό και στις επίσημες αργίες.

Η πρόσβαση στο καταφύγιο γίνεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

## Πεζοπορώντας

Από Θρακομακεδόνες παίρνοντας το κίτρινο μονοπάτι σε ~2 ώρες φτάνετε στο Φλαμπούρι. Το κίτρινο μονοπάτι ξεκινάει από το τέλος της οδού Καστοριάς στους Θρακομακεδόνες. Από το πάρκινγκ του τελεφερίκ ακολουθείτε το μονοπάτι της Χούνης προς Φλαμπούρι. Στην μέση περίπου της διαδρομής (~1,15' ώρες από το σημείο εκκίνησης) κάνετε δεξιά στην διχάλα που συναντάτε ακολουθώντας την ταμπέλα προς Φλαμπούρι. Συνολική διάρκεια μέχρι το καταφύγιο ~2,30' ώρες. Στο Φλαμπούρι θα βρείτε ορειβατικούς χάρτες, με όλα τα μονοπάτια για την ευρύτερη περιοχή της Πάρνηθας.

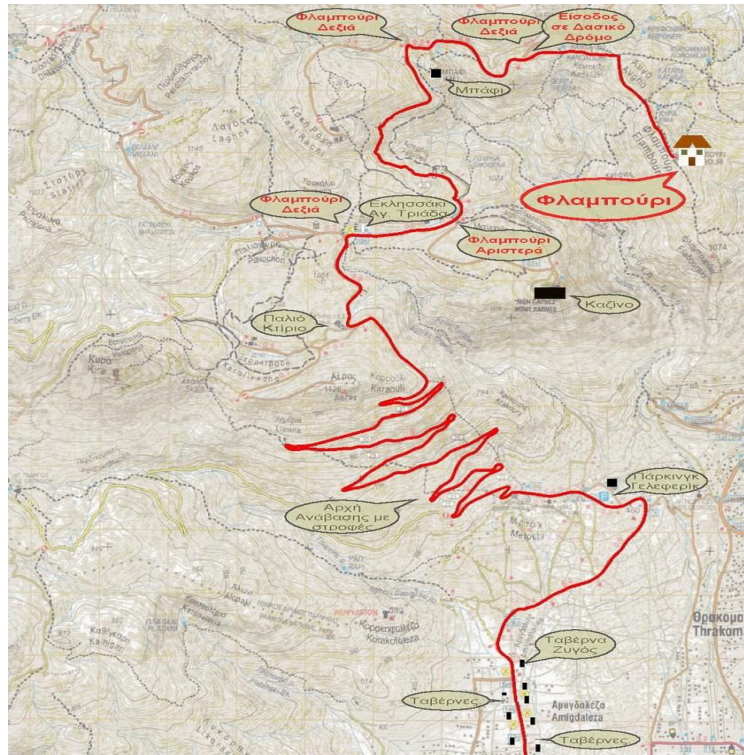


Με αυτοκίνητο ή μοτοσικλέτα.

Στην εθνική Αθηνών-Λαμίας βγαίνετε στην έξοδο προς Πάρνηθα - Μεταμόρφωση, στρίβετε με κατεύθυνση προς Πάρνηθα συνεχίζοντας σε όλες τις διασταυρώσεις ευθεία. Ο δρόμος από κάποιο σημείο και μετά λέγεται Λεωφ. Καραμανλή και στην συνέχεια Πάρνηθος. Μετά από μερικά χλμ. περνάτε την περιοχή με τις ταβέρνες και στην συνέχεια το πάρκινγκ του τελεφερίκ. Ο δρόμος πια αρχίζει και ανεβαίνει την Πάρνηθα για αρκετά χιλιόμετρα. Κάποια στιγμή περνάτε το παλιό ξενοδοχείο και στη επόμενη διασταύρωση κάνετε δεξιά, περνώντας μπροστά από το λευκό εκκλησάκι της Αγ.Τριάδας. Συνεχίζετε τον ασφαλτόδρομο και στην επόμενη διασταύρωση συναντάτε ταμπέλα για Φλαμπούρι όπου κάνετε λοξά αριστερά. Για την υπόλοιπη διαδρομή ακολουθείτε τις μεγάλες ταμπέλες προς Φλαμπούρι και όχι τις μικρές για τους πεζοπόρους. Η τελευταία ταμπέλα σας βάζει σε κατηφορικό βατό χωματόδρομο όπου σε 5'λεπτά με το αυτοκίνητο ή την μοτοσικλέτα και σε 20'λεπτά αν περπατήσετε, θα σας οδηγήσει στο Φλαμπούρι.

Με το τελεφερίκ.

Παίρνετε το τελεφερίκ και ανεβαίνετε στο πάρκινγκ του καζίνο. Από εκεί περνώντας από το ελικοδρόμιο και ακολουθώντας ταμπελίτσες για Φλαμπούρι, πεζοπορείτε σε μονοπάτι ή στον ασφαλτόδρομο και σε ~1.30' ώρα φτάνετε στο Φλαμπούρι.



Σχήμα 15.1 Χάρτης πρόσβασης στο ορειβατικό καταφύγιο Φλαμπούρι.



Σχήμα 15.2 Θέα απ' το καταφύγιο.

# Κεφάλαιο 16

---

*Υπολογισμός Φωτοβολταϊκού  
Συστήματος*

---

## Μελέτη Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος για τη Τροφοδότηση του Ορειβατικού Καταφυγίου.

### 16.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί μελετάται το πρόβλημα της ηλεκτρικής τροφοδότησης του ορειβατικού καταφυγίου Φλαμπούρι Πάρνηθας. Το εν λόγω καταφύγιο βρίσκεται εντελώς απομακρυσμένο από το δίκτυο της ΔΕΗ και επομένως είναι απαραίτητη η εξασφάλιση της ηλεκτρικής ενέργειας που θα το τροφοδοτεί από άλλες πηγές. Η χρήση ντιζελογεννήτριας εκτός από το μεγάλο κόστος που επιφέρει λόγω της αυξημένης τιμής πετρελαίου που κατά κανόνα υπάρχει τα τελευταία χρόνια, έχει και μια σειρά άλλων μειονεκτημάτων όπως η υψηλή στάθμη θορύβου που δεν ταιριάζει στο χώρο του καταφυγίου, το οποίο προορίζεται για ξεκούραση και ανάπαυση ορειβατών και εκδρομέων. Το υψηλό κόστος συντήρησης της ντιζελογεννήτριας, ιδίως μετά την πάροδο κάποιων χρόνων είναι επίσης μεγάλο αφού τείνουν να χρειάζονται συχνά αλλαγή διαφόρων εξαρτημάτων τους, να εμφανίζουν τακτικά βλάβες ενώ πρέπει να συμπεριληφθεί στα προβλήματα που συνεπάγεται η χρήση τους και το πρόβλημα της συχνής μεταφοράς καυσίμων καθώς και της φύλαξής τους με ότι κινδύνους συνεπάγεται η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων εύφλεκτων υλικών.

Απ' την άλλη, η μεγάλη απόσταση που χωρίζει το ορειβατικό καταφύγιο με το δίκτυο διανομής της ΔΕΗ κάνει πολύ μεγάλο το κόστος επέκτασης του δικτύου προς τη μεριά του καταφυγίου και επομένως αυτή κρίνεται ως η πιο ασύμφορη λύση στο πρόβλημα της ηλεκτρικής τροφοδότησης.

Η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προσφέρει μια ικανοποιητική λύση στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του καταφυγίου. Η βελτίωση των τεχνολογιών στον τομέα των ΑΠΕ, η αύξηση του βαθμού απόδοσής τους και οι πιο προσιτές τιμές που υπάρχουν σήμερα δείχνουν πως αποτελεί μονόδρομο η χρησιμοποίησή τους. Σε αυτά όλα προστίθεται φυσικά και το μηδαμινό κόστος καυσίμου που έχουν αυτές οι τεχνολογίες.

Το πρόβλημα που ανακύπτει στην χρήση των ΑΠΕ είναι ότι μία πηγή από μόνη της δεν μπορεί να εξασφαλίσει αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή του καταφυγίου. Έτσι πχ. μια συστοιχία φωτοβολταϊκών θα παρείχε μεν ικανοποιητική ενέργεια κατά τους καλοκαιρινούς μήνες που υπάρχει μεγάλη ηλιοφάνεια, αλλά κατά την περίοδο του χειμώνα όπου ίσως και για εβδομάδες ο ήλιος δεν κάνει την εμφάνισή του θα υπήρχε παντελής έλλειψη ηλεκτρικού ρεύματος. Παρόμοια προβλήματα θα υπήρχαν και από τη χρήση κάποιας άλλης τεχνολογίας ΑΠΕ όπως πχ. μιας ανεμογεννήτριας όπου τους καλοκαιρινούς μήνες η ένταση των ανέμων πέφτει αρκετά.

Άρα η μόνη αξιόλογη λύση στο πρόβλημα της ηλεκτρικής τροφοδότησης είναι ο συνδυασμός περισσότερων της μιας πηγών ΑΠΕ ή αλλιώς η χρήση υβριδικού συστήματος. Με τη χρήση Υβριδικού συστήματος ξεπερνάμε τις προαναφερθείσες

δυσκολίες αφού η μία πηγή ενέργειας αλληλοσυμπληρώνει την άλλη παρέχοντας συνεχή ροή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην δικιά μας τη περίπτωση, το ορειβατικό καταφύγιο Φλαμπούρι Πάρνηθας, επιλέξαμε την εγκατάσταση ενός υβριδικού συστήματος το οποίο αποτελείται από Φωτοβολταϊκά – Ανεμογεννήτρια- Ντιζελογεννήτρια. Ο συνδυασμός των τριών αυτών διαφορετικών πηγών ενέργειας μας εξασφαλίζει μόνιμη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και χαμηλού κόστους λειτουργίας. Το βάρος της τροφοδότησης του καταφυγίου αναλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά και η ανεμογεννήτρια αναλόγως της πιο συμφέρουσας κατά περίπτωση λύσης. Όταν αδυνατεί η μία πηγή να ανταπεξέλθει στην ηλεκτρική τροφοδότηση αναλαμβάνει αυτομάτως η άλλη. Η ντιζελογεννήτρια θα υπάρχει μόνο σαν εφεδρική πηγή σε περίπτωση που κανένα από τα δύο άλλα μέσα δεν επαρκεί για την τροφοδότηση του καταφυγίου ή στην σπάνια περίπτωση ταυτόχρονης βλάβης και των δύο άλλων πηγών.

Το υβριδικό σύστημα θα περιλαμβάνει και συσσωρευτές αποθήκευσης της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας που θα αρκούν για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων του καταφυγίου για 24 ώρες. Έτσι μειώνονται και άλλο οι πιθανότητες χρησιμοποίησης της ντιζελογεννήτριας και επομένως του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται.

Το ορειβατικό καταφύγιο Φλαμπούρι αποτελείται από δύο κτίρια, ένα κύριο και ένα βοηθητικό. Κάθε κτίριο περιλαμβάνει και σοφίτα. Καθημερινά μπορεί να φιλοξενηθούν έως και 30 άτομα στο καταφύγιο πράγμα που σημαίνει ότι οι απαιτήσεις του για ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι ευκαταφρόνητες.

## 16.2 Ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης κατοικίας

Για να μπορέσουμε να προχωρήσουμε στην σχεδίαση του Υβριδικού συστήματος πρέπει να υπολογίσουμε την ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης του ορειβατικού καταφυγίου. Για το λόγο αυτό εργαζόμαστε ως εξής:

- α. Γίνεται λεπτομερής καταγραφή όλων των ηλεκτρικών συσκευών που προβλέπεται να τροφοδοτηθούν στο καταφύγιο, της ισχύος του καθενός από αυτά καθώς και του πιθανού χρόνου λειτουργίας τους σε διάστημα ενός εικοσιτετραώρου.
- β. Υπολογίζεται η ημερήσια ενέργεια κατανάλωσης του καταφυγίου. Για να γίνει αυτό πολλαπλασιάζουμε την ηλεκτρική ισχύ κάθε συσκευής ξεχωριστά με το χρόνο που αναμένεται να λειτουργήσει. Έτσι υπολογίζεται η ηλεκτρική της κατανάλωση σε διάστημα ενός εικοσιτετραώρου ( $E_K = P_K \cdot T$ ). Από το άθροισμα των καταναλώσεων προκύπτει η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης του καταφυγίου.
- γ. Εκτίμηση της μέγιστης ισχύος στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή καταγράφεται η πιθανότητα της ταυτόχρονης λειτουργίας περισσότερων συσκευών και υπολογίζεται η μέγιστη απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς.



Το αυτόνομο υβριδικό σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί όπως είδαμε έχει σαν στόχο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του ορειβατικού καταφυγίου Φλαμπούρι Πάρνηθας. Επειδή τα κτίρια είναι δύο και τα άτομα το χρησιμοποιούν καθημερινά είναι πολλά, είναι λογικό οι ενεργειακές απαιτήσεις να είναι πολύ υψηλές. Για αυτό θα πρέπει να ακολουθηθούν κάποιοι βασικοί κανόνες ώστε το σύστημά μας να είναι οικονομικότερο:

- Είναι ασύμφορο να επιδιώκεται η χρήση υβριδικού συστήματος για τροφοδότηση ηλεκτρικών συσκευών με μεγάλη θερμική κατανάλωση (ηλεκτρικές κουζίνες, ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες, ηλεκτρικά καλοριφέρ). Οι ανάγκες αυτές πρέπει να καλύπτονται από εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως υγραέριο, πετρέλαιο ήλιος κλπ. Στην δική μας τη περίπτωση χρησιμοποιήσαμε ενεργειακό καλοριφέρ για θέρμανση, ηλιακό θερμοσίφωνα και boiler για τη θέρμανση νερού και φούρνο υγραερίου.
- Χρησιμοποιούμε ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/Z) για την αντιμετώπιση αιχμών ζήτησης από το να επιδιώκεται η πλήρης ικανοποίηση των καταναλώσεων με αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μεγάλο βάρος και κόστος. Με το H/Z χρησιμοποιούμε συσσωρευτές μικρότερης χωρητικότητας και φωτοβολταϊκής συστοιχίας και ανεμογεννήτριας μικρότερης ισχύος.
- Χρησιμοποιούμε συσκευές υψηλής ενεργειακής απόδοσης, δηλαδή από ενεργειακή κλάση A και πάνω (A+, A++). Ειδικά για τους λαμπτήρες όπου είναι δυνατόν χρησιμοποιούνται τύπου LED, όπου έχουμε εξαιρετικά μικρή ισχύ κατανάλωσης.

Για να ξεκινήσει η μελέτη του υβριδικού μας συστήματος είναι απαραίτητο να γίνει καταγραφή των καταναλώσεων που λειτουργούν στο χώρο του καταφυγίου. Επειδή οι ενεργειακές ανάγκες του καταφυγίου κατά τη διάρκεια του έτους αλλάζουν σημαντικά από εποχή σε εποχή, όπως και οι συσκευές που λειτουργούν εντός αυτού είναι αναγκαίο να χωριστεί η μελέτη στις πιο χαρακτηριστικές περιόδους λειτουργίας του. Για το λόγο αυτό γίνεται μια λεπτομερής καταγραφή των ηλεκτρικών συσκευών του καταφυγίου, της ισχύος καθενός από αυτά καθώς και του πιθανού χρόνου λειτουργίας τους κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου. Η καταγραφή αυτή χωρίζεται σε ένα τυπικό χειμερινό και ένα καλοκαιρινό μήνα όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες αποκλίσεις στη λειτουργία του καταφυγίου. Τέλος υπολογίζεται η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των συσκευών που λειτουργούν, η εκτιμώμενη ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση κάθε συσκευής καθώς και όλου του καταφυγίου.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ	ΙΣΧΥΣ (kW)	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (kWh)
Εσωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου 1	0,196	7	1,372
Εσωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου 2	0,214	1,5	0,321
Εξωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου	0,043	1	0,043
Φωτισμός Βοηθητικού Κτιρίου	0,17	0,1	0,017
Κυκλοφορητής Τζακιού - Καλοριφέρ	0,1	16	1,6
Αντλία Πίεσης Νερού	0,65	1,2	0,78
Ψυγείο	0,09	9	0,81
Καταψύκτης	0,15	12	1,8
Απορροφητήρας Κουζίνας	0,1	1,3	0,13
Φως Απορροφητήρα	0,0038	0,2	0,00076
Καφετιέρα	0,7	0,5	0,35
Υπολογιστής (φορητός)	0,05	1,5	0,075
Εκτυπωτής	0,01	0,05	0,0005
Τηλεόραση (LED)	0,056	0,3	0,0168
DVD player	0,01	0,3	0,003
Στερεοφωνικό Συγκρότημα	0,12	1,5	0,18
Φούρνος Μικροκυμάτων	0,6	0,15	0,09
Τοστιέρα	0,75	0,3	0,225
Αναμκτήρας Τροφών	0,3	0,05	0,015
Φορτιστής Κινητού	0,012	1,3	0,0156
Άλλοι Υπολογιστές (φορητοί)	0,1	1	0,1
Άλλοι Φορτιστές Κινητών	0,048	1,3	0,0624
Έκτακτες Καταναλώσεις	0,2	0,3	0,06
<b>Σύνολο</b>	<b>4,673</b>		<b>8,067</b>

*Σχήμα 16.1* Χρησιμοποιούμενες ηλεκτρικές συσκευές, ισχύς και χρόνος λειτουργίας τους, ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωσή τους, συνολική εγκατεστημένη ισχύς τους και ολική κατανάλωση του καταφυγίου για ένα τυπικό χειμερινό μήνα.

**Συνολική Ενεργειακή Κατανάλωση:** 8,067 kWh

**Συνολική Ισχύς Φορτίων:** 4,673 kW

<b>ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ</b>	<b>ΙΣΧΥΣ (kW)</b>	<b>ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ</b>	<b>ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (kWh)</b>
Εσωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου 1	0,196	4,5	0,882
Εσωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου 2	0,214	1,5	0,321
Εξωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου	0,043	2,3	0,0989
Φωτισμός Βοηθητικού Κτιρίου	0,17	0,1	0,017
Κυκλοφορητής Τζακιού - Καλοριφέρ	0	0	0
Αντλία Πίεσης Νερού	0,65	1,5	0,975
Ψυγείο	0,09	15	1,35
Καταψύκτης	0,15	15	2,25
Απορροφητήρας Κουζίνας	0,1	1,3	0,13
Φως Απορροφητήρα	0,0038	0,2	0,00076
Καφετιέρα	0,7	0,5	0,35
Υπολογιστής (φορητός)	0,05	1,5	0,075
Εκτυπωτής	0,01	0,05	0,0005
Τηλεόραση (LED)	0,056	0,3	0,0168
DVD player	0,01	0,3	0,003
Στερεοφωνικό Συγκρότημα	0,12	1,5	0,18
Φούρνος Μικροκυμάτων	0,6	0,15	0,09
Τοστιέρα	0,75	0,3	0,225
Αναμκτήρας Τροφών	0,3	0,05	0,015
Φορτιστής Κινητού	0,012	1,3	0,0156
Άλλοι Υπολογιστές (φορητοί)	0,1	1	0,1
Άλλοι Φορτιστές Κινητών	0,048	1,3	0,0624
Έκτακτες Καταναλώσεις	0,2	0,3	0,06
<b>Σύνολο</b>	<b>4,573</b>		<b>7,218</b>

*Σχήμα 16.2* Χρησιμοποιούμενες ηλεκτρικές συσκευές, ισχύς και χρόνος λειτουργίας τους, ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωσή τους, συνολική εγκατεστημένη ισχύς τους και ολική κατανάλωση του καταφυγίου για ένα τυπικό καλοκαιρινό μήνα.

**Συνολική Ενεργειακή Κατανάλωση:** 7,218KWh

**Συνολική Ισχύς Φορτίων:** 4,573 KW

Όπου

- Εσωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου 1 : Τραπεζαρία, Κουζίνα, Προθάλαμος κεντρικού κτιρίου.
- Εσωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου 2 : Ξενώνας, Τουαλέτα, Σκάλα – προθάλαμος ξενώνα, Υπόγεια αποθήκη, Κτίριο κολλητά κυρίως κτιρίου.
- Εξωτερικός Φωτισμός Κεντρικού Κτιρίου : Φως έξω από πόρτα, Φώτα βεράντας.

Παρατηρώντας τους πίνακες διαπιστώνουμε ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι λίγο μεγαλύτερη τον χειμερινό μήνα. Αυτό οφείλεται στη λειτουργία του κυκλοφορητή ο οποίος απουσιάζει παντελώς κατά τους καλοκαιρινούς μήνες αφού δεν υπάρχουν ανάγκες για θέρμανση τότε. Κάτι ανάλογο παρατηρείται και με τη συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια η οποία είναι μεγαλύτερη τους χειμερινούς μήνες. Αποφασίσαμε συνεπώς η μελέτη της υβριδικής εγκατάστασης να γίνει για το μήνα Δεκέμβριο αφού τότε έχουμε τις υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις και παράλληλα τις δυσμενέστερες κλιματολογικές συνθήκες (πολύ μικρός χρόνος ηλιοφάνειας).

Το πρώτο βήμα στην μελέτη του υβριδικού συστήματος αποτελεί η επιλογή της κλίσης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών. Για τη επιλογή μας αυτή χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα **PV GIS**. Το πρόγραμμα αυτό λειτουργεί υπό της αιγίδα της European Commission και αποτελεί ένα εργαλείο για την σωστή εκτίμηση εγκατάστασης φωτοβολταϊκών και της ισχύος που παρέχουν με βάση τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής.

Αφού βρούμε το ορειβατικό καταφύγιο μέσω δορυφόρου και το μαρκάρουμε στο πρόγραμμα PV GIS αρχίζουμε να προσθέτουμε τις υπόλοιπες παραμέτρους για τον υπολογισμό της εγκατάστασής μας. Συγκεκριμένα ορίζουμε ως τεχνολογία φωτοβολταϊκών το κρυσταλλικό πυρίτιο, εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών συλλεκτών 4,3 KW όπως προέκυψαν από τους πίνακες ηλεκτρικών καταναλώσεων. Τρόπος τοποθέτησης των συλλεκτών στο έδαφος πάνω σε διαμορφωμένες βάσεις και αζιμούθιο μηδέν καθώς βρισκόμαστε στο βόρειο ημισφαίριο.

Μετά από διαδοχικές δοκιμές στο πρόγραμμα καταλήξαμε στην επιλογή της κλίσης των 55° για τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, διότι του χειμερινούς μήνες (κατά τους οποίους έχουμε την ελάχιστη παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλάγια), η κλίση αυτή δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.



Σχήμα 16.3 Το ορειβατικό καταφύγιο Φλαμπούρι Πάρνηθας όπως φαίνεται απ' το δορυφόρο στο πρόγραμμα PV GIS.

A screenshot of the PV GIS software interface. The interface is in Greek and shows various input fields and options for a PV system. The "Radiation database" is set to "Classic PVGIS". The "PV technology" is "Crystalline silicon". The "Installed peak PV power" is 4.3 kWp. The "Estimated system losses" are 28.5%. Under "Fixed mounting options", the "Mounting position" is "Free-standing", the "Slope" is 55 degrees, and the "Azimuth" is 0 degrees. There are checkboxes for "Optimize slope" and "Also optimize azimuth". Under "Tracking options", there are checkboxes for "Vertical axis", "Inclined axis", and "2-axis tracking", each with a "Slope [0;90]" field and an "Optimize" checkbox. The "Horizon file" section has a button "Επιλογή αρχείου" and the text "Δεν έχει επιλεγεί κανένα αρχείο". Under "Output options", there are checkboxes for "Show graphs" and "Show horizon", and radio buttons for "Web page", "Text file", and "PDF". A "Calculate" button and a "[help]" link are at the bottom.

Σχήμα 16.4 Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα PV GIS.

### 16.3 Υπολογισμός Φωτοβολταϊκού Συστήματος

Στην προηγούμενη ενότητα επιλέξαμε με τη χρήση του προγράμματος PV GIS κλίση  $55^\circ$  για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και Νότιο προσανατολισμό. Επιπλέον, δείξαμε ότι η μικρότερη μέση ημερήσια ενέργεια ηλιακής ακτινοβολίας για την περιοχή του καταφυγίου σ' αυτή τη κλίση είναι:

$$E_{HA} = 2.83 \text{ kWh/m}^2/\text{day} \text{ (για το μήνα Δεκέμβριο)}$$

Η ισχύς αιχμής  $P_{\rho\Sigma}$  της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων μιας ημέρας αυτονομίας είναι:

$$P_{\rho\Sigma} = \frac{E_k \cdot P_{STC} \cdot N}{E_{HA} \cdot \sigma_{AS} \cdot \sigma_{\mu} \cdot (N - n)}$$

όπου,

$P_{STC} = 1 \text{ KW/m}^2$ , ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις πρότυπες συνθήκες STC.

$E_k = 8,067 \text{ KWh}$ , η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης το Χειμώνα.

$E_{HA} = 2.83 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$  (για το μήνα Δεκέμβριο), ημερήσια ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

$\sigma_{AS} = 0,95 \cdot \sigma_{\theta}$ , συντελεστής απωλειών συστοιχίας για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα

Συντελεστής θερμοκρασίας:

$$\sigma_{\theta} = 1 - [(t_a + 30) - 25] \cdot 0,004 = 0,94 \text{ με}$$

$t_a = 7,9^\circ\text{C}$ , μέση μηνιαία θερμοκρασία ημέρας αέρα για το μήνα Δεκέμβριο

$\sigma_{\mu} = n_{conv} \cdot n_w \cdot n_{inv} \cdot n_E = 0,9 \cdot 0,98 \cdot 0,94 \cdot 0,85 = 0,7$ , συντελεστής μεταφοράς απωλειών ενέργειας της εγκατάστασης, η οποία περιλαμβάνει ηλεκτρικό συσσωρευτή, ελεγκτή φόρτισης, γραμμές μεταφοράς και inverter

$N = 31$  ημέρες (χρονική περίοδος αναφοράς)

$n = 1$  ημέρα (αριθμός ημερών αυτονομίας)

Μετά τους απαραίτητους υπολογισμούς προκύπτει ότι:

$$P_{\rho\Sigma} = 4,33 \text{ KW}_p$$

Άρα η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων πρέπει να είναι κοντά σε αυτή την τιμή για την κάλυψη των ενεργειακών μας αναγκών για τους χειμερινούς μήνες.

Για τους καλοκαιρινούς μήνες ισχύει:

$$\sigma_{\theta} = 0,88 \text{ (αφού } t_a = 25,6 \text{ }^{\circ}\text{C)}.$$

$$E_{\kappa} = 7,218 \text{ KWh.}$$

$$E_{HA} = 5,62 \text{ KWh/ m}^2 / \text{ day}$$

Άρα η απαιτούμενη ισχύς αιχμής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για το καλοκαίρι είναι:

$$P_{\rho\sigma} = 2,693 \text{ KW}_p$$

Συνεπώς αρκεί η κάλυψη των αναγκών μας το μήνα Δεκέμβριο για να καλύψουμε όλο το έτος.

Επιλέγουμε τη χρήση Φωτοβολταϊκών πλαισίων της εταιρίας Luxor γερμανικής προέλευσης, σειράς Eco Line, μοντέλο LX-240P. Το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, αποτελείται από 60 κύτταρα, έχει ονομαστική τάση  $240\text{W}_p$  και βαθμό απόδοσης 14,89%.



Σχήμα 16.5 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο Luxor Eco Line LX-240P.

