



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

ΘΕΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

**"Μελέτη και περιγραφή του συστήματος πέδησης
ανεμογεννητριών"**



ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ:

ΕΙΡΗΝΗ ΔΙΑΜΑΝΤΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Δρ. ΜΙΧΑΗΛ ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2018

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/Η κάτωθι υπογεγραμμένος/η Διαμάντη Ειρήνη,
του Κων/νου, με αριθμό μητρώου 43244 φοιτητής / τρια του Τμήματος **Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής**, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε.) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε., ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφαση της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση της Π.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού βμήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.»

Ο Δηλών

Ημερομηνία

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη του συστήματος πέδησης ανεμογεννητριών κάνοντας περιγραφή της δομής, της λειτουργίας και της αποτελεσματικότητας του συστήματος αυτοματισμού που επιβραδύνει ή/και ακινητοποιεί μία ανεμογεννήτρια σε καταστάσεις υψηλής ταχύτητας ανέμων, προς αποφυγή της καταστροφής της ανεμογεννήτριας. Γίνεται περιγραφή των δομοστοιχείων/εξαρτημάτων που αποτελούν το εν λόγω σύστημα μέσα από εικόνες και σχήματα.

Η ανάπτυξη της εργασίας γίνεται σε τρία κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν όλες οι υπάρχουσες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και εισαγωγικές έννοιες για την τεχνολογία εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, τα ενεργειακά χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας και στατιστικά στοιχεία για την υπάρχουσα εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ στην Ελλάδα. Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται θεωρητική ανάλυση της δομής και λειτουργίας της ανεμογεννήτριας ώστε να αποσαφηνιστούν οι επιμέρους λειτουργίες της δίνοντας έμφαση στο σύστημα πέδησης. Τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται, σε θεωρητικό επίπεδο, σύγκριση αποδοτικότητας σε φαινόμενα υψηλών ριπών ανέμου, μεταξύ δύο ανεμογεννητριών (Vestas-Enercon), που κατέχουν ηγετική θέση στον ελλαδικό χώρο.

Abstract

The purpose of this diploma thesis is to study the wind turbine brake system in order to describe the structure, function and efficiency of automation that slows down and / or immobilizes a wind turbine in high-wind conditions in order to prevent the wind turbine being destroyed. A description of the modules / components that make up this system is provided through pictures and figures.

The development work will be done in three chapters. In the first chapter, all existing forms of renewable energy sources as well as introductory concepts for wind energy technology, the energy characteristics of a wind turbine and statistics on the existing installed RES power in Greece will be presented. In the second chapter, a theoretical analysis of the structure and operation of the wind turbine is made in order to clarify its individual functions by emphasizing the braking system. Finally, in the third chapter, there is a theoretical comparison of efficiency in high wind blowing phenomena between two wind turbines (Vestas-Enercon), which have a leading position in Greece.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract.....	2
Περιεχόμενα.....	3
Ευχαριστίες	5
Εισαγωγή	6
1. Αιολική Ενέργεια	7
1.1. Μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	7
1.1.1. 1.1.1. Ηλιακή Ενέργεια	7
1.1.2. 1.1.2. Αιολική Ενέργεια	8
1.1.3. 1.1.4. Υδροηλεκτρική Ενέργεια.....	9
1.1.4. 1.1.5. Βιομάζα.....	10
1.1.5. 1.1.6. Ενέργεια από παλίρροια	11
1.1.6. 1.1.7. Ενέργεια από κύματα.....	11
1.1.7. 1.1.8. Εγκατεστημένη Ισχύς ΑΠΕ στην Ελλάδα	12
1.2. Ιστορική Ανασκόπηση Αιολικής Ενέργειας	20
1.3. Άνεμος	23
1.4. Μέτρηση Αιολικού Δυναμικού	28
1.5. Βασικά Στοιχεία Αεροδυναμικής	33
2. Αιολικά Συστήματα-Δομή & Λειτουργία	38
2.1. Αρχή Λειτουργίας Ανεμογεννητριών	38
2.1.1. Κατηγορίες Ανεμογεννητριών	39
2.1.2. Διάκριση ανεμογεννητριών ανάλογα με τις αρχές λειτουργίας και ελέγχου τους.....	41

2.2. Ενεργειακά Χαρακτηριστικά Ανεμογεννητριών.....	43
2.2.1. Καμπύλη Ισχύος.....	43
2.2.2. Βαθμός Απόδοσης.....	46
2.3. Δομή Ανεμογεννητριών.....	47
2.3.1. Μηχανικό Σύστημα Ανεμογεννητριών	49
2.3.2. Ηλεκτρικό Σύστημα Ανεμογεννητριών.....	62
2.3.3. Σύστημα Ελέγχου.....	65
2.4. Ανάλυση Συστήματος & Διαδικασίας Πέδησης Ανεμογεννητριών.....	66
3. Σύγκριση αποδοτικότητας μεταξύ Vestas-Enercon σε φαινόμενα υψηλών ριπών ανέμου	80
Βιβλιογραφία	90

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση πτυχιακής εργασίας αποτελεί το τελευταίο λιθαράκι για την απόκτηση του ακαδημαϊκού τίτλου σπουδών μου, σε αυτό το στάδιο, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω από καρδιάς τους γονείς μου για την υλική, αλλά πρωτίστως, ηθική υποστήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συναδέλφους για την αμέριστη βοήθειά τους όλα αυτά τα έτη, καθώς επίσης, και όλους τους συναδέλφους από τη πρακτική άσκηση για την άριστη συνεργασία μας και τη πολύτιμη καθοδήγησή τους.

Εισαγωγή

Σήμερα είναι κοινά αποδεκτό ότι η παγκόσμια αλλαγή του κλίματος αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες απειλές για το μέλλον της ανθρωπότητας. Η αλλαγή αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στις εκπομπές των λεγομένων «αερίων του θερμοκηπίου» που συνοδεύουν αναπόφευκτα την παραγωγή ενέργειας από συμβατικά καύσιμα. Θεωρείται, λοιπόν, δεδομένο ότι η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ιδιαίτερα της αιολικής, η οποία αποτελεί τον ταχύτερα αναπτυσσόμενο βιώσιμο ενεργειακό πόρο, είναι η μοναδική –μη πυρηνική– μεσοπρόθεσμη λύση για την αντιμετώπιση του φαινομένου των κλιματικών αλλαγών.

Με την παρούσα πτυχιακή εργασία αποσκοπείται, μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης, η διερεύνηση των δυνατοτήτων αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες, εμβαθύνοντας στο σύστημα πέδησης.

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται όλες οι υπάρχουσες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και εισαγωγικές έννοιες για την τεχνολογία εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, τα ενεργειακά χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας και στατιστικά στοιχεία για την υπάρχουσα εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ στην Ελλάδα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται θεωρητική ανάλυση της δομής και λειτουργίας της ανεμογεννήτριας ώστε να αποσαφηνιστούν οι επιμέρους λειτουργίες της δίνοντας έμφαση στο σύστημα πέδησης.

Τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται σε θεωρητικό επίπεδο, σύγκριση αποδοτικότητας σε φαινόμενα υψηλών ριπών ανέμου, μεταξύ δύο ανεμογεννητριών (Vestas-Enercon), που κατέχουν ηγετική θέση στον ελλαδικό χώρο.

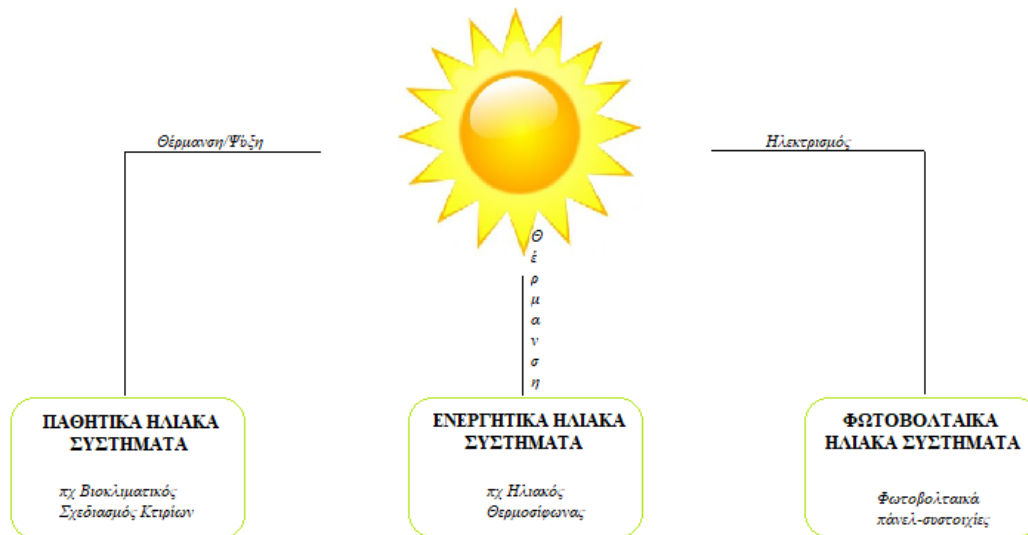
1. Αιολική Ενέργεια

1.1 Μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Συγκεκριμένα σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ως ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές θεωρείται η αιολική, ηλιακή, αεροθερμική, γεωθερμική, υδροθερμική και ενέργεια των ωκεανών, υδροηλεκτρική, από βιομάζα, από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέρια.[1] Αναλυτικότερα:

1.1.1. Ηλιακή Ενέργεια

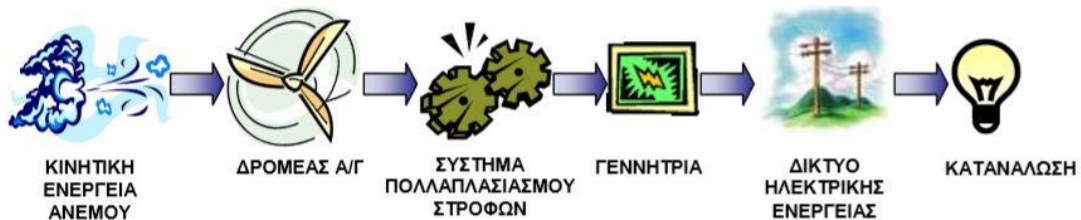
Με το όρο Ηλιακή Ενέργεια χαρακτηρίζουμε το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Το φως και η θερμότητα που ακτινοβολούνται, απορροφούνται από στοιχεία και ενώσεις στη Γη και μετατρέπονται σε άλλες μορφές ενέργειας. Η τεχνολογία σήμερα αξιοποιεί ένα μηδαμινό ποσοστό της καταφθάνουσας στην επιφάνεια του πλανήτη μας ηλιακής ενέργειας με τριών ειδών συστήματα: τα θερμικά ηλιακά, τα παθητικά ηλιακά και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. [2]



Εικόνα 1:Είδη ηλιακών συστημάτων

1.1.2. Αιολική Ενέργεια

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Για την ακρίβεια, έμμεσα δημιουργείται από την ηλιακή ακτινοβολία, και αυτό διότι η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από την μία περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας έτσι τους ανέμους. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται "ήπια μορφή ενέργειας" και περιλαμβάνεται στις "καθαρές" πηγές, όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν εκπέμπουν ή δεν προκαλούν ρύπους. Η εκμετάλλευσή της γίνεται κυρίως με μηχανές που μετατρέπουν την επί της ουσίας κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ή/και σε ηλεκτρική ενέργεια. [3]

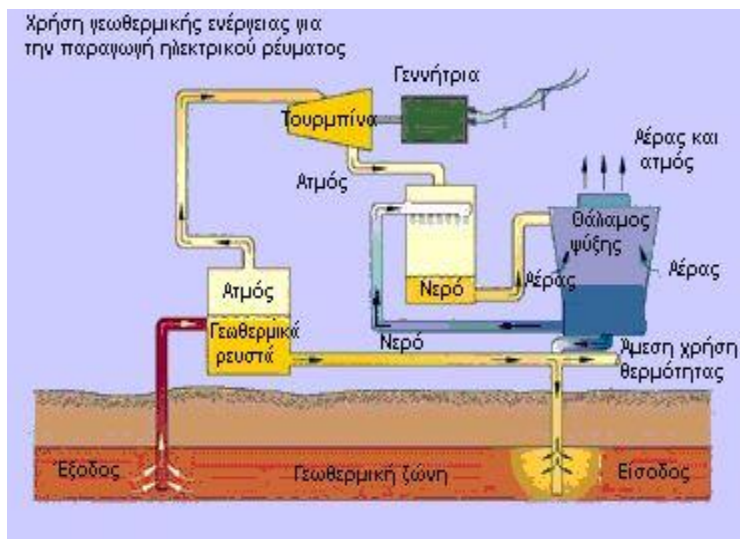


Εικόνα 2: Μετατροπή κινητικής ενέργειας ανέμου

1.1.3. Γεωθερμική Ενέργεια

Γεωθερμία ή γεωθερμική ενέργεια ονομάζουμε τη φυσική θερμική ενέργεια της Γης που διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια. Η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

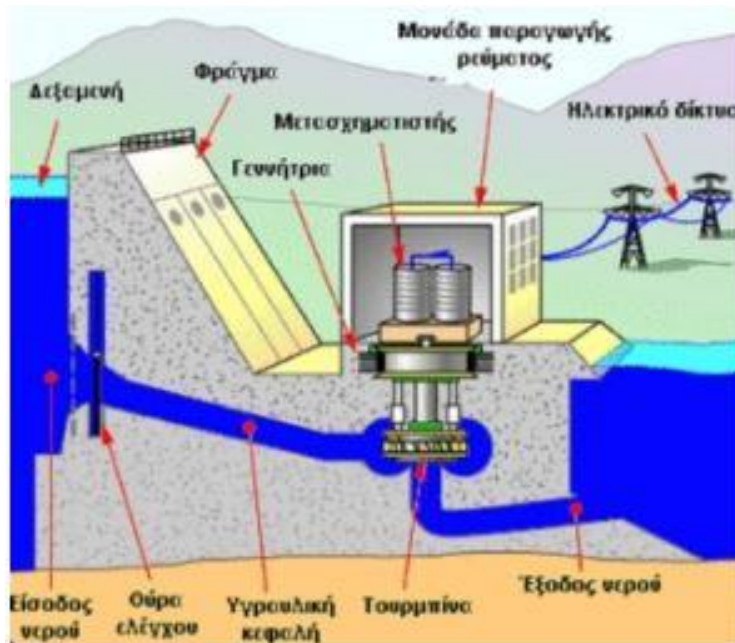
- α) Με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια με ρυθμό $0,04 - 0,06 \text{ W/m}^2$
- β) Με ρεύματα μεταφοράς, που περιορίζονται όμως στις ζώνες κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, λόγω ηφαιστειακών και υδροθερμικών φαινομένων.



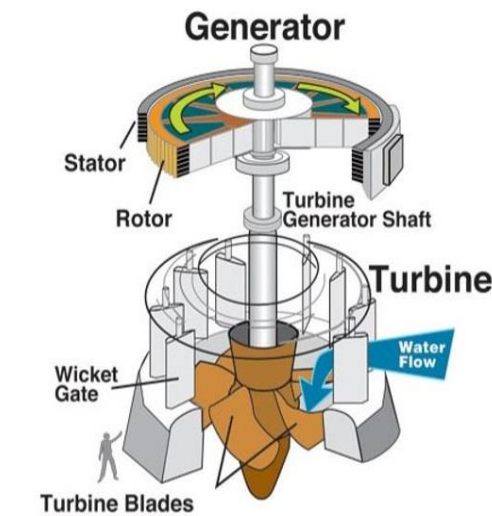
Εικόνα 3: [Πηγή: <http://www.hellenic-college.gr>]

1.1.4. Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η Υδροηλεκτρική Ενέργεια (Υ/Ε) είναι η ενέργεια η οποία στηρίζεται στην εκμετάλλευση και τη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού των λιμνών και της κινητικής ενέργειας του νερού των ποταμών σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της πτερωτής του στροβίλου, έχουμε την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του νερού σε μηχανική ενέργεια με την μορφή περιστροφής του άξονα της πτερωτής και στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνουμε τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το σύνολο των έργων και εξοπλισμού μέσω των οποίων γίνεται η μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική, ονομάζεται Υδροηλεκτρικό Έργο (ΥΗΕ).