### **Ηλεκτρικά δεδομένα LX-240P**

- ✚ Ονομαστική ισχύς  $P_{mp}$  [Wp] 240,00
- ✚ Εύρος  $P_{mp}$  241,50 – 246,49
- ✚ Ονομαστικό ρεύμα  $I_{mp}$  [A] 7,95
- ✚ Ονομαστική τάση  $V_{mp}$  [V] 30,40
- ✚ Ρεύμα βραχυκυκλώματος  $I_{sc}$  [A] 8,49
- ✚ Τάση άνευ φορτίου [V] 37,76
- ✚ Βαθμός απόδοσης σε STC 14,89 %
- ✚ Βαθμός απόδοσης σε 200 W/m<sup>2</sup> 14,18 %
- ✚ NOCT [°C]  $47 \pm 2^{\circ}\text{C}$

### **Οριακές τιμές LX-240P**

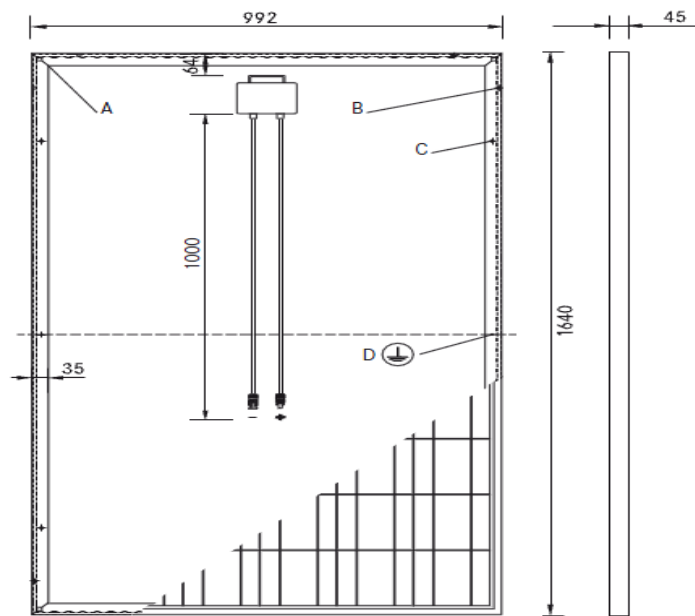
- ✚ Μέγιστη τάση συστήματος [V] 1000 V
- ✚ Μέγιστο ρεύμα επιστροφής [I] 15 A
- ✚ Εύρος θερμοκρασίας - 40 έως 85°C
- ✚ Ζώνη φορτίου χιονιού1 άδεια έως SLZ 3 (σύμφωνα με DIN 1055)
- ✚ Μέγιστο φορτίο πίεσης 5400 Pa
- ✚ Συντελεστής θερμοκρασίας LX-240P
- ✚ Συντελεστής θερμοκρασίας [U] | [I] | [P] - 0,32 % /°C | 0,05 % /°C | - 0,45 % /°C

### **Τεχνικές πληροφορίες LX-240P**

- ✚ Αριθμός κυψελών 6 x 10, τρία strings σε σειρά
- ✚ Μέγεθος κυψελών 156 χιλ. x 156 χιλ.
- ✚ Διαστάσεις πλαισίου (M x Π x Y)2 | Βάρος 1640 χιλ. x 992 χιλ. x 45 χιλ. | 21,0 κιλά
- ✚ Μπροστινό κάλυμμα 3,2 χιλ. σκληρυμένο, ηλιακό γυαλί με ελάχιστο ποσοστό σιδήρου
- ✚ Πλαίσιο ανθεκτικό, ανοδιωμένο αλουμινένιο πλαίσιο σε κατασκευή κοίλου θαλάμου
- ✚ Κουτί σύνδεσης πλαστικό (PPO) (Οξειδίο πολυφαινυλενίου), IP65, αεριζόμενο
- ✚ Καλώδια σύνδεσης 4 mm<sup>2</sup> ηλιακό καλώδιο, μήκος καλωδίου 1,0 μ.
- ✚ Σύνδεση υψηλής ποιότητας σύστημα σύνδεσης, (IP65) MC4 ή ισότιμο
- ✚ Τεστ χαλαζόπτωσης  $\varnothing$  45 mm | Ταχύτητα 23 m/s
- ✚ Πυρασφάλιση στην περίπτωση BROOF(ti) κατά DIN EN 13501-5

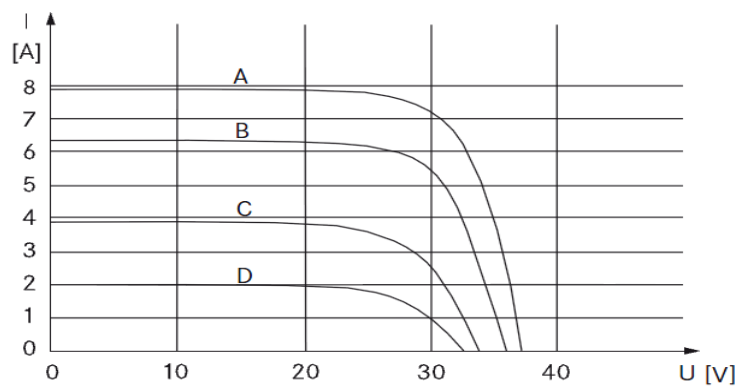


Πίσω όψη / Μπροστινή όψη / Πλαϊνή όψη<sup>2</sup>

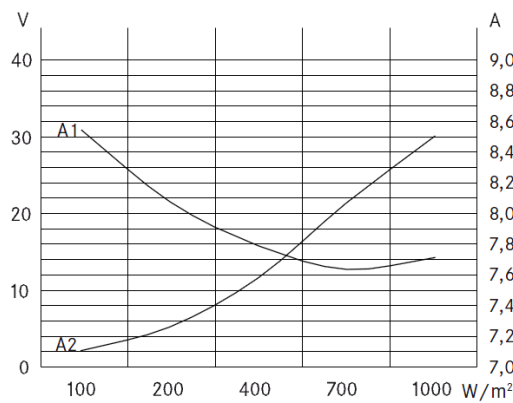


- A: 4 x Αποστράγγιση 10\*10 χιλ
- B: 8 x Άνοιγμα εξαερισμού 3\*7 χιλ
- C: 8 x Οπή συναρμολόγησης<sup>3</sup> d = 7 χιλ
- D: 2 x Γείωση d = 2 χιλ

Χαρακτηριστικές καμπύλες



- A: 1000 W/m<sup>2</sup> | B: 800 W/m<sup>2</sup>
- C: 500 W/m<sup>2</sup> | D: 250 W/m<sup>2</sup>



A1:  $I_{mpp}$  | A2:  $V_{mpp}$

Με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πίνακα το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων που απαιτούνται είναι:

$$N = \frac{P_{\rho\Sigma}}{P_{\rho\Pi}}$$

όπου:

$$P_{\rho\Sigma} = 4,33 \text{KW}_p \text{ και } P_{\rho\Pi} = 240 \text{ W}_p$$

Επομένως

$$N \cong 18 \text{ περίπου φωτοβολταϊκά πλαίσια}$$

Στη συνέχεια για να υπολογίσουμε την συνδεσμολογία των φωτοβολταϊκών πλαισίων, πρέπει να ορίσουμε τη μέγιστη τάση  $V_{m\sigma}$  της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Η τάση  $V_{m\sigma}$  φροντίζουμε να υπερκαλύπτει τη μέγιστη επιτρεπτή τάση φόρτισης του συσσωρευτή, η οποία προσεγγιστικά ισούται με  $\sim 1,2V_B$ , όπου  $V_B$  η ονομαστική τάση του συσσωρευτή. Επομένως ισχύει:

$$V_{m\sigma} > 1,2 V_B$$

όπου,

$V_B$  ονομαστική τάση του ηλεκτρικού συσσωρευτή και με τιμή 24V.

Επομένως έχουμε:

$$V_{m\sigma} > 28,8V$$

Για να καλύπτουμε το περιορισμό της τάσης που θέσαμε νωρίτερα, επιλέξαμε τη δημιουργία 9 παράλληλων κλάδων, ο καθένας εκ των οποίων θα έχει 2 πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά. Με τη χρήση 18 πλαισίων 240W<sub>p</sub> το καθένα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι τελικά:

$$P_m = v \cdot P_{m1} = 18 \cdot 240 = 4,32 \text{ KW}_p$$

Στη συνέχεια καταχωρούμε τις τιμές που υπολογίσαμε δηλαδή την ισχύ αιχμής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, τον τύπο των πλαισίων, την κλίση των συλλεκτών καθώς και όλα τα κλιματικά και γεωγραφικά δεδομένα στο πρόγραμμα PV GIS, απ' το οποίο προκύπτει ο παρακάτω πίνακας. Σε αυτόν φαίνεται η μέση ημερήσια ενεργειακή απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε κλίση 55°.

## Performance of Grid-connected PV

### PVGIS estimates of solar electricity generation

Location: 38°9'41" North, 23°44'49" East, Elevation: 1143 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-classic

Nominal power of the PV system: 4.3 kW (crystalline silicon)

Estimated losses due to temperature: 9.3% (using local ambient temperature)

Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.8%

Other losses (cables, inverter etc.): 28.5%

Combined PV system losses: 37.0%

Fixed system: inclination=55 deg., orientation=0 deg.				
Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	9.38	291	3.28	102
Feb	10.60	297	3.76	105
Mar	12.90	400	4.61	143
Apr	14.50	434	5.27	158
May	14.20	441	5.34	165
Jun	14.30	428	5.48	165
Jul	14.50	449	5.62	174
Aug	15.00	465	5.80	180
Sep	15.30	458	5.75	173
Oct	12.50	388	4.61	143
Nov	9.44	283	3.39	102
Dec	8.06	250	2.83	87.6
Year	12.60	382	4.65	141
Total for year		4580		1700

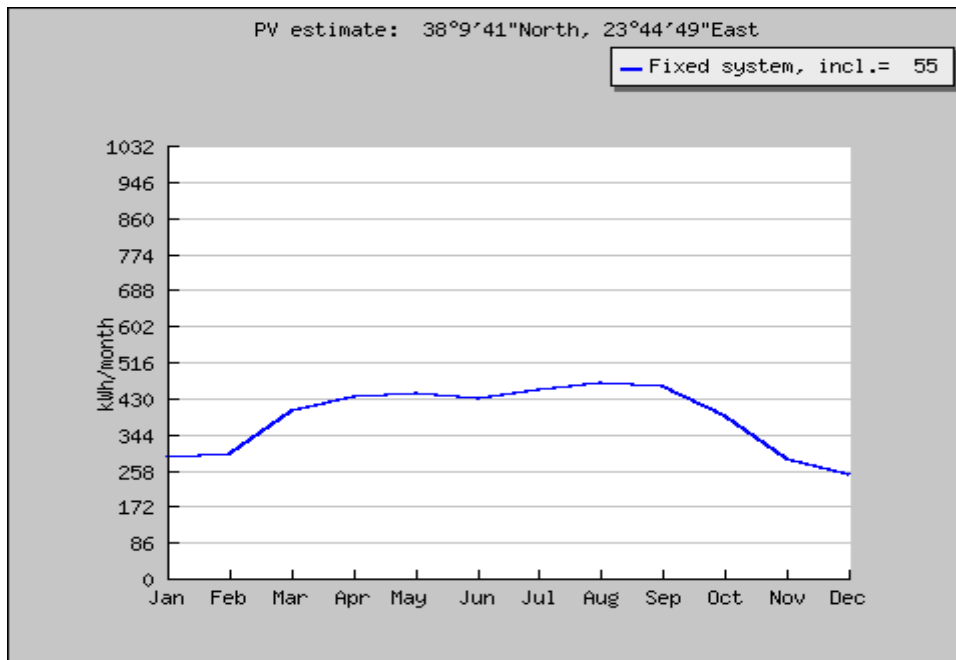
Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh)

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh)

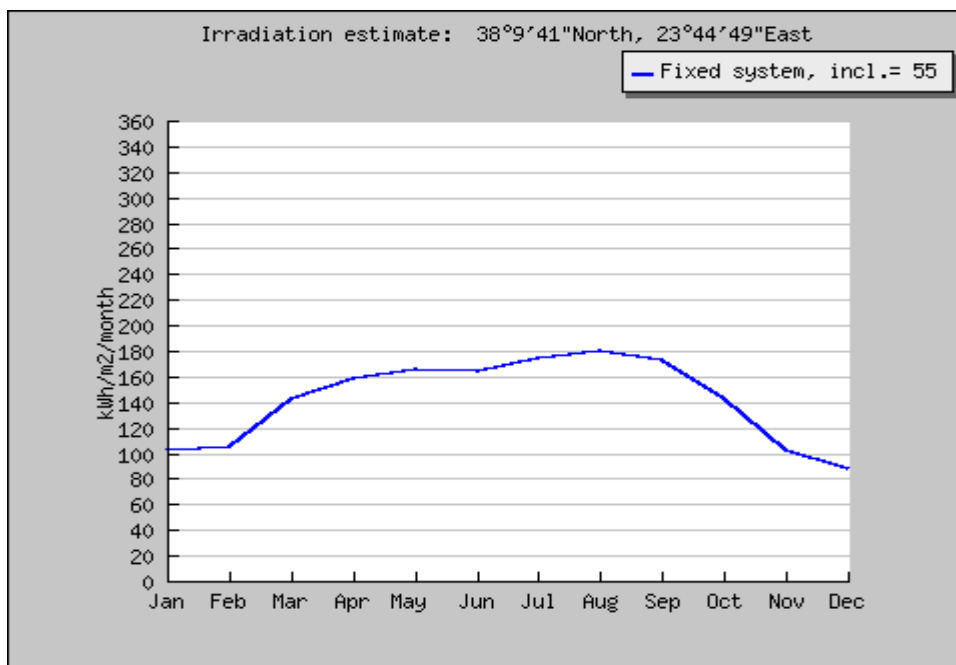
Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>)

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>)

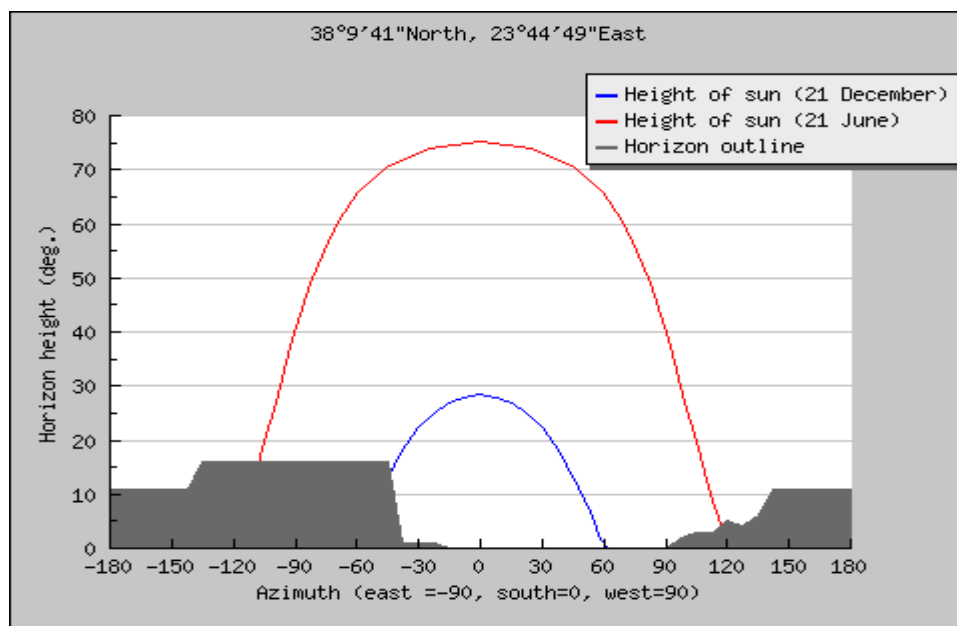
**Σχήμα 16.6** Ενεργειακές απολαβές της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής συστοιχίας στην περιοχή του καταφυγίου.



Σχήμα 16.7 Παραγωγή ενέργειας σε KWh απ' τη φωτοβολταϊκή συστοιχία για κάθε μήνα του έτους σε κλίση 55°.



Σχήμα 16.8 Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε KWh/m<sup>2</sup> για κλίση 55°.



**Σχήμα 16.9** Μεταβολή του ύψους του ορίζοντα στην περιοχή του καταφυγίου σε μοίρες στο θερινό ηλιοστάσιο και στο χειμερινό ηλιοστάσιο.

Απ' τα παραπάνω δεδομένα φαίνεται ότι η εγκατάσταση καλύπτει πλήρως τις ενεργειακές μας ανάγκες, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, και μάλιστα το μήνα Δεκέμβριο κατά τον οποίο έχουμε τις δυσμενέστερες συνθήκες, η ενέργεια που παράγεται είναι ακριβώς ίση με τις ενεργειακές μας απαιτήσεις. Επομένως δεν έχει γίνει υπερδιαστασιολόγηση του εν λόγω συστήματος και οι εφεδρικές πηγές που θα υπάρξουν θα έχουν στόχο να καλύψουν τις αιχμές ζήτησης μέσα στη μέρα και τις ημέρες αυτονομίας.

## 16.4 Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών συλλεκτών με βέλτιστη κλίση $55^\circ$ , για όλο το χρόνο.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η ρύθμιση της κλίσης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών γίνεται δύο ή και τέσσερις φορές το χρόνο για βέλτιστη απόδοση, σε όλη τη διάρκεια του έτους. Εμείς θα υπολογίσουμε για όλο το χρόνο, την απόσταση ανάμεσα στις σειρές, για να μην έχουμε σκίαση, με σταθερή βέλτιστη κλίση  $55^\circ$ .

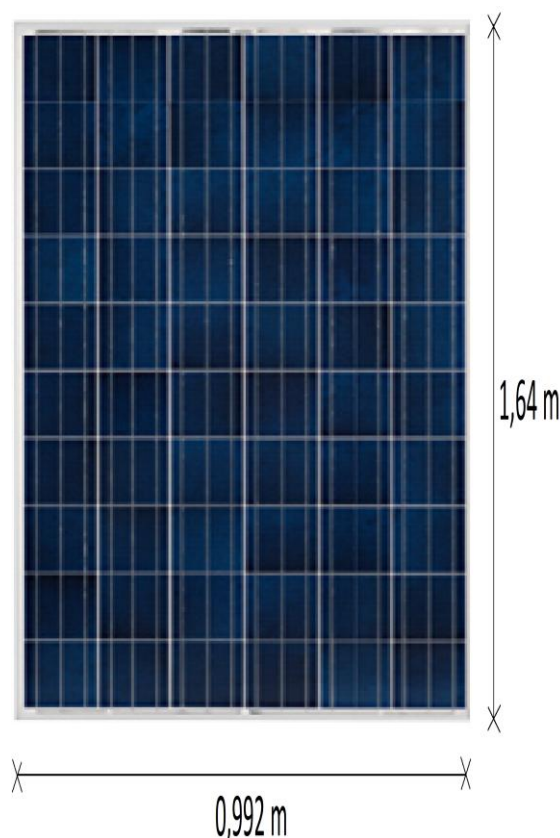
Τα δεδομένα μας είναι τα εξής :

$\delta = - 23,45^\circ$ , η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου).

$\Phi = 38^\circ$ , το γεωγραφικό πλάτος για την περιοχή του ορεινού καταφυγίου.

$B = 55^\circ$ , Η βέλτιστη κλίση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών για όλο τον χρόνο.

Διαστάσεις φωτοβολταϊκού συλλέκτη :



**Σχήμα 16.10** Φωτοβολταϊκό πλαίσιο Luxor Eco Line LX-240P.

Μήκος  $h = 1,64 \text{ m}$  – Πλάτος  $L = 0,992 \text{ m}$  – Πάχος  $v = 0,045 \text{ m}$ .

Όπως υπολογίσαμε παραπάνω θα χρησιμοποιήσουμε 18 τέτοια, φωτοβολταϊκά πλαίσια για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του ορεινού καταφύγιου. Κατά την τοποθέτηση στον ειδικά μελετημένο χώρο δίπλα από το ορεινό καταφύγιο, θα κατασκευάσουμε φωτοβολταϊκό πάνελ το οποίο θα αποτελείται από δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετημένα οριζόντια. Δηλαδή το ύψος του φωτοβολταϊκού πάνελ θα είναι  $2L = 1,984 \text{ m}$  και το πλάτος θα είναι  $h = 1,64 \text{ m}$ . Έτσι θα σχηματίσουμε δύο σειρές (συστοιχίες) με 5 στην πρώτη και 4 στην δεύτερη φωτοβολταϊκά πάνελ (σχήμα 16.12).

Έχουμε επίσης, γωνία  $\theta = \varphi - \delta = 38^\circ - (-23,45^\circ) \Rightarrow \theta = 61,45^\circ$ .

Το ύψος του Ήλιου κατά την ηλιακή μεσημβρία, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση,

$$n_n = 90^\circ - \theta = 90^\circ - 61,45^\circ \Rightarrow n_n = 28,55^\circ.$$

Η απόσταση ανάμεσα στις σειρές θα είναι:

$$x = 2L \left[ \frac{\eta\mu(n_n + B)}{\eta\mu n_n} \right] = 1,984 \left[ \frac{\eta\mu(28,55^\circ + 55^\circ)}{\eta\mu 28,55^\circ} \right] \Rightarrow$$

$$x = 1,984 \left[ \frac{\eta\mu 83,5^\circ}{\eta\mu 28,55^\circ} \right] = 1,984 \left[ \frac{0,99}{0,47} \right] \Rightarrow$$

$$x = 4,12 \text{ m.}$$

Η απόσταση στη βάση θα είναι :

Πλάτος βάσης :

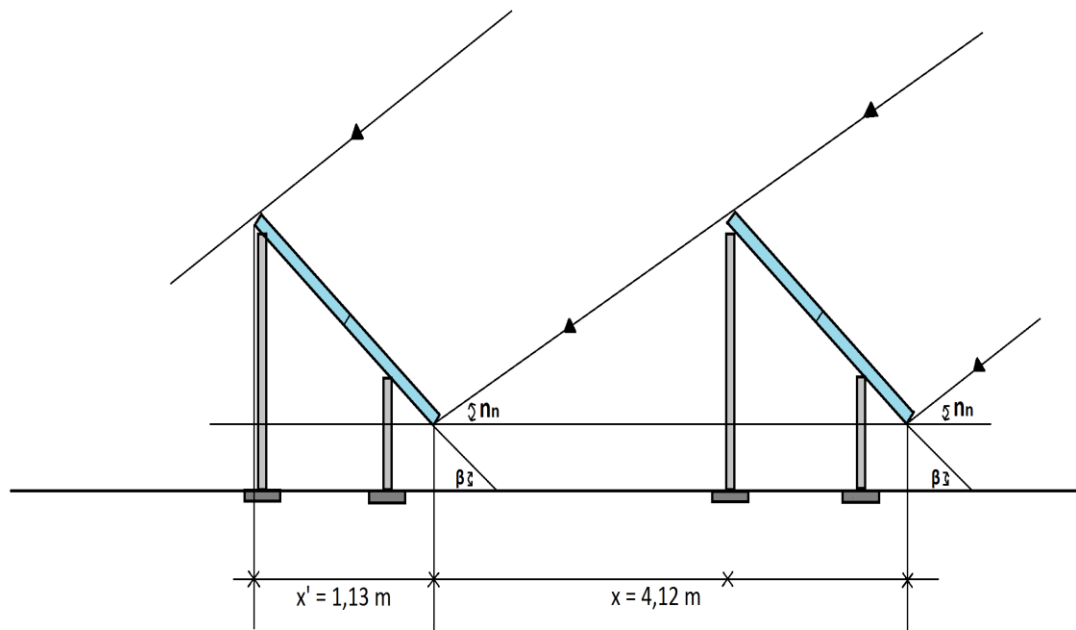
$$x' = 2L \cdot \sigma\upsilon\nu B = 1,984 \cdot \sigma\upsilon\nu 55^\circ \Rightarrow$$

$$\mathbf{x' = 1,13 \text{ m.}}$$

Το πλάτος  $Y'$  που καταλαμβάνουν στο έδαφος οι δύο σειρές θα είναι :

$$Y' = [(v-1) \cdot x + x'] = [(2-1) \cdot 4,12 + 1,13] \Rightarrow$$

$$\mathbf{Y' = 5,25 \text{ m.}}$$



**Σχήμα 16.11** Τρόπος στήριξης συλλεκτών στο έδαφος, πλάγια όψη, (τοποθέτηση μεταλλικών βάσεων) για μόνιμη κλίση, για γωνία  $55^\circ$ .

Το μήκος  $y_1$  της 1<sup>ης</sup> σειράς θα είναι :

$$y_1 = K \cdot h = 5 \cdot 1,64 \Rightarrow$$

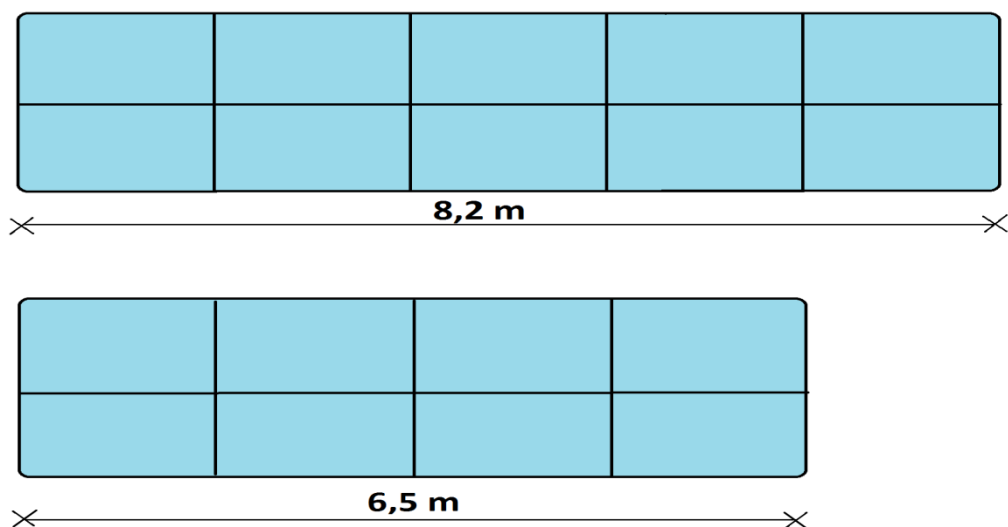
$$y_1 = \mathbf{8,2 \text{ m.}}$$

Το μήκος  $y_2$  της 2<sup>ης</sup> σειράς θα είναι :

$$Y_2 = K \cdot h = 4 \cdot 1,64 \Rightarrow$$

$$y_2 = \mathbf{6,5 \text{ m.}}$$





Σχήμα 16.12 Πρόσοψη φωτοβολταϊκών συλλεκτών.

Υπολογισμός εμβαδού 1<sup>ης</sup> σειράς (5 φωτοβολταϊκά πάνελ).

$$F_{s1} = y_1 \cdot x' = 8,2 \cdot 1,13 \Rightarrow$$

$$F_{s1} = 9,266 \text{ τμ.}$$

Υπολογισμός εμβαδού 2<sup>ης</sup> σειράς (4 φωτοβολταϊκά πάνελ).

$$F_{s2} = y_2 \cdot x' = 6,5 \cdot 1,13 \Rightarrow$$

$$F_{s2} = 7,345$$

Διαφορά μεταξύ 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> σειράς:

$$F_{s1-s2} = 9,266 - 7,345 = 1,921 \text{ τμ}$$

Η συνολική έκταση που απαιτείται για την τοποθέτηση των 9 φωτοβολταϊκών πάνελ (18 Φ/Β πλαίσια), σε 2 σειρές, χωρίς να έχουμε σκίαση, είναι :

$$F_s = y_1 \cdot y' = 8,2 \cdot 5,25 \Rightarrow$$

$$F_s = 43,05 \text{ τμ.}$$

Αφαιρόντας από το  $F_s$  το  $F_{s1-s2}$ , θα έχουμε τελικά το εμβαδόν που απαιτείται για την τοποθέτηση των 9 φωτοβολταϊκών πλαισίων :

$$F_{ES} = F_s - F_{s1-s2} = 43,05 - 1,921 \Rightarrow$$

$$F_{ES} = \mathbf{41,129 \text{ τμ.}}$$

## 16.5 Υπολογισμός χωρητικότητας συσσωρευτών

Κατόπιν υπολογίζεται η χωρητικότητα  $C$  του ηλεκτρικού συσσωρευτή. Ισχύει ο παρακάτω τύπος:

$$C = \frac{n \cdot E_k}{\sigma_{\gamma B} \cdot \sigma_{\epsilon K} \cdot \beta_{\epsilon K} \cdot V_B}$$

όπου,

$E_k = 8,067 \text{ KWh}$ , η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης για τους χειμερινούς μήνες.

$\sigma_{\gamma B} = 0,8$ , συντελεστής γύρασης συσσωρευτή.

$\sigma_{\epsilon K} = 0,91$ , συντελεστής μεταφοράς ενέργειας στο κύκλωμα εκφόρτισης

$\beta_{\epsilon K} = 0,6$ , βάθος εκφόρτισης συσσωρευτών για 1 ημέρα αυτονομίας

$n = 1$  ημέρα

$V_B = 24V$  η ονομαστική τάση συσσωρευτή

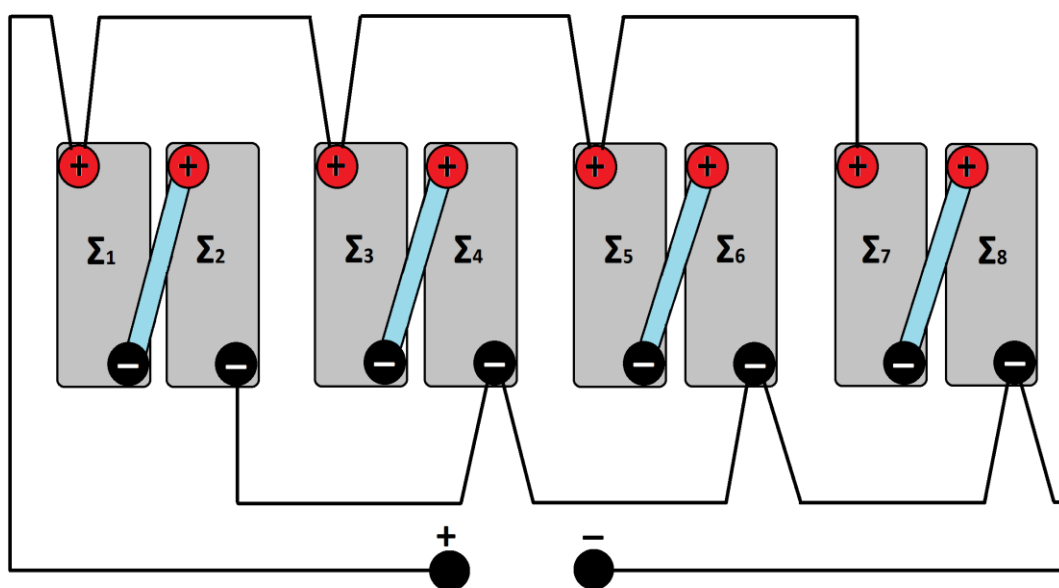
Από την παραπάνω σχέση η χωρητικότητα προκύπτει  $C = 769,53Ah$

Θα χρησιμοποιήσουμε στο σύστημά μας συσσωρευτές της εταιρίας Solar Systems τύπου AGM 200AH με τάση 12V και χωρητικότητα 200Ah/4h. Προτιμήθηκαν συσσωρευτές τύπου AGM διότι χρησιμοποιούν Boron-Silicate Glass Mat μεταξύ των πλακών. Ο ηλεκτρολύτης είναι μέσα στο Glass Mat και δεν υπάρχει κίνδυνος διαρροής σε περίπτωση σπασίματος της μπαταρίας. Επίσης δεν υπάρχει κίνδυνος παγώματος της μπαταρίας σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες αφού δεν υπάρχουν υγρά μέσα. Η τάση φόρτισης είναι η ίδια όπως για κάθε απλή μπαταρία και λόγω του ότι η εσωτερική αντίσταση είναι εξαιρετικά μικρή δεν υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης της μπαταρίας κάτω από συνθήκες γρήγορη φόρτισης ή εκφόρτισης. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι πολύ χαμηλός της τάξης του 1-3% μηνιαία που σημαίνει ότι μπορούν να μείνουν εκτός φόρτισης για περισσότερο χρονικό διάστημα χωρίς να πέσει ιδιαίτερα η απόδοση της. Οι πλάκες στην AGM είναι ιδιαίτερα συμπαγείς και αντέχουν περισσότερους κραδασμούς από κάθε άλλη μπαταρία. Έχουν διάρκεια ζωής 10-12 χρόνια ενώ είναι κατάλληλες για κυκλικές, πολλαπλές φορτίσεις με εφαρμογές σε φωτοβολταϊκά συστήματα.