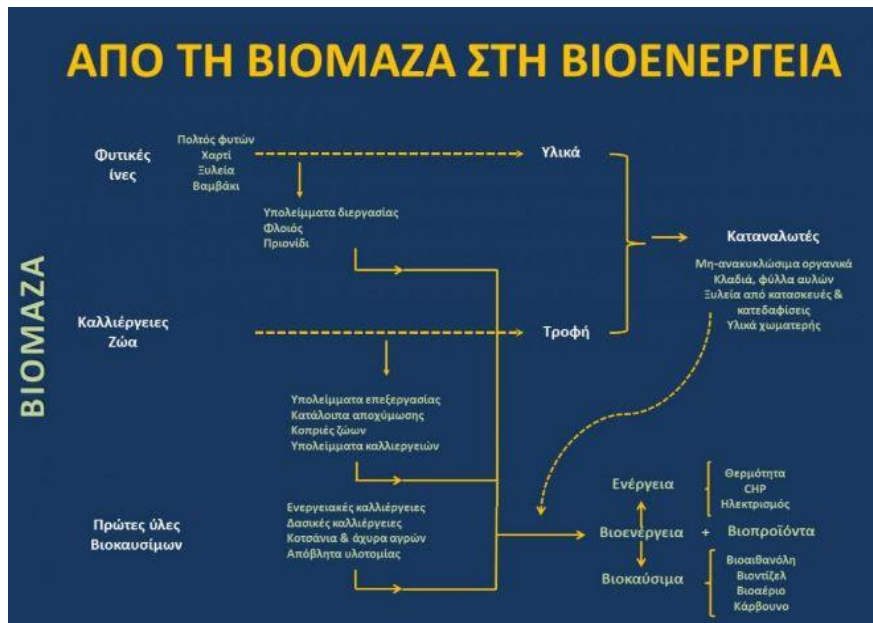
Εικόνα 4: [Πηγή: <http://users.sch.gr>]



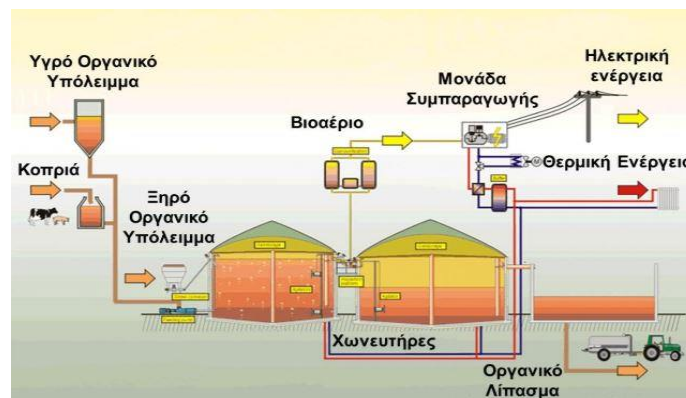
Εικόνα 5: [Πηγή: <https://eclass.uowm.gr>]

1.1.5. Βιομάζα

Με τον όρο βιομάζα αποκαλείται οποιοδήποτε υλικό που παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς (όπως είναι το ξύλο και άλλα προϊόντα του δάσους, υπολείμματα καλλιεργειών, κτηνοτροφικά απόβλητα, απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων κ.λπ.) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας. Η ενέργεια που είναι δεσμευμένη στις φυτικές ουσίες προέρχεται από τον ήλιο. Με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, τα φυτά μετασχηματίζουν την ηλιακή ενέργεια σε βιομάζα. Οι ζωικοί οργανισμοί αυτή την ενέργεια την προσλαμβάνουν με την τροφή τους και αποθηκεύουν ένα μέρος της. Αυτή την ενέργεια αποδίδει τελικά η βιομάζα, μετά την επεξεργασία και τη χρήση της. Είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας γιατί στην πραγματικότητα είναι αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια που δεσμεύτηκε από τα φυτά κατά τη φωτοσύνθεση. Χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικότερα, μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών(θέρμανσης, ψύξης, ηλεκτρισμού κ.λπ.) και ακόμα για την παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων (βιοαιθανόλη, βιοντίζελ, βιοαερίου κ.λπ.). [1], [4]



Εικόνα 6: [Πηγή: <http://www.agroenergy.gr>]

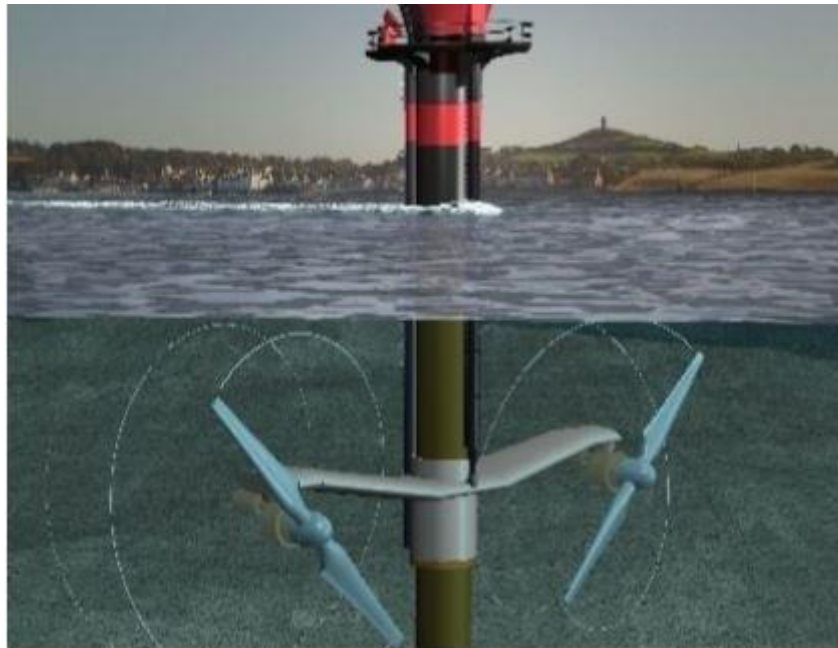


Εικόνα 7: [Πηγή: <https://www.agroenergy.gr>]

1.1.6. Ενέργεια από παλίρροια

Το θαλασσινό νερό καθώς και το νερό των μεγάλων λιμνών βρίσκεται σε χαμηλό υψόμετρο και δεν είναι δυνατό να κινηθεί με ταχύτητα προς χαμηλότερες περιοχές και συνεπώς να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας, όπως περιγράψαμε στην υδροηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, και η θάλασσα κινείται, αφού ανεβαίνει (πλημμυρίς) και κατεβαίνει (άμπωτις) λόγω της παλίρροιας, κυκλοφορεί ως ρεύματα (λόγω της διαφοράς της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του νερού), ή κινείται παλινδρομικά (κύματα).

Τέτοιες κινήσεις της θάλασσας μπορούμε να τις εκμεταλλευτούμε για να περιστρέψουμε τροχούς με πτερύγια προκειμένου να παράγουμε ηλεκτρική ενέργεια. Παλιρροϊκός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής είναι λοιπόν ένας ηλεκτρικός σταθμός που μετατρέπει την ενέργεια των παλιρροιών της θάλασσας σε ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, μπορούμε να επιτύχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκμεταλλευόμενοι τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της επιφάνειας και των βαθύτερων στρωμάτων της θάλασσας.[17]



Εικόνα 8: Ηλεκτρικός σταθμός μετατροπής ενέργειας παλιρροιών

1.1.7. Ενέργεια από κύματα

Τα θαλάσσια κύματα αποτελούν μια ανανεώσιμη και ισχυρή πηγή ενέργειας που ωστόσο δεν είναι εύκολο να χρησιμοποιηθεί για να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλα ποσά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να είναι σπάνιοι.

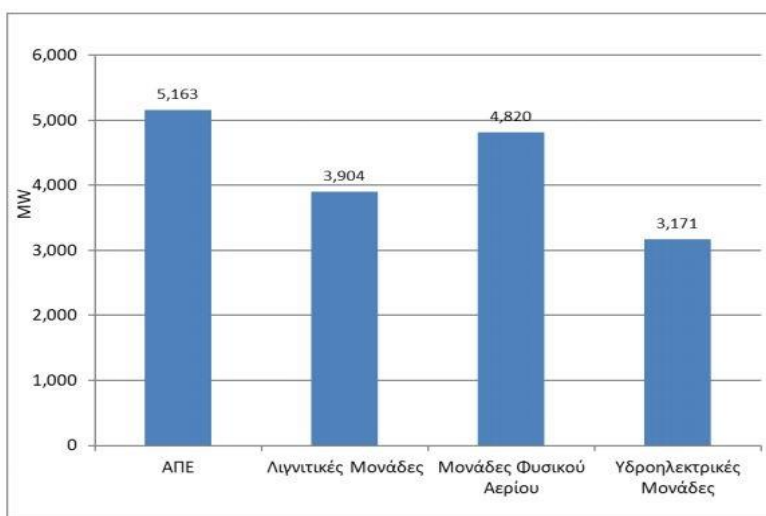
Αντί όμως της χρήσης των θαλάσσιων κυμάτων, υπάρχει μέθοδος παραγωγής ενέργειας από τα κύματα που δημιουργούνται τεχνητά σε πισίνα. Το σύστημα

εκμεταλλεύεται την ταχύτητα του κύματος, το ύψος, το βάθος και τη ροή κάτω από το πλησιάζον κύμα, παράγοντας κατά συνέπεια την ενέργεια αποτελεσματικότερα και φθηνότερα από άλλα θαλάσσια κύματα και τις υπόλοιπες συμβατικές τεχνολογίες.[17]

1.1.8. Εγκατεστημένη Ισχύς ΑΠΕ στην Ελλάδα

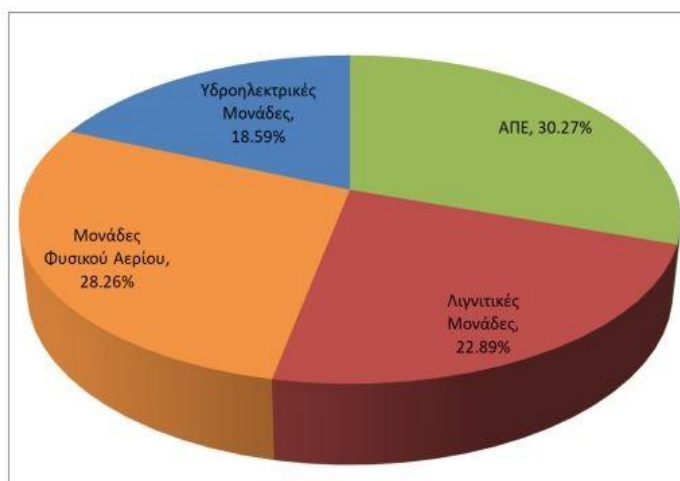
Εγκατεστημένη Ισχύς σταθμού Α.Π.Ε. είναι το άθροισμα της ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος όλων των μονάδων παραγωγής που περιλαμβάνει ο σταθμός Α.Π.Ε.. Ως ονομαστική ισχύς κάθε μονάδας παραγωγής ορίζεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς της μονάδας.

Ας δούμε τώρα τα ποσοτικά στοιχεία του μηνιαίου δελτίου συστήματος συναλλαγών ΗΕΠ, όσον αφορά την συνολική εγκατεστημένη ισχύ, για τον Μάρτιο του 2018 που ανακοίνωσε ο Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΛΑΓΗΕ).



Εγκατεστημένη Ισχύς Μονάδων στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα ανά Καύσιμο

Γράφημα 1 [Πηγή: www.lagie.gr]



Ποσοστό (%) στο Σύνολο της Εγκατεστημένης Ισχύος στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα ανά Καύσιμο

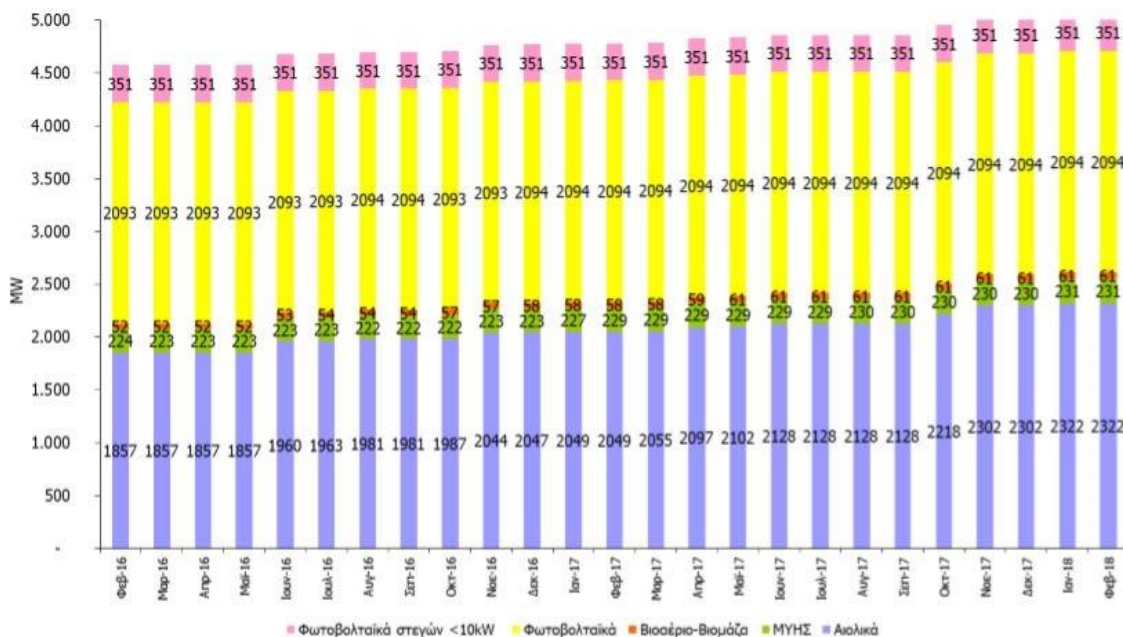
Γράφημα 2 [Πηγή: www.lagie.gr]

Βλέπουμε ότι οι μονάδες ΑΠΕ πρωταγωνιστούν στο διασυνδεδεμένο σύστημα, έστω και με μικρή διαφορά από τον αμέσως επόμενο τύπο καυσίμου, φτάνοντας τα 5.163 MW ισχύος. Ακολουθούν οι μονάδες φυσικού αερίου με 4.820 MW και οι λιγνιτικές με 3.904 MW. Η χαμηλότερη ισχύς αφορά τις υδροηλεκτρικές μονάδες με 3.171 MW.

Ακολουθούν ποσοτικά στοιχεία του συνοπτικού μηνιαίου δελτίου συστήματος συναλλαγών ΑΠΕ του ΛΑΓΗΕ, που αφορούν το μήνα Φεβρουάριο 2018.



2016 – 2018 ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW) ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (Άρθρο 9 Ν.3468/2006) & Φ/Β ΣΤΕΓΩΝ ≤10kW



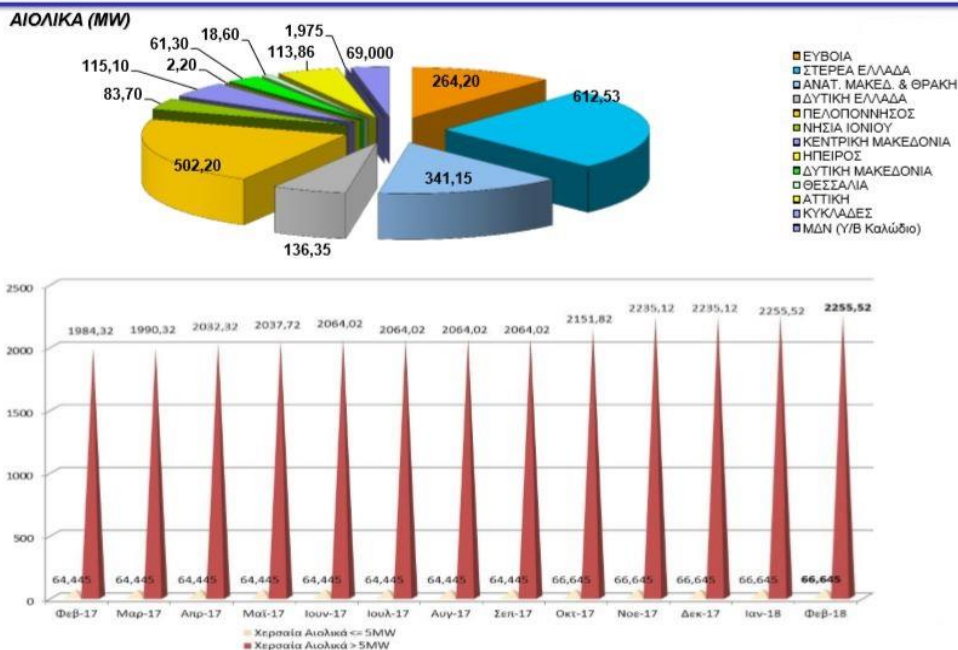
Γράφημα 3 [Πηγή: www.laie.gr]

Παρατηρούμε ότι το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ σε λειτουργία άγγιξε τα 5000 MW.

Αναλυτικότερα:



02_2018 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ & ΕΞΕΛΙΞΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (MW) ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ ΣΤΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (Άρθρο 9 Ν.3468/2006)

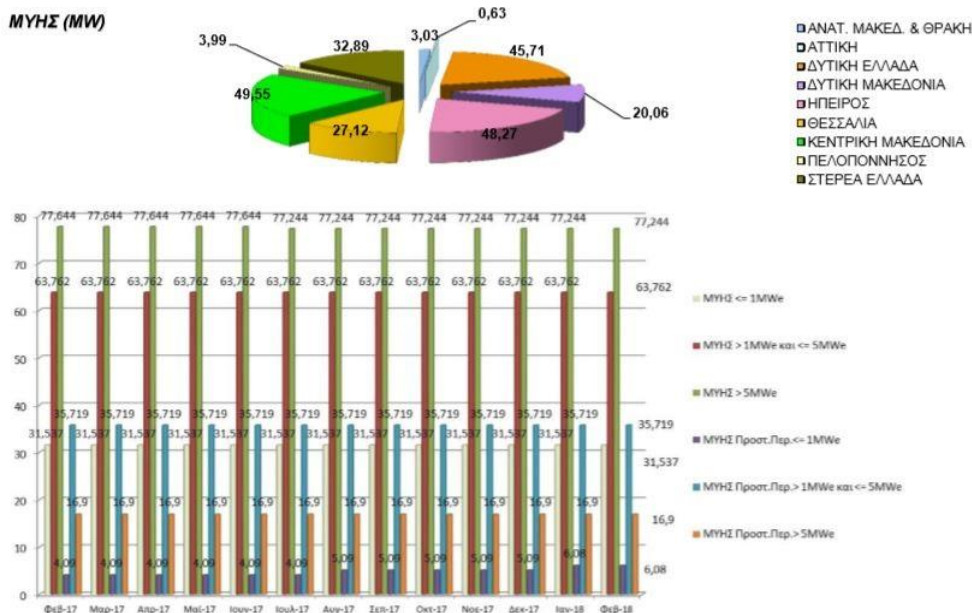


Γράφημα 4 [Πηγή: www.lagie.gr]

Με βάση τη γεωγραφική κατανομή της εγκατεστημένης ισχύος, ανά μορφή ενέργειας, η Στερεά Ελλάδα παίρνει πρωτιά στα αιολικά με 612,53 MW, με την Πελοπόννησο και την Ανατ. Μακεδονία-Θράκη να ακολουθούν.



02_2018 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ & ΕΞΕΛΙΞΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (MW) ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ ΣΤΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (Άρθρο 9 Ν.3468/2006)

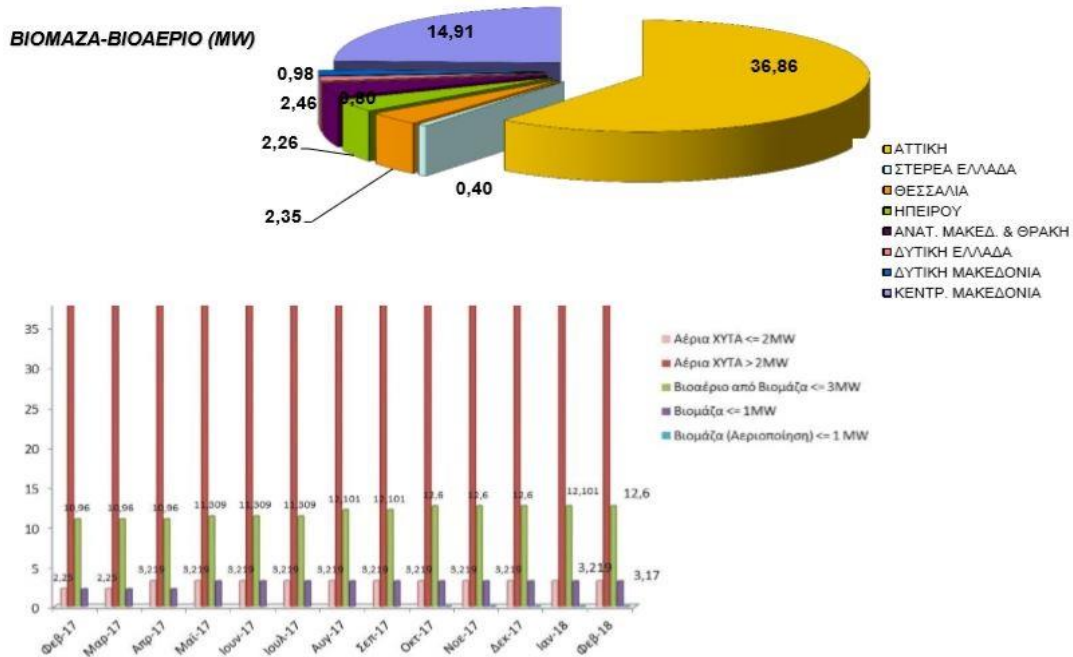


Γράφημα 5 [Πηγή: www.lagie.gr]

Οι πιο ισχυρές Περιφέρειες της χώρας όσον αφορά τα υδροηλεκτρικά είναι η Κεντρική Μακεδονία και η Ήπειρος, οι οποίες αναδεικνύονται σχεδόν ισοδύναμες με 49,55 και 48,23 MW εγκατεστημένης ισχύος αντίστοιχα. Η Δυτική Ελλάδα ακολουθεί παρά πόδας με 45,71 MW και με μεγαλύτερη απόκλιση η Στερεά.



02_2018 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ & ΕΞΕΛΙΞΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (MW) ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ ΣΤΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (Άρθρο 9 Ν.3468/2006)



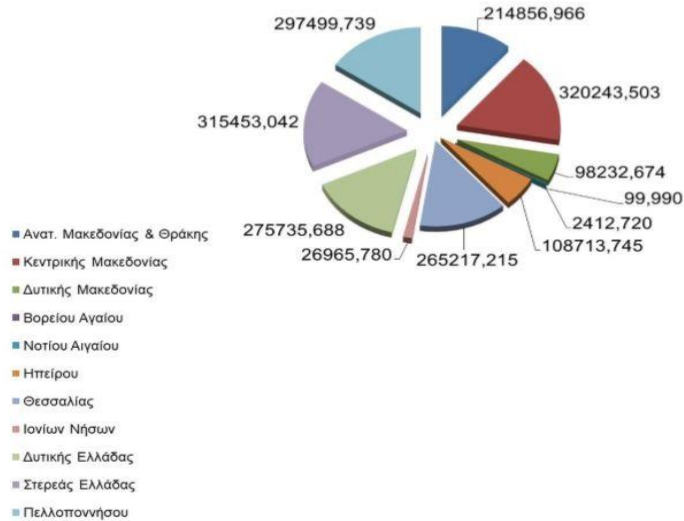
Γράφημα 6 [Πηγή: www.lagie.gr]

Πρωταγωνίστρια στις μονάδες βιοαερίου-βιομάζας αναδεικνύεται η Περιφέρεια Αττικής με 36,86 MW, με την Κεντρική Μακεδονία να ακολουθεί με 14,91 MW.



02_2018 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (kW) ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ ΣΤΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (Άρθρο 9 Ν.3468/2006)

ΦΒ (kW)

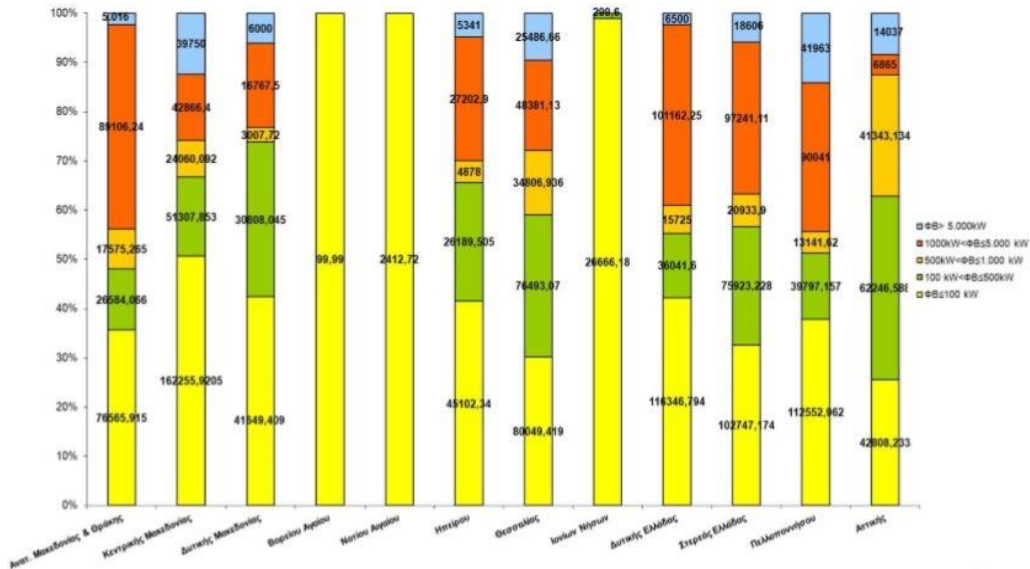


Γράφημα 7 [Πηγή: www.lagie.gr]



02_2018 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (kW) ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ ΣΤΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (Άρθρο 9 Ν.3468/2006)

ΦΒ (kW)



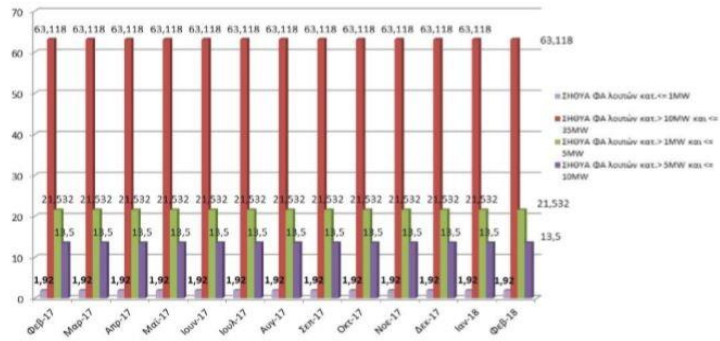
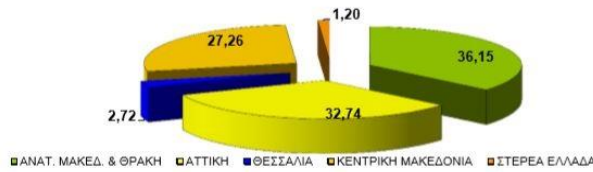
Γράφημα 8 [Πηγή: www.lagie.gr]

Μοιρασμένα στα φωτοβολταϊκά όπου έχουμε ισομερή, περίπου, κατανομή για σχεδόν όλες τις Περιφέρειες της χώρας, πλην των νησιών του Ιονίου, καθώς και σε Δυτική Μακεδονία και Ήπειρο.



02_2018 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ & ΕΞΕΛΙΞΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (MW) ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ ΣΤΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (Άρθρο 9 Ν.3468/2006)

ΣΗΘΥΑ (MW)

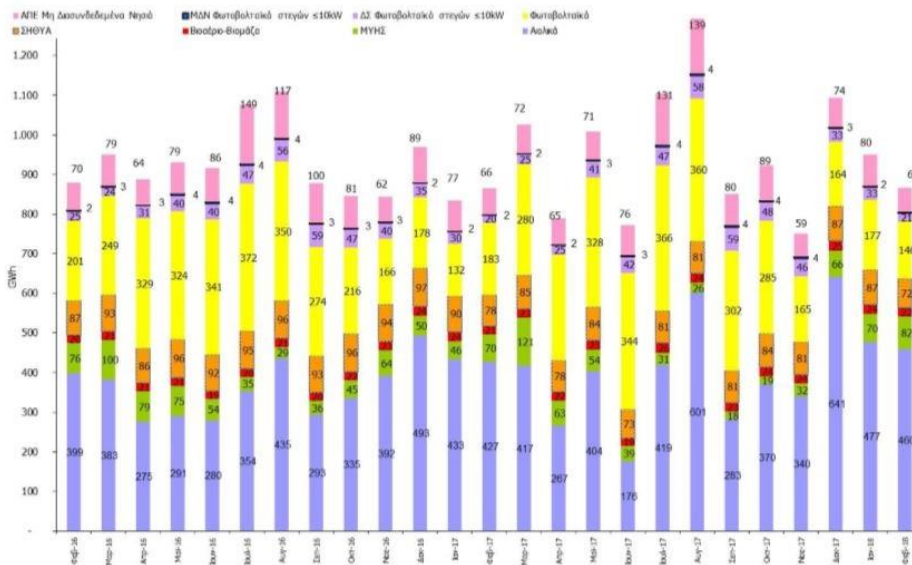


Γράφημα 9 [Πηγή: www.lagie.gr]

Παρατηρούμε ότι στα ΣΗΘΥΑ, δηλαδή στα συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, με μικρή διαφορά την πρωτιά έχει η Ανατολική Μακεδονία και Θράκη έναντι της Αττικής, και ακολουθούν Κεντρική Μακεδονία, Θεσσαλία και τέλος Στερεά Ελλάδα.



2016 – 2018 ΕΘΝΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (GWh) ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ (Άρθρα 9 & 10 Ν.3468/2006) & Φ/Β ΣΤΕΓΩΝ ≤ 10kW



Γράφημα 10 [Πηγή: www.lagie.gr]


**02_2018 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ
ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (Άρθρο 9 ν.3468/2006)**

ΑΙΟΛΙΚΑ				ΜΥΛΗΣ			
Μήνας	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Συντελεστής Φόρτισης (%)	Μήνας	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Συντελεστής Φόρτισης (%)
Ιανουάριος	476.627	2.322,17	27,59%	Ιανουάριος	70.491		40,97%
Φεβρουάριος	459.626	2.322,17	29,45%	Φεβρουάριος	81.994	231,24	52,77%
Μάρτιος				Μάρτιος			
Απρίλιος				Απρίλιος			
Μάιος				Μάιος			
Ιούνιος				Ιούνιος			
Ιούλιος				Ιούλιος			
Αύγουστος				Αύγουστος			
Σεπτέμβριος				Σεπτέμβριος			
Οκτώβριος				Οκτώβριος			
Νοέμβριος				Νοέμβριος			
Δεκέμβριος				Δεκέμβριος			
	936.253				152.486		

Μήνας	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Συντελεστής Φόρτισης (%)
Ιανουάριος	24.340	61,02	53,62%
Φεβρουάριος	22.107	61,02	53,91%
Μάρτιος			
Απρίλιος			
Μάιος			
Ιούνιος			
Ιούλιος			
Αύγουστος			
Σεπτέμβριος			
Οκτώβριος			
Νοέμβριος			
Δεκέμβριος			
	46.448		

Πίνακας 1 [Πηγή: www.lagie.gr]
**02_2018 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΗΘΥΑ &
ΚΑΤΑΝΕΜΟΜΕΝΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΗΘΥΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

ΣΗΘΥΑ			ΚΑΤΑΝΕΜΟΜΕΝΗ ΜΟΝΑΔΑ ΣΗΘΥΑ			
Μήνας	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Μήνας	Ενέργεια (MWh)	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Ισχύς Προτεραιότητας της Μονάδας Συμπαράγωγής (MW) (*)
Ιανουάριος	23.962	100,07	Ιανουάριος	86.872	334,00	134,60
Φεβρουάριος	19.554	100,07	Φεβρουάριος	72.338	334,00	134,60
Μάρτιος			Μάρτιος			
Απρίλιος			Απρίλιος			
Μάιος			Μάιος			
Ιούνιος			Ιούνιος			
Ιούλιος			Ιούλιος			
Αύγουστος			Αύγουστος			
Σεπτέμβριος			Σεπτέμβριος			
Οκτώβριος			Οκτώβριος			
Νοέμβριος			Νοέμβριος			
Δεκέμβριος			Δεκέμβριος			
Σύνολο (MWh)	43.516		Σύνολο (MWh)	159.209		

(*) Από 12.01.2017 η ισχύς προτεραιότητας είναι 132,9 MW.

Πίνακας 2 [Πηγή: www.lagie.gr]



02_2018 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (Άρθρο 9 ν.3468/2006)

Φ/Β ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

ΜΗΝΑΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWh)	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (%) (**)
Ιανουάριος	177.299,36	2.093,97	11,38%
Φεβρουάριος*	145.724,98	2.094,07	10,36%
Μάρτιος			
Απρίλιος			
Μάιος			
Ιούνιος*			
Ιούλιος			
Αύγουστος			
Σεπτέμβριος			
Οκτώβριος*			
Νοέμβριος			
Δεκέμβριος			
ΣΥΝΟΛΟ (MWh)	323.024,34	*Μήνες εκκαθαριστικών λογαριασμών για τα Φ/Β ΧΤ	

(**) Ο Συντελεστής Φόρτισης στα Φ/Β είναι ενδεικτικός γιατί η μηνιαία εκκαθαριζόμενη ενέργεια δεν ταυτίζεται πάντα με τη μηνιαία παραγωγή των πάρκων. Στη ΧΤ η παραγόμενη ενέργεια μετράται 3 φορές μέσα στο έτος, ενώ στους υπόλοιπους μήνες η εκκαθαριζόμενη ενέργεια αφορά σε «έναντι» παραγωγή. Επιπλέον, σε μερικά πάρκα λόγω τεχνικών περιορισμών του δικτύου έγινε μείωση της εγκατεστημένης τους ισχύος.

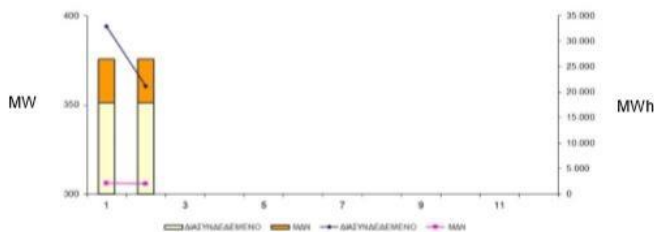
Πίνακας 3 [Πηγή www.lagie.gr]



02_2018 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΕ ΣΤΕΓΕΣ Σ 10kW (Ειδικό Πρόγραμμα ΦΒ σε στέγες κτιρίων Κ.Υ.Α. 12323/ΓΓ175_ΦΕΚ Β 1079)

	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWh)*		ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)		ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (%)	
	ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ	ΜΑΝ	ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ	ΜΑΝ	ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ	ΜΑΝ
Ιανουάριος	32.885,33	2.118,31	351,10	24,63	12,59%	11,56%
Φεβρουάριος	21.104,63	2.055,85	351,10	24,63	8,94%	12,42%
Μάρτιος						
Απρίλιος						
Μάιος						
Ιούνιος						
Ιούλιος						
Αύγουστος						
Σεπτέμβριος						
Οκτώβριος						
Νοέμβριος						
Δεκέμβριος						
ΣΥΝΟΛΟ	53.989,96	4.174,17	351,10	24,63		

(*1 Η παραγόμενη ενέργεια αναφέρεται στο ποσό ενέργειας που έχει εκκαθαριστεί το συγκεκριμένο μήνα βάσει καταμετρήσεων από το ΔΕΔΔΗΕ. MWh



Πίνακας 4 [Πηγή: www.lagie.gr]

Η συνεισφορά των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή κατά τον μήνα Φεβρουάριο είναι η εξής: τα αιολικά με συνεισφορά 459,6 χιλ. MWh, η βιομάζα με 22,1 χιλ. MWh, τα υδροηλεκτρικά με 81,9 χιλ. MWh και τα Φ/Β με 145,7 χιλ. MWh (21,1 χιλ. MWh επιπλέον, αν συνυπολογίσουμε το Ειδικό Πρόγραμμα Φ/Β σε στέγες κτιρίων). Τέλος, οι μονάδες ΣΗΘΥΑ συνεισέφεραν 19,5 χιλ. MWh.

Βασιζόμενοι στο Δελτίου ΗΕΠ, που εκδίδει ο ΛΑΓΗΕ και αναφέραμε παραπάνω, οι μονάδες ΑΠΕ έχουν εξασφαλίσει πλέον την πρωτιά στο διασυνδεδεμένο σύστημα, έστω και με βραχεία κεφαλή, από τον αμέσως επόμενο τύπο καυσίμου. Η υπόθεση διείσδυσης ΑΠΕ στον ενεργειακό ισοζύγιο βαίνει καλώς με αποτέλεσμα οι εθνικοί δεσμευτικοί στόχοι και εκτιμήσεις να φτάνουν ολοένα και περισσότερο στην υλοποίησή τους.