Σχήμα 16.13 Συσσωρευτής Solar Systems AGM 200AH τάσης 12V και χωρητικότητας 200Ah.

Η συστοιχία των συσσωρευτών θα περιλαμβάνει 4 παράλληλους κλάδους με 2 συσσωρευτές σε σειρά ανά κλάδο, δηλαδή συνολικά απαιτούνται 8 συσσωρευτές. Η σύνδεση σε σειρά καθορίζει την ονομαστική τάση ( $V_B = 2 \cdot 12 = 24V$ ) και η παράλληλη σύνδεση καθορίζει την ονομαστική χωρητικότητα ( $C = 4 \cdot 200 = 800Ah$ ). Τα καλώδια θα πρέπει να έχουν κατάλληλη διατομή για να μεταφέρουν με όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες (πτώση τάσης, ανάπτυξη θερμότητας κλπ) το ηλεκτρικό ρεύμα από τον αυτόματο ρυθμιστή – φορτιστή προς τους συσσωρευτές και από εκεί στον ηλεκτρονικό αντιστροφέα. Στα σημεία σύνδεσης με τους πόλους θα πρέπει να γίνεται χρήση ακροδεκτών – σφικτήρων και θα εξασφαλίζεται πολύ καλή ηλεκτρική σύνδεση. Οι πόλοι πριν από τη σύνδεση θα πρέπει να καθαρίζονται με βούρτσα και να πλένονται με διάλυμα σόδας. Πριν και μετά τη σύσφιξη των ακροδεκτών πρέπει να αλείφονται με αντιδιαβρωτικό γράσο ή βαζελίνη.



Σχήμα 16.14 Τρόπος σύνδεσης συσσωρευτών υβριδικού συστήματος.

Η κάθε συστοιχία έχει μέγιστο ρυθμό εκφόρτισης:

$$\frac{200Ah}{4h} = 50A$$

και συνολικά οι 4 συστοιχίες  $50 \cdot 4 = 200A$ . Η συνολική ισχύς που μας παρέχουν σ' αυτή την περίπτωση είναι:

$$P = V \cdot I \Rightarrow P = 24 \cdot 200 \Rightarrow P = 4800W$$

Επομένως υπερκαλύπτεται η ισχύς αιχμής των 4673W.

## 16.6 Επιλογή Ρυθμιστή Φόρτισης

Το επόμενο βήμα μας είναι η επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή – ρυθμιστή φόρτισης. Η τάση του ρυθμιστή φόρτισης πρέπει να είναι ίση με την ονομαστική τάση του συσσωρευτή, δηλαδή στην περίπτωσή μας 24V. Το μέγιστο ρεύμα εισόδου του ρυθμιστή φόρτισης προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε τη μέγιστη ένταση ρεύματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με το συντελεστή ασφαλείας 1,2. Ισχύει:

$$I_{m\Sigma} = I_{m\Pi} \cdot N_{\Pi} = 7,95 \cdot 9 = 71,55 \text{ A}$$

όπου

$I_{m\Sigma}$  η μέγιστη ένταση ρεύματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας .

$I_{m\Pi} = 7,95$  η μέγιστη ένταση ρεύματος του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

$N_{\Pi} = 9$ , ο αριθμός των παράλληλων κλάδων της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Άρα το μέγιστο ρεύμα εισόδου του ρυθμιστή φόρτισης είναι:  $1,2 \cdot I_{m\Sigma} = 85,86 \text{ A}$

Η ονομαστική τάση στην είσοδο του ρυθμιστή φόρτισης προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε την ονομαστική τάση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με το συντελεστή ασφαλείας 1,2. Ισχύει:

$$V_{m\Sigma} = V_{m\Pi} \cdot N_{\Sigma} = 30,4 \cdot 2 = 60,8 \text{ V}$$

όπου

$V_{m\Sigma}$  η ονομαστική τάση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας

$V_{m\Pi} = 30,4$  , η ονομαστική τάση του φωτοβολταϊκού πλαισίου

$N_{\Sigma} = 2$  , ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά

Άρα η ονομαστική τάση εισόδου του ρυθμιστή φόρτισης είναι:  $1,2 \cdot V_{m\Sigma} = 72,96 \text{ V}$

Αντίστοιχα προκύπτει και η τάση στη λειτουργία χωρίς φορτίο η οποία είναι 90,6 V.

Το ρεύμα εξόδου του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να μπορεί να δώσει το μέγιστο ρεύμα στα φορτία κατανάλωσης που λειτουργούν ταυτόχρονα. Θεωρούμε ότι η μέγιστη απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς για την ταυτόχρονη λειτουργία συσκευών είναι

$P_K = 4,673 \text{ KW}$ . Η τάση κατανάλωσης είναι  $V_K = 230 \text{ V}$ . Άρα το ρεύμα εξόδου θα είναι  $P_K/V_K = 20,3 \text{ A}$ . Επομένως το μέγιστο ρεύμα εξόδου είναι  $20,3 \cdot 1,2 = 24,36 \text{ A}$ .

Συνεπώς, θα πρέπει να επιλέξουμε ελεγκτή – ρυθμιστή φόρτισης με τα εξής χαρακτηριστικά:

- μέγιστο ρεύμα εισόδου: 85,86 A
- ονομαστική τάση εισόδου: 72,96 V
- τάση στη λειτουργία χωρίς φορτίο: 90,6 V
- μέγιστο ρεύμα εξόδου: 24,36 A

Επιλέγεται ο ρυθμιστής FM80-150VDC Charge Controller, της εταιρίας FLEXmax.



**Σχήμα 16.15** Ο ρυθμιστής φόρτισης FM80-150VDC Charge Controller, της εταιρίας FLEXmax.

<b>FLEXmax FM80-150VDC Specifications</b>	
<b>Max PV Input Current</b>	95 A
<b>Maximum Output Current</b>	80 A at 104° F (40°C) with adjustable current limit
<b>Maximum Solar Array STC Nameplate</b>	7500 Watts
<b>NEC Recommended Solar Array STC Nameplate</b>	5000 Watts
<b>PV Open Circuit Voltage (VOC)</b>	150 VDC absolute maximum coldest conditions / 145 VDC start-up and operating maximum
<b>Power Conversion Efficiency</b>	97.5% at 80 A in a 48 VDC System - Typical
<b>Charging Regulation</b>	Five Stages: Bulk, Absorption, Float, Silent and Equalization
<b>Voltage Regulation Set points</b>	10 to 60 VDC user adjustable with password protection
<b>Equalization Charging</b>	Programmable Voltage Setpoint and Duration - Automatic Termination when completed
<b>Battery Temperature Compensation</b>	Automatic with optional RTS installed / 5.0 mV per °C per 2V battery cell
<b>Voltage Step-Down Capability</b>	Can charge a lower voltage battery from a higher voltage PV array - Max 150 VDC input
<b>Programmable Auxilary Control Output</b>	12 VDC output signal which can be programmed for different control applications (Maximum of 0.2 amps DC)
<b>Status Display</b>	3.1" (8 cm) backlit LCD screen - 4 lines with 80 alphanumeric characters total
<b>Remote Display and Controller</b>	Optional Mate or Mate2 with RS232 Serial Communications Port
<b>Network Cabeling</b>	Proprietary network system using RJ 45 Modular Connectors with CAT 5e Cable (8 wires)
<b>Data Logging</b>	Last 128 days of Operation - Amp Hours, Watt Hours, Time in Float , Peak Watts, Amps, Solar Array Voltage, Max Battery Voltage Min Battery Voltage and Absorb for each day along with total Accumulated Amp Hours, and kW Hours of production
<b>Hydro Turbine Applications</b>	Consult factory for approved Turbines
<b>Positive Ground Applications</b>	Requires two Pole Breakers for switching both positive and Negative Conductors on both Solar Array and Battery Connections (HUB 4 and HUB 10 can not be used for use in positive ground applications)
<b>Operating Temperature Range</b>	Minimum -40° to maximum 60° C (Power capacity of the controller is automatically derated when operated above 40° C)
<b>Environmental Rating</b>	Indoor Type 1
<b>Conduit Knockouts</b>	One 1" (35mm) on the back; One 1" (35mm) on the left side; Two 1" (35mm) on the bottom
<b>Warranty</b>	Standard 5 year / Available 10 Year
<b>Weight</b>	15.75 lbs (7.10 kg)
<b>Dimensions</b>	21" x 10.5" x 9.75" (53 x 27 x 25 cm)
<b>Options</b>	Remote Temperature Sensor (RTS), HUB 4, HUB 10, MATE, MATE 2
<b>Certifications</b>	ETL Listed to UL1741, CSA C22.2 No. 107.1

Σχήμα 16.16 Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών του ρυθμιστή φόρτισης FLEXmax FM80-150VDC.

## 16.7 Επιλογή μετατροπέα τάσης (Inverter)

Στη συνέχεια, προχωρούμε στην επιλογή του κατάλληλου μετατροπέα τάσεως DC/AC (inverter). Ο μετατροπέας αυτός θα πρέπει να καλύπτει τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Τάση εισόδου ίση με την ονομαστική τάση των συσσωρευτών (δηλαδή 24 V).
- Η ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ  $P_k$  των φορτίων που λειτουργούν ταυτόχρονα (δηλαδή 4,673 KW όπως θεωρήσαμε νωρίτερα).
- Ο μετατροπέας θα πρέπει να έχει απόδοση τριπλάσιας ισχύος για τουλάχιστον 10sec.
- Η τάση εξόδου του μετατροπέα θα πρέπει να είναι ίση με την τάση των φορτίων κατανάλωσης, δηλαδή 230 V.
- Η κυματομορφή της εξόδου θα πρέπει να είναι τροποποιημένο ή διαμορφωμένο ημίτονο ή πλήρες ημίτονο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω επιλέγουμε τον inverter Quattro 24/3000/70-50/30. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του μετατροπέα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.



Σχήμα 16.17 Ο μετατροπέας τάσεως DC/AC (inverter) Quattro 24/3000/70-50/30.



<b>INVERTER QUATTRO 24/3000/70-50/30</b>	
<b>PowerControl / PowerAssist</b>	Yes
<b>Integrated Transfer switch</b>	Yes
<b>AC inputs (2x)</b>	Input voltage range: 187-265 VAC Input frequency: 45 – 65 Hz
<b>Maximum feed through current (A)</b>	2x100
<b>Input voltage range (V DC)</b>	19 – 33V
<b>Output</b>	Output voltage: 230 VAC ± 2% Frequency: 50 Hz ± 0,1%
<b>Cont. output power at 25 °C (W)</b>	7000
<b>Cont. output power at 40 °C (W)</b>	6300
<b>Peak power (W)</b>	16000
<b>Maximum efficiency (%)</b>	96
<b>Zero-load power (W)</b>	35
<b>Zero load power in AES mode (W)</b>	30
<b>Zero load power in Search mode (W)</b>	10
<b>GENERAL</b>	
<b>Auxiliary output (A)</b>	50
<b>Programmable relay</b>	3x
<b>Protection</b>	a-g
<b>VE.Bus communication port</b>	For parallel and three phase operation, remote monitoring and system integration
<b>General purpose com. port</b>	2x
<b>Characteristics</b>	Operating temp.: -20 to +50 °C Humidity (non condensing): max. 95%
<b>ENCLOSURE</b>	
<b>Characteristics</b>	Material & Colour: aluminium (blue RAL 5012) Protection category: IP 21
<b>Battery-connection</b>	Four M8 bolts (2 plus and 2 minus connections)
<b>230 V AC-connection</b>	Screw terminals 13 mm <sup>2</sup> (6 AWG)
<b>Weight (kg)</b>	45
<b>Dimensions (hxwx d in mm)</b>	470 x 350 x 280
<b>STANDARDS</b>	
<b>Safety</b>	EN 60335-1, EN 60335-2-29
<b>Emission, Immunity</b>	EN55014-1, EN 55014-2, EN 61000-3-3

Σχήμα 16.18 Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών inverter Quattro 24/3000/70-50/30.

## 16.8 Υπολογισμός διατομής καλωδίων.

(έλεγχος με βάση την πυκνότητα ρεύματος, πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384 και έλεγχος με βάση την επιτρεπόμενη πτώση τάσης που σύμφωνα με τους διεθνείς ηλεκτρικούς κανόνες National Electric Code, πρέπει να είναι μικρότερη του 5%.)

A) Διαδρομή από ομάδα φωτοβολταϊκών συλλεκτών μέχρι το μετατροπέα.

1. Έλεγχος με βάση την πυκνότητα ρεύματος.

$$I_{\Sigma} = 9 \cdot 7,95 = 71,55 \text{ A.}$$

Επειδή η θερμοκρασία του εδάφους κατά την καλοκαιρινή περίοδο είναι 25 °C περίπου, με βάση τα στοιχεία του πίνακα 52-Δ<sub>2</sub>, του προτύπου ΕΛΟΤ HD384, θα έχουμε συντελεστή διόρθωσης  $f_2 = 0,95$ .

Επίσης συντελεστής διόρθωσης λόγω διαφορετικής ειδικής θερμικής αντίστασης του εδάφους (3 k.m/W),  $f_6 = 0,96$  (πίνακας 52-Δ<sub>2</sub>).

Επομένως :

$$I'_{\Sigma} = I_{\Sigma} / f_2 \cdot f_6$$

$$I'_{\Sigma} = 71,55 / 0,95 \cdot 0,96 = 78,45 \text{ A.}$$

Από τον πίνακα 52-K<sub>3</sub>, βάση πρότυπου ΕΛΟΤ HD384, στήλη 3<sup>η</sup>, θα έχουμε διατομή καλωδίου 16 mm<sup>2</sup>. Το καλώδιο που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι HO7RN-F με μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση στα 95 A. Με βάση λοιπόν την πυκνότητα ρεύματος και τις συνθήκες λειτουργίας, έχουμε τύπο και διατομή καλωδίου:

$$\mathbf{HO7RN-F 2 \times 16 \text{ mm}^2}$$

2. Έλεγχος με βάση την επιτρεπόμενη πτώση τάσης ( $U_{\pi\pi\%} < 5\% U_{\text{nom}}$ ).

Η απόσταση από τους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες μέχρι το ηλεκτροστάσιο του καταφυγίου, είναι  $l = 15 \text{ m}$  και το συνολικό μήκος αγωγών καλωδίου,  $L = 2l = 2 \cdot 15 \text{ m} = 30 \text{ m}$ .

Η αντίσταση του καλωδίου θα είναι:

$$R = \rho \cdot L / S$$

$\rho$  : Ειδική αντίσταση αγωγών του χαλκού (0,018 Ω / mm<sup>2</sup>).

$L$  : συνολικό μήκος αγωγών καλωδίου.

$S$  : διατομή καλωδίου με βάση την πυκνότητα ρεύματος.

Επομένως :

$$R = \rho \cdot L / S = 0,018 \cdot 30 / 16 = 0,03 \Omega.$$

Η πτώση τάσης στην διαδρομή του καλωδίου θα είναι :

$$U_{\pi\tau} = I_{\Sigma} \cdot R = 71,55 \cdot 0,03 = 2,14 \text{ V}.$$

$$U_{\varepsilon\pi} < U_{\text{on}} \cdot 5\% \quad \rightarrow \quad U_{\varepsilon\pi} < 60,8 \cdot 0,05 \quad \rightarrow \quad U_{\varepsilon\pi} < 3,04 \text{ V}$$

Από τους υπολογισμούς προκύπτει  $U_{\pi\tau} < U_{\varepsilon\pi}$  δηλαδή,  $2,14\text{V} < 3,04\text{V}$ .

Επομένως με καλώδιο διατομής  $2 \times 16 \text{ mm}^2$ , έχουμε πτώση τάσης μικρότερη από την επιτρεπόμενη. Τελικά επιλέγουμε διατομή καλωδίου  $S = 16 \text{ mm}^2$  (καλώδιο HO7RN-F  $2 \times 16 \text{ mm}^2$ ).

B) Διαδρομή από το μετατροπέα μέχρι τη συστοιχία των συσσωρευτών.

Η συνολική χωρητικότητα της συστοιχίας είναι :

$$Q = 800 \text{ Ah}.$$

Για ταχεία φόρτιση ή εκφόρτιση (0,2C), θα έχουμε :

$$I_{\varphi} = 0,2 \cdot Q \Rightarrow I_{\varphi} = 0,2 \cdot 800 = 160 \text{ A}.$$

Με βάση τα στοιχεία του πίνακα 52-K<sub>2</sub>, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ HD384, για υλικό ΕΡΡ και δύο φορτιζόμενους αγωγούς (στήλη 3) για ένταση 160 Α, έχω διατομή αγωγών καλωδίου **S = 35 mm<sup>2</sup>**.

# Κεφάλαιο 17

---

*Υπολογισμός Ονομαστικής Ισχύος  
Ανεμογεννήτριας*

---

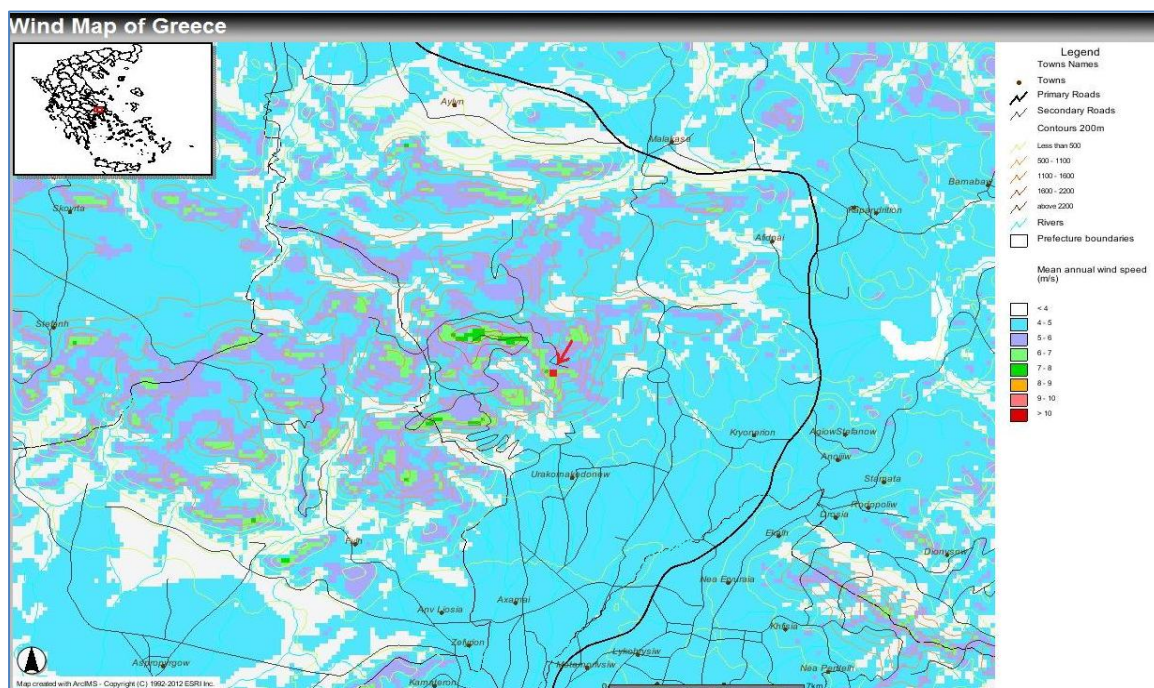
## 17.1 Διαστασιολόγηση Ανεμογεννήτριας

Στη συνέχεια προχωράμε στη μελέτη για τον υπολογισμό της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η καταγραφή των ανεμολογικών δεδομένων που επικρατούν στο χώρο του καταφυγίου. Τα στοιχεία που παραθέτουμε προέρχονται από τη βάση δεδομένων meteo.gr. Η εν λόγω βάση δεδομένων αντλεί στοιχεία από το δίκτυο αυτόματων σταθμών του ΕΑΑ και αποτελείται από σταθμούς τύπου Davis, οι οποίοι μετρούν όλες τις βασικές μετεωρολογικές παραμέτρους, δηλαδή πίεση θερμοκρασία, υγρασία, βροχόπτωση, διεύθυνση και ένταση του ανέμου. Όλες οι καταγραφές (ανά δέκα λεπτά) συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο.

Οι μετρήσεις της έντασης του ανέμου για το ορειβατικό καταφύγιο πάρθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό της Πάρνηθας (LGK3). Σημειωτέον ότι τα δεδομένα που παραθέτουμε καταγράφηκαν στο διάστημα το 2,5 τελευταίων χρόνων καθώς ο σταθμός εγκαταστάθηκε και ξεκίνησε να παρέχει δεδομένα από το Δεκέμβριο του 2009.

Πληροφορίες σταθμού:

- Όνομα: Πάρνηθα (LGK3)
- Υψόμετρο: 1230 m
- Θέση: Βάση Ναυτικού (ΣΔΑΜ)
- Ύψος αισθητήρων θερμ/υγρ : 2 m
- Ύψος ανεμομέτρου: 5 m
- Βρίσκεται σε χώμα



**Σχήμα 17.1** (προηγούμενης σελίδας) Η θέση του ορειβατικού καταφυγίου Φλαμπούρι (κόκκινη κουκίδα-βελάκι) πάνω στον αιολικό χάρτη της Ελλάδας. Όπως φαίνεται απ' το χάρτη το καταφύγιο βρίσκεται σε σημείο που πνέουν ισχυροί άνεμοι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η μέση ημερήσια ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή του καταφυγίου σε m/sec.

Ημ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ
1	3,16	5,22	0,22	11,14	4,64	2,47	4,25	2,47	3,97	10,33	2,11	3,27
2	4,97	10,1	1,97	9,33	5,8	3,25	3,5	5,55	2,5	7,05	9,83	11,44
3	5	11,2	4,25	3,88	5,89	3,25	4,39	6,47	5	8,86	11,97	11,01
4	6,61	5,27	8	5,14	6,22	4,19	5,55	4,61	9,53	8,53	9,33	11,56
5	2,27	4,17	2,58	4,97	5,8	4,17	3,58	5,42	8,5	5,72	3,08	4,89
6	3,75	6	6,08	9,25	10,8	4,97	4,39	7,11	3,97	4,42	1,55	3,87
7	4,83	9,91	8,97	12,08	6,61	2,58	3,83	7,05	8,05	4,25	1,42	2,66
8	5,08	7,55	8,86	6,69	4,78	3,89	6,47	6,47	8,19	6,3	1,19	3,33
9	3,66	4,28	3,25	5,64	5,94	5,78	11,14	4,97	3,3	6,92	2,91	2,43
10	1,3	9,08	5,42	6,69	14,39	7,5	12,17	4,55	5,36	9,03	2,91	7,88
11	3,25	5,08	7,5	7,72	10,14	5,44	11,44	9,11	7,78	12,19	13,14	14,89
12	3,08	7,55	2,5	5,64	5,94	6,17	10,33	5,14	9,03	6,47	12,08	11,21
13	5,88	4,39	1,03	5,14	4,55	6,22	8,19	5,22	9,17	3,03	11,94	8,41
14	6,38	1,83	2,8	6,83	3,44	3,25	6,52	4,53	8,5	8,67	10,47	12,12
15	6,11	1,61	3,22	1,66	2,8	6,97	6,8	2,92	5,72	10,25	0	3,39
16	11,5	4,64	4,25	4,11	4,47	6,97	5,78	3,44	10,5	11,75	3,3	6,7
17	13,64	4,83	5,22	10,28	2,94	5,58	5,22	8,08	9,61	9,78	8,67	6,7
18	9,02	9,75	4,33	10,58	3,72	3,22	4,69	10,58	8,89	5,58	11,36	12,82
19	2,92	8,97	3,39	3,83	5,8	3,17	3,03	8,44	4,86	2,92	7,03	9,52
20	2,27	5,63	6,36	7,25	7,02	3,17	4,69	9,97	4,47	1,47	4,33	7,58
21	3,88	2,69	13,72	10,72	6,03	7,92	6	11,36	5,14	2,5	2,19	4,03
22	6	5,13	11,97	10,5	10,05	11,94	5,14	13,5	7,64	3,53	2	2,73
23	6,17	6,47	12,08	7,05	9,97	12,92	4,83	12,08	8,94	10,72	2,94	5,98
24	4,92	8,14	6,8	6,66	7,69	11,22	2,42	12,47	6,83	10,33	13,55	13,655
25	6,25	7,92	4,92	8,88	7,64	6,11	4,75	12,33	10,8	11,05	13,5	13,88
26	3,25	0,8	6,08	5,72	9,83	9,55	4,97	13,94	11,67	13,55	9,22	9,47
27	3,72	-	7,19	3,25	9,97	5,78	3,67	13,64	13,14	16,3	11,89	12,03
28	12,3	-	3,72	5,66	7,72	3,36	5	11,44	12,17	14,67	6,67	7,43
29	0,44	-	5,33	5,78	3,67	3,25	4,19	10,05	12,55	16,5	12,83	13,57
30	-	-	3,58	3,25	4,64	4,25	4,25	3,5	8,64	14,36	7,64	3,56
31	-	-	4,33	-	3,14	-	2,94	4,61	-	6,58	-	-

**Σχήμα 17.2** Μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου (m/sec) στην περιοχή της Πάρνηθας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες ταχύτητες ανέμων σε μέρες το μήνα.

m/s	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ
0÷1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1÷2	1	2	2	1	0	0	0	0	0	1	3	0
2÷3	3	1	3	0	2	2	2	2	1	2	6	3
3÷4	8	0	5	4	4	9	5	2	3	2	2	5
4÷5	3	5	5	2	5	4	10	5	2	2	1	2
5÷6	3	5	3	7	6	4	5	4	4	2	0	1
6÷7	6	2	4	4	3	5	4	2	1	3	1	2
7÷8	0	3	2	3	4	2	0	2	2	1	2	3
8÷9	0	2	3	1	0	0	1	2	7	3	1	1
9÷10	1	3	0	2	3	1	0	2	4	2	3	2
10÷11	0	1	0	4	3	0	1	2	2	4	1	0
11÷12	1	1	1	1	0	2	2	2	1	2	4	4
12÷13	1	0	1	1	0	1	1	3	2	1	2	3
13÷14	1	0	1	0	0	0	0	3	1	1	3	3
14÷15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	1
15÷16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16÷17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0

**Σχήμα 17.3** Οι μέσες ταχύτητες ανέμων σε μέρες το μήνα για τη περιοχή του καταφυγίου.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες ταχύτητες ανέμων σε ώρες το μήνα.

m/s	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοε	Δεκ
0÷1	24	24	24	0	0	0	0	0	0	0	24	0
1÷2	24	48	48	24	0	0	0	0	0	24	72	0
2÷3	72	24	72	0	48	48	48	48	24	48	144	72
3÷4	192	0	120	96	96	216	120	48	72	48	48	120
4÷5	72	120	120	48	120	96	240	120	48	48	24	48
5÷6	72	120	72	168	144	96	120	96	96	48	0	24
6÷7	144	48	96	96	72	120	96	48	24	72	24	48
7÷8	0	72	48	72	96	48	0	48	48	24	48	72
8÷9	24	48	72	24	0	0	24	48	168	72	24	24
9÷10	0	72	0	48	72	24	0	48	96	48	72	48
10÷11	0	24	0	96	72	0	24	48	48	96	24	0
11÷12	24	24	24	24	0	48	48	48	24	48	96	96
12÷13	24	0	24	24	0	24	24	72	48	24	48	72
13÷14	24	0	24	0	0	0	0	72	24	24	72	72
14÷15	0	0	0	0	24	0	0	0	0	48	0	24
15÷16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16÷17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0

Σχήμα 17.4 Οι μέσες ταχύτητες ανέμων σε ώρες το μήνα για την περιοχή του καταφυγίου.

Όπως προκύπτει τόσο από τον αιολικό χάρτη όσο και από τους πίνακες με τις μετρήσεις της εντάσεως των ανέμων το ορειβατικό καταφύγιο βρίσκεται σε μια κορυφή του βουνού της Πάρνηθας όπου πνέουν αρκετά ισχυροί άνεμοι καθ' όλη τη διάρκεια τους έτους. Επίσης οι άνεμοι παρατηρούμε πως έχουν και διάρκεια και δεν πρόκειται απλώς για ριπές ανέμων οι οποίες κάνουν την εμφάνισή τους και σταματούν μετά από λίγα δευτερόλεπτα. Ορισμένοι μήνες του έτους μάλιστα έχουν ιδιαίτερα μεγάλη μέση τιμή εντάσεως ανέμου που φτάνει μέχρι τα 16 m/sec. Ακόμα το γεγονός πως το καταφύγιο βρίσκεται σε κορυφή υψώματος και δεν παρεμβάλλονται διάφορα φυσικά εμπόδια μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως η περιοχή ενδείκνυται για εγκατάσταση ανεμογεννήτριας. Εξάλλου σε απόσταση 2,7 km νοτιοδυτικά του καταφυγίου βρίσκεται ήδη εγκατεστημένο αιολικό πάρκο με 3 ανεμογεννήτριες που επιβεβαιώνει το αξιοποιήσιμο του αιολικού δυναμικού της περιοχής.

## 17.2 Μεθοδολογία καθορισμού της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας

Για να υπολογίσουμε την ονομαστική ισχύ της καταλληλότερης Α/Γ για μια συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτούνται:

- A. Οι ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής, στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο χρήσης. Συνήθως, καταγράφονται οι ενεργειακές καταναλώσεις σε κάθε ιδιαίτερη χρονική περίοδο μέσα στο έτος και τελικά προσδιορίζονται οι μέσες ημερήσιες τιμές ανά έτος και ανά μήνα.
- B. Ανεμολογικά στοιχεία για τη συγκεκριμένη θέση εγκατάστασης, με βάση το τυπικό μετεωρολογικό έτος του τόπου. Συνήθως καταγράφονται οι ταχύτητες του ανέμου, σε βραχεία χρονικά διαστήματα, πχ ανά 20 sec. Μετά από επεξεργασία των δεδομένων αυτών προσδιορίζονται οι μέσες τιμές ταχυτήτων ανέμου καθώς και η κατανομή της πιθανότητας εμφάνισής τους, ανά μήνα και ετησίως.
- Γ. Χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος Α/Γ, που δίδονται από τους κατασκευαστές. Απαιτούνται στοιχεία για τους τύπους και τα μεγέθη ανεμογεννητριών, που μπορούν να λειτουργήσουν στην περιοχή ταχυτήτων της θέσης εγκατάστασης.

Ο προσδιορισμός της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας βασίζεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας, δηλαδή:

$$\bar{P}_k = \bar{P}_{A/\Gamma}$$

με

$$\bar{P}_k = \frac{E_k}{T}$$

( η μέση ημερήσια ισχύς κατανάλωσης)

και

$$\bar{P}_{A/\Gamma} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{A\Gamma}(t) dt = \int_0^\infty P_{A\Gamma}(u) \cdot f(u) du$$

(η μέση ημερήσια ισχύς)

με  $P_{A\Gamma}$  την στιγμιαία ηλεκτρική ισχύ που παρέχεται από την ανεμογεννήτρια και η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και με  $f(u)$  την συνάρτηση πυκνότητας κατανομής στο χώρο των ταχυτήτων του ανέμου. Εδώ χρησιμοποιούμε πιο συχνά τον συντελεστή ισχύος  $n_{A\Gamma}$  που ορίζεται σαν την παροχή ηλεκτρικής ισχύος προς την  $P_R$  (όπου  $P_R$  η ονομαστική ισχύς της ΑΓ):

$$n_{A\Gamma} = \frac{P_{A\Gamma}}{P_R}$$



Η παραπάνω σχέση σε συνδυασμό με τη σχέση (1) δημιουργούν μια καινούργια:

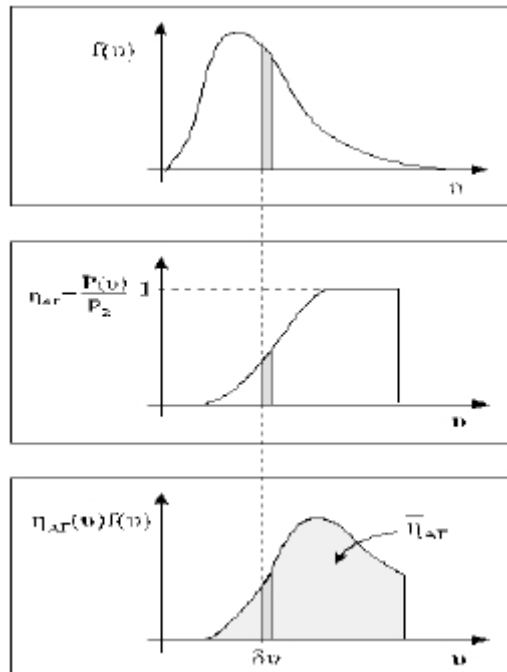
$$\bar{P}_{AG,i} = \left( \int_0^{\infty} \frac{P_{AG}(u)}{P_R} f_i(u) du \right) \cdot P_R = \bar{n}_{AG,i} \cdot P_R$$

με  $\bar{n}_{AG,i}$  τον μέσο συντελεστή ισχύος της ΑΓ για το συγκεκριμένο μήνα:

$$\bar{n}_{AG,i} = \int_0^{\infty} n_{AG,i} \cdot f_i(u) du$$

Αν τώρα γνωρίζουμε τις κατανομές του συντελεστή ισχύος σε συνάρτηση με την ταχύτητα και η συνάρτηση κατανομής της πυκνότητας πιθανότητας εμφάνισης ανέμων,  $f(u)$ , σε κάθε ταχύτητα  $u$ , μπορούνε να υπολογίσουμε τον μέσο συντελεστή ισχύος για το διάστημα  $du$ .

Έτσι για να υπολογίσουμε την ονομαστική ισχύ της καταλληλότερης ανεμογεννήτριας χρειαζόμαστε το ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ της παρεχόμενης από την ανεμογεννήτρια μέσης (ημερήσιας, μηνιαίας ή ετήσιας) ηλεκτρικής ισχύος και της αντίστοιχης μέσης ισχύος κατανάλωσης της συγκεκριμένης εφαρμογής.



**Σχήμα 17.5** Σχηματική παράσταση που περιγράφει τον υπολογισμό του συντελεστή ισχύος, για ένα ορισμένο μήνα. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη  $AG(u)f(u) - u$ , αποτελεί τον μέσο συντελεστή, για το μήνα αυτό. Τα διαγράμματα αυτά, για λόγους απλότητας, δίδονται με τη μορφή συνεχών ομαλών καμπυλών. Στην πράξη, έχουν τη μορφή ιστογράμματος, με βήμα  $du$ .

Δημιουργούμε έτσι για κάθε μήνα ένα πίνακα με 4 στήλες όπου για ορισμένο βήμα  $du$  καταγράφουμε τα παρακάτω:

- A. Τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου
- B. Τις αντίστοιχες τιμές της συνάρτησης κατανομής της πυκνότητας πιθανότητας  $f(u)$ , του ανέμου, η οποία προκύπτει με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής. Συγκεκριμένα το  $f(u) = dp/du = dt/(T \cdot du)$  όπου  $dp = dt/T$  η πιθανότητα εμφάνισης ανέμων με ταχύτητα, της οποίας το μέτρο βρίσκεται μέσα στην περιοχή ταχυτήτων  $u$  και  $u+du$ , όπου  $du$ , το βήμα ταχυτήτων ανέμου και  $dt$  το χρονικό διάστημα μέσα στο συνολικό χρόνο  $T$ , στο οποίο έπνεαν άνεμοι με ταχύτητα στο συγκεκριμένο διάστημα  $u$  και  $u+du$ .
- Γ. Τις τιμές του συντελεστή ισχύος,  $n_{AG}$ , σε κάθε ταχύτητα του ανέμου, με βάση τα στοιχεία του κατασκευαστή.
- Δ. Σε κάθε ταχύτητα  $u$ , υπολογίζεται το γινόμενο  $n_{AG} \cdot f(u) \cdot du$ .
- Ε. Το άθροισμα των γινομένων αυτών αποτελεί τον ζητούμενο  $\bar{n}_{AG}$ , για το μήνα αυτό.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι πίνακες για κάθε μήνα του έτους.

### Ιανουάριος

$u$ m/sec	$n_{AG}(u)$	Πυκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,0422	0,00
2	0,00	0,0738	0,00
3	0,034	0,1261	0,0043
4	0,092	0,0843	0,0077
5	0,186	0,0953	0,0177
6	0,2926	0,11219	0,0328
7	0,4	0,0128	0,005
8	0,6	0,0611	0,0366
9	0,864	0,0217	0,00187
10	1,00	0,0195	0,0195
11	1,00	0,0173	0,0173
12	1,00	0,0672	0,0672
13	1,00	0,0648	0,0648
14	1,00	0,012	0,012
15	1,00	0,0064	0,0064
16	1,00	0,0068	0,0068
17	1,00	0,0087	0,0087
18	1,00	0,001	0,001
19	1,00	0,00082	0,00082
20	1,00	0,003	0,003
21	0,98	0,00219	0,00215
22	0,84	0,0003	0,00025
23	0,6	0,00043	0,000258
24	0,4	0,00006	0,000024
25	0,00	0,00007	0,00

26	0,00	0,00001	0,00
$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,316172$			

**Φεβρουάριος**

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Πυκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,0739	0,00
2	0,00	0,0475	0,00
3	0,034	0,0211	0,000717
4	0,092	0,1038	0,00955
5	0,186	0,1108	0,0206
6	0,2926	0,0849	0,0248
7	0,4	0,1086	0,04344
8	0,6	0,0826	0,04956
9	0,864	0,1057	0,09132
10	1,00	0,0442	0,0442
11	1,00	0,0439	0,0439
12	1,00	0,0321	0,0321
13	1,00	0,0318	0,0318
14	1,00	0,0201	0,0201
15	1,00	0,02	0,02
16	1,00	0,019	0,019
17	1,00	0,01917	0,01917
18	1,00	0,01826	0,01826
19	1,00	0,0199	0,0199
20	1,00	0,00187	0,00187
21	0,98	0,001538	0,0015
22	0,84	0,00149	0,00125
23	0,6	0,0015	0,0009
24	0,4	0,001002	0,0004
25	0,00	0,0007	0,00
26	0,00	0,00022	0,00
$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,514337$			

**Μάρτιος**

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Πυκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,0526	0,00
2	0,00	0,0749	0,00
3	0,034	0,1056	0,00359
4	0,092	0,0988	0,00908
5	0,186	0,0873	0,01623
6	0,2926	0,1065	0,03116
7	0,4	0,0519	0,02076
8	0,6	0,0941	0,05646
9	0,864	0,0242	0,0209

10	1,00	0,0276	0,0276
11	1,00	0,0528	0,0528
12	1,00	0,0439	0,0439
13	1,00	0,0451	0,0451
14	1,00	0,0273	0,0273
15	1,00	0,0167	0,0167
16	1,00	0,0138	0,0138
17	1,00	0,0186	0,0186
18	1,00	0,00974	0,00974
19	1,00	0,00851	0,00851
20	1,00	0,007	0,007
21	0,98	0,00697	0,00683
22	0,84	0,00584	0,0049
23	0,6	0,001433	0,00085
24	0,4	0,001032	0,00041
25	0,00	0,00067	0,00
26	0,00	0,00084	0,00

$$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,4422$$

### Απρίλιος

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Ποκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,0453	0,00
2	0,00	0,0264	0,00
3	0,034	0,0948	0,00322
4	0,092	0,0643	0,0059
5	0,186	0,1362	0,02533
6	0,2926	0,1053	0,0308
7	0,4	0,0845	0,0338
8	0,6	0,0478	0,02868
9	0,864	0,0772	0,0667
10	1,00	0,0929	0,0929
11	1,00	0,0499	0,0499
12	1,00	0,0525	0,0525
13	1,00	0,0267	0,0267
14	1,00	0,00271	0,00271
15	1,00	0,00231	0,00231
16	1,00	0,0149	0,0149
17	1,00	0,00195	0,00195
18	1,00	0,00976	0,00976
19	1,00	0,0054	0,0054
20	1,00	0,0033	0,0033
21	0,98	0,003	0,00294
22	0,84	0,0019	0,001596
23	0,6	0,0017	0,00102
24	0,4	0,0011	0,00044
25	0,00	0,0006	0,00

26	0,00	0,0003	0,00
$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,4627$			

**Μάιος**

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Πυκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,0004	0,00
2	0,00	0,0053	0,00
3	0,034	0,0958	0,00326
4	0,092	0,1036	0,00953
5	0,186	0,1073	0,01995
6	0,2926	0,0954	0,0279
7	0,4	0,0731	0,02924
8	0,6	0,0432	0,0259
9	0,864	0,0849	0,0733
10	1,00	0,0751	0,0751
11	1,00	0,0596	0,0596
12	1,00	0,0422	0,0422
13	1,00	0,0413	0,0413
14	1,00	0,0987	0,0987
15	1,00	0,0351	0,0351
16	1,00	0,0299	0,0299
17	1,00	0,011	0,011
18	1,00	0,0103	0,0103
19	1,00	0,0009	0,0009
20	1,00	0,00077	0,00077
21	0,98	0,00064	0,00062
22	0,84	0,00065	0,00055
23	0,6	0,00039	0,000234
24	0,4	0,00031	0,000124
25	0,00	0,00006	0,00
26	0,00	0,00004	0,00
$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,5954$			

**Ιούνιος**

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Πυκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,0004	0,00
2	0,00	0,0981	0,00
3	0,034	0,1745	0,0059
4	0,092	0,1983	0,0182
5	0,186	0,1042	0,01938
6	0,2926	0,0967	0,02829
7	0,4	0,0439	0,01756

8	0,6	0,0322	0,01932
9	0,864	0,0378	0,03265
10	1,00	0,0261	0,0261
11	1,00	0,0643	0,0643
12	1,00	0,0584	0,0584
13	1,00	0,0219	0,0219
14	1,00	0,0176	0,0176
15	1,00	0,0112	0,0112
16	1,00	0,0157	0,0157
17	1,00	0,0113	0,0113
18	1,00	0,0119	0,0119
19	1,00	0,005	0,005
20	1,00	0,005	0,005
21	0,98	0,0006	0,000588
22	0,84	0,00055	0,00046
23	0,6	0,00031	0,000186
24	0,4	0,0003	0,00012
25	0,00	0,00007	0,00
26	0,00	0,00003	0,00

$$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,3859$$

### Ιούλιος

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Πυκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,0003	0,00
2	0,00	0,0047	0,00
3	0,034	0,0958	0,00325
4	0,092	0,0971	0,0089
5	0,186	0,0846	0,01573
6	0,2926	0,1063	0,0311
7	0,4	0,0837	0,033
8	0,6	0,0644	0,03864
9	0,864	0,0781	0,0675
10	1,00	0,0659	0,0659
11	1,00	0,0732	0,0732
12	1,00	0,0769	0,0769
13	1,00	0,0549	0,0549
14	1,00	0,0431	0,0431
15	1,00	0,0382	0,0382
16	1,00	0,0175	0,0175
17	1,00	0,011	0,011
18	1,00	0,0103	0,0103
19	1,00	0,0008	0,0008
20	1,00	0,00066	0,00066
21	0,98	0,00053	0,0005194
22	0,84	0,00041	0,000344
23	0,6	0,00049	0,000294

24	0,4	0,0003	0,00012
25	0,00	0,00005	0,00
26	0,00	0,00002	0,00
			$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,5918$

**Αύγουστος**

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Πυκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,000012	0,00
2	0,00	0,00379	0,00
3	0,034	0,00421	0,000143
4	0,092	0,0549	0,00505
5	0,186	0,0629	0,001169
6	0,2926	0,0638	0,0638
7	0,4	0,0452	0,01808
8	0,6	0,0673	0,04
9	0,864	0,0757	0,0065
10	1,00	0,0981	0,0981
11	1,00	0,0988	0,0988
12	1,00	0,10034	0,10034
13	1,00	0,0817	0,0817
14	1,00	0,0429	0,0429
15	1,00	0,0586	0,0586
16	1,00	0,0341	0,0341
17	1,00	0,0218	0,0218
18	1,00	0,01004	0,01004
19	1,00	0,00934	0,00934
20	1,00	0,00629	0,00629
21	0,98	0,0005	0,00049
22	0,84	0,00049	0,000277
23	0,6	0,00033	0,000198
24	0,4	0,00028	0,000112
25	0,00	0,00005	0,00
26	0,00	0,00001	0,00
			$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,6977$

**Σεπτέμβριος**

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Πυκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,000027	0,00
2	0,00	0,041	0,00
3	0,034	0,0531	0,0018
4	0,092	0,0398	0,00366
5	0,186	0,0217	0,004
6	0,2926	0,0374	0,0109
7	0,4	0,0367	0,01468

8	0,6	0,1196	0,07176
9	0,864	0,0943	0,0818
10	1,00	0,0802	0,0802
11	1,00	0,0949	0,0949
12	1,00	0,0736	0,0736
13	1,00	0,0517	0,0517
14	1,00	0,0441	0,0441
15	1,00	0,0376	0,0376
16	1,00	0,0341	0,0341
17	1,00	0,02	0,02
18	1,00	0,01008	0,01008
19	1,00	0,00741	0,00741
20	1,00	0,00329	0,00329
21	0,98	0,00044	0,00043
22	0,84	0,00017	0,0001428
23	0,6	0,00032	0,000192
24	0,4	0,00019	0,000076
25	0,00	0,00011	0,00
26	0,00	0,00007	0,00

$$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,6464$$

### Οκτώβριος

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Ποκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,000013	0,00
2	0,00	0,0678	0,00
3	0,034	0,0763	0,00259
4	0,092	0,0659	0,00606
5	0,186	0,0519	0,00965
6	0,2926	0,0937	0,0274
7	0,4	0,0359	0,01436
8	0,6	0,0904	0,05424
9	0,864	0,0943	0,0814
10	1,00	0,1056	0,1056
11	1,00	0,0783	0,0783
12	1,00	0,0418	0,0418
13	1,00	0,0477	0,0477
14	1,00	0,0761	0,0761
15	1,00	0,0376	0,0376
16	1,00	0,0742	0,0742
17	1,00	0,0308	0,0308
18	1,00	0,0172	0,0172
19	1,00	0,00619	0,00619
20	1,00	0,00392	0,00392
21	0,98	0,00051	0,00016
22	0,84	0,00017	0,00014
23	0,6	0,00029	0,000174



24	0,4	0,00007	0,000028
25	0,00	0,00022	0,00
26	0,00	0,00003	0,00
			$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,7136$

### Νοέμβριος

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Ποκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,0634	0,00
2	0,00	0,1114	0,00
3	0,034	0,0517	0,00175
4	0,092	0,02317	0,00313
5	0,186	0,03	0,00558
6	0,2926	0,03014	0,0088
7	0,4	0,0572	0,02288
8	0,6	0,0284	0,01704
9	0,864	0,0943	0,0814
10	1,00	0,00218	0,00218
11	1,00	0,0913	0,0913
12	1,00	0,0719	0,0719
13	1,00	0,0971	0,0971
14	1,00	0,0256	0,0256
15	1,00	0,0137	0,0137
16	1,00	0,00477	0,00477
17	1,00	0,023	0,023
18	1,00	0,01029	0,01029
19	1,00	0,01083	0,01083
20	1,00	0,00469	0,00469
21	0,98	0,00039	0,000196
22	0,84	0,0002	0,000168
23	0,6	0,00017	0,000102
24	0,4	0,00049	0,000196
25	0,00	0,00005	0,00
26	0,00	0,00004	0,00
			$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,4964$

### Δεκέμβριος

u m/sec	$n_{AG}(u)$	Ποκνότητα πιθανότητας, $f(u)$	$n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot d(u)$
1	0,00	0,0043	0,00
2	0,00	0,0638	0,00
3	0,034	0,1083	0,00368
4	0,092	0,0472	0,004342
5	0,186	0,036	0,00669
6	0,2926	0,0456	0,01334
7	0,4	0,0671	0,02684

8	0,6	0,0375	0,0225
9	0,864	0,0431	0,0372
10	1,00	0,0219	0,0219
11	1,00	0,1067	0,1067
12	1,00	0,0642	0,0642
13	1,00	0,0657	0,0657
14	1,00	0,0299	0,0299
15	1,00	0,0265	0,0265
16	1,00	0,0194	0,0194
17	1,00	0,0183	0,0183
18	1,00	0,0108	0,0108
19	1,00	0,01	0,01
20	1,00	0,00375	0,00375
21	0,98	0,00022	0,00021
22	0,84	0,0002	0,000168
23	0,6	0,00012	0,000072
24	0,4	0,00032	0,00032
25	0,00	0,00004	0,00
26	0,00	0,00003	0,00

$$\bar{n}_{AG} = \sum n_{AG}(u) \cdot f(u) \cdot du = 0,49251$$

### 17.3 Διαδοχικά βήματα προσδιορισμού της ονομαστικής ισχύος ΑΓ για πλήρη κάλυψη φορτίου.

Μελετώντας τα παραπάνω συστήματα συνήθως αναφερόμαστε σε μηνιαία ή ετήσια μέση ημερήσια ισχύ. Αν πάρουμε ως  $\bar{P}_{L,i}$  τη μηνιαία μέση ισχύ κατανάλωσης για μήνα και  $\bar{P}_{AG,i}$  την αντίστοιχη μηνιαία μέση ισχύ που παράγεται από την ΑΓ, θα έχουμε την παρακάτω σχέση:

$$\bar{P}_{AG,i} \geq \frac{\bar{P}_{L,i}}{n_{μετ}}$$

Η παραπάνω σχέση επιβάλλεται από την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων με  $n_{μετ}$  τον συντελεστή μεταφοράς ενέργειας από την έξοδο της ανεμογεννήτριας μέχρι την έξοδο του αιολικού συστήματος. Ο συνδυασμός της παραπάνω σχέσης δίνει:

$$P_{R,i} = \frac{\bar{P}_{L,i}}{n_{μετ} \cdot \bar{n}_{AG,i}}$$

Η σχέση αυτή οδηγεί στον υπολογισμό της ονομαστικής ισχύος της καταλληλότερης ανεμογεννήτριας για πλήρη κάλυψη των ενεργειακών

καταναλώσεων της εφαρμογής.

Έτσι μπορούμε να προσδιορίσουμε 12 τιμές (όσοι και οι μήνες) ονομαστικής ισχύος ΑΓ. Μεταξύ αυτών των τιμών θα επιλέξουμε τη μέγιστη ονομαστική ισχύ έτσι ώστε να έχουμε πλήρη κάλυψη φορτίου. Τα βήματα που ακολουθούμε είναι τα παρακάτω:

- A. Η ημερήσια τιμή για κάθε μήνα του έτους για ισχύ κατανάλωσης  $\bar{P}_{L,i}$  καθορίζεται με βάση τα υπάρχοντα στοιχεία ενεργειακών απαιτήσεων ή με πρόβλεψη κατανάλωσης φορτίων.
- B. Υπολογίζουμε τις τιμές των δώδεκα μηνιαίων μέσων τιμών του συντελεστή ισχύος,  $\bar{n}_{AG}$ . Για να υπολογιστούν πρέπει να αξιοποιήσουμε τα παρακάτω:
  - Δεδομένα για την εξάρτηση της αποδιδόμενης ισχύος από την ταχύτητα του ανέμου, για εκείνους τους τύπους ΑΓ με υψηλή απόδοση στη χαρακτηριστική για τον τόπο εγκατάστασης, περιοχή ταχυτήτων ανέμου.
  - Ανεμολογικά δεδομένα του τόπου εγκατάστασης της ΑΓ από τα οποία προσδιορίζεται η συνάρτηση κατανομής της πιθανότητας εμφάνισης ανέμων ταχύτητας  $u$ , για κάθε μήνα του έτους.
- Γ. Αφού συλλέξουμε τα στοιχεία των δώδεκα μηνών εφαρμόζουμε τη σχέση. Έπειτα επιλέγουμε εκείνη την ανεμογεννήτρια η οποία έχει τη μέγιστη ονομαστική ισχύ μεταξύ των δώδεκα τιμών  $P_R$ .

Κάνοντας του υπολογισμούς για κάθε μήνα του έτους με βάση τα στοιχεία των πινάκων παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη τιμή προκύπτει τον μήνα Ιανουάριο και είναι ίση με 9,73 KW. Επομένως και η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριάς μας για πλήρη κάλυψη των φορτίων της κατανάλωσης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους είναι  $9,73 \approx 10$  KW. Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς επιλέγουμε την ανεμογεννήτρια **Hummer Wind Turbine – 10KW**.

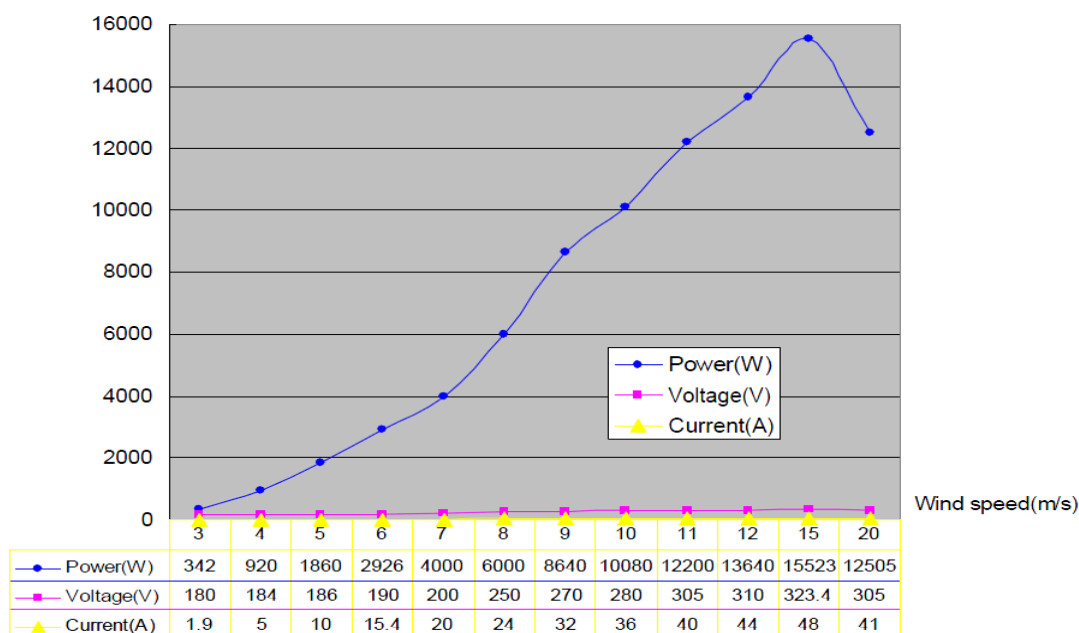


Σχήμα 17.6 Η ανεμογεννήτρια Hummer Wind Turbine – 10KW.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εν λόγω ανεμογεννήτριας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

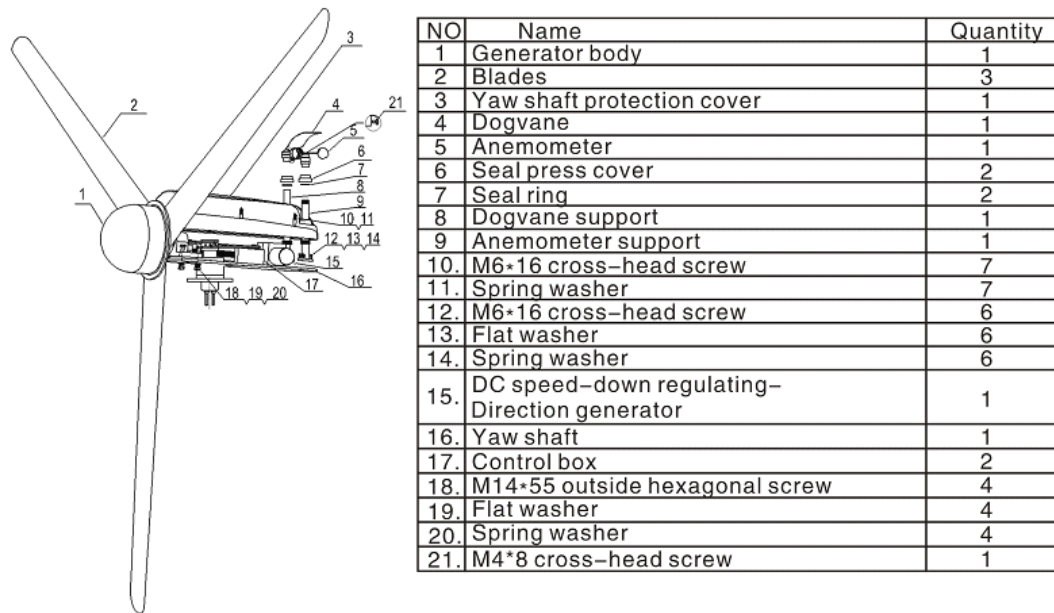
### Technical Parameters

Rated power (W)	<b>10000</b>
Maximum output power (W)	15000
Charging voltage (V)	DC 300V
Blade quantity	3
Rotor blade material	GRP
Rotor blade diameter (m)	Ø8.0
Start-up wind speed (m/s)	2,5
Rated wind speed (m/s)	10
Rated rotating rate (r/min)	180
Wind energy utilizing ratio (Cp)	0.42
Generator output	180 ÷ 323,4 V AC
Rated charging current (A)	33
The maximum charging current (in a short time) (A)	65
Output AC frequency (Hz)	0~360
Generator efficiency	>0.8
Wireless tower diameter (mm)	Ø 530×Ø 370×12000 (3pcs)
Guy tower diameter (mm)	Ø360×3000 (4pcs)
Tower height (m)	12m
The weight of generator (kg)	150kg

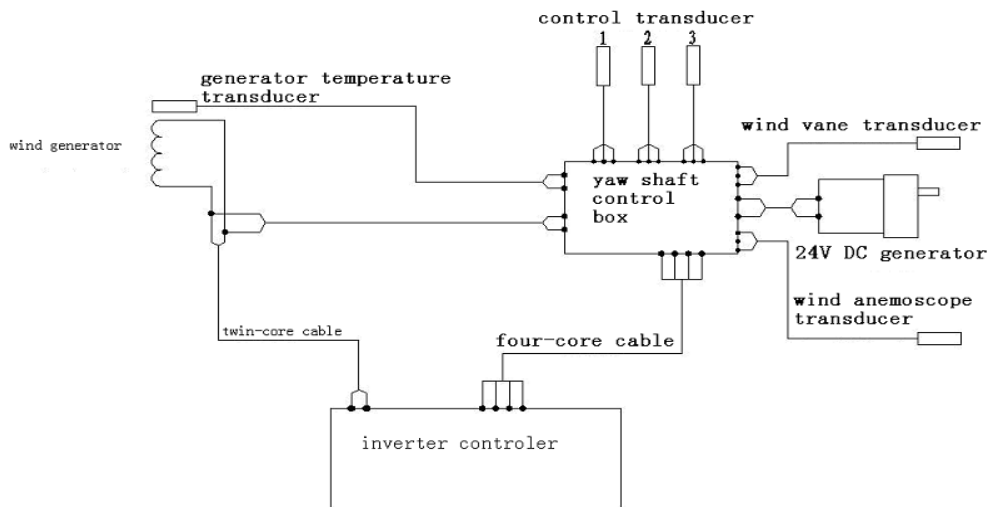


Σχήμα 17.7 Καμπύλη ισχύος ΑΓ Hummer Wind Turbine – 10KW.