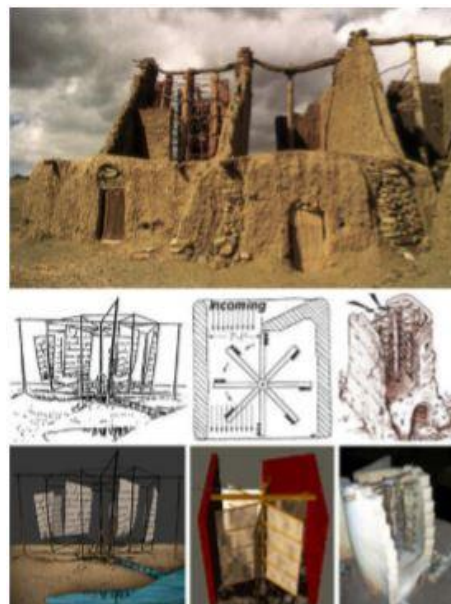


Γράφημα 11 [Πηγή: <http://www.ypeka.gr>]

1.2 Ιστορική Ανασκόπηση Αιολικής Ενέργειας

Ο άνθρωπος χρησιμοποίησε την αιολική ενέργεια για πρώτη φορά στα ιστιοφόρα πλοία (3500 π.Χ.), γεγονός που συνέβαλε στην ανάπτυξη της ναυτιλίας και κατ' επέκταση την βελτίωση της ανθρώπινης ζωής. Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιούνταν στην Περσία μεταξύ το 900-500 μ.Χ. Η αιολόσφαιρα του Ήρωνα αποτελεί μία από τις πρώτες κατασκευές που αξιοποιούσαν την αιολική ενέργεια. Ωστόσο, η πρώτη γνωστή κατασκευή κατασκευάστηκε στο Σιστάν, στην ανατολική επαρχία του Ιράν, τον 7ο αιώνα. Τα πανεμόνια ήταν μηχανές κατακόρυφου άξονα, που διαθέτανε 6-12 ημικυλινδρικά πτερύγια. Χρησιμοποιήθηκαν για το άλεσμα του σιταριού ή για την μεταφορά νερού, καθώς και στην παραγωγή ζαχαροκάλαμου.

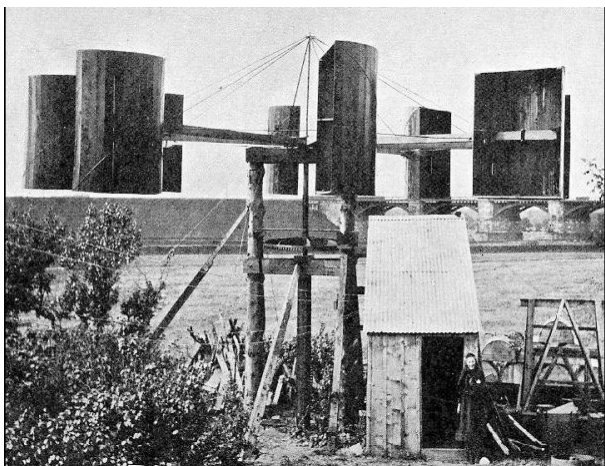
Η αιολική ενέργεια εμφανίστηκε για πρώτη



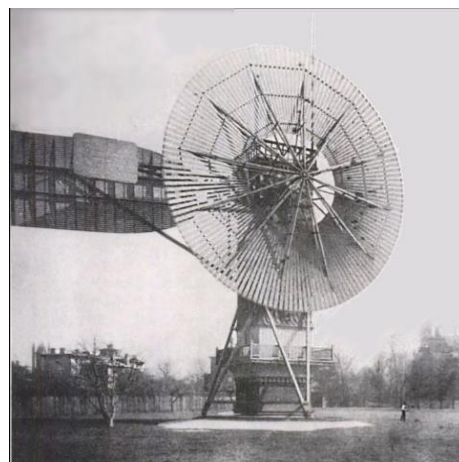
Εικόνα 9: Περσικό συγκρότημα ανεμόμυλων και σχηματική αναπαράσταση [Πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki>]

φορά στην Ευρώπη στη διάρκεια του Μεσαίωνα. Τα πρώτα ιστορικά στοιχεία της χρήσης της φαίνονται στην Αγγλία, κατά τον 11ο ή 12ο αιώνα και υπάρχουν αναφορές πως Γερμανοί σταυροφόροι έμαθαν την τεχνογνωσία των ανεμογεννητριών στη Συρία περίπου το 1190. Από τον 14ο αιώνα, οι ολλανδικοί ανεμόμυλοι χρησιμοποιούνταν για την αποστράγγιση περιοχών κοντά στο δέλτα του Ρήνου. Προηγμένες ανεμογεννήτριες έχουν περιγραφεί από τον Κροάτη εφευρέτη Φάουστο Βεράντζιο. Στο βιβλίο του "Machinae Novae" (1595) περιέγραψε ανεμογεννήτριες με κυρτά πτερύγια ή σχήματος V.

Η πρώτη ανεμογεννήτρια παραγωγής ρεύματος ήταν μία μηχανή φόρτισης μπαταριών που εφευρέθηκε τον Ιούλιο του 1887 από τον Σκωτσέζο ακαδημαϊκό Τζέιμς Μπλιθ στο Μέρικικ της Σκωτίας.



Εικόνα 10: Η ανεμογεννήτρια που κατασκευάστηκε από τον Τζέιμς Μπλιθ (1891)
[Πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki>]



Εικόνα 11: Η πρώτη αυτόματη ανεμογεννήτρια κατασκευασμένη στο Κλίβελαντ το 1887 από τον Τσαρλς Φ. Μπρας. Είχε 18 μέτρα ύψος, ζύγιζε 4 τόνους και παράγαγε 12 kW [Πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki>]

Λίγους μήνες αργότερα ο Αμερικανός εφευρέτης Τσαρλς Φ. Μπρας κατάφερε να κατασκευάσει την πρώτη αυτόματη ανεμογεννήτρια και, έπειτα από διαβούλευση με τους Τζάκομπ Σ. Γκιμπς και Μπρίνσλεϊ Κόουλμπερντ, καθηγητές του τοπικού πανεπιστημίου, κατάφερε να ηλεκτροδοτήσει το Κλίβελαντ. Αν και η εφεύρεση του Μπλιθ κρίθηκε ασύμφορη στο Ηνωμένο Βασίλειο, οι ανεμογεννήτριες φάνηκαν πιο αποδοτικές σε χώρες με μικρή πυκνότητα πληθυσμού.

Στη Δανία από το 1900, υπήρχαν περίπου 2500 ανεμόμυλοι για τα μηχανικά φορτία όπως οι αντλίες και τα ελαιοτριβεία, με την παραγωγή να εκτιμάται σε ισχύ περίπου 30 MW. Οι μεγαλύτερες μηχανές είχαν 24 μέτρα ύψος με τέσσερα πτερύγια των 23 μέτρων. Στις ΗΠΑ, από το 1908 υπήρχαν 72 ανεμογεννήτριες που παρήγαγαν από 5 KW έως 25 KW. Την περίοδο του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου, κατασκευάστηκαν στις ΗΠΑ 100.000 ανεμόμυλοι το χρόνο, κυρίως για άντληση νερού.

Από τη δεκαετία του 1930, οι ανεμογεννήτριες ήταν ιδιαίτερα συνηθισμένες σε αγροκτήματα, κυρίως



Εικόνα 12: Ανεμόμυλοι που χρησιμοποιούνταν για την άλεση και την άντληση νερού
[Πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki>]

στις ΗΠΑ, όπου δεν είχε κατασκευαστεί ακόμα δίκτυο διανομής ηλεκτρισμού. Εκείνη την περίοδο, οι τιμές του χάλυβα ήταν χαμηλές και ως εκ τούτου πολλές ανεμογεννήτριες στηρίζονταν σε χαλύβδινο σκελετό.

Ένας πρόδρομος της σύγχρονης ανεμογεννήτριας βρισκόταν στη Γιάλτα το 1931. Παρήγαγε 100 KW, είχε 30 μέτρα ύψος και συνδεόταν με ένα τοπικό δίκτυο διανομής 6.3 KV. Έχει αναφερθεί πως η ετήσια ικανότητα παραγωγής έφτανε το 32%, ποσοστό που δεν διαφέρει από τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες.

Το φθινόπωρο του 1941, η πρώτη ανεμογεννήτρια MW βρισκόταν στο Βερμόντ. Λειτουργήσε μόνο για 1.100 ώρες πριν υποστεί σοβαρή βλάβη. Δεν επισκευάστηκε ποτέ, λόγω έλλειψης υλικών κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου.

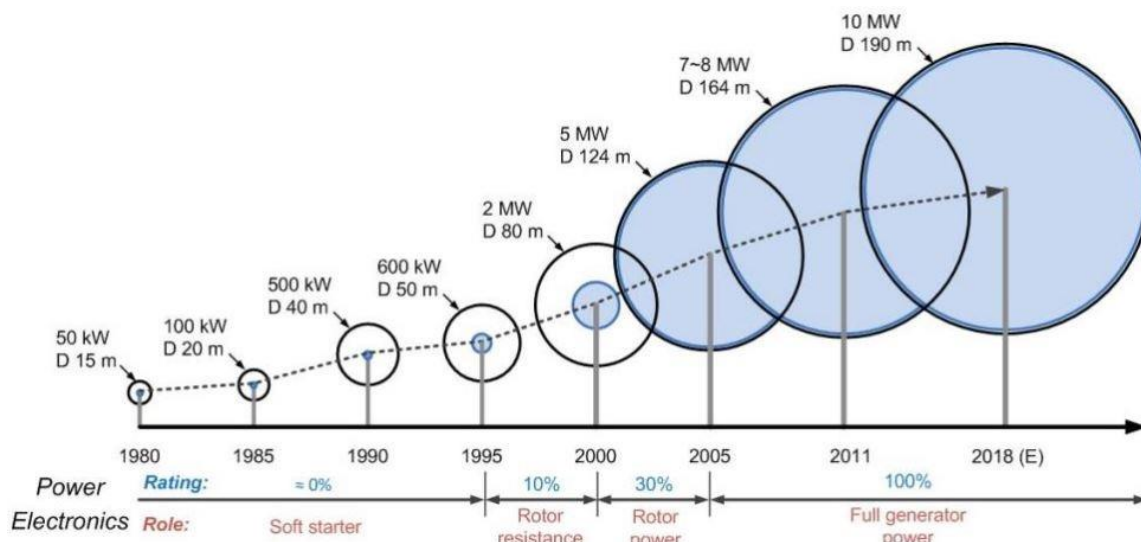
Η πρώτη ανεμογεννήτρια που ήταν συνδεδεμένη στο εθνικό δίκτυο λειτουργήσε το 1951 στο Ηνωμένο Βασίλειο. Κατασκευάστηκε από την εταιρεία John Brown & Company στις Ορκάδες.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, στη Δανία ξέσπασαν διαμαρτυρίες κατά της χρήσης πυρηνικής ενέργειας. Αυτό ώθησε τη χώρα να αναπτύξουν μικροτουρμπίνες ικανότητας 22 KW. Κατά τη δεκαετία του 1980, πολλοί οργανισμοί και συνεταιρισμοί άσκησαν πίεση στην κυβέρνηση για την κατασκευή μεγαλύτερων τουρμπινών σε όλη τη χώρα. Στη συνέχεια, οι ακτιβιστές (κυρίως στη Γερμανία), οι νεοϊδρυθέντες κατασκευαστικές εταιρείες στην Ιαπωνία και οι επενδύσεις στις ΗΠΑ πίεσαν τις κυβερνήσεις αυτών των κρατών για την κατασκευή ανεμογεννητριών. Εταιρείες δημιουργήθηκαν στην Ινδία και στην Κίνα. Από το 2012, η δανέζικη εταιρεία Vestas θεωρείται ο μεγαλύτερος κατασκευαστής ανεμογεννητριών.[1]



Εικόνα 13: Αιολικό Πάρκο

[Πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki/>]



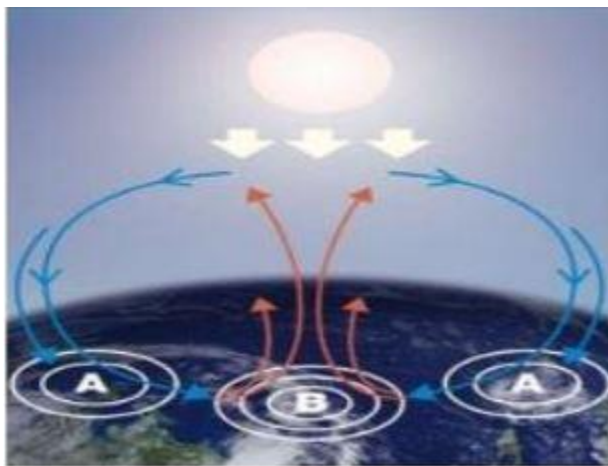
Εικόνα 14: Εξέλιξη ανεμογεννητριών 1980-2018 [Πηγή: Frede Blaabjerg; Ke Ma, 2013]

1.3 Άνεμος

Άνεμος ορίζεται κάθε οριζόντια μετακίνηση μάζας ατμοσφαιρικού αέρα. Ο άνεμος είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών πιέσεων που επικρατούν από τόπο σε τόπο και εξαρτάται άμεσα από το γεωγραφικό πλάτος και μήκος μιας περιοχής καθώς επίσης και από το κλίμα που επικρατεί σε κάθε περιοχή. Οι μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης (βαρομετρικό χαμηλό ή υψηλό) και οι θερμοκρασιακές αλλαγές στην ατμόσφαιρα προκαλούν δύο είδη κίνησης στα μόρια του αέρος είτε την κατακόρυφο κίνηση των αερίων μαζών που είναι τα ανοδικά και τα καθοδικά ρεύματα είτε την οριζόντια κίνηση ή ροή των μορίων του αέρα. Επιπλέον, τα βασικά χαρακτηριστικά του ανέμου είναι η διεύθυνση και η έντασή του. [5], [6]

Η κίνηση του αέρα γίνεται με μια κυκλική κίνηση είτε ανοδική είτε καθοδική κίνηση των αερίων μαζών, θερμών και ψυχρών, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο το αιολικό δυναμικό. Συγκεκριμένα, η δημιουργία του αιολικού δυναμικού γίνεται με την θέρμανση μιας αέριας μάζας (όπως αναφέραμε και στο 1.1.2) η οποία εκτονώνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται το βάρος της και να έχει ανοδική πορεία. Όμως η θέση της καλύπτεται με μια αέρια μάζα η οποία χαρακτηρίζεται από την χαμηλότερη θερμοκρασία. Σε γενικές γραμμές ένα στρώμα ατμοσφαιρικού αέρα θα έρθει σε επαφή με τη γήινη επιφάνεια, θα θερμανθεί και θα ανέλθει, τη θέση του θα πάρει ένα ψυχρόμετρο στρώμα όπου με την σειρά του θα θερμανθεί και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. [6]

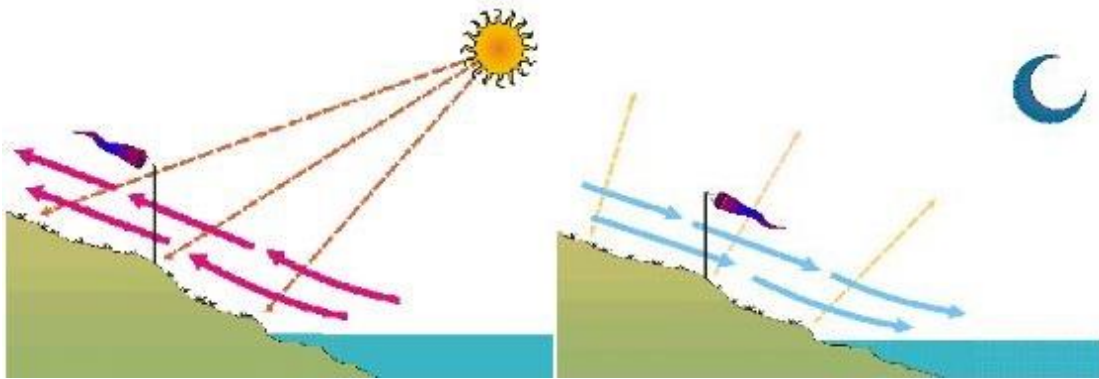
Ωστόσο, υπάρχει ακόμα ένας παράγοντας που επηρεάζει την κίνηση των αερίων μαζών και είναι η περιστροφή της γης, αφού με αυτό τον τρόπο διαμορφώνεται το βαρομετρικό στο οποίο πραγματοποιείται η κυκλική κίνηση των αερίων μαζών. Καταλήγουμε λοιπόν στο ότι οι άνεμοι διαμορφώνονται ανάλογα με τα τοπικά φαινόμενα και την θέση που έχει η εκάστοτε τοποθεσία ως προς τον ήλιο. [6]



Εικόνα 15: Κύκλος θέρμανσης και ψύξης αιολικού δυναμικού [Πηγή: Τσούλης, 2016]

Η διακύμανση της θερμοκρασίας πραγματοποιείται με πολύ γρήγορους ρυθμούς διότι η μετακίνηση των αερίων μαζών επηρεάζεται από την γήινη επιφάνεια που μπορεί να είναι είτε στεριά η οποία έχει μικρότερη θερμοχωρητικότητα είτε θάλασσα η οποία

έχει μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα. Άρα με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται συνεχόμενη μετακίνηση αερίων μαζών-στρωμάτων από τη θάλασσα στη στεριά κατά τη διάρκεια της ημέρας, με στόχο την θέρμανση τους και αντίστροφα κατά την διάρκεια της νύχτας, όπου η θάλασσα παρουσιάζει υψηλότερες θερμοκρασίες από την ξηρά. [5], [6]



Εικόνα 16: Κίνηση αερίων μαζών κατά την διάρκεια της ημέρας και κατά τη διάρκεια της νύχτας

[Πηγή: www.forward.gr]

Χαρακτηριστικές παράμετροι του ανέμου [7]

▲ Μέση ταχύτητα του ανέμου

Η χαμηλότερη περιοχή της ατμόσφαιρας, στην οποία βρίσκονται και οι περισσότερες κατασκευές, ονομάζεται ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Εκεί, η κίνηση του ανέμου επιβραδύνεται από δυνάμεις τριβής και μεγάλα εμπόδια στην επιφάνεια της γης, καθώς και από φαινόμενα που οφείλονται στον στροβιλισμό. Ο στροβιλισμός, προκαλεί απότομες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου, γνωστές και ως ριπές.