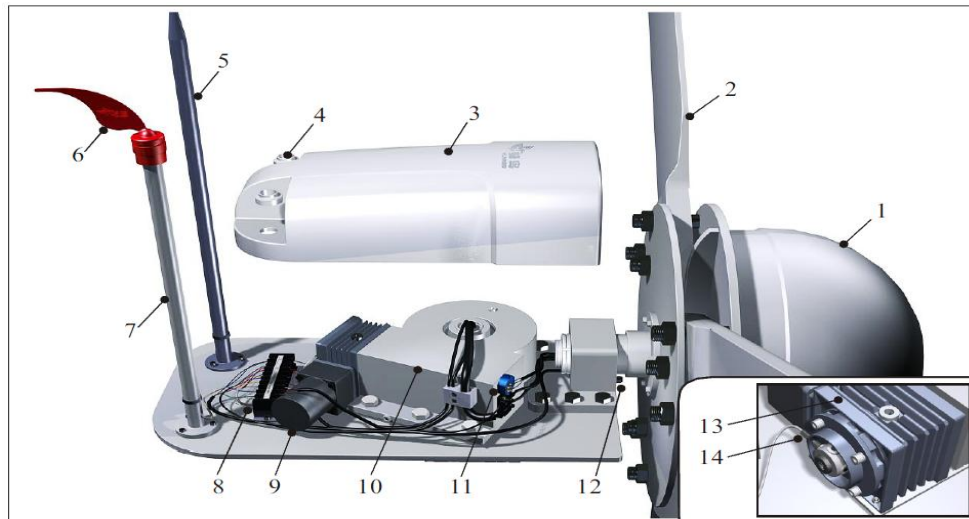
Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια παίρνει κίνηση κατευθείαν από τα πτερύγια του ρότορα χωρίς να παρεμβάλλεται άλλος μηχανισμός ρύθμισης της ταχύτητας. Η γεννήτρια η οποία είναι υψηλής απόδοσης, εδράζεται μπροστά από τα πτερύγια του ρότορα πράγμα το οποίο βοηθά να ακτινοβολείται θερμότητα προς το περιβάλλον και άρα να μειώνεται η θερμοκρασία που αναπτύσσει η ίδια. Το όλο σύστημα αποτελείται από τη γεννήτρια, τον άξονα περιστροφής (συμπεριλαμβανομένου του ανεμομέτρου, του κουτιού ελέγχου περιστροφής, DC γεννήτρια για ρύθμιση της κατεύθυνσης), πύργο και inverter.



Σχήμα 17.8 Τα βασικά εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας.

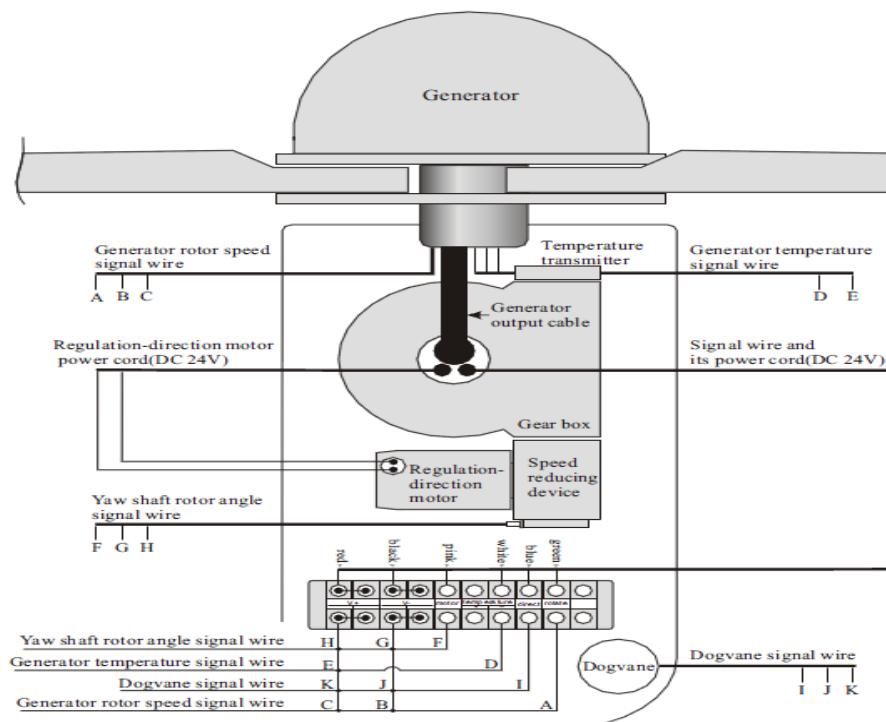


Σχήμα 17.9 Το βασικό κύκλωμα της ανεμογεννήτριας.

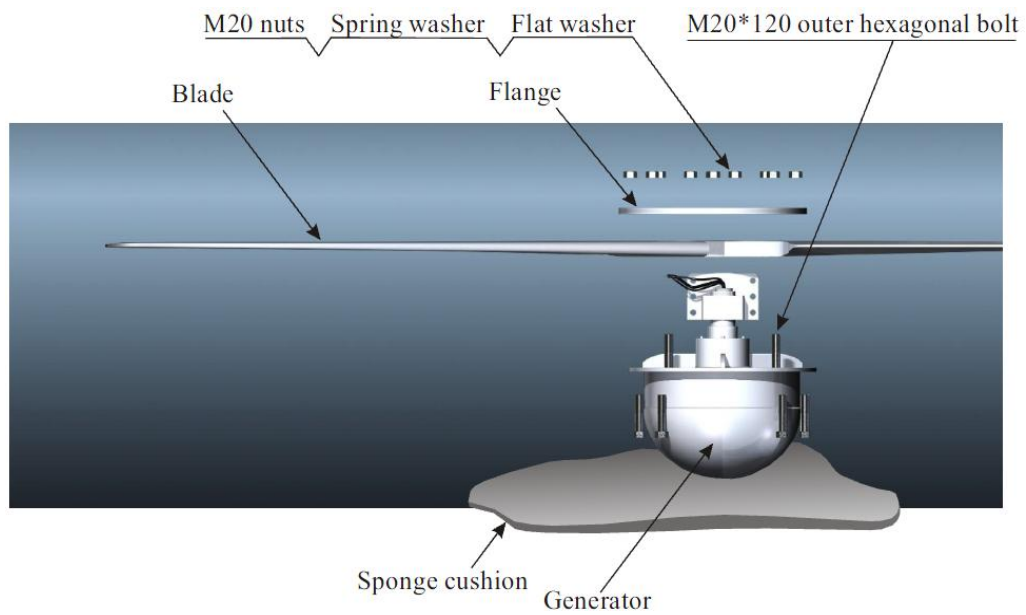


NO	Name	NO	Name
1	Generator	8	Signal wire terminal block
2	Rotor blade	9	DC 24V regulating-direction motor
3	Yaw shaft protection cover	10	Gear box
4	Gland cover	11	Generator temperature transmitter
5	A lighting rod (selection match)	12	Wind generator rotor speed probe
6	Dogvane	13	Speed-reduction device
7	Support of dogvane	14	Measurement probe for yaw shaft revolving

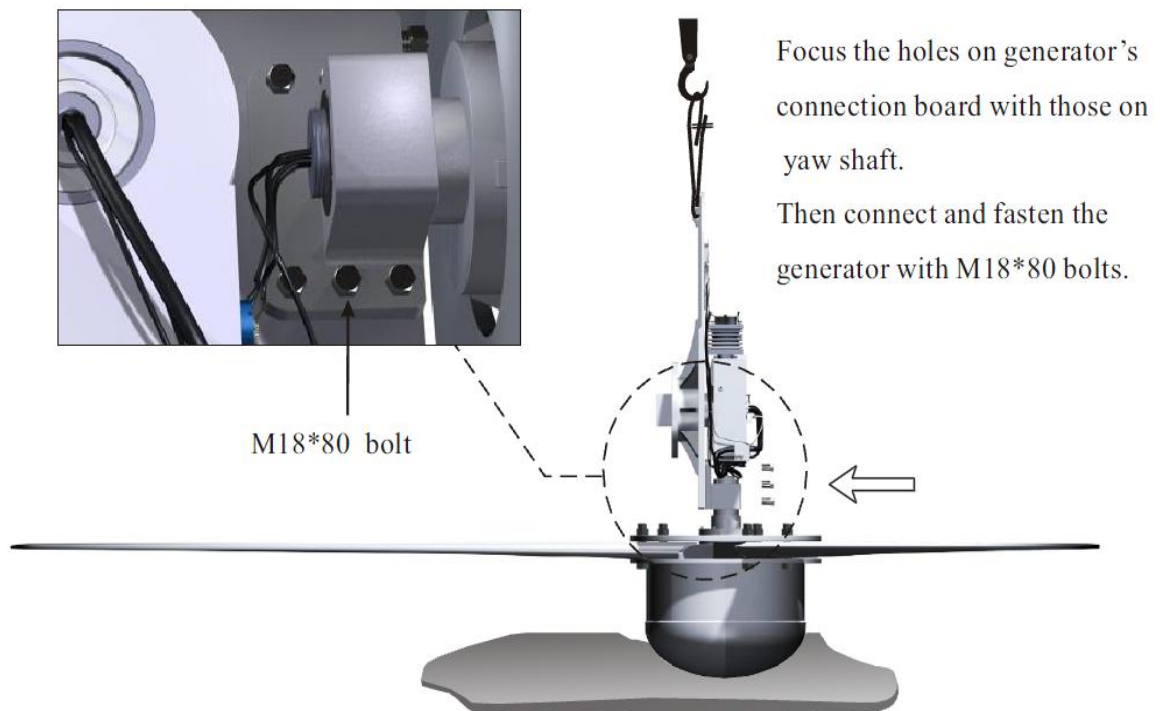
Σχήμα 17.10 Τα εξαρτήματα απ' τα οποία αποτελείται η ΑΓ.



Σχήμα 17.11 Διάγραμμα σύνδεσης καλωδίων του άξονα περιστροφής και της γεννήτριας.



Σχήμα 17.12 Τρόπος σύνδεσης των πτερυγίων με το κύριο σώμα της ΑΓ.



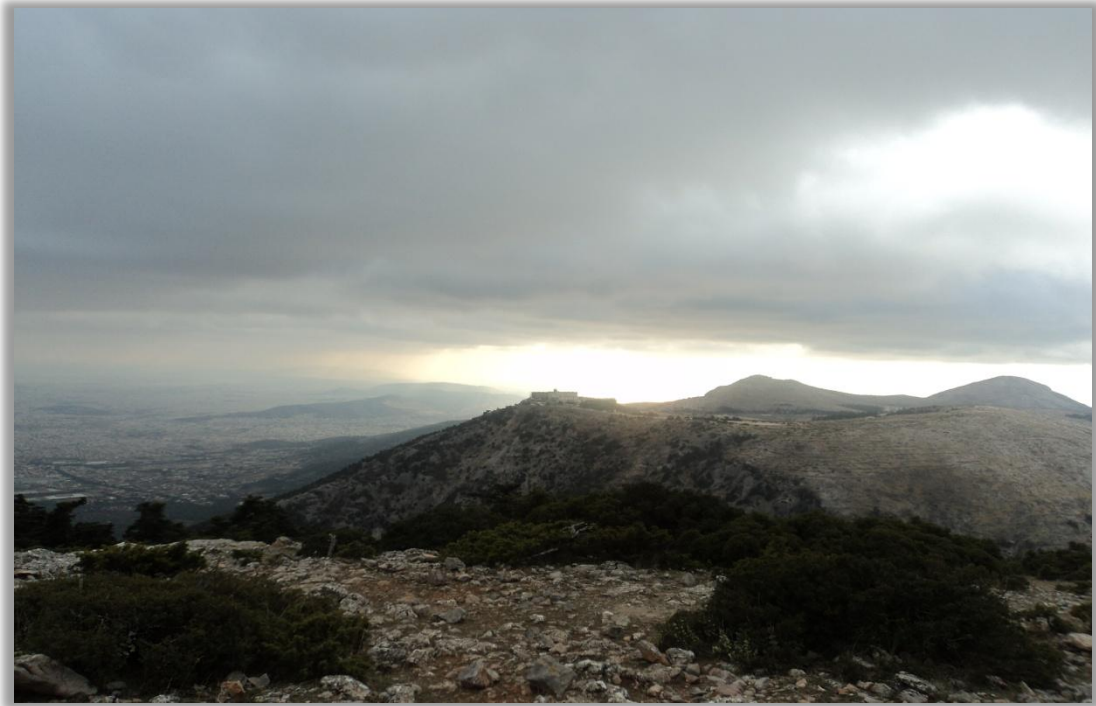
Σχήμα 17.13 Τρόπος σύνδεσης του άξονα περιστροφής με τη γεννήτρια.



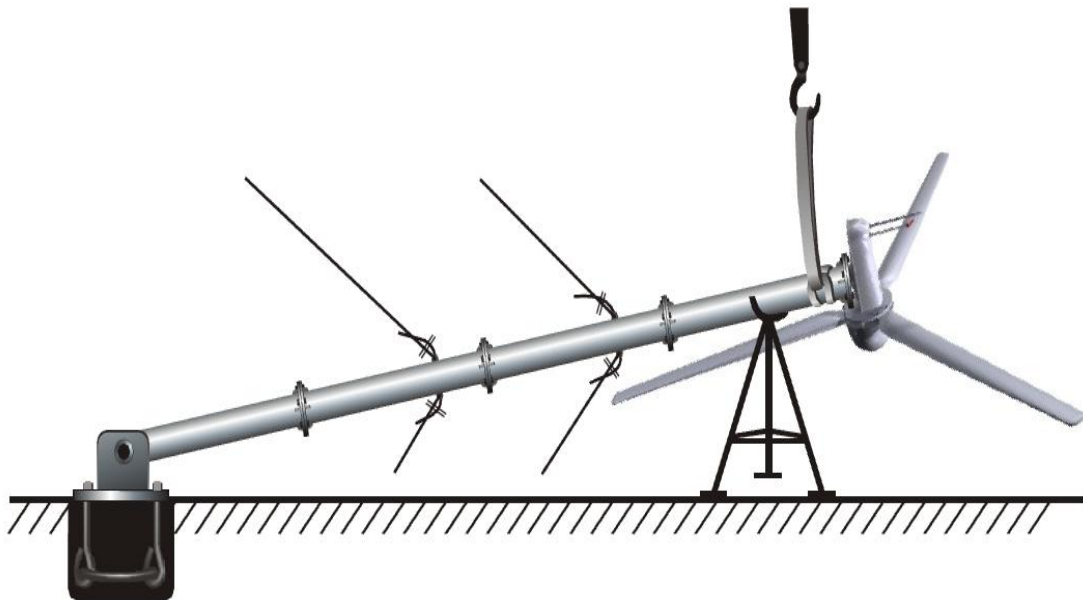
*Σχήμα 17.14 Τοποθέτηση του προστατευτικού κελύφους του άξονα περιστροφής μέσω των ράβδων του ανεμομέτρου.*

Η τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας θα γίνει σε ανοικτό χώρο μπροστά από το από το κεντρικό κτίριο του καταφυγίου. Ο χώρος βρίσκεται στην άκρη της κορυφής Φλαμπούρι της Πάρνηθας χωρίς κανένα φυσικό εμπόδιο γύρω από αυτή.

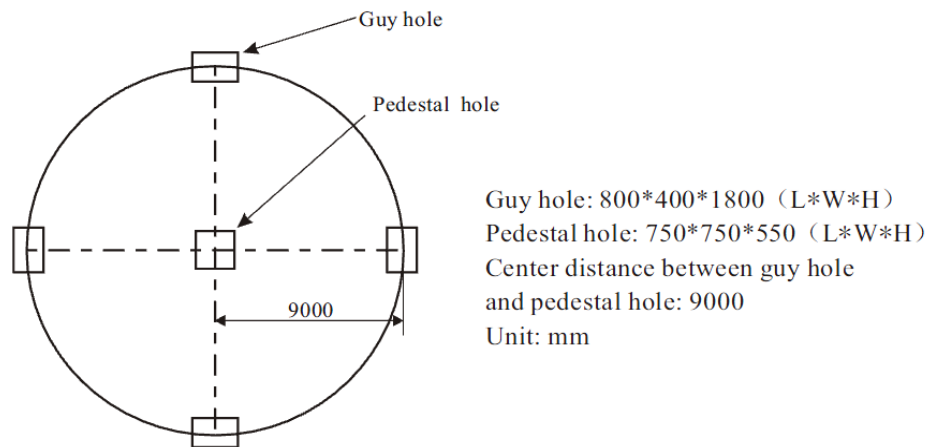




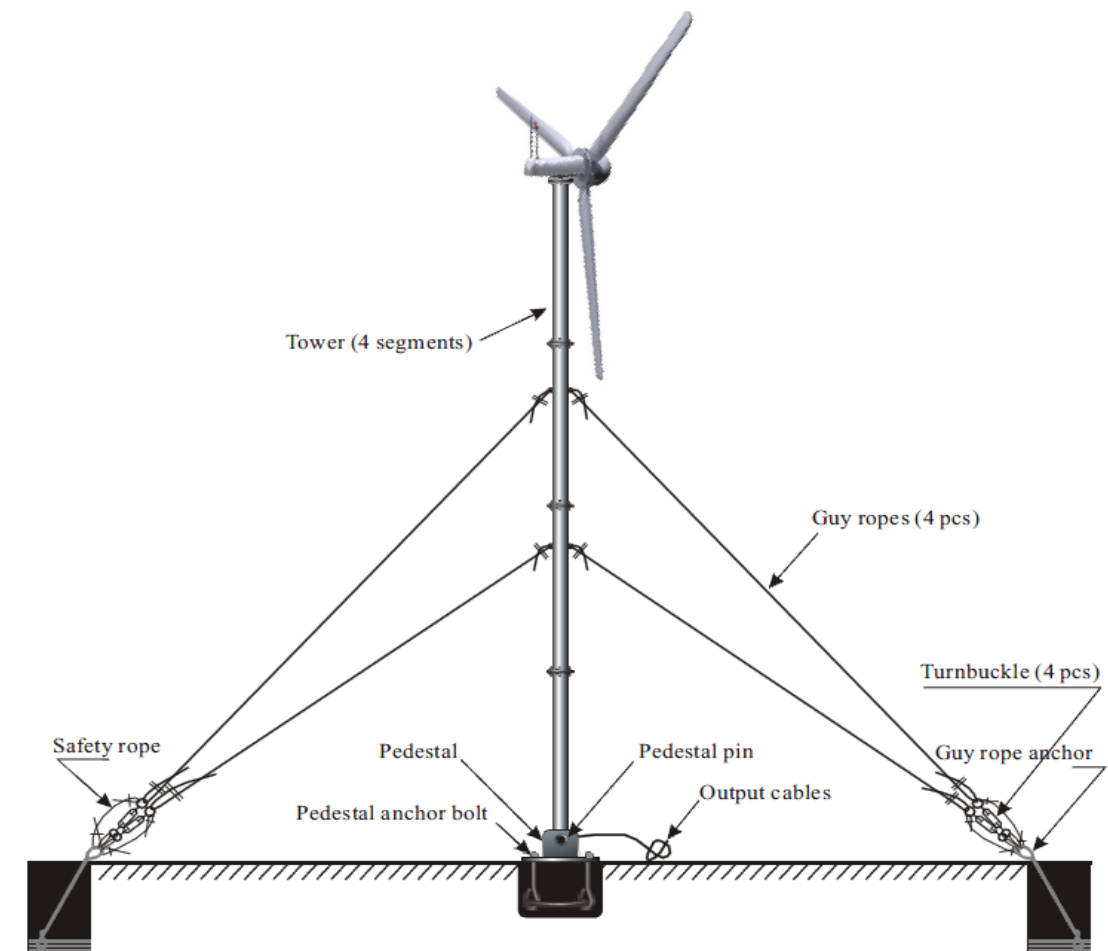
Σχήμα 17.15 Χώρος τοποθέτησης της ανεμογεννήτριας των 10 KW.



Σχήμα 17.16 Σωστός τρόπος ανύψωσης της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 17.17 Διαστάσεις θεμελίωσης του πύργου της ΑΓ.



Σχήμα 17.18 Τελική μορφή της ΑΓ πάνω στον πύργο στήριξης.

Η ανεμογεννήτριά μας θα τοποθετηθεί πάνω σε πύργο ύψους 12m σωληνωτό. Ο πύργος αποτελείται από τέσσερα επί μέρους κομμάτια τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ειδικά μπουλόνια. Για μεγαλύτερη στατικότητα ο πύργος θα είναι συνδεδεμένος

με 6 συρματόσκοινα τα οποία θα εδράζονται σε ειδικές βάσεις στήριξης από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα συρματόσκοινα συγκρατούν το πύργο σε δύο διαφορετικά ύψη. Στα σημεία σύνδεσης των συρματόσκοινων με τις βάσεις στήριξης υπάρχουν ειδικοί σφικτήρες ρυθμιζόμενοι. Οι διαστάσεις της θεμελίωσης του πύργου καθώς και των βάσεων έδρασης των συρματόσκοινων φαίνονται στα σχέδια των προηγούμενων σελίδων.

Τέλος προχωράμε στην επιλογή του κατάλληλου ανορθωτή – ρυθμιστή φόρτισης για την ανεμογεννήτριά μας. Επιλέγουμε τον **AC/DC 24V/40A modular converter της εταιρίας Siemens**. Ο μετατροπέας αυτός ανορθώνει το εναλλασσόμενο ρεύμα που παράγεται απ' την ανεμογεννήτρια σε συνεχές για την φόρτιση των συσσωρευτών.



Σχήμα 17.19 Ο 24V/40A modular converter της εταιρίας Siemens.

Ο συγκεκριμένος ανορθωτής καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις της εφαρμογής μας καθώς δέχεται στην είσοδό του τάσεις έως και 304 V AC και ρεύμα μεγαλύτερο από 80A, ενώ στην έξοδο του δίνει πλήρως ανορθωμένα μεγέθη με τάση κατάλληλη για φόρτιση συσσωρευτών 24V, όσο δηλαδή και οι συσσωρευτές μας και ένταση ρεύματος 40A. Υπερκαλύπτει επομένως τα ζητούμενα μεγέθη. Παράλληλα με την ανόρθωση κάνει και έλεγχο στη διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών επιτηρώντας την τάση και την ένταση ρεύματος καθώς και τη κατάσταση των συσσωρευτών διακόπτοντας την τροφοδοσία όταν οι συσσωρευτές είναι πλήρως φορτισμένοι. Είναι σχεδιασμένος να δέχεται έως και δύο φάσεις στην είσοδό του, έχει μεγάλο βαθμό απόδοσης, μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας αφού μπορεί να λειτουργεί και σε θερμοκρασίες έως και 70°C .

# Κεφάλαιο 18

---

*Υβριδικό Σύστημα*

---

## 18.1 Επιλογή Ηλεκτροπαραγωγού Ζεύγους (H/Z)

Το τελευταίο στάδιο της μελέτης του Υβριδικού μας συστήματος είναι η επιλογή του κατάλληλου H/Z. Η γεννήτρια αποτελεί μονάδα εφεδρείας στο σύστημά μας και συνεπώς καλείται να καλύψει την αδυναμία επαρκούς ηλεκτροδότησης του καταφυγίου και τις πιθανές βλάβες που μπορεί να προκύψουν. Ως εκ τούτου το H/Z δεν τοποθετείται με σκοπό τη συνεχή λειτουργία του αλλά εφόσον χρειαστεί θα πρέπει να ανταποκριθεί πλήρως στις ανάγκες του συστήματος μας.

Πρώτο μέλημά μας είναι να μπορεί το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος να καλύψει τις ισχύεις αιχμής που πιθανώς να υπάρξουν. Με δεδομένο ότι τόσο η ανεμογεννήτρια όσο και τα φωτοβολταϊκά έχουν υπολογιστεί να καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες του καταφυγίου αλλά σε πιθανή ζήτηση ισχύος αιχμής οι κλιματολογικές συνθήκες πρέπει να είναι οι βέλτιστες, όλο το βάρος πέφτει στους συσσωρευτές και το H/Z.

Η ισχύς αιχμής του καταφυγίου όπως υπολογίστηκε στις προηγούμενες σελίδες είναι 4,673 KW. Επομένως το H/Z που θα επιλεγεί θα πρέπει να αποδώσει τουλάχιστον αυτή την ισχύ. Ακόμη θα πρέπει να συνοδεύεται από σύστημα παρακολούθησης των φορτίων ζήτησης και να τίθεται εκτός όταν τα φορτία θα καλύπτονται από τις άλλες πηγές. Με αυτά τα δεδομένα επιλέγουμε την γεννήτρια Diesel DHY6000SE-3 της εταιρίας HYUNDAI.

Η γεννήτρια αυτή διαθέτει:

- Ηλεκτρονικό πίνακα ελέγχου.
- Ενσωματωμένο μετρητή ωρών για ειδοποίηση service.
- Μεταλλικό πλαίσιο 32mm.
- Σύστημα ειδοποίησης χαμηλής στάθμης λαδιού με συνέπεια την αυτόματη διακοπή λειτουργίας της γεννήτριας.
- Τετράχρονο αερόψυκτο κινητήρα με προθέρμανση.
- Πίνακα ασφαλείας.
- Ισχυρό αντιδονητικό σύστημα
- Δυνατότητα σύνδεσης με μεταγωγικό πίνακα για την έναρξη λειτουργίας της γεννήτριας σε περίπτωση διακοπής ρεύματος.
- Επιτηρητής τάσης AVR.
- Ρόδες για εύκολη μετακίνηση.



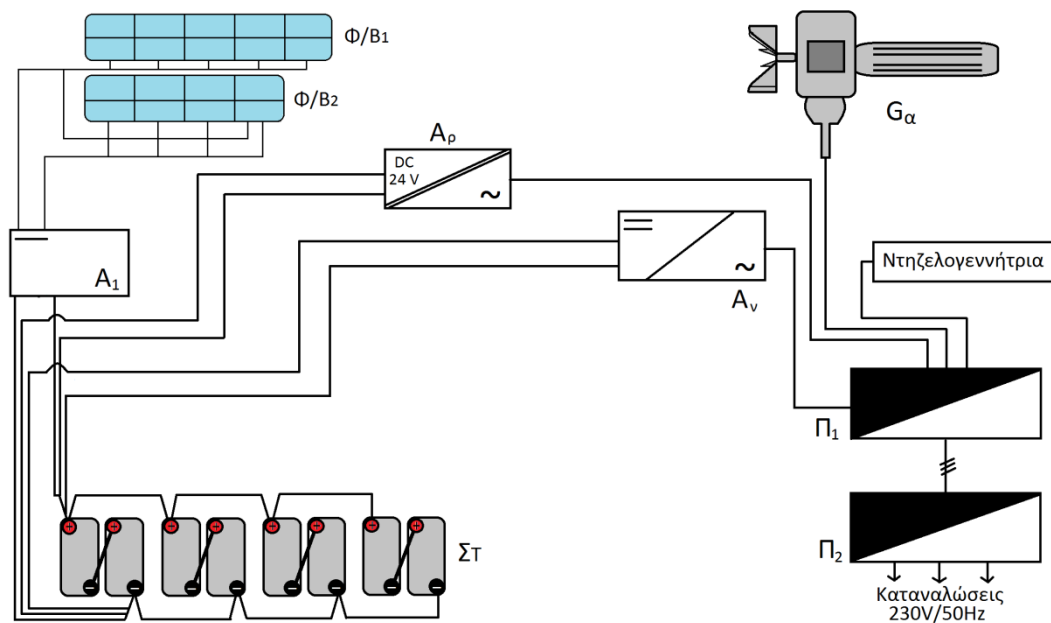
Σχήμα 18.1 Η γεννήτρια πετρελαίου DHY6000SE-3.

SKU	DHY6000SE
Κατασκευαστής	HYUNDAI
Εγγύηση	1 Έτος
Υλικά Παράδοσης	ΡΟΔΕΣ
Κva (max)/hp	7,00/10
Κva (normal)	6,25
Βαρος	160 kg
Εκκίνηση	ΜΙΖΑ
Εξοδος (dc)	ΝΑΙ
Καυσίμο	ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ
Κινητήρας	ΑΕΡΟΨΥΚΤΟΣ ΜΟΝΟΚΥΛΙΝΔΡΟΣ
Ρεζερβουαρ (lt)	17
Σταθμη θορυβου (db)	72,6
Συνεχης λειτουργια (hr)	16
Συχνοτητα (Hz)	50
Ταση	230
Επιτηρητής τάσης	ΝΑΙ

Σχήμα 18.2 Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών της γεννήτρια πετρελαίου DHY6000SE-3.

## 18.2 Τελικό Υβριδικό Σύστημα

Αφού ολοκληρώθηκε η επιλογή όλων των επιμέρους τμημάτων του υβριδικού συστήματός μας, προχωράμε στην ολοκληρωμένη σχεδίασή του. Το σκαρίφημα συνδεσμολογίας του συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 18.3 Τελική μορφή του υβριδικού συστήματος για το ορειβατικό καταφύγιο.

Όπου

$\Phi/B_1, \Phi/B_2$  = Ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων.

$A_1$  = Αυτόματος φορτιστής – ρυθμιστής.

$A_v$  = Ηλεκτρονικός αντιστροφέας (inverter).

$A_p$  = Ανορθωτής – φορτιστής.

$\Sigma_T$  = Συστοιχία συσσωρευτών βιομηχανικού τύπου.

$G_\alpha$  = Ανεμογεννήτρια.

$\Pi_1$  = Πίνακας αυτοματισμού, ελέγχου και παρακολούθησης.

$\Pi_2$  = Πίνακας διανομής ηλεκτρικού ρεύματος 230V/ 50 Hz AC.

### 18.3 Λειτουργία του συστήματος

Τα Φ/Β πλαίσια παράγουν ηλεκτρική ενέργεια η οποία μέσω του φορτιστή – ρυθμιστή  $A_1$  οδηγείται προς τους συσσωρευτές  $\Sigma_T$  για αποθήκευση ή προς τον ηλεκτρονικό αντιστροφέα  $A_v$  για μετατροπή από την DC σε 230V/50 Hz AC. Από τον αντιστροφέα το ηλεκτρικό ρεύμα ελέγχεται από τον πίνακα αυτοματισμού  $\Pi_1$  και εφόσον καλύπτει τις ανάγκες ζήτησης της κατανάλωσης διοχετεύεται προς τον πίνακα  $\Pi_2$  για διανομή.

Όταν τα φορτία ζήτησης αυξηθούν ο πίνακας αυτοματισμού  $\Pi_1$  δίνει εντολή στην ανεμογεννήτρια  $G_a$  να ξεκινήσει και να αναλάβει τα φορτία της κατανάλωσης, διακόπτοντας την τροφοδοσία από τον ηλεκτρονικό αντιστροφέα. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας γίνεται φόρτιση των συσσωρευτών αποθήκευσης  $\Sigma_T$  δια μέσου του ανορθωτή – φορτιστή  $A_p$ .