Από μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου σε διάφορα ύψη από το έδαφος, διαπιστώνουμε ότι:

- η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται συναρτήσει του ύψους από το έδαφος
- στην περιοχή υπάρχουν διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή στροβιλισμός
- ο στροβιλισμός διαδίδεται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων

Προκειμένου να διαχωριστούν οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου που οφείλονται στο στροβιλισμό, από τις πιο αργές που οφείλονται σε μετεωρολογικά φαινόμενα, χρησιμοποιείται το μέγεθος της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου, V , που δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_{\infty}^{\infty+T} V(t) dt$$

Σχέση 1.3.1

όπου: $V(t)$: η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου

T : το χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται η ολοκλήρωση, ώστε να υπολογιστεί η μέση τιμή

▲ Στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου

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

$$V(t) = \bar{V} + V'(t)$$

Σχέση 2.3.2

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V(t) dt \quad V'(t) = 0$$

▲ 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.

▲ Ριπή του ανέμου

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

▲ Διεύθυνση του ανέμου

Ορίζεται από το σημείο του ορίζοντα από το οποίο φυσά ο άνεμος σε σχέση με τη θέση την οποία μελετάμε. Η διεύθυνση του ανέμου εμφανίζει μικρότερες διακυμάνσεις σε σχέση με την ταχύτητά του και εξαρτάται από τον προσανατολισμό της τοποθεσίας, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τη βλάστηση. Ως κύρια διεύθυνση του ανέμου ορίζεται αυτή που συνεισφέρει τουλάχιστον 10% στη συνολική διαθέσιμη αιολική ενέργεια.

▲ Τραχύτητα του εδάφους

Η τραχύτητα εκφράζει το είδος του εδάφους και εκφράζεται:

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

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

$$Z_0 = 0,15h$$

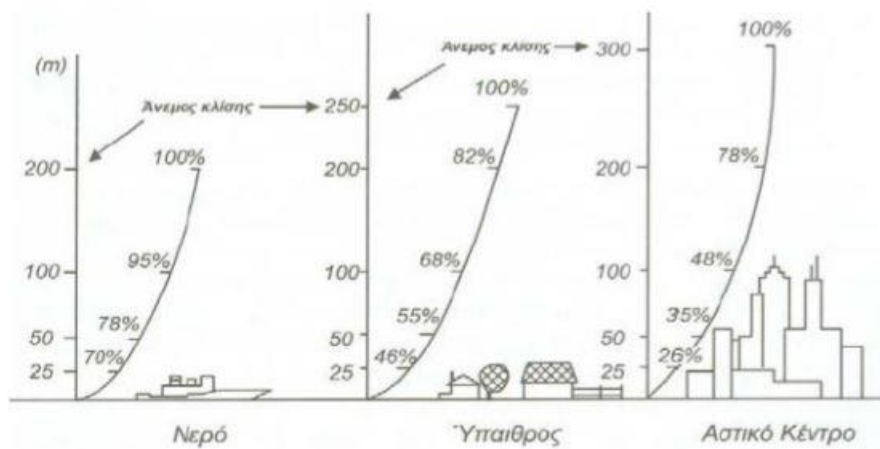
Σχέση 3.3.3

Αν $Z_0 \leq 0,03$, τότε κλάση = $1,698823 + \ln(Z_0)/\ln(150)$

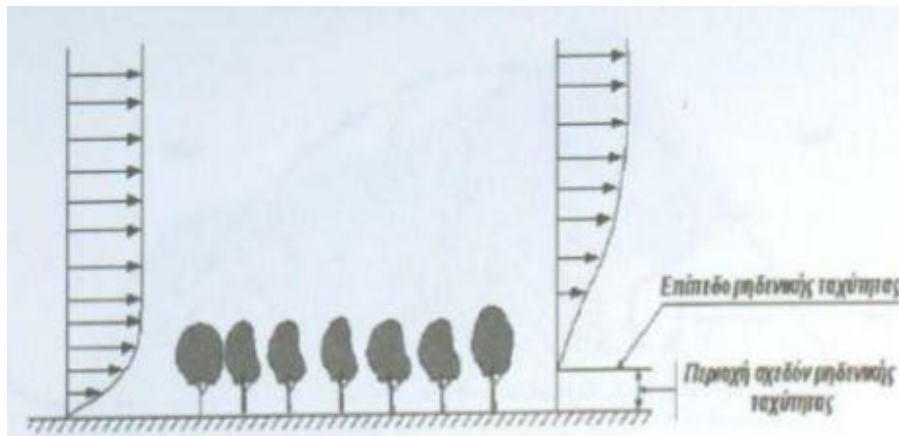
Σχέση 4.3.4

Αν $Z_0 > 0,03$, τότε κλάση = $3,912489 + \ln(Z_0)/\ln(3,333333)$

Σχέση 5.3.5



Εικόνα 17: Επίδραση τραχύτητας στην ταχύτητα του ανέμου
[Πηγή: Μπιτζιονης Β., εκδ. Τζίολα]



Εικόνα 18: Αλλαγή της κατανομής ταχύτητας του ανέμου λόγω εμποδίων
[Πηγή: Μπιτζιονης Β., εκδ. Τζίολα]

▲ Ανατάραξη του αέρα(Τύρβη)

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

Για $Z_0 \leq 0,20$ m

$$I = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)} \quad \text{Σχέση 6.3.6}$$

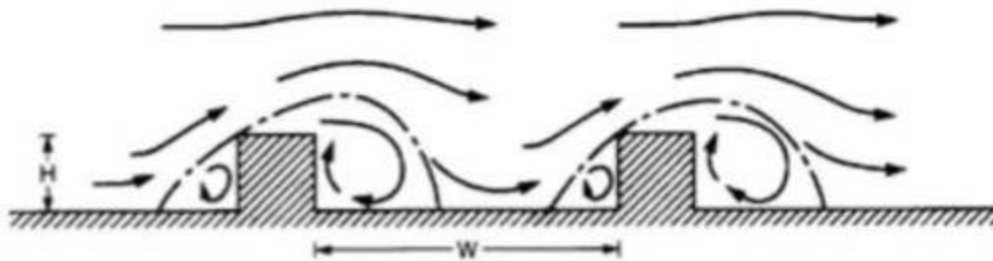
Για $Z_0 > 0,20$ m

$$I = \frac{-0,14 \ln Z_0 + 0,78}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)} \quad \text{Σχέση 7.3.7}$$

όπου: Z_0 : η τραχύτητα του εδάφους σε m
 Z : το ύψος αναφοράς σε m
 I : η ένταση ανατάραξης αέρα, καθαρός αριθμός

▲ Στροβιλισμός του αέρα

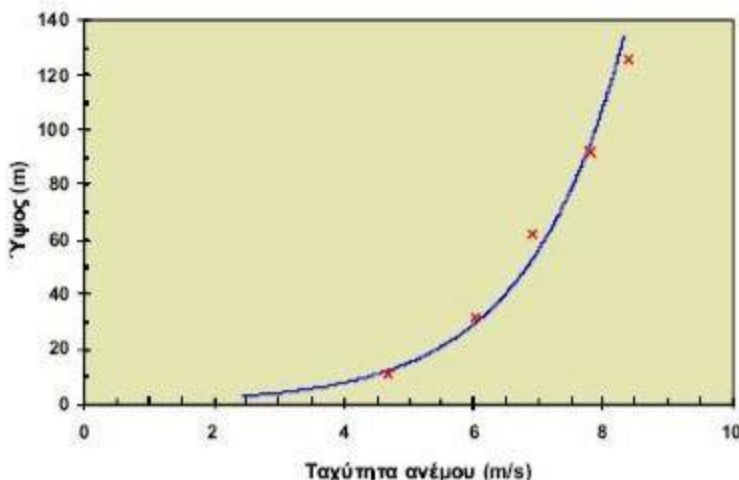
Στροβιλισμός είναι η δημιουργία ανωμαλιών στη ροή του αέρα λόγω της ανατάραξης και των διαφόρων χαρακτηριστικών εμποδίων της επιφάνειας του εδάφους.



Εικόνα 19: Στροβιλισμός του αέρα [Πηγή: Σακκάς, Τζεμπελής, 2013]

▲ Κατανομή του αέρα

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

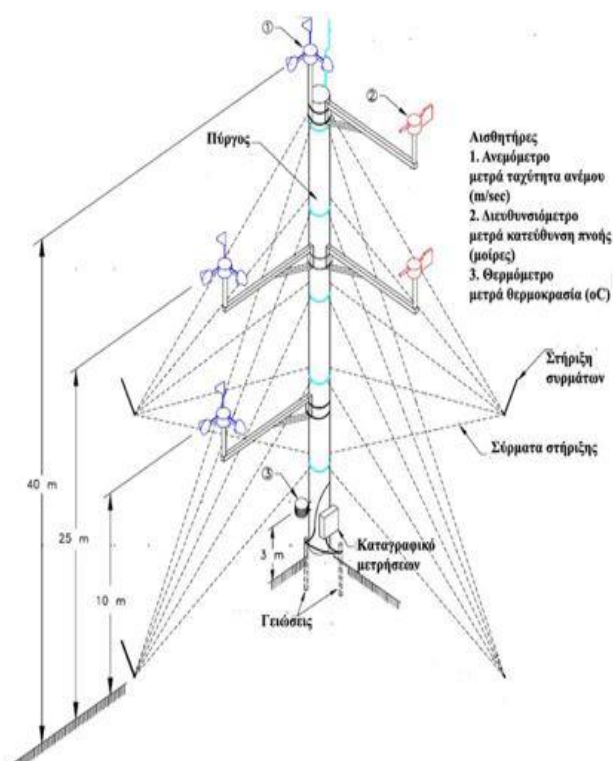


Εικόνα 20: Τυπική καμπύλη μεταβολής της ταχύτητας του αέρα σε σχέση με το ύψος

[Πηγή: Σακκάς, Τζεμπελης, 2013]

1.4 Μέτρηση Αιολικού Δυναμικού

Η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού μπορεί να πραγματοποιηθεί στο μέγιστο μόνο στην περίπτωση που υπάρχουν οι απαραίτητες μετρήσεις του ανέμου. Με την σωστή καταμέτρηση σημαντικών δεδομένων του ανέμου δημιουργείται μια σαφής εικόνα για το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής. Το αιολικό δυναμικό καθώς και ο άνεμος μετρούνται με ανεμόμετρα, για την μέτρηση της ταχύτητας και διευθυνσιόμετρα/ανεμοδείκτες για την διεύθυνση του ανέμου. Αυτά είναι τοποθετημένα στον λεγόμενο μετεωρολογικό ιστό, ο οποίος τοποθετείται κοντά στην περιοχή ενδιαφέροντος και πιο συγκεκριμένα στην ψηλότερη κορυφή για την αποφυγή κάθε είδους φυσικού ή τεχνητού εμποδίου, προκειμένου να μην υπάρξει αλλοίωση αποτελεσμάτων.[8] Οι πιο απλές συσκευές μέτρησης ταχύτητας του ανέμου είναι τα ανεμόμετρα αφού η ταχύτητα που περιστρέφει το άνω μέρος του οργάνου είναι ίδια με την ταχύτητα του ανέμου που επικρατεί στο συγκεκριμένο σημείο. Επιπλέον, τα ανεμόμετρα μετρούν μέσες τιμές



Εικόνα 21: Μετεωρολογικός ιστός
[Πηγή: www.aiolikigi.gr]

έντασης του ανέμου με συνέπεια να θεωρούνται αθροιστικά ανεμόμετρα. Η καταγραφή στιγμιαίας μέτρησης του ανέμου γίνεται με την χρήση του ανεμόμετρου πίεσης, όπου η ένταση του δίνεται από την πίεση που ασκεί ο άνεμος σε ορισμένα τμήματα του οργάνου.[6]

Τα πιο διαδεδομένα ανεμόμετρα είναι τα κυπελλοφόρα, τα οποία αποτελούνται από ένα κατακόρυφο άξονα και στην κορυφή αυτού υπάρχουν τρεις ή τέσσερις οριζόντιοι βραχίονες, οι οποίοι είναι νομοθετημένοι σε συμμετρία. Στα άκρα κάθε βραχίονα είναι τοποθετημένο ένα ημισφαιρικό ή κωνικό κύπελλο, σε τρόπο ώστε η διαμετρική τομή του να είναι κατακόρυφη [6], [9]



Εικόνα 22: Κυπελλοφόρα ανεμόμετρα(Vector-Thies-NRG)
[Πηγή: Βασιλείου, 2013]

Η διεύθυνση του ανέμου μετριέται συνήθως με τη βοήθεια των ανεμοδείκτων. Ο ανεμοδείκτης αποτελείται από έναν 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:

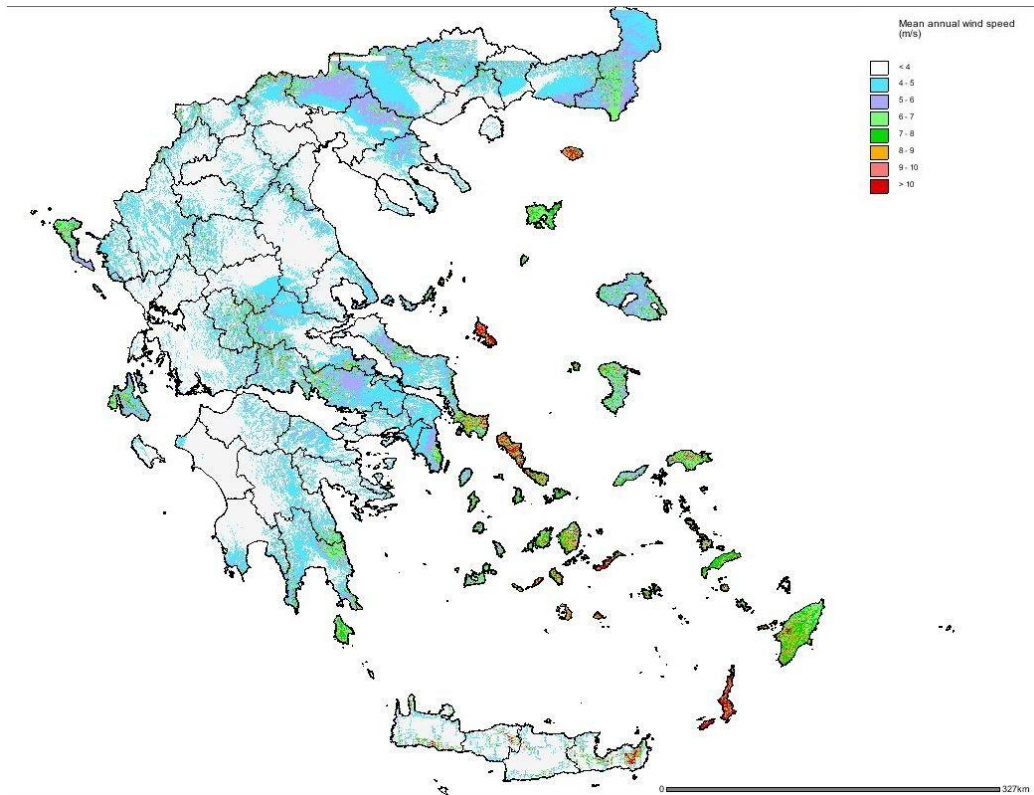
- a. περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονά του με ελάχιστες τριβές
- b. δεν παρουσιάζει τάσεις κλίσεως προς μια διεύθυνση, με την ακριβή αντιστάθμιση των ελασμάτων με τη χρήση αντίβαρου
- c. εμφανίζει τη μέγιστη ροπή στρέψης για δεδομένη αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου σε σχέση με την αδράνεια του οργάνου.
- d. παρουσιάζει γρήγορη απόκριση στις διαρκείς διακυμάνσεις της διεύθυνσης του ανέμου
- e. παρουσιάζει επαρκή απόσβεση των τυχαίων ταλαντώσεων.

Τέλος, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι επειδή η διεύθυνση του ανέμου μετριέται συναρτήσει του αληθούς βορρά, το όργανο πρέπει να προσανατολισθεί με τη βοήθεια της χαραγής που υπάρχει επάνω του.[10]



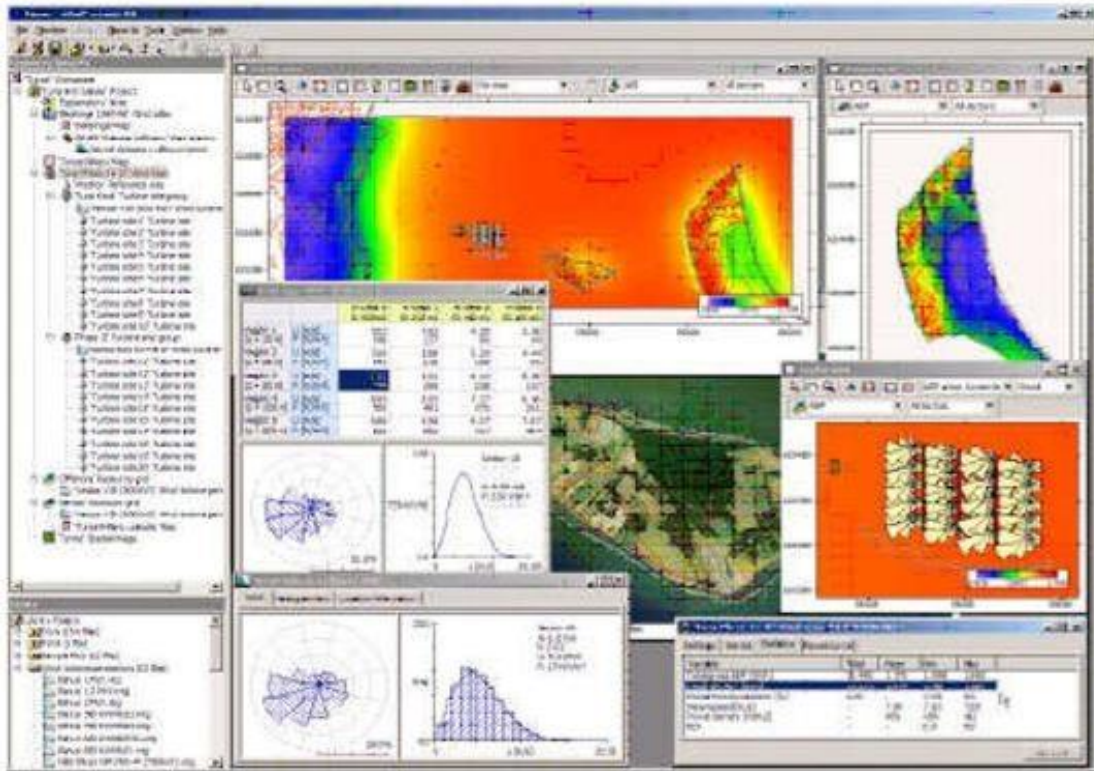
Εικόνα 23: Ανεμοδείκτες [Πηγή: Καλατζής, 2008]

Το τεχνικά και οικονομικά εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό της Ελλάδας παρουσιάζεται δωρεάν στον ιστότοπο του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ) ως αιολικός χάρτης και είναι επικαιροποιημένο από την Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ).

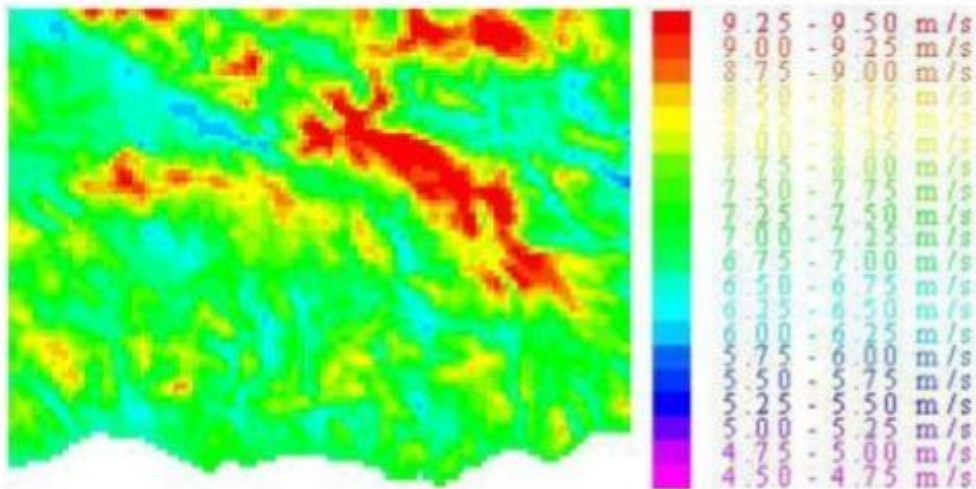


Εικόνα 24: Αιολικός χάρτης Ελλάδας [Πηγή: www.cres.gr]

Αν κάποιος επιθυμεί να διερευνήσει ή αναζητήσει πληροφορίες του παγκόσμιου αιολικού δυναμικού, μπορεί να ανατρέξει σε ιστοτόπους όπως: <https://www.windy.com>, <https://earth.nullschool.net> ή το <https://globalwindatlas.info> κ.ά. ή μέσω πακέτων λογισμικού όπως το WAsP, το οποίο είναι πρόγραμμα που δημιουργεί ανεμολογικούς χάρτες και παρέχει τα απαραίτητα δεδομένα για την εγκατάσταση αιολικών συστημάτων στις εξεταζόμενες περιοχές. [8]

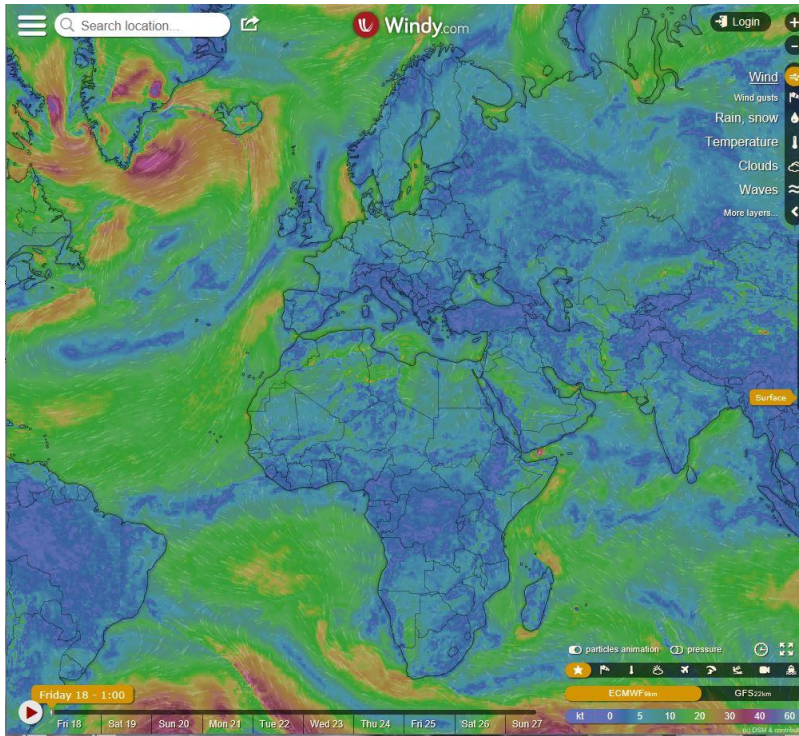


Απόσπασμα από μελέτη αιολικού δυναμικού με WAsP

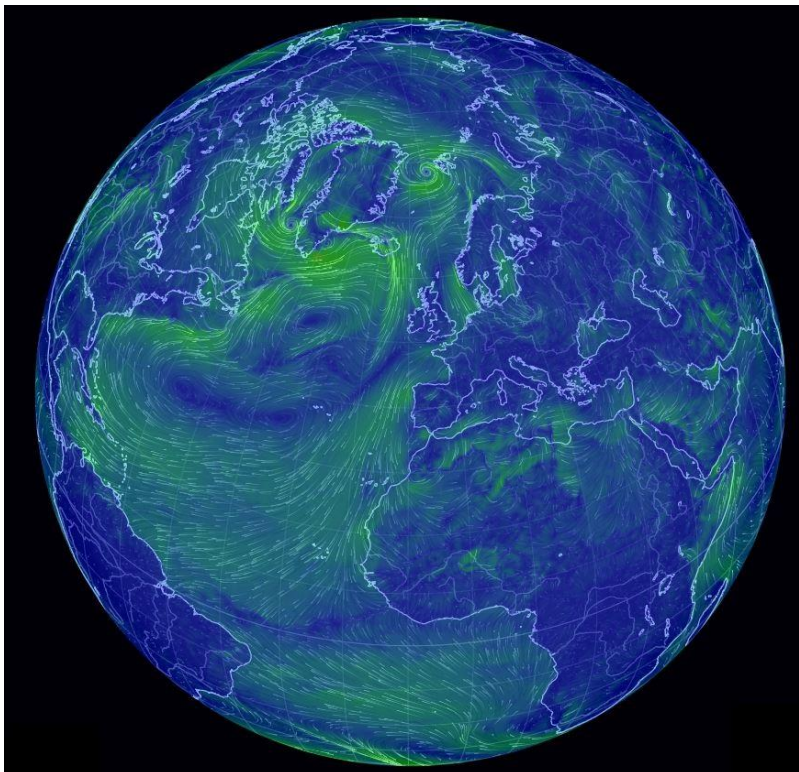


Απόσπασμα ψηφιοποίησης αιολικού δυναμικού

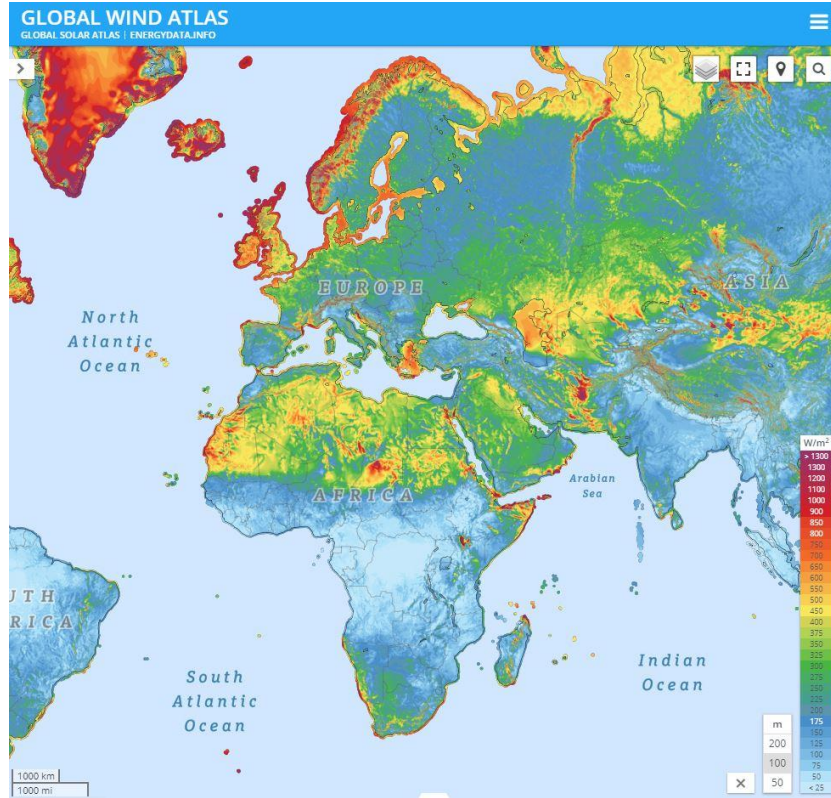
Εικόνα 25: [Πηγή: Πελοποννήσιος, 2013]



Εικόνα 26: Παγκόσμιο Αιολικό Δυναμικό
[Πηγή: <https://www.windy.com>]



Εικόνα 27: Παγκόσμιο Αιολικό Δυναμικό
[Πηγή: <https://earth.nullschool.net>]



Εικόνα 28: Παγκόσμιο Αιολικό Δυναμικό
 [Πηγή: <https://globalwindatlas.info>]

1.5 Βασικά Στοιχεία Αεροδυναμικής

Η ισχύς του ανέμου:

Αιολική ισχύς ορίζεται η συνολικά διαθέσιμη κινητική ενέργεια του ανέμου στη μονάδα του χρόνου. Αυτή η ισχύς είναι που μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ μέσω του ρότορα της ανεμογεννήτριας όπως θα δούμε παρακάτω. [11]

Η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τη σχέση:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 (t) \quad \text{Σχέση 1.5.1}$$

Όπου: P_{wind} = ισχύς που παράγεται από τον άνεμο (watt)

ρ = πυκνότητα του αέρα (gr/m^3)

A = επιφάνεια που διαπερνά κάθετα ο αέρας (m^2)

V_w = ταχύτητα του ανέμου (m/sec)

Συντελεστής απόδοσης:

Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας χαρακτηρίζεται από τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος που ορίζεται ως ο λόγος της μηχανικής ισχύος που παράγεται από το ρότορα προς την αιολική ισχύ που δεσμεύεται από την ανεμογεννήτρια. Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος ισούται με [12]:

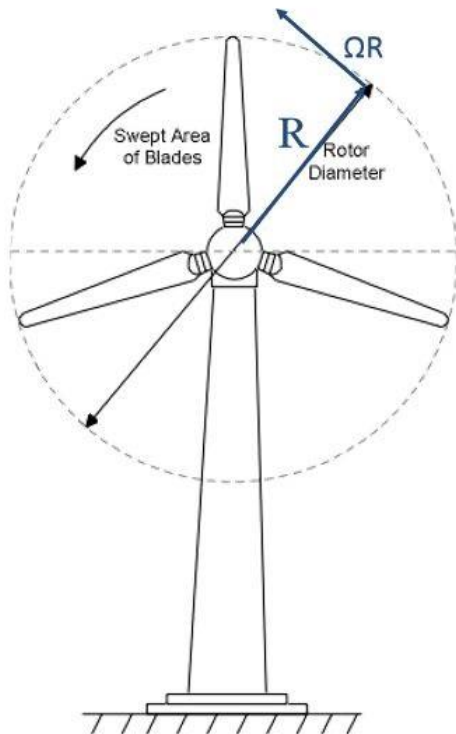
$$C_p = \frac{PM}{P_{wind}}$$

Σχέση 1.5.2

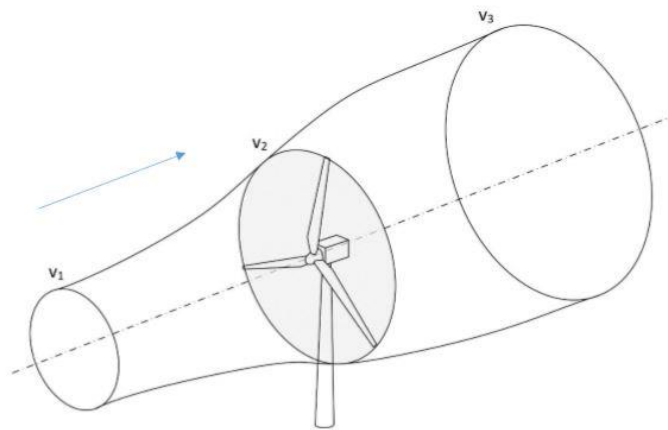
Όπου: PM = μηχανική ισχύς στον άξονα του ανεμοκινητήρα

P_{wind} = ισχύς που παράγεται από τον άνεμο

Η μέγιστη θεωρητική τιμή για τον συντελεστή ισχύος (νόμος του Betz) είναι $C_{pmax} = 0.593$ η οποία προκύπτει μέσα από ανάλυση της κινητικής ενέργειας του ανέμου που περνά μέσα από τον σωλήνα ροής της ανεμογεννήτριας. [13]



Εικόνα 29: Σωλήνας ροής ηλεκτροκινητήρα
[Πηγή: <https://set.ksu.edu.sa>]



Εικόνα 30: Σωλήνας ροής ηλεκτροκινητήρα [Πηγή: Σπανός, 2017]

Σύμφωνα με τη θεωρία του δίσκου ενέργειας ο μηχανισμός δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου από το δρομέα του ανεμοκινητήρα θεωρείται ιδανικός, δηλαδή χωρίς απώλειες. Ο δρομέας εξετάζεται σαν ένα «μαύρο κουτί» δια μέσου του οποίου περνάει ο αέρας που υφίσταται μεταβολή της ενέργειάς του, μεταβολή που ουσιαστικά εκφράζεται με την πτώση της στατικής του πίεσης. Επιπλέον ο δρομέας

θεωρείται σαν ένας δίσκος που ενεργεί πάνω στο ρευστό γι' αυτό και η ονομασία του «δίσκος ενέργειας». Όπως βλέπουμε και στις εικόνες 1.5.1 και 1.5.2 το σχήμα δείχνει το ροϊκό σωλήνα ανεμοκινητήρα που ορίζεται από τη διάμετρο του δρομέα (rotor diameter). Ο αέρας πολύ μακριά (στο άπειρο) πριν από το δίσκο (ανάντη) έχει στατική πίεση p και πλησιάζει με ταχύτητα V_1 , ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από τον αέρα και συνεπώς πολύ μακριά μετά από το δίσκο (κατάντη) όπου η πίεση του αέρα θα έχει αποκατασταθεί στην πίεση του περιβάλλοντος p , η ταχύτητα του ανέμου V_2 θα είναι μικρότερη από την V_1 . Για λόγους διατήρησης της μάζας μέσα στο ροϊκό σωλήνα, θα πρέπει η διατομή άρα και η διάμετρος του ροϊκού σωλήνα να μεγαλώνει πίσω από το δρομέα, δηλαδή να υπάρχει διαστολή του ρεύματος του αέρα (ομόρου) του ανεμοκινητήρα, όπως ακριβώς παριστάνεται στο σχήμα της εικόνας 1.5.2. Το ρευστό μετά το δίσκο έχει μικρότερη ενέργεια από αυτή πριν το δίσκο και επειδή η αξονική ταχύτητα του ρευστού πάνω στο δίσκο και οριακά λίγο πριν και λίγο μετά από το δίσκο παραμένει ίδια για λόγους διατήρησης της μάζας (η διαφορά κινητικής ενέργειας του ανέμου πριν και μετά το δίσκο δεσμεύτηκε από τον ιδανικό δρομέα του ανεμοκινητήρα) τότε η στατική πίεση του ρευστού μετά το δίσκο θα είναι μικρότερη από τη στατική πίεση του ρευστού πριν από το δίσκο. Συνεπώς ο δίσκος αποτελεί μια επιφάνεια ασυνέχειας πίεσης, αλλά συνέχειας όμως της αξονικής ταχύτητας και ασυνέχειας της περιφερειακής ταχύτητας. Τυπική μεταβολή της αξονικής ταχύτητας και πίεσης του ανέμου κατά μήκος του άξονα του ροϊκού σωλήνα παρουσιάζεται στο σχήμα της εικόνα 1.5.2. [14]

Ο συντελεστής C_p συνδέεται με τη ταχύτητα του ανέμου μέσω μιας σχέσης που μας δίνει τη δυνατότητα να σχεδιάσουμε μία καμπύλη (Γράφημα 1.5.1) από όπου διεξάγονται βασικά στοιχεία. Ο λόγος ταχύτητας του ακροπτερυγίου (tip speed ratio) « λ » εκφράζει τη γραμμική ταχύτητα στο άκρο του πτερυγίου ως ποσοστό της ταχύτητας του και δίνεται από τη σχέση: [15]

$$\lambda = \frac{\Omega R \cdot R}{V}$$

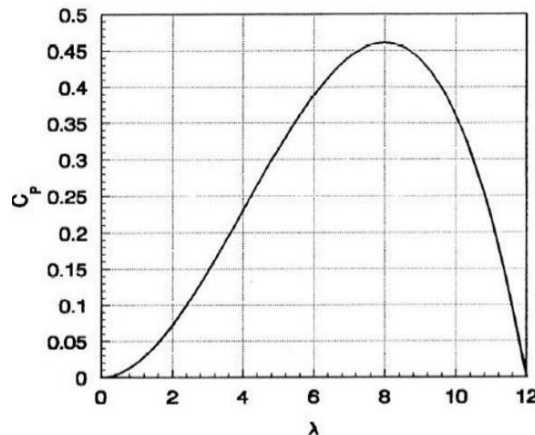
Σχέση 1.5.3

Όπου: ΩR = γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας (rad/sec)

R = μήκος του πτερυγίου του ανεμοκινητήρα (m)

V = ταχύτητα του ανέμου (m/sec)

Representative C_p - λ curve



Γράφημα 12: Συντελεστής απόδοσης C_p σε σχέση με τη τιμή της ταχύτητας ακροπτερυγίου λ
[Πηγή : <http://mstudioblackboard.tudelft.nl>]

Στο γράφημα 1.5.2 όπου απεικονίζεται ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p συναρτήσει της ταχύτητας ακροπτερυγίου « λ » παρατηρούμε ότι υπάρχει εξάρτηση μεταξύ του συντελεστή C_p και της γωνία του βήματος του πτερυγίου β . Διαπιστώνεται επίσης ότι η μέγιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C_{pmax} αντιστοιχεί για γωνία βήματος πτερυγίου $\beta=0$ για μια συγκεκριμένη τιμή του « λ » όπου συμβολίζεται λ_{opt} .