Αν υπάρξει περαιτέρω αύξηση των φορτίων κατανάλωσης ή η ανεμογεννήτρια αδυνατεί να ανταπεξέλθει στην τροφοδότηση του συστήματος με ηλεκτρική ενέργεια, ο πίνακας αυτοματισμού  $\Pi_1$  δίνει εντολή στην ντιζελογεννήτρια να ξεκινήσει αυτή τη φορά και να αναλάβει τα φορτία της κατανάλωσης, διακόπτοντας την τροφοδοσία από την ανεμογεννήτρια  $G_a$ .

Αν κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ντιζελογεννήτριας, μειωθούν τα φορτία ζήτησης και καλύπτονται από τα Φ/Β πλαίσια ή από τους συσσωρευτές αποθήκευσης, ο πίνακας αυτοματισμού  $\Pi_1$  δίνει εντολή για σταμάτημα της ντιζελογεννήτριας και σύνδεση με τον ηλεκτρονικό αντιστροφέα.



# Παράρτημα 1

---

*Στοιχεία Μηνιαίας Ακτινοβολίας*

---

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

### Monthly Solar Irradiation

#### PVGIS Estimates of long-term monthly averages

Location: 38 ° 9'41 "N, 23 ° 44'49" East, Elevation: 1143 m a.s.l.

Solar radiation database used: PVGIS-classic

Nominal power of the PV system: 4.3 kW (crystalline silicon)

Estimated losses due to temperature: 9.3% (using local ambient emperature)

Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.8%

Other losses (cables, inverter etc.): 28.5%

Combined PV system losses: 37.0%

#### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 10° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	1.97	61.1	2.44	75.7
Feb	2.51	70.4	3.14	88.0
Mar	3.44	107	4.36	135
Apr	4.40	132	5.72	172
May	4.88	151	6.54	203
Jun	5.25	157	7.20	216
Jul	5.17	160	7.17	222
Aug	4.78	148	6.59	204
Sep	4.16	125	5.58	167
Oct	3.01	93.2	3.92	122
Nov	2.06	61.7	2.62	78.5
Dec	1.67	51.9	2.09	64.8
Yearly average	3.61	110	4.79	146
<b>Total for year</b>	<b>1320</b>		<b>1750</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 15° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.10	65.3	2.60	80.6
Feb	2.63	73.6	3.29	92.1
Mar	3.53	109	4.49	139
Apr	4.45	133	5.79	174
May	4.87	151	6.54	203
Jun	5.21	156	7.16	215
Jul	5.15	160	7.15	222
Aug	4.82	149	6.66	206
Sep	4.27	128	5.74	172
Oct	3.14	97.2	4.10	127
Nov	2.18	65.5	2.77	83.1
Dec	1.79	55.5	2.23	69.1
<b>Yearly average</b>	<b>3.68</b>	<b>112</b>	<b>4.88</b>	<b>149</b>
<b>Total for year</b>	<b>1340</b>		<b>1780</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 15° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.22	68.9	2.75	85.1
Feb	2.73	76.3	3.42	95.7
Mar	3.61	112	4.60	143
Apr	4.47	134	5.84	175
May	4.84	150	6.51	202
Jun	5.14	154	7.07	212
Jul	5.10	158	7.09	220
Aug	4.83	150	6.68	207
Sep	4.36	131	5.86	176
Oct	3.25	101	4.25	132
Nov	2.29	68.7	2.91	87.3
Dec	1.89	58.7	2.35	73.0
<b>Yearly average</b>	<b>3.73</b>	<b>114</b>	<b>4.95</b>	<b>151</b>
<b>Total for year</b>	<b>1360</b>		<b>1810</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 25° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.32	72.1	2.87	89.1
Feb	2.81	78.6	3.53	98.8
Mar	3.66	114	4.68	145
Apr	4.48	134	5.86	176
May	4.79	149	6.44	200
Jun	5.05	152	6.95	209
Jul	5.03	156	6.99	217
Aug	4.81	149	6.67	207
Sep	4.42	133	5.96	179
Oct	3.34	104	4.38	136
Nov	2.38	71.5	3.03	91.0
Dec	1.98	61.5	2.47	76.4
Yearly average	3.76	114	4.99	152
Total for year	1370		1820	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 30° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Μήνας	Ed	Em	Hd	Hm
Ιαν	2,41	74,7	2,99	92,6
Φεβρουάριος	2,87	80,5	3,62	101
Μαρ	3,70	115	4,73	147
Απρίλιος	4,46	134	5,84	175
Μάιος	4,72	146	6,34	197
Ιούνιος	4,94	148	6,80	204
Ιούλιος	4,93	153	6,85	212
Αύγουστος	4,77	148	6,62	205
Σεπτέμβριος	4,45	134	6,01	180
Οκτώβριο	3,42	106	4,49	139
Νοέμβριος	2,46	73,9	3,14	94,2
Δεκέμβριος	2,06	63,9	2,56	79,5

<b>Ετήσιος μέσος όρος</b>	3,77	115	5,01	152
<b>Συνολικά για το έτος</b>	<b>1380</b>		<b>1830</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 35° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.48	77.0	3.08	95.6
Feb	2.92	81.9	3.69	103
Mar	3.72	115	4.76	148
Apr	4.43	133	5.79	174
May	4.62	143	6.21	192
Jun	4.80	144	6.61	198
Jul	4.80	149	6.68	207
Aug	4.71	146	6.53	202
Sep	4.47	134	6.04	181
Oct	3.47	108	4.57	142
Nov	2.53	75.9	3.23	96.8
Dec	2.12	65.9	2.65	82.1
<b>Yearly average</b>	3.76	114	4.99	152
<b>Total for year</b>	<b>1370</b>		<b>1820</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 40° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.54	78.7	3.16	98.0
Feb	2.96	82.8	3.74	105
Mar	3.72	115	4.77	148
Apr	4.37	131	5.71	171
May	4.49	139	6.04	187

<b>Jun</b>	4.64	139	6.37	191
<b>Jul</b>	4.65	144	6.46	200
<b>Aug</b>	4.62	143	6.40	198
<b>Sep</b>	4.46	134	6.02	181
<b>Oct</b>	3.51	109	4.62	143
<b>Nov</b>	2.58	77.4	3.30	98.9
<b>Dec</b>	2.18	67.4	2.72	84.3
<b>Yearly average</b>	3.73	113	4.95	151
<b>Total for year</b>	<b>1360</b>		<b>1810</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

#### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 42° για την περιοχή της Πάρνηθας.

<b>Month</b>	<b>Ed</b>	<b>Em</b>	<b>Hd</b>	<b>Hm</b>
<b>Jan</b>	2.56	79.3	3.19	98.8
<b>Feb</b>	2.97	83.1	3.76	105
<b>Mar</b>	3.71	115	4.76	148
<b>Apr</b>	4.33	130	5.67	170
<b>May</b>	4.44	138	5.96	185
<b>Jun</b>	4.56	137	6.27	188
<b>Jul</b>	4.58	142	6.37	197
<b>Aug</b>	4.58	142	6.34	197
<b>Sep</b>	4.44	133	6.00	180
<b>Oct</b>	3.52	109	4.64	144
<b>Nov</b>	2.59	77.8	3.32	99.6
<b>Dec</b>	2.19	68.0	2.74	85.0
<b>Yearly average</b>	3.71	113	4.92	150
<b>Total for year</b>	<b>1350</b>		<b>1800</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 43° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.57	79.6	3.20	99.1
Feb	2.97	83.2	3.76	105
Mar	3.71	115	4.75	147
Apr	4.32	130	5.64	169
May	4.41	137	5.92	184
Jun	4.53	136	6.22	187
Jul	4.55	141	6.32	196
Aug	4.55	141	6.31	195
Sep	4.44	133	5.99	180
Oct	3.52	109	4.64	144
Nov	2.60	78.0	3.33	99.9
Dec	2.20	68.2	2.75	85.3
<b>Yearly average</b>	<b>3.70</b>	<b>113</b>	<b>4.91</b>	<b>149</b>
<b>Total for year</b>	<b>1350</b>		<b>1790</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 44° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.58	79.8	3.21	99.5
Feb	2.97	83.3	3.77	105
Mar	3.71	115	4.75	147
Apr	4.30	129	5.62	169
May	4.38	136	5.88	182
Jun	4.49	135	6.17	185
Jul	4.51	140	6.27	194
Aug	4.53	140	6.27	194
Sep	4.43	133	5.98	179
Oct	3.52	109	4.64	144
Nov	2.61	78.2	3.34	100
Dec	2.21	68.4	2.76	85.6
<b>Yearly average</b>	<b>3.69</b>	<b>112</b>	<b>4.89</b>	<b>149</b>
<b>Total for year</b>	<b>1350</b>		<b>1790</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 45° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.58	80.1	3.22	99.8
Feb	2.98	83.4	3.77	106
Mar	3.70	115	4.74	147
Apr	4.28	128	5.59	168
May	4.35	135	5.84	181
Jun	4.45	133	6.11	183
Jul	4.48	139	6.22	193
Aug	4.51	140	6.24	193
Sep	4.42	133	5.97	179
Oct	3.52	109	4.65	144
Nov	2.61	78.4	3.35	100
Dec	2.21	68.6	2.77	85.9
Yearly average	3.68	112	4.88	148
<b>Total for year</b>	<b>1340</b>		<b>1780</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 46° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.59	80.3	3.23	100
Feb	2.98	83.4	3.77	106
Mar	3.69	115	4.73	147
Apr	4.26	128	5.57	167
May	4.32	134	5.79	180
Jun	4.41	132	6.05	182
Jul	4.44	138	6.16	191
Aug	4.48	139	6.20	192
Sep	4.41	132	5.95	179
Oct	3.53	109	4.65	144
Nov	2.62	78.6	3.35	101
Dec	2.22	68.8	2.78	86.2
Yearly average	3.66	111	4.86	148
<b>Total for year</b>	<b>1340</b>		<b>1770</b>	



Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 47° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.60	80.4	3.24	100
Feb	2.98	83.5	3.78	106
Mar	3.69	114	4.72	146
Apr	4.24	127	5.54	166
May	4.28	133	5.75	178
Jun	4.36	131	5.99	180
Jul	4.40	136	6.11	189
Aug	4.45	138	6.16	191
Sep	4.40	132	5.94	178
Oct	3.53	109	4.65	144
Nov	2.62	78.7	3.36	101
Dec	2.23	69.0	2.79	86.4
<b>Yearly average</b>	<b>3.65</b>	<b>111</b>	<b>4.84</b>	<b>147</b>
<b>Total for year</b>	<b>1330</b>		<b>1770</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 48° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.60	80.6	3.24	101
Feb	2.98	83.5	3.78	106
Mar	3.68	114	4.71	146
Apr	4.22	127	5.51	165
May	4.25	132	5.70	177
Jun	4.32	130	5.94	178
Jul	4.36	135	6.05	188
Aug	4.42	137	6.12	190
Sep	4.39	132	5.92	178
Oct	3.53	109	4.65	144
Nov	2.63	78.8	3.37	101

<b>Dec</b>	2.23	69.2	2.79	86.6
<b>Yearly average</b>	3.64	111	4.82	147
<b>Total for year</b>	<b>1330</b>		<b>1760</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 49° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
<b>Jan</b>	2.61	80.8	3.25	101
<b>Feb</b>	2.98	83.5	3.78	106
<b>Mar</b>	3.67	114	4.70	146
<b>Apr</b>	4.20	126	5.48	164
<b>May</b>	4.21	131	5.65	175
<b>Jun</b>	4.28	128	5.87	176
<b>Jul</b>	4.32	134	5.99	186
<b>Aug</b>	4.39	136	6.08	188
<b>Sep</b>	4.37	131	5.90	177
<b>Oct</b>	3.52	109	4.65	144
<b>Nov</b>	2.63	78.9	3.37	101
<b>Dec</b>	2.24	69.3	2.80	86.8
<b>Yearly average</b>	3.62	110	4.80	146
<b>Total for year</b>	<b>1320</b>		<b>1750</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 50° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
<b>Jan</b>	2.61	80.9	3.26	101
<b>Feb</b>	2.98	83.5	3.78	106
<b>Mar</b>	3.66	114	4.69	145
<b>Apr</b>	4.17	125	5.45	163
<b>May</b>	4.18	129	5.60	174

<b>Jun</b>	4.23	127	5.81	174
<b>Jul</b>	4.27	132	5.93	184
<b>Aug</b>	4.36	135	6.03	187
<b>Sep</b>	4.36	131	5.88	176
<b>Oct</b>	3.52	109	4.64	144
<b>Nov</b>	2.63	79.0	3.38	101
<b>Dec</b>	2.24	69.4	2.81	87.0
<b>Yearly average</b>	3.60	110	4.78	145
<b>Total for year</b>	<b>1320</b>		<b>1740</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

#### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 51° για την περιοχή της Πάρνηθας.

<b>Month</b>	<b>Ed</b>	<b>Em</b>	<b>Hd</b>	<b>Hm</b>
<b>Jan</b>	2.61	81.0	3.26	101
<b>Feb</b>	2.98	83.4	3.78	106
<b>Mar</b>	3.65	113	4.68	145
<b>Apr</b>	4.15	125	5.41	162
<b>May</b>	4.14	128	5.55	172
<b>Jun</b>	4.19	126	5.75	172
<b>Jul</b>	4.23	131	5.87	182
<b>Aug</b>	4.33	134	5.99	186
<b>Sep</b>	4.34	130	5.86	176
<b>Oct</b>	3.52	109	4.64	144
<b>Nov</b>	2.64	79.1	3.38	101
<b>Dec</b>	2.24	69.6	2.81	87.2
<b>Yearly average</b>	3.59	109	4.75	145
<b>Total for year</b>	<b>1310</b>		<b>1730</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 52° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.62	81.1	3.27	101
Feb	2.98	83.4	3.77	106
Mar	3.64	113	4.66	144
Apr	4.13	124	5.38	161
May	4.10	127	5.50	170
Jun	4.14	124	5.68	171
Jul	4.19	130	5.81	180
Aug	4.30	133	5.94	184
Sep	4.33	130	5.83	175
Oct	3.52	109	4.63	144
Nov	2.64	79.1	3.38	101
Dec	2.25	69.7	2.82	87.3
Yearly average	3.57	109	4.73	144
<b>Total for year</b>	<b>1300</b>		<b>1730</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 53° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.62	81.2	3.27	101
Feb	2.97	83.3	3.77	106
Mar	3.63	113	4.64	144
Apr	4.10	123	5.34	160
May	4.06	126	5.45	169
Jun	4.09	123	5.62	169
Jul	4.14	128	5.75	178
Aug	4.27	132	5.90	183
Sep	4.31	129	5.81	174
Oct	3.51	109	4.63	143
Nov	2.64	79.2	3.38	102
Dec	2.25	69.7	2.82	87.4
Yearly average	3.55	108	4.70	143
<b>Total for year</b>	<b>1300</b>		<b>1720</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 54° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.62	81.3	3.27	101
Feb	2.97	83.2	3.77	105
Mar	3.62	112	4.63	143
Apr	4.07	122	5.31	159
May	4.02	125	5.39	167
Jun	4.04	121	5.55	167
Jul	4.09	127	5.68	176
Aug	4.23	131	5.85	181
Sep	4.29	129	5.78	173
Oct	3.51	109	4.62	143
Nov	2.64	79.2	3.39	102
Dec	2.25	69.8	2.82	87.5
Yearly average	3.53	107	4.68	142
<b>Total for year</b>	<b>1290</b>		<b>1710</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

**Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 55° για την περιοχή της Πάρνηθας.**

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.62	81.3	3.28	102
Feb	2.97	83.1	3.76	105
Mar	3.61	112	4.61	143
Apr	4.04	121	5.27	158
May	3.98	123	5.34	165
Jun	3.99	120	5.48	165
Jul	4.05	125	5.62	174
Aug	4.20	130	5.80	180
Sep	4.27	128	5.75	173
Oct	3.50	108	4.61	143
Nov	2.64	79.2	3.39	102
Dec	2.25	69.9	2.83	87.6
Yearly average	3.51	107	4.65	141
<b>Total for year</b>	<b>1280</b>		<b>1700</b>	

--	--	--

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 56° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.62	81.3	3.28	102
Feb	2.96	83.0	3.75	105
Mar	3.59	111	4.59	142
Apr	4.02	120	5.23	157
May	3.94	122	5.28	164
Jun	3.94	118	5.41	162
Jul	4.00	124	5.55	172
Aug	4.16	129	5.75	178
Sep	4.25	127	5.73	172
Oct	3.49	108	4.60	143
Nov	2.64	79.2	3.38	102
Dec	2.25	69.9	2.83	87.7
Yearly average	3.49	106	4.62	140
<b>Total for year</b>	<b>1270</b>		<b>1690</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 57° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.62	81.3	3.28	102
Feb	2.96	82.8	3.75	105
Mar	3.58	111	4.57	142
Apr	3.99	120	5.19	156
May	3.90	121	5.22	162
Jun	3.89	117	5.34	160
Jul	3.95	122	5.48	170
Aug	4.12	128	5.69	176
Sep	4.23	127	5.69	171
Oct	3.49	108	4.59	142
Nov	2.64	79.1	3.38	101

<b>Dec</b>	2.26	69.9	2.83	87.7
<b>Yearly average</b>	3.47	106	4.59	140
<b>Total for year</b>	<b>1270</b>		<b>1670</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 58° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
<b>Jan</b>	2.62	81.3	3.28	102
<b>Feb</b>	2.95	82.7	3.74	105
<b>Mar</b>	3.56	110	4.55	141
<b>Apr</b>	3.95	119	5.15	154
<b>May</b>	3.85	119	5.16	160
<b>Jun</b>	3.84	115	5.27	158
<b>Jul</b>	3.90	121	5.41	168
<b>Aug</b>	4.08	127	5.64	175
<b>Sep</b>	4.21	126	5.66	170
<b>Oct</b>	3.48	108	4.58	142
<b>Nov</b>	2.64	79.1	3.38	101
<b>Dec</b>	2.26	69.9	2.83	87.7
<b>Yearly average</b>	3.45	105	4.56	139
<b>Total for year</b>	<b>1260</b>		<b>1660</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 59° για την περιοχή της Πάρνηθας.

Month	Ed	Em	Hd	Hm
<b>Jan</b>	2.62	81.3	3.28	102
<b>Feb</b>	2.95	82.5	3.73	104
<b>Mar</b>	3.55	110	4.53	140
<b>Apr</b>	3.92	118	5.11	153
<b>May</b>	3.81	118	5.10	158
<b>Jun</b>	3.78	114	5.20	156
<b>Jul</b>	3.85	119	5.34	166

<b>Aug</b>	4.04	125	5.58	173
<b>Sep</b>	4.18	125	5.63	169
<b>Oct</b>	3.47	107	4.57	142
<b>Nov</b>	2.63	79.0	3.38	101
<b>Dec</b>	2.25	69.9	2.83	87.7
<b>Yearly average</b>	3.42	104	4.53	138
<b>Total for year</b>	<b>1250</b>		<b>1650</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

### Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 60° για την περιοχή της Πάρνηθας.

<b>Month</b>	<b>Ed</b>	<b>Em</b>	<b>Hd</b>	<b>Hm</b>
<b>Jan</b>	2.62	81.2	3.27	102
<b>Feb</b>	2.94	82.3	3.72	104
<b>Mar</b>	3.53	109	4.50	140
<b>Apr</b>	3.89	117	5.06	152
<b>May</b>	3.76	117	5.04	156
<b>Jun</b>	3.73	112	5.12	154
<b>Jul</b>	3.79	118	5.27	163
<b>Aug</b>	4.00	124	5.53	171
<b>Sep</b>	4.16	125	5.59	168
<b>Oct</b>	3.46	107	4.55	141
<b>Nov</b>	2.63	78.9	3.37	101
<b>Dec</b>	2.25	69.9	2.83	87.7
<b>Yearly average</b>	3.40	103	4.49	137
<b>Total for year</b>	<b>1240</b>		<b>1640</b>	

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh).

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh) .

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>).



# Παράρτημα 2

---

*Κλιματολογικά δεδομένα  
μετεωρολογικού σταθμού Πάρνηθας*

---

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

### Κλιματολογικά δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Πάρνηθας

NAME: PARNITHA CITY: STATE

ELEV: 1220 m LAT: 38° 09' 48" N LONG: 23° 43' 05" E

#### Τιμές Ιανουαρίου 2011

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
1	2.3	4.7	13:00	0.4	6:10	16.0	0.0	0.0	11.4	27.4	3:00	NW
2	3.5	4.6	15:10	2.7	5:20	14.8	0.0	17.4	17.9	56.3	12:40	S
3	2.9	4.9	13:10	0.5	00:00	15.4	0.0	2.8	18.0	46.7	22:50	NNW
4	-0.8	0.7	0:30	-1.6	22:50	19.1	0.0	0.2	23.8	46.7	8:10	NNW
5	-0.8	1.1	12:00	-1.9	6:50	19.1	0.0	0.2	8.2	30.6	18:10	N
6	-0.1	2.2	14:10	-1.8	8:00	18.4	0.0	0.0	13.5	33.8	6:10	NNW
7	1.2	3.8	13:30	-0.2	0:20	17.1	0.0	0.0	17.4	41.8	23:00	NW
8	5.2	9.1	13:20	1.9	0:10	13.2	0.0	0.0	18.3	46.7	0:40	WNW
9	8.3	10.3	12:00	6.2	0:20	10.1	0.0	0.0	13.2	35.4	22:40	NNW
10	8.4	10.7	9:00	7.1	18:20	9.9	0.0	0.0	4.8	25.7	0:10	NNW
11	4.4	7.8	0:10	2.9	6:40	13.9	0.0	0.0	11.7	27.4	2:20	WNW
12	4.4	5.3	11:40	3.6	6:30	13.9	0.0	3.0	11.1	29.0	16:30	SSE
13	3.7	4.6	0:10	2.9	4:40	14.7	0.0	8.2	21.2	43.5	11:30	N
14	4.1	7.2	9:40	3.0	1:10	14.2	0.0	0.2	23.0	64.4	20:50	NNW
15	6.2	9.9	23:20	3.7	0:30	12.2	0.0	0.0	22.0	53.1	0:30	NNW
16	2.1	7.5	0:30	0.2	14:10	16.2	0.0	32.8	41.7	114.3	23:20	NW
17	0.6	1.5	13:50	0.1	7:30	17.7	0.0	0.4	49.1	112.7	0:10	N
18	4.3	6.6	14:50	0.1	1:00	14.1	0.0	0.2	32.5	66.0	5:20	N
19	7.6	11.3	12:00	5.7	7:20	10.7	0.0	0.0	10.5	30.6	0:10	N
20	5.2	7.1	0:10	3.1	22:10	13.1	0.0	0.0	8.2	24.1	13:40	S
21	4.2	7.1	12:00	2.9	6:40	14.2	0.0	3.6	14.0	53.1	22:40	S
22	4.7	7.1	14:10	3.4	00:00	13.6	0.0	4.2	21.6	61.2	22:20	SSW
23	2.9	4.6	13:30	1.7	23:40	15.4	0.0	0.2	22.2	62.8	1:20	WSW
24	1.2	3.6	12:00	-1.6	23:00	17.2	0.0	2.8	17.7	38.6	6:20	WNW
25	-3.0	-0.9	5:10	-5.2	23:20	21.3	0.0	0.2	22.5	59.5	12:30	NNW
26	-3.8	-1.1	13:40	-6.6	5:00	22.1	0.0	0.0	11.7	29.0	3:40	NW
27	-0.4	2.3	12:10	-2.8	1:50	18.8	0.0	0.4	13.4	43.5	00:00	SE
28	0.1	0.9	5:10	-0.3	1:50	18.2	0.0	13.0	44.3	88.5	12:30	NE
29	-1.6	-0.1	0:50	-2.7	21:40	19.9	0.0	9.0	1.6	32.2	0:20	NNW
30	-2.4	-1.3	14:10	-3.4	7:50	20.7	0.0	0.2	0.0	0.0	---	---
31	-1.4	-0.2	13:50	-2.2	6:10	19.8	0.0	1.0	0.0	1.6	12:30	NNE
	2.4	11.3	19	-6.6	26	495.2	0.0	100.0	17.6	114.3	16	NNW

**Τιμές Φεβρουαρίου 2011**

DAY	MEAN		TIME	LOW	TIME	HEAT	COOL	RAIN	AVG		TIME	DOM
	TEMP	HIGH				DEG	DEG		WIND	HIGH		
1	-3.8	-2.2	0:10	-5.6	00:00	22.1	0.0	0.4	18.8	78.9	17:50	N
2	-3.3	-0.6	14:30	-6.2	2:00	21.6	0.0	0.0	36.4	80.5	2:00	NNE
3	-0.5	-0.1	19:50	-1.6	0:10	18.8	0.0	54.2	40.4	99.8	21:20	NE
4	-2.5	-0.9	0:10	-3.3	20:40	20.8	0.0	4.8	19.0	90.1	4:20	ENE
5	-2.2	-0.4	16:00	-3.2	0:20	20.5	0.0	2.8	15.0	57.9	20:30	NE
6	3.7	7.6	13:20	-1.6	1:20	14.6	0.0	0.0	21.6	49.9	20:00	NE
7	5.1	6.5	0:50	3.7	7:20	13.3	0.0	0.0	35.7	66.0	17:40	N
8	6.3	8.7	15:30	4.3	1:40	12.0	0.0	0.0	27.2	69.2	5:20	NE
9	7.1	10.8	12:00	4.2	22:50	11.3	0.0	0.0	15.4	48.3	20:10	NNE
10	2.4	4.5	0:30	0.4	00:00	15.9	0.0	0.0	32.7	64.4	8:50	N
11	2.8	6.4	15:50	-0.7	7:10	15.6	0.0	0.0	18.3	59.5	1:40	NW
12	5.9	8.5	6:00	3.7	0:10	12.4	0.0	0.2	27.2	61.2	22:20	NW
13	5.3	9.3	12:40	3.2	23:10	13.0	0.0	0.0	15.8	57.9	3:00	SSE
14	3.7	6.6	13:30	2.4	7:00	14.7	0.0	0.0	6.6	22.5	14:20	S
15	1.5	3.1	0:20	-0.3	23:10	16.8	0.0	0.8	27.4	53.1	22:30	N
16	0.8	3.5	12:50	-0.9	4:50	17.5	0.0	0.4	16.7	51.5	0:40	SW
17	4.4	6.7	13:20	1.7	0:10	13.9	0.0	0.0	17.4	46.7	22:10	SSW
18	5.3	7.1	18:40	2.2	21:30	13.1	0.0	5.8	35.1	104.6	21:30	SE
19	3.1	3.7	6:20	2.2	23:40	15.3	0.0	29.8	32.3	103.0	15:30	WSW
20	2.0	3.0	13:50	1.4	22:30	16.3	0.0	3.0	20.3	75.6	0:30	W
21	2.4	4.2	00:00	1.0	4:50	15.9	0.0	3.2	9.7	59.5	22:50	SE
22	3.8	5.6	13:40	2.6	7:40	14.6	0.0	16.6	18.5	61.2	0:40	SSE
23	3.0	4.4	13:10	1.7	23:50	15.3	0.0	0.8	23.3	48.3	21:30	N
24	3.0	4.2	12:10	1.7	1:20	15.3	0.0	35.6	29.3	75.6	23:10	NE
25	-0.2	2.6	0:10	-0.9	00:00	18.5	0.0	21.2	28.5	90.1	12:40	W
26	-1.7	-0.9	0:10	-2.9	23:20	20.0	0.0	0.0	2.9	46.7	11:40	NNW
27	-2.6	-1.4	13:10	-3.2	2:30	20.9	0.0	0.0	0.0	0.0	---	---
28	-1.6	-0.3	14:10	-2.9	0:10	19.9	0.0	0.6	0.0	0.0	---	---
	1.9	10.8	9	-6.2	2	459.9	0.0	180.2	21.1	104.6	18	N

Τιμές Μαρτίου 2011

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
1	-1.3	-0.7	14:20	-1.9	19:00	19.6	0.0	6.0	0.8	32.2	13:20	NE
2	0.4	2.9	17:10	-1.4	0:10	17.9	0.0	10.4	7.1	41.8	23:00	N
3	2.0	4.7	11:30	0.4	23:50	16.3	0.0	0.2	15.3	54.7	00:00	NNW
4	-0.1	2.8	23:40	-0.9	21:20	18.4	0.0	0.0	28.8	59.5	15:00	N
5	3.3	7.4	10:00	0.1	6:50	15.0	0.0	0.0	9.3	41.8	6:40	NE
6	3.1	4.9	16:10	0.0	00:00	15.3	0.0	2.8	21.9	64.4	23:40	W
7	-2.7	0.8	1:50	-4.6	19:20	21.0	0.0	5.4	32.3	77.2	0:20	WNW
8	-6.1	-4.4	0:10	-7.4	20:10	24.4	0.0	0.8	31.9	80.5	2:20	ESE
9	-7.5	-6.2	14:10	-8.4	9:50	25.8	0.0	0.8	11.7	48.3	5:40	S
10	-6.2	-4.4	16:30	-8.2	1:20	24.6	0.0	0.2	19.5	56.3	22:20	S
11	-1.1	1.8	00:00	-5.2	0:50	19.4	0.0	0.0	27.0	49.9	14:00	NW
12	4.4	8.3	14:40	0.8	1:10	13.9	0.0	0.0	9.0	32.2	4:00	S
13	5.9	8.3	13:40	3.5	6:30	12.4	0.0	0.0	3.7	14.5	11:00	S
14	7.7	10.3	16:00	5.6	8:00	10.7	0.0	0.0	10.1	27.4	8:00	SSW
15	8.5	11.0	15:20	6.7	3:50	9.8	0.0	0.0	11.6	30.6	19:20	SSW
16	8.9	11.2	16:00	7.2	7:20	9.4	0.0	0.0	15.3	38.6	6:00	SSW
17	8.1	10.8	1:00	5.6	23:00	10.3	0.0	1.4	18.8	46.7	16:40	S
18	7.9	11.5	15:00	5.8	2:10	10.4	0.0	0.0	15.6	41.8	21:30	SSW
19	6.7	10.6	12:30	5.1	19:20	11.6	0.0	0.6	12.2	41.8	2:10	SSW
20	3.6	5.6	0:10	1.8	22:30	14.8	0.0	2.8	22.9	61.2	16:50	NW
21	0.2	1.9	0:10	-1.8	00:00	18.1	0.0	5.4	49.4	82.1	9:00	ENE
22	-2.1	-1.1	13:10	-3.0	9:00	20.4	0.0	0.0	43.1	78.9	18:00	WSW
23	-0.9	0.7	00:00	-2.3	4:30	19.2	0.0	0.2	43.5	80.5	9:30	W
24	2.8	6.1	23:00	0.3	4:20	15.6	0.0	0.0	24.5	80.5	15:00	W
25	7.9	11.8	13:50	5.8	0:30	10.4	0.0	0.0	17.7	69.2	7:20	WNW
26	7.7	11.1	16:00	5.3	22:30	10.7	0.0	0.0	21.9	49.9	21:20	SSW
27	6.9	10.4	15:40	3.8	5:10	10.9	0.0	0.0	25.9	56.3	8:50	WSW
28	8.6	12.2	14:20	6.0	0:40	9.8	0.0	0.0	13.4	46.7	22:10	SSW
29	7.9	10.2	17:50	6.1	21:40	10.4	0.0	1.0	19.2	49.9	17:00	SSW
30	8.3	11.1	12:40	6.8	6:50	10.1	0.0	0.0	12.9	38.6	15:30	ESE
31	7.0	7.7	16:10	6.1	9:40	11.3	0.0	17.0	15.6	56.3	11:10	N
	3.2	12.2	28	-8.4	9	468.1	0.0	55.0	19.7	82.1	21	S