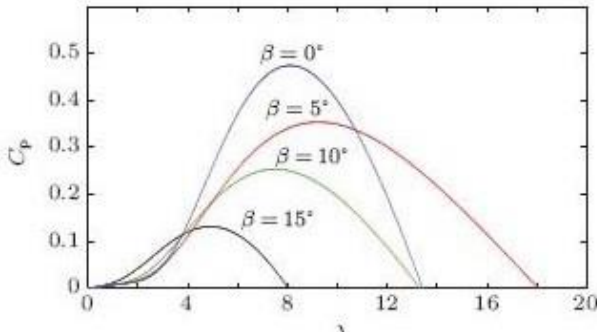
Αυτό ισχύει για κάθε διαφορετική τιμή της γωνίας βήματος, δηλαδή, υπάρχει μία βέλτιστη τιμή του « λ » για την οποία ο συντελεστής ισχύος C_p παίρνει την μέγιστη τιμή του για την εκάστοτε γωνία βήματος. Η βέλτιστη τιμή του « λ » (λ_{opt}), ορίζει και μία βέλτιστη τιμή για την γωνιακή ταχύτητα του ακροπτερυγίου, $\Omega_{R,opt}$, η οποία πλέον θα εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα του ανέμου και ορίζεται από την σχέση: [12], [6]

$$\Omega_{R,opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} V$$

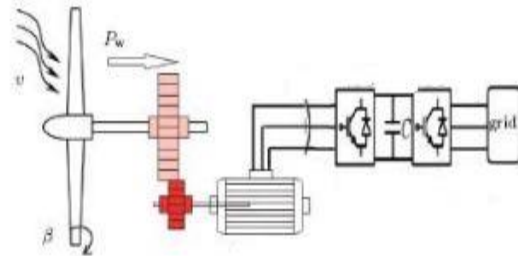
Σχέση 1.5.4

- Όπου: λ_{opt} = βέλτιστη τιμή του « λ » (rad/sec)
- R = μήκος του πτερυγίου του ανεμοκινητήρα (m)
- V = ταχύτητα του ανέμου (m/sec)

Συμπερασματικά, παρατηρούμε ότι έχουμε μέγιστη παραγόμενη ισχύ από τον άνεμο, όταν είμαστε σε λειτουργία $\Omega_{R,opt}$.



Γράφημα 13: Συντελεστής C_p σε σχέση με τον λ για διάφορες τιμές γωνίας βήματος πτερυγίων β
 [Πηγή: <http://cpb.iphy.ac.cn>]



Εικόνα 31: Προσομοίωση
 [Πηγή: <http://cpb.iphy.ac.cn>]

Συντελεστής στιβαρότητας (solidity):

Η στιβαρότητα είναι μία σημαντική παράμετρος για να επιλέξουμε τύπο ανεμοκινητήρα, καθώς ισούται με τον λόγο της συνολικής επιφάνειας των πτερυγίων προς με την μετωπική επιφάνεια σάρωσης της πτερωτής.[16]

- Για ανεμοκινητήρες οριζοντίου άξονα είναι:

$$\sigma = \frac{n \cdot C \cdot R}{\pi \cdot R^2}$$

Σχέση 1.5.5

- Για ανεμοκινητήρες κατακόρυφου άξονα είναι :

$$\sigma = \frac{n \cdot C}{R}$$

Σχέση 1.5.6

Όπου: n: Ο αριθμός των πτερυγίων του δρομέα.

R: Το μήκος των πτερυγίων του δρομέα

C: Το πλάτος (χορδή) των πτερυγίων του δρομέα

Κατά κανόνα οι ανεμοκινητήρες με μεγάλη στιβαρότητα:

- Είναι αργόστροφοι. Αποδίδουν την μέγιστη του ισχύς για μικρή τιμή του λ
- Έχουν σχετικά μικρό συντελεστή απόδοσης C_p
- Είναι ανθεκτικοί με ελάχιστες ανάγκες συντήρησης
- Χαρακτηρίζονται από μεγάλες δυνάμεις στα πτερύγια και συνεπώς μεγάλη ροπή στον άξονα περιστροφής.
- Ξεκινούν μόνες τους όταν αρχίζει να φυσά άνεμος.
- Είναι πολύ απλής τεχνολογίας
- Είναι κατάλληλοι για αγροτικές χρήσεις (άντληση νερού).

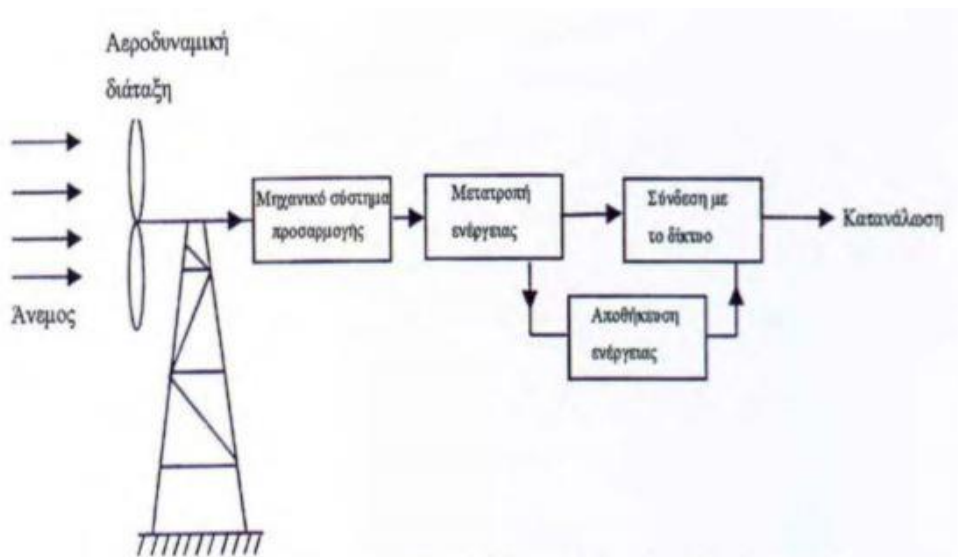
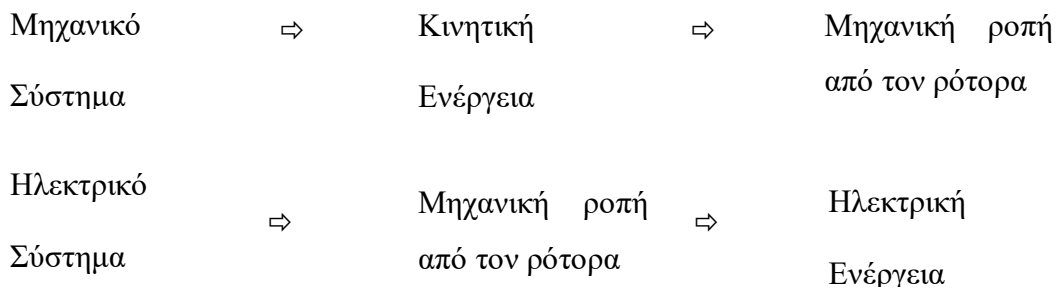
Κατά κανόνα οι ανεμοκινητήρες με μικρή στιβαρότητα :

- Είναι πολύστροφοι. Αποδίδουν την μέγιστη ισχύς τους για μεγάλη τιμή του λ.
- Έχουν σχετικά μεγάλο συντελεστή ισχύος C_p .
- Είναι σχετικά ευπαθείς χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρές δυνάμεις στα πτερύγια και συνεπώς μικρές δυνάμεις στον άξονα περιστροφής.
- Είναι προϊόντα σχετικά υψηλής τεχνολογίας, ειδικά οι μεγαλύτερες από αυτούς.
- Είναι κατάλληλοι για ηλεκτροπαραγωγή.

2. Αιολικά Συστήματα-Δομή & Λειτουργία

2.1 Αρχή Λειτουργίας Ανεμογεννητριών

Η αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών είναι πολύ απλή. Πρώτα από όλα η ανεμογεννήτρια είναι η μηχανή εκείνη που μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ανεμογεννήτρια δουλεύει ως εξής, ο αέρας περιστρέφει τα πτερύγια τα οποία είναι συνδεδεμένα με έναν περιστρεφόμενο άξονα. Αυτός ο άξονας περνάει σε ένα κιβώτιο μετάδοσης κίνησης και το κιβώτιο συνδέεται με έναν άλλον άξονα μέσω του οποίου κινείται μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Εν ολίγοις η λειτουργία της βασίζεται σε δύο συστήματα μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας. Στο μηχανικό σύστημα, το οποίο μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ροπή στον ρότορα και στο ηλεκτρικό σύστημα, στο οποίο η γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ροπή του ρότορα σε ηλεκτρική ενέργεια. [18] Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση :



Εικόνα 32: Αεροδυναμική διάταξη ανεμογεννήτριας [Πηγή: Στεργίου, Ψυλλας, 2012]

2.1.1 Κατηγορίες Ανεμογεννητριών

Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία παραγωγής ανεμογεννητριών παρουσιάζει μεγάλη οικονομική άνθηση. Για αυτό τον λόγο έχουν κατασκευαστεί δεκάδες ανεμογεννήτριες για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Αυτές τις ανεμογεννήτριες μπορούμε να τις χωρίσουμε ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων αλλά κατά κύριο λόγο με την θέση του άξονα περιστροφής ως προς την Γη. Ανάλογα με την θέση του άξονα υπάρχουν οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT-horizontal axis wind turbine) και οι καθέτου άξονα (VAWT-vertical axis wind turbine).

▲ Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τον άξονά τους παράλληλο προς την επιφάνεια της Γης και συνήθως παράλληλα και με την διεύθυνση του ανέμου. Αυτού του τύπου οι ανεμογεννήτριες έχουν συνήθως 2 ή 3 πτερύγια, σε αντίθεση με τους ανεμόμυλους που έχουν πολλά. Ένα χαρακτηριστικό των πτερυγίων αυτών είναι ότι έχουν μεγάλο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης. Τα κύρια μηχανικά μέρη, όπως φαίνονται και στην εικόνα, είναι ο δρομέας ή φτερωτή, το σύστημα μετάδοσης κίνησης (κύριος άξονας και κιβώτιο ταχυτήτων), η γεννήτρια, ο πύργος στήριξης στον οποίο είναι τοποθετημένος ο δρομέας, το σύστημα πέδησης (η ανεμογεννήτρια πρέπει να μειώνει ταχύτητα όταν υπερβαίνει ένα όριο ταχύτητας, για να μην υποστεί κάποια βλάβη) και το σύστημα ελέγχου, σύνδεσης και αποθήκευσης (συσσωρευτές) της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος υπάρχει και σύστημα προσανατολισμού ανάλογα με την διεύθυνση του ανέμου, το οποίο γίνεται είτε με αισθητήρες είτε με καθοδηγητικό πτερύγιο (κάτι σαν ανεμοδείκτη). [19]

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα είναι τα εξής:

Πλεονεκτήματα:

- + Λόγω του ύψους της ανεμογεννήτριας, εκμεταλλεύεται και άνεμο μεγαλύτερης ταχύτητας.
- + Εύκολη συναρμολόγηση.
- + Υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή.
- + Υψηλότερη αποδοτικότητα και καλύτερη απόδοση σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα.

Μειονεκτήματα:

- Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή θορύβου.
- Λόγω του μεγέθους κοστίζει πολύ η κατασκευή και η μεταφορά της.
- Για να εκμεταλλεύεται η ανεμογεννήτρια συνέχεια τον άνεμο, χρειάζεται έναν μηχανισμό περιστροφής για τον προσανατολισμό των πτερυγίων στην διεύθυνση του ανέμου.

▲ Ανεμογεννήτριες Καθέτου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα μπορούν να εκμεταλλευτούν το άνεμο ανεξάρτητα από τη κατεύθυνση του ανέμου και δεν υπάρχει η ανάγκη ρύθμισης του δρομέα με αλλαγή της κατεύθυνσης του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες αυτές

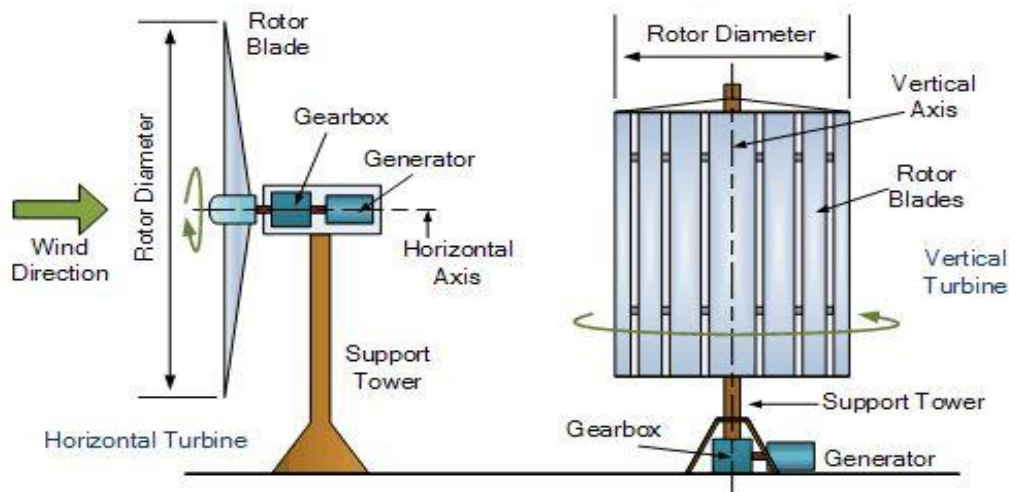
περιστρέφονται γύρω από έναν κάθετο άξονα προς την κατεύθυνση του ανέμου. Το παραγόμενο μηχανικό έργο μεταφέρεται μέσω του κατακόρυφου άξονα στο έδαφος όπου εγκαθίσταται η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα που αναπτύχθηκαν είναι του τύπου Savonius και Darrieus. Η διαφορά αυτών των δυο εκτός από τον σχεδιασμό τους είναι ότι η Savonius ξεκινάει πιο εύκολα και είναι δεν τόσο αποδοτική ενώ η Darrieus δεν ξεκινάει τόσο εύκολα αλλά είναι πολύ αποδοτική. Για αυτό έχουν κατασκευαστεί ανεμογεννήτριες που είναι συνδυασμός και των δυο τύπων, έτσι ώστε με την Savonius να έχουμε εύκολη εκκίνηση και με την Darrieus τα υπόλοιπα που αναφέραμε παραπάνω. Υπάρχουν επίσης πολλές ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, αλλά όλες βασίζονται στην λογική των Savonius και Darrieus απλά γίνονται μετατροπές στον σχεδιασμό τους. Γενικά πάντως τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα είναι τα εξής: [19]

Πλεονεκτήματα:

- + Εκμεταλλεύεται τον άνεμο από όλες τις διευθύνσεις.
- + Η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων είναι τοποθετημένο στην βάση και έτσι είναι πιο εύκολη η τοποθέτηση και η συντήρηση αυτών των μηχανικών μερών.
- + Παράγει λιγότερο θόρυβο.
- + Μπορεί να τοποθετηθεί σε περισσότερα μέρη λόγω του μεγέθους(όπως μέσα στην πόλη, στις ταράτσες, σε αυτοκινητόδρομους).
- + Η κατασκευή της είναι πιο απλή και χαμηλότερου κόστους.

Μειονεκτήματα:

- Χαμηλή απόδοση.
- Ροπή εκκίνησης υψηλή που σημαίνει χαμηλή ταχύτητα περιστροφής.
- Λόγω του μικρού μεγέθους δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί ανέμους υψηλών ταχυτήτων.
- Υπάρχει δυσκολία συντήρησης σε κάποια μηχανικά μέρη, για παράδειγμα η αλλαγή των εδράνων κύλισης.