Τιμές Απριλίου 2011

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
1	5.7	6.9	6:40	4.0	00:00	12.7	0.0	9.4	40.1	77.2	00:00	N
2	2.9	4.2	2:30	2.2	15:50	15.4	0.0	11.0	33.6	95.0	16:50	---
3	4.2	6.7	17:30	2.1	7:50	14.1	0.0	0.2	14.0	62.8	12:00	---
4	4.6	8.1	17:00	1.3	2:20	13.8	0.0	0.2	18.5	61.2	11:00	---
5	8.5	12.0	14:10	6.1	1:40	9.8	0.0	0.0	17.9	43.5	7:00	---
6	4.8	6.6	0:10	3.3	21:50	13.5	0.0	0.8	33.3	83.7	19:30	---
7	3.7	5.7	16:40	2.0	6:10	14.7	0.0	0.8	43.5	85.3	5:20	---
8	10.6	15.1	15:40	5.0	0:10	7.8	0.0	0.0	24.1	49.9	0:50	---
9	13.4	16.9	17:10	10.6	4:20	4.9	0.0	0.0	20.3	49.9	1:20	---
10	8.8	12.6	17:40	6.3	9:10	9.5	0.0	0.0	24.1	80.5	9:10	---
11	4.7	7.8	2:20	1.4	22:20	13.7	0.0	0.0	27.8	106.2	11:10	---
12	5.4	9.3	16:00	1.8	4:20	12.9	0.0	0.0	20.3	53.1	0:50	---
13	9.1	12.4	16:30	6.7	23:10	9.3	0.0	0.0	18.5	59.5	22:10	---
14	5.6	9.1	18:10	2.6	23:10	12.7	0.0	1.6	24.6	86.9	8:10	---
15	4.5	7.5	11:50	2.4	1:10	13.3	0.0	0.2	6.0	27.4	12:50	ESE
16	4.2	6.9	16:00	1.8	22:50	14.1	0.0	4.2	14.8	45.1	00:00	NNE
17	1.9	2.6	15:00	0.8	8:20	16.4	0.0	22.6	37.0	62.8	4:50	NNE
18	0.5	1.6	0:10	-0.3	21:50	17.8	0.0	4.8	38.1	72.4	19:10	NNW
19	0.6	2.2	17:50	-0.5	0:40	17.7	0.0	4.0	13.8	77.2	12:00	NW
20	2.8	4.3	21:30	1.4	0:40	15.5	0.0	2.8	26.1	80.5	21:00	NNW
21	2.8	4.7	15:00	1.2	6:50	15.5	0.0	0.0	38.6	95.0	10:30	N
22	4.9	8.1	16:30	1.6	2:40	13.4	0.0	0.0	37.8	75.6	1:30	N
23	6.6	10.3	15:50	3.4	00:00	11.8	0.0	0.0	25.4	62.8	5:20	N
24	7.0	11.5	15:40	3.4	1:00	11.3	0.0	0.0	24.0	57.9	3:00	NNE
25	6.8	10.6	14:10	4.6	22:50	11.6	0.0	0.0	32.0	75.6	20:00	N
26	6.3	10.2	15:30	2.9	1:10	12.1	0.0	5.8	20.6	66.0	1:40	N
27	6.2	7.1	13:40	4.0	3:10	12.2	0.0	17.6	11.7	33.8	19:30	NE
28	6.5	7.8	13:20	5.7	20:30	11.8	0.0	0.4	20.4	46.7	22:40	NNE
29	7.4	12.6	17:10	4.7	4:10	10.9	0.0	0.6	20.8	48.3	0:10	NNW
30	9.6	12.9	17:00	7.6	3:30	8.7	0.0	0.0	11.7	30.6	14:40	SSE
	5.7	16.9	9	-0.5	19	379.0	0.0	87.0	24.7	106.2	11	N

Τιμές Μάιος 2011

DAY	MEAN		TIME	LOW	TIME	HEAT	COOL	RAIN	AVG		TIME	DOM
	TEMP	HIGH				DEG	DEG		WIND	HIGH		DIR
1	10.6	12.1	17:50	8.1	8:10	7.8	0.0	1.0	16.7	49.9	13:10	SSE
2	12.2	15.7	17:10	9.3	4:20	6.2	0.0	0.0	20.9	41.8	5:00	NW
3	11.9	14.2	2:20	9.6	7:30	6.4	0.0	4.4	21.2	62.8	16:30	S
4	10.7	12.6	12:40	8.7	6:20	7.7	0.0	0.2	22.4	48.3	14:00	WNW
5	8.2	10.9	11:40	4.6	23:10	10.2	0.0	4.0	20.9	78.9	23:50	NNW
6	3.8	4.8	0:10	3.1	12:50	14.6	0.0	3.6	38.9	98.2	5:10	N
7	6.6	10.1	18:20	3.2	3:30	11.7	0.0	0.0	23.8	64.4	1:20	NNE
8	10.6	14.3	12:50	8.1	1:10	7.7	0.0	0.0	17.2	41.8	5:50	NNW
9	7.5	9.8	14:40	3.6	23:20	10.8	0.0	0.0	21.4	77.2	23:40	NNE
10	4.9	7.1	14:50	3.5	5:30	13.4	0.0	0.0	51.8	85.3	17:10	NNE
11	6.6	9.3	14:20	5.1	3:00	11.8	0.0	0.0	36.5	77.2	5:10	N
12	5.6	7.3	18:40	4.2	13:50	12.8	0.0	5.2	21.4	75.6	5:40	NW
13	8.3	11.7	17:40	5.4	3:30	10.1	0.0	0.0	16.4	53.1	3:00	NW
14	12.5	16.1	13:20	9.2	1:10	5.8	0.0	0.0	12.4	35.4	16:10	NW
15	14.2	17.6	13:20	12.1	3:20	4.2	0.0	0.0	10.1	27.4	16:10	SSE
16	14.6	17.8	14:10	12.7	5:30	3.7	0.0	0.0	16.1	38.6	22:20	SSW
17	11.9	14.6	15:40	9.2	00:00	6.4	0.0	0.0	10.6	38.6	15:20	S
18	9.3	12.8	11:20	6.3	4:30	9.0	0.0	0.0	13.4	38.6	12:50	ESE
19	7.8	9.9	18:40	6.2	13:00	10.6	0.0	17.2	20.9	51.5	19:20	NNW
20	10.4	14.2	14:40	7.1	1:30	7.9	0.0	0.4	25.3	53.1	1:40	NNW
21	13.1	16.6	12:50	10.9	2:10	5.2	0.0	0.0	21.7	45.1	4:20	NNE
22	13.2	15.7	14:10	11.3	3:30	5.2	0.0	0.0	36.2	70.8	11:20	NNE
23	14.2	17.0	16:10	12.7	6:10	4.2	0.0	0.0	35.9	64.4	9:50	NNE
24	14.4	18.4	15:10	12.1	6:30	3.9	0.0	0.0	27.7	61.2	3:10	N
25	14.9	17.2	15:20	12.2	7:50	3.4	0.0	0.0	27.5	53.1	11:10	NNE
26	13.3	15.3	11:00	11.9	00:00	5.1	0.0	5.0	35.4	62.8	7:10	NNE
27	10.8	13.2	13:00	9.8	6:30	7.5	0.0	11.0	35.9	80.5	3:00	NNW
28	11.2	13.6	18:00	9.6	5:50	7.1	0.0	0.8	27.8	57.9	4:00	NNW
29	13.6	16.5	17:50	11.6	6:20	4.7	0.0	0.0	13.2	38.6	3:50	N
30	13.3	16.2	18:00	11.4	5:30	5.1	0.0	0.0	16.7	43.5	11:40	NNE
31	13.5	16.5	10:40	11.8	3:50	4.8	0.0	0.0	11.3	35.4	0:30	NNE
	10.8	18.4	24	3.1	6	234.8	0.0	52.8	23.5	98.2	6	NNE

Τιμές Ιουνίου 2011

DAY	MEAN		TIME	LOW	TIME	HEAT	COOL	RAIN	AVG		TIME	DOM
	TEMP	HIGH				DEG	DEG		WIND	SPEED		DIR
1	14.8	17.4	13:50	12.9	0:10	3.5	0.0	17.6	8.9	29.0	1:40	NNW
2	15.6	18.4	13:30	13.6	22:30	2.7	0.0	3.8	11.7	35.4	13:50	N
3	15.3	18.4	12:30	13.6	5:00	3.1	0.0	14.8	11.7	35.4	3:10	N
4	15.1	19.5	15:10	13.3	2:50	3.2	0.0	0.0	15.1	40.2	21:00	N
5	16.1	19.5	12:40	13.4	4:10	2.2	0.0	0.0	15.0	43.5	3:10	NNE
6	17.3	20.5	14:40	14.4	6:20	1.3	0.3	0.0	17.9	48.3	10:20	NE
7	18.3	21.4	14:40	15.2	6:50	0.7	0.7	0.0	9.3	37.0	6:50	N
8	20.3	21.9	12:10	18.4	0:20	0.0	2.0	0.0	14.0	51.5	22:40	SSW
9	22.2	25.6	15:40	18.2	00:00	0.0	3.8	0.0	20.8	46.7	21:00	WNW
10	16.9	20.4	17:00	14.3	7:00	1.7	0.3	0.2	27.0	56.3	9:10	NW
11	15.4	19.3	14:50	12.8	7:00	3.0	0.1	0.0	19.6	56.3	4:40	NNW
12	13.4	17.8	13:10	8.1	14:50	4.9	0.0	22.2	22.4	66.0	14:50	NW
13	13.2	16.5	17:50	10.6	6:30	5.2	0.0	0.2	22.4	70.8	10:10	NNW
14	14.7	18.4	12:20	12.9	4:20	3.6	0.0	1.8	11.7	33.8	6:50	N
15	13.7	15.6	13:10	11.8	5:00	4.7	0.0	0.2	25.1	51.5	7:20	NNE
16	13.2	16.1	17:30	10.9	7:20	5.2	0.0	0.4	25.1	51.5	7:00	NNW
17	15.5	19.1	16:40	12.6	4:20	2.8	0.0	0.0	20.1	48.3	3:10	N
18	18.0	21.9	16:40	15.6	5:40	1.0	0.7	0.0	11.6	33.8	6:10	NNW
19	19.5	22.7	15:30	16.9	0:30	0.2	1.3	0.0	11.4	32.2	22:20	NNW
20	20.7	24.4	14:40	17.6	1:40	0.1	2.4	0.0	11.4	32.2	0:10	SSE
21	17.5	19.3	1:10	15.2	8:50	1.0	0.2	0.0	28.2	54.7	10:50	N
22	15.3	17.9	16:00	13.1	6:20	3.0	0.0	0.0	43.0	72.4	6:40	N
23	16.3	18.9	16:50	13.5	5:10	2.1	0.1	0.0	46.5	78.9	0:20	NNW
24	17.9	20.7	15:50	15.6	5:50	0.9	0.5	0.0	40.4	69.2	7:10	N
25	20.6	24.4	17:10	17.0	00:00	0.1	2.3	0.0	22.0	54.7	0:40	N
26	11.4	17.0	0:10	9.6	13:10	6.9	0.0	6.8	34.4	80.5	10:30	N
27	11.8	14.4	15:10	9.4	6:50	6.5	0.0	0.0	20.8	66.0	9:30	N
28	13.4	17.1	17:00	10.5	6:20	4.9	0.0	0.0	12.1	37.0	12:30	NNW
29	13.7	16.8	13:10	12.0	5:50	4.7	0.0	0.8	11.7	43.5	3:10	SW
30	16.7	20.7	14:10	13.0	3:00	1.9	0.3	0.0	15.3	43.5	23:40	SW
	16.1	25.6	9	8.1	12	80.9	14.8	68.8	20.2	80.5	26	N

Τιμές Ιουλίου 2011

DAY	MEAN		TIME	LOW	TIME	HEAT	COOL	RAIN	AVG		TIME	DOM
	TEMP	HIGH				DEG	DEG		WIND	SPEED		DIR
1	18.6	22.0	13:20	16.0	1:00	0.6	0.8	0.0	15.3	38.6	2:00	SSE
2	17.3	20.1	13:10	15.2	5:20	1.2	0.2	0.0	12.6	37.0	3:40	SSE
3	18.3	22.2	14:10	15.1	7:00	0.9	0.9	0.0	15.8	43.5	16:10	SW
4	17.3	22.0	16:40	14.2	7:30	1.6	0.5	0.0	20.0	48.3	1:50	NNW
5	19.2	23.6	16:30	15.6	0:10	0.4	1.4	0.0	12.9	38.6	21:10	SW
6	19.2	23.2	13:50	17.3	4:50	0.2	1.1	0.0	15.8	46.7	9:50	NW
7	18.9	23.1	16:50	16.7	5:50	0.3	0.9	0.0	13.8	41.8	8:30	N
8	18.7	21.8	14:30	15.8	5:00	0.6	1.0	0.0	23.3	54.7	10:50	N
9	19.5	22.8	16:00	17.1	4:50	0.2	1.3	0.0	40.1	67.6	5:50	NNE
10	19.7	22.8	15:30	16.9	6:30	0.2	1.6	0.0	43.8	69.2	0:10	N
11	19.9	22.3	15:10	18.3	4:30	0.0	1.6	0.0	41.2	67.6	0:50	N
12	18.9	21.4	17:00	16.5	7:30	0.4	1.0	0.0	37.2	74.0	8:10	N
13	19.3	22.4	14:30	17.3	7:30	0.2	1.1	0.0	29.5	67.6	4:40	N
14	19.3	22.8	15:40	16.5	6:50	0.3	1.3	0.0	23.5	57.9	12:10	N
15	20.3	23.6	14:30	17.6	5:00	0.1	2.1	0.0	24.5	59.5	6:00	N
16	22.2	26.2	16:10	18.6	4:10	0.0	3.8	0.0	20.8	49.9	1:10	NW
17	24.2	28.6	13:40	22.2	1:50	0.0	5.9	0.0	18.8	40.2	6:30	NNW
18	22.5	26.6	12:00	19.7	6:40	0.0	4.2	0.0	16.9	46.7	4:40	NNW
19	23.6	27.6	13:40	20.7	6:00	0.0	5.3	0.0	10.9	35.4	14:40	N
20	25.3	29.9	14:20	21.1	00:00	0.0	6.9	0.0	16.9	45.1	23:50	NNW
21	20.2	25.4	17:40	16.6	8:00	0.2	2.1	0.0	21.6	61.2	1:50	NW
22	20.7	26.4	17:20	17.1	5:40	0.2	2.6	0.0	18.5	46.7	19:50	NNW
23	20.8	25.9	15:30	18.1	2:10	0.0	2.6	0.0	17.4	41.8	5:20	NNW
24	21.2	24.9	16:10	18.7	1:20	0.0	2.8	0.0	8.7	38.6	00:00	SW
25	20.7	24.7	14:10	17.7	23:30	0.1	2.3	0.0	17.1	48.3	0:50	SW
26	19.2	23.2	16:00	15.9	4:50	0.4	1.3	0.0	17.9	49.9	5:10	W
27	19.8	24.7	15:40	15.8	5:10	0.5	2.0	0.0	13.2	35.4	2:10	SSE
28	21.7	25.2	16:30	19.2	6:20	0.0	3.4	0.0	18.0	43.5	8:40	N
29	21.4	27.2	14:50	18.7	3:20	0.0	3.1	0.0	15.1	37.0	0:20	N
30	21.1	26.3	14:10	18.2	7:10	0.0	2.8	0.0	15.3	38.6	5:10	NW
31	20.7	25.0	13:40	18.5	4:10	0.0	2.4	0.0	10.6	33.8	17:20	SSE
	20.3	29.9	20	14.2	4	8.4	70.3	0.0	20.2	74.0	12	N



**Τιμές Αυγούστου 2011**

DAY	MEAN		TIME	LOW	TIME	HEAT	COOL	RAIN	AVG		TIME	DOM
	TEMP	HIGH				DEG	DEG		WIND	DIR		
1	19.9	23.3	12:50	17.9	5:20	0.0	1.6	0.0	8.9	30.6	13:50	SSE
2	18.2	21.7	15:40	15.1	3:00	0.8	0.7	0.0	20.0	48.3	1:50	N
3	16.9	20.3	16:00	14.2	6:50	1.6	0.2	0.0	23.3	54.7	7:40	N
4	18.7	23.0	16:10	15.8	6:30	0.8	1.2	0.0	16.6	46.7	4:30	NW
5	19.9	23.3	15:40	18.1	00:00	0.0	1.6	0.0	19.5	43.5	10:20	N
6	17.2	20.4	16:00	14.4	7:30	1.4	0.2	0.0	25.6	62.8	1:20	N
7	18.1	21.9	16:20	14.9	4:50	0.9	0.7	0.0	25.4	56.3	8:50	N
8	20.1	23.1	16:40	17.7	6:50	0.1	1.8	0.0	23.3	59.5	20:10	N
9	22.7	27.5	15:30	19.3	4:30	0.0	4.3	0.0	17.9	48.3	3:50	N
10	22.9	27.5	16:30	18.6	00:00	0.0	4.6	0.0	16.4	48.3	6:50	NNE
11	13.9	18.6	0:10	11.6	7:10	4.4	0.0	0.8	32.8	80.5	11:00	N
12	15.6	19.5	17:40	12.5	7:50	2.8	0.1	0.0	18.5	59.5	0:20	N
13	17.6	22.5	15:40	14.3	5:30	1.4	0.7	0.0	18.8	45.1	9:50	NNE
14	19.2	24.2	16:50	15.8	4:00	0.6	1.5	0.0	16.3	40.2	19:00	NNE
15	20.4	25.4	15:40	17.2	6:40	0.1	2.2	0.0	10.5	33.8	15:50	N
16	21.3	25.9	14:30	18.7	5:20	0.0	2.9	0.0	12.4	35.4	13:00	NNE
17	19.4	22.1	15:50	17.4	8:00	0.1	1.2	0.0	29.1	78.9	12:40	N
18	19.4	22.3	15:30	17.6	23:50	0.1	1.2	0.0	38.1	72.4	12:30	NNE
19	17.4	19.2	16:00	16.2	00:00	0.9	0.1	0.0	30.4	69.2	20:30	N
20	16.9	19.6	14:20	14.2	7:00	1.6	0.2	0.0	35.9	80.5	8:40	N
21	18.3	21.2	15:20	16.1	7:10	0.6	0.6	0.0	40.9	83.7	23:30	N
22	17.9	20.2	15:40	16.3	8:20	0.8	0.3	0.0	48.6	95.0	8:10	N
23	17.9	21.5	14:30	15.3	6:10	0.9	0.6	0.0	43.5	78.9	8:00	N
24	18.6	21.7	14:30	16.4	7:30	0.6	0.8	0.0	44.9	91.7	11:40	N
25	19.3	22.4	15:40	17.3	7:30	0.2	1.2	0.0	44.4	90.1	5:40	NNE
26	17.5	19.6	14:40	15.2	00:00	0.9	0.1	0.0	50.2	90.1	1:40	NNE
27	14.9	17.3	15:50	12.6	8:00	3.4	0.0	0.0	49.1	85.3	4:50	NNW
28	14.4	16.8	16:10	12.9	6:50	3.9	0.0	0.0	41.2	66.0	0:20	NNW
29	15.2	18.2	16:20	12.7	6:40	3.1	0.0	0.0	36.2	75.6	7:00	NNW
30	18.1	22.7	14:30	13.9	5:40	1.2	0.9	0.0	12.6	43.5	2:40	SSE
31	20.1	24.2	13:40	15.9	23:20	0.2	1.9	0.0	16.6	56.3	23:10	SSE
	18.3	27.5	9	11.6	11	33.6	33.4	0.8	28.0	95.0	22	N

**Τιμές Σεπτεμβρίου 2011**

DAY	MEAN		TIME	LOW	TIME	HEAT	COOL	RAIN	AVG		TIME	DOM
	TEMP	HIGH				DEG	DEG		WIND	DIR		
1	20.8	25.2	13:00	17.5	6:50	0.0	2.4	0.0	14.3	38.6	3:00	N
2	21.6	25.0	12:30	19.3	0:10	0.0	3.3	0.0	9.0	25.7	12:40	SSE
3	20.0	23.6	14:10	17.3	23:30	0.1	1.7	0.0	18.0	54.7	18:10	NNW
4	17.0	19.5	15:30	14.4	7:20	1.4	0.1	0.0	34.3	72.4	8:40	N
5	18.2	21.6	14:40	14.9	7:20	1.1	0.9	0.0	30.6	69.2	2:10	N
6	20.9	26.3	15:30	17.8	1:50	0.0	2.7	0.0	14.3	33.8	0:30	N
7	15.8	17.7	0:10	14.1	22:30	2.6	0.0	0.0	29.0	61.2	3:30	N
8	16.8	20.3	17:00	13.6	7:30	1.9	0.3	0.0	29.5	66.0	7:40	N
9	20.1	24.8	12:30	17.2	5:10	0.1	1.8	0.0	11.9	30.6	7:00	SSE
10	19.2	21.3	15:30	16.8	7:20	0.1	0.9	0.0	19.3	41.8	10:20	N
11	18.7	21.8	16:10	16.9	2:50	0.4	0.8	0.0	28.0	64.4	23:50	NNE
12	18.5	22.1	17:20	16.6	6:10	0.6	0.7	0.0	32.5	66.0	3:20	NNE
13	18.2	21.2	15:30	15.6	6:40	0.9	0.8	0.0	33.0	64.4	8:00	N
14	20.1	23.8	15:30	18.3	2:10	0.0	1.8	0.0	30.6	62.8	5:20	NNE
15	20.8	25.8	15:00	18.5	7:20	0.0	2.4	0.0	20.6	53.1	5:20	NE
16	17.9	20.2	14:10	16.3	8:20	0.7	0.3	0.0	37.8	77.2	14:30	N
17	18.4	21.2	14:20	15.4	8:10	0.6	0.7	0.0	34.6	67.6	5:40	N
18	17.7	20.1	16:10	15.1	8:40	0.9	0.3	0.0	32.0	64.4	1:50	N
19	18.6	24.3	15:40	16.0	2:40	0.8	1.1	0.0	17.5	49.9	0:10	NNE
20	17.6	22.7	11:10	13.6	22:10	1.2	0.5	3.6	16.1	57.9	21:40	SSE
21	12.9	16.5	12:00	9.9	23:50	5.4	0.0	0.4	18.5	48.3	23:00	W
22	11.0	13.1	14:20	9.7	1:30	7.3	0.0	7.0	27.5	57.9	0:50	N
23	13.2	15.6	15:30	11.0	1:10	5.1	0.0	0.2	32.2	69.2	3:50	N
24	14.8	17.9	14:20	13.4	1:10	3.6	0.0	0.0	24.6	56.3	6:10	N
25	14.1	16.8	16:00	12.3	7:10	4.3	0.0	0.0	38.9	74.0	13:40	N
26	12.5	14.8	15:10	10.3	20:50	5.8	0.0	0.0	42.0	80.5	1:30	N
27	10.5	12.7	14:30	9.4	7:30	7.8	0.0	0.0	47.3	80.5	7:10	N
28	10.4	13.0	14:30	8.7	7:10	7.9	0.0	0.0	43.8	74.0	6:40	N
29	11.4	13.9	13:50	9.4	7:20	6.9	0.0	0.0	45.2	78.9	6:00	N
30	11.4	14.0	14:00	8.9	21:20	6.9	0.0	0.0	31.1	66.0	0:10	N
	16.6	26.3	6	8.7	28	74.5	23.6	11.2	28.1	80.5	26	N

## Τιμές Οκτωβρίου 2011

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
1	9.4	11.0	14:50	7.9	3:50	8.9	0.0	0.0	37.2	77.2	8:30	N
2	10.7	13.1	16:20	9.4	6:50	7.6	0.0	0.0	25.4	66.0	2:10	N
3	11.6	14.6	13:20	9.9	22:00	6.7	0.0	0.0	31.9	67.6	9:50	N
4	11.2	14.5	16:20	9.2	8:10	7.1	0.0	0.0	30.7	70.8	4:50	NNE
5	12.2	15.9	14:40	10.3	3:40	6.1	0.0	0.0	20.6	53.1	7:40	NNE
6	14.0	18.8	15:10	10.9	1:40	4.3	0.0	0.0	15.9	41.8	0:20	SSE
7	14.3	17.8	12:50	11.9	0:10	4.1	0.0	0.0	15.3	38.6	21:10	WSW
8	13.1	16.9	13:50	11.1	5:00	5.2	0.0	0.4	22.7	69.2	19:20	S
9	11.1	14.7	13:40	8.7	19:30	7.3	0.0	6.8	24.9	74.0	1:00	SW
10	5.5	9.3	1:50	3.7	22:40	12.8	0.0	58.0	32.5	80.5	21:50	NW
11	4.4	5.5	23:30	3.7	6:30	13.9	0.0	18.6	43.9	85.3	3:10	NW
12	8.3	11.4	17:50	5.0	1:40	10.0	0.0	0.2	23.3	61.2	10:20	NW
13	12.8	17.7	15:40	10.6	1:40	5.5	0.0	0.0	10.9	48.3	1:30	NNW
14	10.1	13.4	3:50	8.2	00:00	8.2	0.0	1.8	31.2	59.5	19:30	NNE
15	7.2	8.2	0:10	5.6	22:20	11.2	0.0	10.6	36.9	69.2	16:10	NNE
16	3.3	5.9	0:40	0.2	00:00	15.1	0.0	35.8	42.3	83.7	23:50	NNE
17	-0.3	0.4	0:50	-1.2	9:30	18.6	0.0	3.0	35.2	85.3	0:10	N
18	3.4	7.6	17:20	0.1	0:20	14.9	0.0	1.2	20.1	48.3	1:30	NNW
19	8.3	12.6	16:00	3.9	1:40	10.1	0.0	0.0	10.5	29.0	20:50	WSW
20	11.3	14.6	13:30	9.0	19:30	7.1	0.0	0.0	5.3	17.7	12:10	SSE
21	11.5	14.8	11:30	9.5	19:00	6.8	0.0	0.0	9.0	22.5	20:50	SSE
22	11.2	15.1	12:40	8.1	00:00	7.2	0.0	0.0	12.7	40.2	18:30	N
23	6.9	8.9	1:50	5.5	23:10	11.4	0.0	0.0	38.6	56.3	7:20	N
24	6.4	8.6	15:10	5.4	7:40	11.9	0.0	0.0	37.2	62.8	3:10	N
25	6.3	8.1	14:20	5.4	21:10	12.1	0.0	0.4	39.8	69.2	10:20	NNE
26	5.5	6.9	14:10	4.3	23:50	12.8	0.0	0.8	48.8	98.2	20:40	N
27	3.7	5.1	13:30	2.5	8:10	14.6	0.0	0.8	58.7	98.2	2:40	N
28	3.9	5.8	14:10	2.9	4:50	14.4	0.0	0.8	52.8	83.7	3:00	NNW
29	3.6	4.7	13:10	2.8	19:20	14.8	0.0	0.8	59.4	86.9	6:00	N
30	3.3	4.2	11:30	2.3	23:50	15.1	0.0	0.0	51.7	82.1	1:40	N
31	3.6	6.9	11:20	2.0	5:50	14.7	0.0	0.0	23.7	77.2	2:30	N
	8.0	18.8	6	-1.2	17	320.6	0.0	139.9	30.6	98.2	26	N

**Τιμές Νοεμβρίου 2011**

DAY	MEAN		TIME	LOW	TIME	HEAT	COOL	RAIN	AVG		TIME	DOM
	TEMP	HIGH				DEG	DEG		WIND	HIGH		DIR
1	5.2	9.6	13:40	2.2	7:00	13.2	0.0	0.0	7.6	29.0	20:10	NNW
2	4.3	6.4	1:10	2.5	5:50	14.1	0.0	0.0	35.4	72.4	23:10	N
3	3.6	4.9	13:20	2.6	7:30	14.8	0.0	0.4	43.1	77.2	5:30	N
4	3.9	6.1	00:00	2.4	2:50	14.4	0.0	0.0	33.6	54.7	1:50	N
5	8.4	11.4	11:30	3.1	5:10	9.9	0.0	0.0	11.1	40.2	2:20	ENE
6	11.1	12.6	13:40	9.2	17:00	7.3	0.0	0.0	5.6	16.1	1:30	ENE
7	11.1	14.2	10:30	8.2	23:30	7.2	0.0	0.0	5.1	25.7	6:00	NE
8	11.0	13.1	9:10	8.2	0:10	7.3	0.0	0.0	4.3	20.9	3:40	NNE
9	12.8	15.1	13:50	10.8	6:10	5.6	0.0	0.0	10.5	40.2	18:50	NNE
10	11.2	15.6	10:40	6.8	23:00	7.1	0.0	0.0	10.5	41.8	23:00	N
11	4.3	7.3	0:10	0.9	23:50	14.1	0.0	3.6	47.3	98.2	23:50	NNE
12	-0.7	1.0	0:10	-1.6	10:50	19.0	0.0	1.8	43.5	101.4	3:30	NNE
13	-0.8	-0.4	15:50	-1.6	0:10	19.2	0.0	0.4	43.0	91.7	17:30	N
14	-0.4	-0.1	19:20	-0.8	6:10	18.7	0.0	0.2	37.7	98.2	21:10	N
15	-0.3	-0.1	0:10	-0.6	7:20	18.7	0.0	15.6	0.0	1.6	10:30	W
16	-0.6	-0.1	12:30	-1.4	21:40	18.9	0.0	5.0	11.9	66.0	00:00	NNW
17	-0.4	0.2	8:40	-1.3	0:10	18.7	0.0	3.8	31.2	67.6	0:30	N
18	-0.6	-0.1	14:30	-1.1	2:30	18.9	0.0	0.0	40.9	72.4	17:00	N
19	3.9	7.1	13:50	-0.6	0:10	14.4	0.0	0.0	25.3	62.8	0:20	N
20	5.5	7.8	12:40	3.4	22:10	12.8	0.0	0.0	15.6	40.2	0:10	NNW
21	3.6	6.3	12:10	1.3	6:30	14.7	0.0	0.0	7.9	35.4	2:20	NNW
22	4.3	7.1	22:30	1.8	3:10	14.1	0.0	0.0	7.2	20.9	17:30	NW
23	5.2	8.3	12:00	2.6	6:40	13.2	0.0	0.0	10.6	43.5	23:20	N
24	1.9	5.0	0:40	0.8	23:40	16.4	0.0	0.0	48.8	72.4	11:40	N
25	0.1	1.2	3:20	-1.2	21:20	18.3	0.0	0.0	48.6	82.1	6:50	N
26	0.2	1.6	12:40	-0.9	2:20	18.2	0.0	0.0	33.2	75.6	23:30	N
27	1.6	4.2	23:20	-0.2	0:50	16.8	0.0	0.0	42.8	77.2	5:20	N
28	6.9	10.3	13:40	2.9	1:00	11.4	0.0	0.0	24.0	57.9	7:20	N
29	5.4	9.3	0:40	2.6	21:30	12.9	0.0	0.0	46.2	74.0	12:00	N
30	5.8	10.4	13:50	2.0	2:40	12.5	0.0	0.0	27.5	54.7	2:30	N
	4.2	15.6	10	-1.6	12	422.8	0.0	30.8	25.3	101.4	12	N

**Τιμές Δεκεμβρίου 2011**

DAY	MEAN TEMP	HIGH	TIME	LOW	TIME	HEAT DEG DAYS	COOL DEG DAYS	RAIN	AVG WIND SPEED	HIGH	TIME	DOM DIR
1	8.0	12.4	11:30	6.0	0:20	10.3	0.0	0.0	17.7	38.6	0:10	NNW
2	8.8	12.0	11:40	7.3	4:00	9.5	0.0	0.0	13.4	35.4	3:00	N
3	7.1	9.7	13:20	3.5	21:50	11.2	0.0	0.0	13.4	27.4	18:10	WNW
4	6.7	10.1	11:10	3.8	2:40	11.7	0.0	0.0	20.0	41.8	17:10	N
5	6.9	9.4	13:40	5.3	7:00	11.4	0.0	0.0	22.2	49.9	2:30	SW
6	6.8	8.4	13:30	6.0	6:30	11.5	0.0	0.0	27.0	57.9	16:50	N
7	5.5	8.9	10:50	1.9	00:00	12.8	0.0	5.0	30.3	91.7	20:40	N
8	3.6	7.3	13:20	0.5	00:00	14.8	0.0	0.2	31.1	77.2	21:50	NW
9	1.6	5.8	14:10	-1.6	7:20	16.7	0.0	0.0	20.3	77.2	0:10	NW
10	6.4	10.6	11:40	1.9	0:30	11.9	0.0	0.0	13.0	43.5	00:00	WNW
11	7.9	10.5	13:50	6.2	2:20	10.4	0.0	0.0	26.4	48.3	0:30	W
12	8.3	11.1	14:40	6.8	00:00	10.0	0.0	0.0	15.0	30.6	2:40	SW
13	7.1	9.3	14:10	5.8	23:40	11.3	0.0	0.0	14.6	35.4	10:20	N
14	7.1	10.0	14:10	5.8	1:20	11.2	0.0	0.0	12.7	40.2	19:50	NW
15	6.6	8.8	13:00	4.9	3:40	11.8	0.0	0.0	24.8	57.9	21:00	N
16	6.1	7.5	21:30	4.2	8:00	12.3	0.0	4.0	28.8	85.3	8:00	N
17	6.4	8.8	14:30	4.5	3:20	11.9	0.0	2.6	36.9	77.2	12:00	N
18	4.9	6.4	12:30	2.9	19:10	13.4	0.0	0.4	17.7	56.3	2:00	W
19	5.3	6.7	12:20	3.1	00:00	13.1	0.0	30.8	26.7	82.1	15:40	N
20	1.9	3.9	12:30	-0.8	23:10	16.4	0.0	0.2	29.8	69.2	14:10	SSW
21	1.7	4.8	23:40	-0.8	1:10	16.7	0.0	11.6	27.8	72.4	0:30	W
22	2.3	5.4	2:50	-2.3	23:40	16.0	0.0	21.6	33.2	99.8	7:00	N
23	-1.7	-0.1	12:30	-3.4	7:20	20.0	0.0	30.0	12.9	54.7	2:40	NNW
24	-1.8	-0.3	12:20	-2.9	2:40	20.2	0.0	2.2	3.9	41.8	22:00	NW
25	-2.7	-1.8	0:10	-4.6	00:00	21.1	0.0	0.4	5.1	30.6	0:10	NNE
26	-3.3	-2.3	13:40	-4.5	0:10	21.7	0.0	0.0	23.3	49.9	14:00	N
27	-2.1	-1.1	12:40	-3.2	0:10	20.4	0.0	0.0	15.8	43.5	20:50	W
28	-0.9	0.1	14:20	-2.0	21:30	19.3	0.0	1.4	12.2	41.8	16:00	NNW
29	-0.7	1.0	14:40	-2.3	1:10	19.0	0.0	0.0	6.1	19.3	0:40	WSW
30	1.6	2.8	21:50	0.2	0:10	16.7	0.0	3.8	12.9	43.5	21:00	SSW
31	1.0	3.4	11:30	-1.2	00:00	17.3	0.0	1.6	21.4	64.4	18:10	NNW
	3.8	12.4	1	-4.6	25	452.1	0.0	115.8	19.9	99.8	22	N

# Παράρτημα 3

---

*Νομοθεσία ΑΠΕ*

---

## Η ενεργειακή πολιτική στη χώρα μας

Στη χώρα μας, τα προγράμματα ανάπτυξης των ΑΠΕ υποστηρίζονται και προωθούνται από πλευράς επίσημης πολιτείας, από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), που είναι ερευνητικός φορέας εποπτευόμενος από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) του Υπουργείου Ανάπτυξης, τα Περιφερειακά Ενεργειακά Γραφεία, τη ΔΕΗ, τα Ιδρύματα Τεχνολογίας και Ευρευνας, τα Πανεπιστήμια, τα Τεχνολογικά Εκπαιδευτικά Ιδρύματα (ΤΕΙ), την Τοπική Αυτοδιοίκηση κ.α.

Εκτός αυτών, έντονη είναι ήδη η δραστηριότητα του ιδιωτικού τομέα, σ' όλο το φάσμα των εφαρμογών των ΑΠΕ. Η ανάπτυξη τους ενισχύεται από σχετικά προγράμματα της ΕΕ, η οποία επιχορηγεί όχι μόνο την έρευνα (τόρα πια σε μικρότερο βαθμό) αλλά στηρίζει, ιδιαίτερα το τελευταίο διάστημα, εφαρμογές μεγάλης ισχύος, σε βιομηχανικές μονάδες, ξενοδοχεία κ.α. Σημαντικό βήμα προώθησης των ΑΠΕ στη χώρα μας, μέσα στην τελευταία δεκαετία, αποτέλεσε η χάραξη πιο συγκεκριμένης ενεργειακής πολιτικής και η θεσμοθέτηση νομοθετικού πλαισίου εγκατάστασης και αξιοποίησης τους.

Η ανάπτυξη των ΑΠΕ και κυρίως της αιολικής και της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας, προωθείται και ενισχύεται, με ισχυρά κίνητρα και υψηλούς ρυθμούς, σ' όλο τον αναπτυγμένο κόσμο. Η αιτία είναι τα συσσωρευμένα οικολογικά προβλήματα που δημιούργησε η αλόγιστη χρήση, αφενός των συμβατικών καυσίμων (ρύπανση περιβάλλοντος), αφετέρου της πυρηνικής ενέργειας (πυρηνικά ατυχήματα). Η κύρια δυσκολία που αντιμετωπίζουν σήμερα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προκειμένου να ενσωματωθούν στην καθημερινή ζωή, είναι το σχετικά υψηλό κόστος της παραγόμενης kWh τους, σε σχέση με το κόστος της kWh του πετρελαίου. Μεταξύ των δύο κύριων τρόπων παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας, αιολικής και φωτοβολταϊκής, η αιολική εμφανίζεται σήμερα οικονομικότερη και άρα περισσότερο προσιτή, κυρίως με τη μορφή αιολικών πάρκων, συνδεδεμένων στο δίκτυο της ΔΕΗ.

### Πρόσφατο θεσμικό πλαίσιο

Τον Ιούνιο του 2006 ψηφίστηκε νέος νόμος για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, (ν. 3468/06), με ιδιαίτερος ευνοϊκά κίνητρα σε ιδιώτες, αλλά κυρίως σε επιχειρήσεις που σκοπεύουν να επενδύσουν στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας. Τα βασικά σημεία – κίνητρα του νέου νόμου είναι :

- Επιδoteίται η αρχική εγκατάσταση σε ποσοστό από 30% έως 55% της αξίας του συστήματος, ενώ επιδοτούμενο είναι και το επιτόκιο σε περίπτωση δανεισμού (Αναπτυξιακός νόμος 3299/04).
- Η τιμή πώλησης της ηλιακής κιλοβατώρας είναι 0,40 – 0,50 ευρώ, ανάλογα με την ισχύ του φωτοβολταϊκού συστήματος και τον τόπο εγκατάστασης. Η τιμή είναι μεγαλύτερη στα νησιά και μικρότερη στην ηπειρωτική χώρα.

- Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων θα μπορεί να πωλείται στη ΔΕΗ εγγυημένα για μία 20ετία, σε τιμή η οποία θα αναπροσαρμόζεται με βάση τον πληθωρισμό ή τις αυξήσεις των τιμολογίων της ΔΕΗ.
- Η σύμβαση πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στη ΔΕΗ ισχύει για 10 έτη και μπορεί να παρατείνεται για επιπλέον 10, μονομερώς, με έγγραφη δήλωση του παραγωγού.

Τον Ιανουάριο του 2009 ψηφίστηκε ο νόμος 3734/2009, όπου κυρίως τροποποιούνται άρθρα του προηγούμενου νόμου και ρυθμίζονται θέματα αδειοδότησης και τιμολόγησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς. Η σύμβαση εγγυημένης πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας συνάπτεται για είκοσι (20) έτη, με τιμή αναφοράς από σχετικό πίνακα σταδιακά αποκλιμακούμενης τιμής της κιλοβατώρας μέχρι το 2014, που αντιστοιχεί στο μήνα και το έτος υπογραφής της σύμβασης. Δίδεται, επίσης η δυνατότητα, μετά από κοινή υπουργική απόφαση (ΚΥΑ), εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σε κτίρια, με λογιστικό συμψηφισμό της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς το δίκτυο και της καταναλισκόμενης απ' αυτό (Δύο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας).

Επίσης, μέσα στο 2010 ενισχύθηκε το θεσμικό πλαίσιο των ΑΠΕ με τον επόμενο νόμο και σχετικές ΚΥΑ:

- Νόμος 3851/2010 ΦΕΚ 85 Α' /4-6-2010. Επιτάχυνση της ανάπτυξης των ΑΠΕ για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας ΥΠΕΚΑ. Με το νόμο αυτό απλοποιούνται δραστικά οι διαδικασίες αδειοδότησης. Οι προτάσεις αδειοδότησης υποβάλλονται στη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), η οποία είναι ανεξάρτητη διοικητική αρχή. Η ΡΑΕ πλέον, εκτός των γνωμοδοτικών και εισηγητικών αρμοδιοτήτων της, έχει και την αρμοδιότητα έκδοσης των αποφάσεων αδειοδότησης έργων ΑΠΕ.
- ΚΥΑ 1079/4-6-2009. Ειδικό πρόγραμμα ανάπτυξης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτιριακές εγκαταστάσεις και ιδίως σε δώματα και στέγες.
- ΚΥΑ 1557/22-9-2010. Συμπλήρωση του ειδικού προγράμματος ανάπτυξης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτιριακές εγκαταστάσεις.

Για τη περίπτωση των φωτοβολταϊκών στα δώματα και στις στέγες, συνοπτικά, ισχύουν τα επόμενα:

- Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών έως 10 kW<sub>p</sub>, στο δώμα ή στη στέγη (συμπεριλαμβανομένων των στεγάστρων βεραντών, βοηθητικών χώρων και χώρων στάθμευσης) κτιρίου, που χρησιμοποιείται για κατοικία ή στέγαση πολύ μικρών επιχειρήσεων (Ηπειρωτική χώρα, διασυνδεδεμένα νησιά και Κρήτη). Στα υπόλοιπα μη διασυνδεδεμένα νησιά, μέχρι 5 kW<sub>p</sub>.
- Εγγυημένη τιμή πώλησης 55 λεπτά/kWh, για 25 έτη (η τιμή αυτή ισχύει για εγκαταστάσεις μέχρι 31/12/2011).



- Αρκεί η υποβολή έγγραφης γνωστοποίησης στην πολεοδομία για εκτέλεση εργασιών και μελέτη εγκατάστασης.

## Βιβλιογραφία

- [1] «Εναλλακτικές Μορφές Ενέργειας», Β. Μπιτζιώνης, εκδόσεις Τζιόλα, 2011.
- [2] «Σύγχρονες Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις», Β. Μπιτζιώνης, εκδόσεις Τζιόλα, 2008.
- [3] «Ανεμοκινητήρες», Γ. Μπεργελές, εκδόσεις Συμεών, 2005.
- [4] «Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Ι. Φραγκιαδάκης, εκδόσεις Ζήτη, 2007.
- [5] «Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία», Κ. Καγκαράκη, εκδόσεις Συμμετρία, 1992.
- [6] «Ήπιες Μορφές Ενέργειας Ι», Θωμάς Ζαχαρίας, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2006.
- [7] «Ήπιες Μορφές Ενέργειας ΙΙ», Θωμάς Ζαχαρίας, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2007.
- [8] «Φυσική των φ/β στοιχείων», Βασιλική Περράκη, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2008.
- [9] «Νέες τεχνολογίες των φ/β στοιχείων», Βασιλική Περράκη, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2008.
- [10] «Ένας πρακτικός οδηγός για τα φωτοβολταϊκά», Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών.
- [11] «Σύγχρονες εξελίξεις σε φ/β συστήματα για διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας», Ι. Κομπούγιας, Α. Κυρίτσης, Α. Νανάκος, Ε. Τατάκης.
- [12] «Μετατροπή της Ηλιακής Ενέργειας σε Ηλεκτρική με Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Νεοκλέους-Κωνσταντινίδη, Ίων, 1991.
- [13] «Μετατροπή της Ηλιακής Ενέργειας σε Ηλεκτρική με Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Νεοκλέους-Κωνσταντινίδη, Ίων, 1991.
- [14] «Επενδύσεις Φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα», Α. Ζαχαρίου, ΤΕΕ, 2010.
- [15] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997.
- [16] Σταύρος Παπαθανασίου, “Ανανεώσιμες Πηγές ενέργειας”, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008.
- [17] Στέφανος Μανιάς, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, 6η έκδοση, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2007.
- [18] Μ. Ντρέκο, Χ. Πάτσιος, Α. Χανιώτης, Α. Κλαδάς “Ανάλυση Λειτουργίας και έλεγχος Συστήματος Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών Διασυνδεδεμένης στο Δίκτυο” Ελληνική επιτροπή CIGRE, σύνοδος Αθήνα 2009.
- [19] P.C. Krause, “Analysis of Electric Machinery”, McGraw-Hill, 1986.

- [20] Chee-Mun Ong, “Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab/Simulink”, Prentice Hall PTR, 1998.
- [21] V. Akhmatov, “Analysis of Dynamic Behavior of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power”, PhD Thesis, Technical University of Denmark, April 2003.
- [22] J.G. Slootweg, “Wind Power – Modeling and Impact on Power System Dynamics”, PhD Thesis, Delft, October 2003.
- [23] M. R. Patel, “Wind and Solar Power Systems”, CRC Press, 1999.
- [24] P. M. Anderson, “Analysis of Faulted Power Systems”, IEEE Press, Power Systems Engineering Series, 1995.
- [25] T. Petru and T. Thiringer, “Modelling of Wind Turbines for Power System Studies”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.17, No.4, November 2002.
- [26] M. Papadopoulos, P. Malatestas, N. Hatziaargyriou, “Simulation and analysis of small and medium size power systems containing wind turbines”, IEEE Trans on Power Systems, vol. 6, pp. 1453 -1458 Nov. 1991.
- [27] “Power Quality Improvements of Wind Farms”, Fredericia, June 1998.
- [28] L.L. Freris, “Wind Energy Conversion Systems”, Prentice Hall, 1990.
- [29] S. Heier, “Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems”, John Willey & Sons, 1998.
- [30] Papathanassiou S.A., Papadopoulos, M.P., “Dynamic behaviour of variable speed wind turbines under stochastic wind”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.: 14, issue: 4 , pages: 1617 -1623, Dec. 1999.
- [31] European Wind Energy Conference, “Proceeding of the International Conference held at Dublin Castle”, Ireland, October 1997.
- [32] “Wind Energy for the Next Millenium”, Proceedings of the European Wind Energy Conference, Nice, France, 1-5 March 1999.
- [33] T. Ackermann, “Wind Power in Power Systems”. John Wiley & Sons,Ltd., 2005.
- [34] H. Slootweg, E. de Vries, “Fixed vs. Variable”, Renewable Energy World, January-February 2003.
- [35] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H.Bindner, P.Sørensen, B. Bak-Jensen, “Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines”, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, December 2001.
- [36] J. G. Slootweg; H. Polinder; W. L. Kling, “Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no.4, pp. 516–524, 2003.
- [37] Siegfried Heier, “Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems”, 2nd ed., John Wiley & Sons, England, 2006.

- [38] V. Valtchev, A. Bossche, J. Ghijselen, and J. Melkebeek, "Autonomous renewable energy conversion system," *Renew. Energy*, vol. 19, no. 1, pp. 259–275, Jan. 2000.
- [39] S. Kim, and E. Kim, "PSCAD/EMTDC – Based modeling and analysis of a gearless variable speed wind turbine", *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 22, no. 2, pp. 421-430, June 2007.
- [40] N. Yamamura, M. Ishida, and T. Hori, "A simple wind power generating system with permanent magnet type synchronous generator", *IEEE International Conf. on Power Electronics and Drive Systems, PEDS '99*, Hong Kong , July 1999.
- [41] C. Patsios, A. Chaniotis, A. Kladas, "A hybrid maximum power point tracking system for grid-connected variable speed wind-generators" *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE 15-19*, June 2008, p.p. 1749 – 1754.
- [42] Justin Wilkes, Jacopo Moccia, "Wind in power : 2009 European statistics", *The European energy association*, February 2010.
- [43] Othman B.k Hasnaoui, Jamel Belhadj, Mohamed Elleuch, "Direct Drive PMSG Wind Turbine investigation-Low Voltage Ride Through capability Dynamic behavior in presence of grid disturbance", *Journal of Electrical Systems*, August 2008.
- [44] Md. Wasi Uddin, Md. Yiasin Sumon, Rajib Goswami, Md. Rahimul Hasan Asif , K. M. Rahman "Sensorless peak power point tracking system for small scale wind turbine generators", *1<sup>st</sup> International Conference on the Developments in Renewable Energy echnology (ICDRET)*, December 2009.
- [45] Liang Ma, Wang Ran, Trillion Q. Z "Modeling and Control of three-phase Grid-connected Photovoltaic Inverter" *8th IEEE International Conference on control and Automation*, Xiamen, China, June 2010.
- [46] «Σχεδίαση αυτόνομου υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος», *Διπλωματική Εργασία της Μαρκάτου Μαρίας*, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2011.
- [47] «Τεχνικό – οικονομική διερεύνηση φωτοβολταϊκών για οικιακή χρήση», *Διπλωματική Εργασία του Δημητρίου Γ. Παναγόπουλου*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.
- [48] «Παραμετρική Μελέτη Μηδενισμού Σκίασης Ηλιακών Συλλεκτών-Κώδικας-Εφαρμογές», *διπλωματική εργασία του Σταμάτιου Καλάκιου*, Εθνικό Μετσόβιο Πλυτεχνείο,2010.
- [49] «Διαχείριση Δεδομένων Μέτρησης της Ηλιακής Ακτινοβολίας», *διπλωματική εργασία του Παναγιώτη Κεραμιτζή*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010.
- [50] «Τεχνοοικονομική Μελέτη και Σύγκριση Υβριδικών Συστημάτων. Εφαρμογή σε Αυτόνομη Κατοικία», *διπλωματική εργασία των Δ. Σαραφianού και Μ. Σειραγάκη*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2009.

- [51] «Σχεδιασμός Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος για την Τροφοδότηση Αγροικίας», διπλωματική εργασία της Φ. Μπουγιούκου, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010.
- [52] Σ. Α. Παπαθανασίου, “Συμβολή στην Ανάλυση Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για την επιλογή του Ηλεκτρικού Σχήματος”, Διδακτορική Διατριβή, Φεβρουάριος 1997, Αθήνα.
- [53] Φ. Δ. Κανέλλος, “Συμβολή στην Προσομοίωση και Αναγνώριση Ανεμογεννητριών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για τη Δημιουργία Μειωμένης Τάξης Ισοδυνάμων Μοντέλων”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Οκτώβριος 2003.
- [54] Σωτήριος Ι. Νάνου, “Μοντέλο Ανεμογεννήτριας με Πλήρη Μετατροπέα για Μελέτες Ευστάθειας”, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Ιούλιος 2009 .
- [55] Χρήστος Π. Πατσιούρας, “ Τεχνικές Απαιτήσεις Κωδίκων για τη Σύνδεση Μεγάλων Αιολικών Πάρκων στο Σύστημα”, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Σεπτέμβριος 2007.
- [56] Μαρία Σ. Ρώτα, “ Σύγκριση Κλασσικού και Ελέγχου βασισμένου σε Ασαφή λογική Ανεμογεννήτριας Μόνιμων Μαγνητών”, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π. Οκτώβριος 2008.
- [57] [http://www.eooa.gr/?page\\_id=540](http://www.eooa.gr/?page_id=540)
- [58] <http://dasikoxorio.wordpress.com/%CF%84%CE%B9>
- [59] <http://www.timbertrail.gr/sports/oreivatika-katafygia.html>
- [60] <http://www.sportsmag.gr/shelters>
- [61] <http://www.buildings.gr/oreivatein/oreivatein.htm>
- [62] [http://www.proskopismos.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=399&Itemid=74](http://www.proskopismos.com/index.php?option=com_content&task=view&id=399&Itemid=74)
- [63] <http://www.seoreivatou.gr/index.jsp?CMCCode=100601&extLang=>
- [64] <http://www.xwmatinos.gr/xwma/modules.php?name=News&file=article&sid=1277>
- [65] [http://katafygioagrafon.blogspot.com/p/blog-page\\_31.html](http://katafygioagrafon.blogspot.com/p/blog-page_31.html)
- [66] <http://www.pvtech.gr/pvgis.html>
- [67] [http://www.cocoon.gr/photovoltaic-system\\_no6.html](http://www.cocoon.gr/photovoltaic-system_no6.html)
- [68] [http://www.cres.gr/energy-saving/images/pdf/Analytikos\\_pinakas\\_timologiou\\_deh.pdf](http://www.cres.gr/energy-saving/images/pdf/Analytikos_pinakas_timologiou_deh.pdf)
- [69] <http://www.energomixaniki.gr/fvprosdiorismos.php>
- [70] <http://www.gardena.com/gr/water-management/irrigation-pump/classic-pressure-tank-unit-3000-4/>
- [71] <http://www.igsolarpower.com/anemogennitries.htm>
- [72] <http://www.anemogennitria.gr/articles.htm>
- [73] <http://toolserver.org/~geohack/geohack.php?language=el&pagename=%CE>
- [74] [http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/OMADESE\\_RGASIAS/fwtovoltaika\\_ergwn.pdf](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/OMADESE_RGASIAS/fwtovoltaika_ergwn.pdf)

- [75] [http://www.ebooks4greeks.gr/2011.Download\\_free-books/kathighths/Eidikis\\_Hlektrikes\\_Egkatastaseis\\_B\\_Downloaded\\_f\\_eBooks4Greeks.gr.pdf](http://www.ebooks4greeks.gr/2011.Download_free-books/kathighths/Eidikis_Hlektrikes_Egkatastaseis_B_Downloaded_f_eBooks4Greeks.gr.pdf)
- [76] [http://www.greenenergyparts.com/PDFManuals/solar\\_panel.pdf](http://www.greenenergyparts.com/PDFManuals/solar_panel.pdf)
- [77] [http://www.going-green.gr/gi\\_off\\_grid.html](http://www.going-green.gr/gi_off_grid.html)
- [78] <http://ikon.aeromodelling.gr/ninter-073a.htm>
- [79] <http://www.eshops.gr/index.php?act=viewProd&productId=11470>
- [80] [http://www.alexstore.gr/index.php?product\\_id=5872&page=shop.product\\_details&category\\_id=450&flypage=flypage.tpl&option=com\\_virtuemart&Itemid=71](http://www.alexstore.gr/index.php?product_id=5872&page=shop.product_details&category_id=450&flypage=flypage.tpl&option=com_virtuemart&Itemid=71)
- [81] [http://www.solarfree.gr/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=424&category\\_id=134&option=com\\_virtuemart&Itemid=18&vmcchk=1&Itemid=18](http://www.solarfree.gr/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=424&category_id=134&option=com_virtuemart&Itemid=18&vmcchk=1&Itemid=18)
- [82] <http://www.dcapowerinverters.com/itemdesc.asp?ic=ML3500-24>
- [83] [http://www.cres.gr/perch/pdf/guide\\_homeowners\\_greek.pdf](http://www.cres.gr/perch/pdf/guide_homeowners_greek.pdf)
- [84] [http://www.eng.auth.gr/IHT/B%20Tomos/B01%20-%20AIOLOKH%20ENERGEIA/05-Carabelas\\_Daskalakis\\_MEL-EGETAST%20ANW%20MOYLIA.pdf](http://www.eng.auth.gr/IHT/B%20Tomos/B01%20-%20AIOLOKH%20ENERGEIA/05-Carabelas_Daskalakis_MEL-EGETAST%20ANW%20MOYLIA.pdf)
- [85] [http://www.windrose.gr/WindRose\\_Greek\\_Users\\_Guide.pdf](http://www.windrose.gr/WindRose_Greek_Users_Guide.pdf)
- [86] [http://www.hnms.gr/hnms/greek/climatology/climatology\\_region\\_diagrams.html?dr\\_city=Tatoi](http://www.hnms.gr/hnms/greek/climatology/climatology_region_diagrams.html?dr_city=Tatoi)
- [87] <http://aims.cres.gr/grwind150/viewer.htm>
- [88] <http://www.scribd.com/doc/81453529/3/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%>
- [89] <http://www.scribd.com/doc/81453529/3/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%>
- [90] [http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/4762/3/papandreoug\\_windfarm.pdf](http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/4762/3/papandreoug_windfarm.pdf)
- [91] <http://penteli.meteo.gr/stations/parnitha/NOAAPRYR.TXT>
- [92] <http://www.leaderexpo.gr/ENERTECH%20'11%20-%201%20OCTOBER/E%20SESSION/TZEN.pdf>
- [93] [http://wiki.answers.com/Q/Convert\\_kmh\\_to\\_ms](http://wiki.answers.com/Q/Convert_kmh_to_ms)
- [94] <http://aix.meng.auth.gr/lhtee/education/IAxBE8.pdf>
- [95] [ap.physics.auth.gr/pms/upload/PEP\\_wind\\_power\\_12-2010.pdf](http://ap.physics.auth.gr/pms/upload/PEP_wind_power_12-2010.pdf)
- [96] <http://www.ecowatt.gr/images/stories/proionta/air/swt7500dc-td-eng-0608.pdf>
- [97] [http://www.2004ewec.info/files/23\\_1400\\_soenkesiegfriedsen\\_01.pdf](http://www.2004ewec.info/files/23_1400_soenkesiegfriedsen_01.pdf)
- [98] <http://www.hlektronika.gr/index.php?page=theory?powersupplies>
- [99] [http://www.linksa.gr/index.php?option=com\\_content&view=category&id=180:2010-04-23-12-36-06&layout=blog&Itemid=282](http://www.linksa.gr/index.php?option=com_content&view=category&id=180:2010-04-23-12-36-06&layout=blog&Itemid=282)

- [100] <http://www.directindustry.com/prod/siemens-ag/ac-dc-switch-mode-power-supplies-modular-converters-17494-862341.html>
- [101] [http://www.toolhouse.gr/index.php?page=shop.product\\_details&category\\_id=44&flypage=ilvm\\_fly2\\_blue.tpl&product\\_id=2989&option=com\\_virtuemart&Itemid=67&vmcchk=1&Itemid=67](http://www.toolhouse.gr/index.php?page=shop.product_details&category_id=44&flypage=ilvm_fly2_blue.tpl&product_id=2989&option=com_virtuemart&Itemid=67&vmcchk=1&Itemid=67)
- [102] [http://www.e-ergaleio.gr/product\\_info.php?cPath=182&products\\_id=13539](http://www.e-ergaleio.gr/product_info.php?cPath=182&products_id=13539)
- [103] <http://www.mrtool.gr/epaggelmatika-biomichanika/gennitries/gennitria-epaggelmatiki-diesel-dhy6000le-10hp-230v-hyundai-2080.html#>