Εικόνα 33: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα
[Πηγή: www.alternative-energy-tutorials.com]

2.1.2. Διάκριση ανεμογεννητριών ανάλογα με τις αρχές λειτουργίας και ελέγχου τους

Οι ανεμογεννήτριες ανάλογα με τις αρχές λειτουργίας και ελέγχου τους διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, σε ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών και σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.[30] [20]

2.1.2.1 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών

Είναι οι ανεμογεννήτριες που έχουν πρακτικά σταθερή ταχύτητα περιστροφής, ανεξαρτήτως της ταχύτητας ανέμου. Αποτελούν τις πρώτες ανεμογεννήτριες που άρχισαν να χρησιμοποιούνται, ενώ ακόμα και σήμερα υπάρχουν σε μεγάλο ποσοστό. Συνδυάζονται είτε με σύγχρονες γεννήτριες είτε με γεννήτριες επαγωγής. Η μεγάλη εξάπλωσή τους οφείλεται στο κόστος τους, αφού για τη σύνδεση τους με το δίκτυο δεν απαιτούνται και δεν παρεμβάλλονται ηλεκτρονικοί μετατροπείς κι αντιστροφείς, των οποίων το κόστος είναι πάρα πολύ μεγάλο. Η απευθείας σύνδεση με το δίκτυο σύνδεση έχει ως αποτέλεσμα η ταχύτητα του δρομέα να είναι σταθερή και πρακτικά ίση με τη σύγχρονη.[20]

$$N_s = 120 \frac{f_s}{p} = \text{σταθερή}$$

Σχέση 2.1

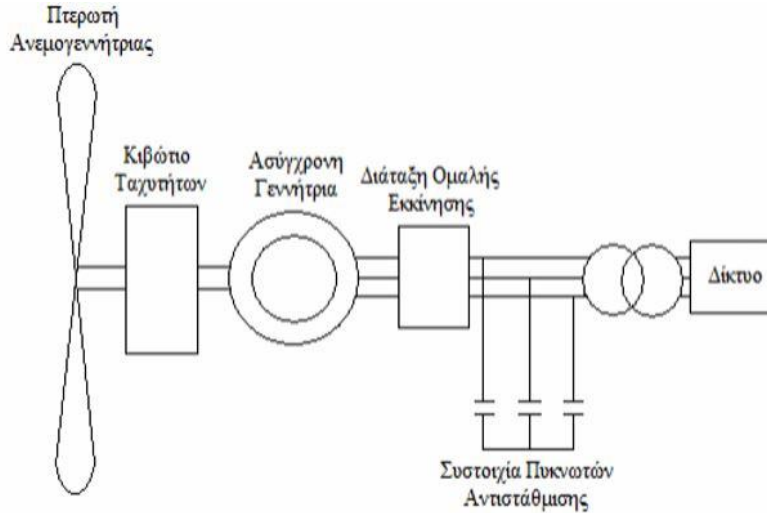
Όπου: N_s = η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (*rpm*)

f_s = η συχνότητα στο στάτη, που ισούται με τη συχνότητα του δικτύου ($f_s=50\text{Hz}$)

p = ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας (πάντα ζυγός)

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι ανεμογεννήτριες λειτουργίας σταθερών στροφών αφορούν στην εξαιρετική τους απλότητα, αξιοπιστία και στις ελάχιστες ανάγκες συντήρησης τους. Παράλληλα, όμως εμφανίζουν και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία είναι η αδυναμία συνεχούς λειτουργίας με το μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή C_{pmax} , η αυξημένη μεταβλητότητα ισχύος εξόδου και ο χαμηλός συντελεστής ισχύος εξόδου. Όπως επίσης και τα μεταβατικά φαινόμενα εκκίνησης και ζεύξης - απόζευξης.

Εξαιτίας αυτών των αδυναμιών, οι κατασκευάστριες εταιρείες ξεκίνησαν την παραγωγή ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, οι οποίες δίνουν λύση σε μεγάλο βαθμό στα προβλήματα που παρουσιάζουν οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών.



Εικόνα 34: Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών [Πηγή: <http://www.wel.teicrete.gr/>]

2.1.2.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

Στις ανεμογεννήτριες αυτές, για να υπάρχει η καλύτερη απόδοση, απαιτείται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα να είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχουν μεγάλες μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων. Για την πραγματοποίηση αυτής της αναλογίας (στροφές δρομέα - ταχύτητα ανέμου) χρησιμοποιούνται συστήματα ηλεκτρονικών αντιστροφών (inverters) που ελέγχουν τις στροφές του δρομέα, αποδεσμεύοντας έτσι την ανεμογεννήτρια από τη συχνότητα του δικτύου κι επιτρέποντας της να κυμαίνεται σε μεγάλα διαστήματα συχνοτήτων με αποτέλεσμα τη βέλτιστη λειτουργία, αφού σε κάθε περίπτωση μπορεί να λειτουργεί με το μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή C_{pmax} , το οποίο επιτυγχάνεται μέσω του λόγου ταχυτήτων ακροπτερυγίου λ . Επιπροσθέτως, ο inverter επιτυγχάνει την ομαλή σύνδεση στο δίκτυο με την προσαρμογή της ισχύος εξόδου στην ονομαστική συχνότητα του δικτύου. [20]

$$N_s = 120 \frac{f_s}{p} = \text{μεταβαλλόμενη} \quad \text{Σχέση 2.2}$$

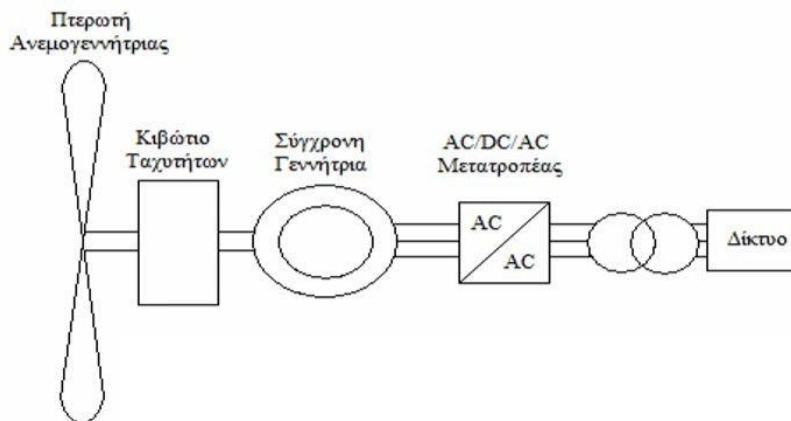
Όπου: f_s = η συχνότητα στο στάτη, που μεταβάλλεται και ελέγχεται από τον αντιστροφέα, ο οποίος μεταβάλλει τις στροφές της ανεμογεννήτριας σύμφωνα με τη σχέση:

$$N_s = \frac{(60V_w\lambda)}{2\pi R} \quad \text{Σχέση 2.3}$$

Όπου: V_w = η ταχύτητα περιστροφής του ανέμου
 λ = ο λόγος ταχυτήτων ακροπτερυγίου (tip speed ratio)
 R = η ακτίνα των πτερυγίων

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών προτιμώνται έναντι των σταθερών στροφών καθώς παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα. Τα σημαντικότερα είναι της αύξηση ενεργειακής απόδοσης, η μείωση των μηχανικών καταπονήσεων (πτερύγια, σύστημα μετάδοσης της κίνησης και δομικό σύστημα), συνεπώς έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και η δυνατότητα απαλοιφής του κιβωτίου ταχυτήτων. Επίσης έχουν μειωμένο ακουστικό θόρυβο, καλύτερη προσαρμογή στις τοπικές συνθήκες ανέμου, διευκόλυνση στη διαδικασία εκκίνησης και την δυνατότητα ελέγχου της άεργου ισχύος.[20]

Τα μειονεκτήματα τους αφορούν κυρίως τον οικονομικό τομέα, αφού απαιτούν σύνδεση ηλεκτρονικών ισχύος, το οποίο είναι ένα σημαντικό μέρος των εξόδων μίας εγκατάστασης τέτοιας ανεμογεννήτριας. Επιπλέον, εμφανίζουν αδυναμίες που αφορούν στην αυξημένη πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών μετατροπέων, στην έγχυση αρμονικών στο δίκτυο και στην αύξηση των απωλειών λόγω της παραμόρφωσης των ρευμάτων της γεννήτριας.[20]



Εικόνα 35: Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών [Πηγή: <http://www.wel.teicrete.gr>]

2.2 Ενεργειακά Χαρακτηριστικά Ανεμογεννητριών

2.2.1 Καμπύλη Ισχύος

Κάθε ανεμογεννήτρια έχει μια χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας-ισχύος (power curve) που φανερώνει τη σχέση μεταξύ της παραγόμενης ενέργειας και της ταχύτητας του ανέμου για κάθε τύπο ανεμογεννήτριας. Η καμπύλη αυτή εξαρτάται από τις διάφορες ιδιότητες της ανεμογεννήτριας όπως η επιφάνεια σάρωσης της έλικας, οι επικρατούσες συνθήκες ανέμου, η αεροδυναμική και οι αποδόσεις των κιβωτίων ταχυτήτων και της μηχανής. Συνήθως η καμπύλη αυτή δίνεται από τους κατασκευαστές.

Η καμπύλη ισχύος αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο της ανεμογεννήτριας αφού αυτή την χαρακτηρίζει, ενώ αποτελεί το βέλτιστο κριτήριο για την σύγκριση μεταξύ διαφορετικών ανεμογεννητριών. Επίσης, είναι το στοιχείο αυτό που κρίνει την καταλληλότητα μίας ανεμογεννήτριας συγκεκριμένης τεχνολογίας για μία συγκεκριμένη

τοποθεσία, αφού διαφορετικές κατανομές ανέμου, προκαλούν διαφορετικές συμπεριφορές από τις ανεμογεννήτριες, άρα διαφορετική παραγωγή ενέργειας.

Η αεροδυναμική ποιότητα του δρομέα παρουσιάζεται μέσω του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C_p , όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 1.5 (σχέση 1.5.2), ο οποίος εξαρτάται από τον αεροδυναμικό σχεδιασμό των πτερυγίων, μέσω των οποίων γίνεται ουσιαστικά η απορρόφηση της αιολικής ισχύος κι εμφανίζει απώλειες λόγω της αναπόφευκτης καθυστέρησης εξαιτίας της περιστροφής κι προσανατολισμού του δρομέα, της επιδείνωσης της ποιότητας της επιφάνειας των πτερυγίων και λόγω του φαινομένου της σκίασης του πύργου¹ (tower shadow) (2-3%).

Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p μπορεί να πάρει μέγιστη τιμή $C_{pmax}=0,592$, το οποίο αποτελεί το γνωστό όριο του Betz. Εξαρτάται από το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ κι από τη γωνία κλίσης (pitch) των πτερυγίων εάν υπάρχει όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 1.5 (σχέση 1.5.3 και 1.5.4). [20]

Σε μια ανεμογεννήτρια επίσης υπάρχουν απώλειες λόγω:

- της τριβής στον άξονα του δρομέα
- της αποτελεσματικότητας του κιβωτίου ταχυτήτων (εάν υπάρχει)
- της αποδοτικότητας της ηλεκτρικής γεννήτριας και του αντιστροφέα που συνδέεται
- της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο (για διασυνδεδεμένα συστήματα) ή στις μπαταρίες (για αυτόνομα συστήματα)
- της ανάγκης τροφοδότησης βοηθητικών λειτουργιών (εσωτερική κατανάλωση) και οργάνων μέτρησης που ενδεχομένως να υπάρχουν

Εν κατακλείδι, ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος ο οποίος προκύπτει από την αεροδυναμική ποιότητα των πτερυγίων, δίνει την ισχύ εξόδου, μέσω της συνολικής απόδοσης n των μηχανικών και ηλεκτρικών μερών της ανεμογεννήτριας, η οποία δίνεται:

$$P_{el} = \frac{1}{2} n p A C_p V^3$$

Σχέση 2.4

Όπου: P_{el} = η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (Watt)

n = η συνολική απόδοση της γεννήτριας

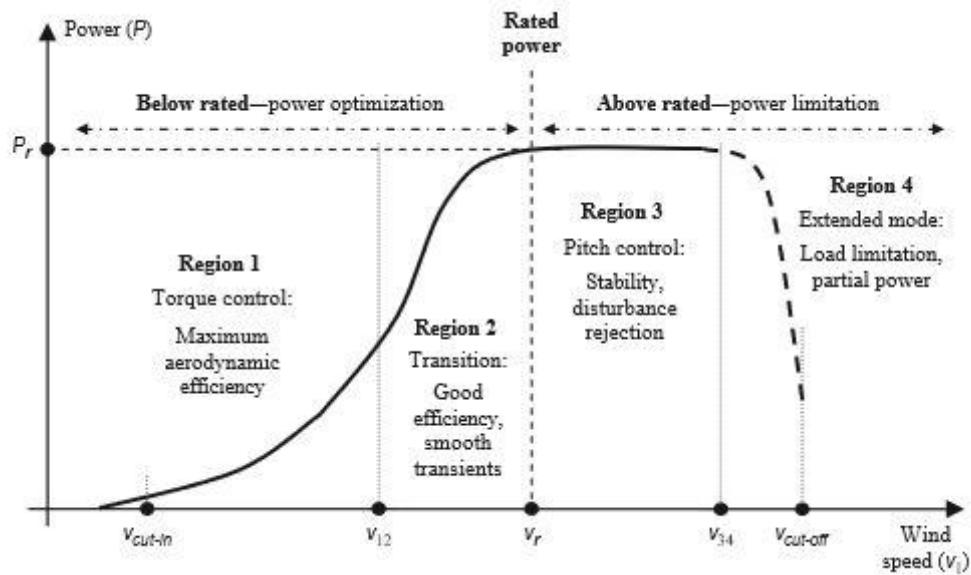
p = η πυκνότητα του ανέμου ($p = 1,225 \text{ kg/m}^3$ στο επίπεδο της θάλασσας)

A = επιφάνεια σάρωσης (m^2)

C_p = ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος ($C_{pmax} = 0.592$)

V = η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

¹ Η αιολική ισχύς μειώνεται από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, όπως δέντρα, κτήρια κλπ. Η επίδραση ενός εμποδίου που παρεμβάλλεται στη ροή του ανέμου στην αιολική ισχύ μπορεί να επεκταθεί καθ' ύψος έως δύο φορές το ύψος του εμποδίου και κατά μήκος έως είκοσι φορές το ύψος του εμποδίου κατά την κατεύθυνση πνοής του ανέμου. Αν μία ανεμογεννήτρια βρίσκεται εντός της περιοχής στην οποία η ροή του ανέμου επηρεάζεται από ένα εμπόδιο, η διαθέσιμη προς αξιοποίηση αιολική ισχύς θα είναι μειωμένη, σε σχέση με την ισχύ του ανέμου πριν το εμπόδιο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αεροδυναμική σκίαση ανεμογεννητριών, ή απλά σκίαση ανεμογεννητριών.



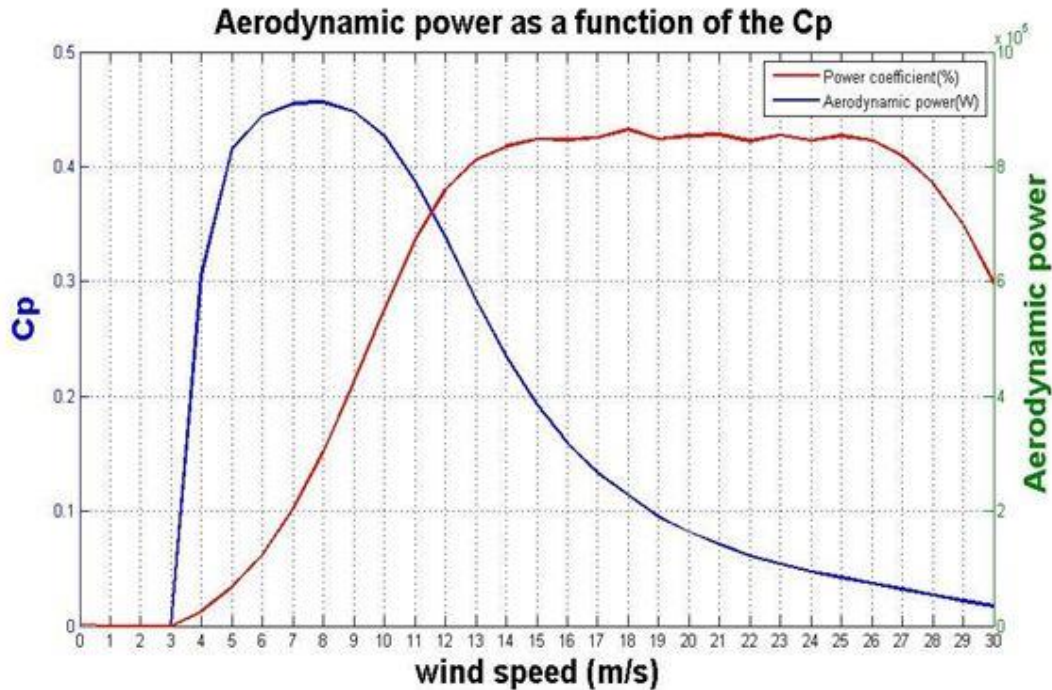
Γράφημα 14: Τυπικό διάγραμμα καμπύλης ισχύος ανεμογεννήτριας [Πηγή: Garcia-Sanz; H. Houris, 2012]

Αναλύοντας το παραπάνω γράφημα 14, παρατηρούμε ότι τα χαρακτηριστικά σημεία μιας καμπύλης ισχύος, που την καθορίζουν, βρίσκονται σε τρεις χαρακτηριστικές, για κάθε ανεμογεννήτρια, ταχύτητες ανέμου, οι οποίες είναι:

- η ταχύτητα έναρξης ή έναρξης V_{cut-in} (ή V_{min}), η οποία αντιπροσωπεύει την ελάχιστη ταχύτητα κατά την οποία η ανεμογεννήτρια ξεκινάει να λειτουργεί και να παράγει ισχύ
(~ 2-4m/s)
- η ονομαστική ταχύτητα V_{rated} (ή V_R), η οποία αντιπροσωπεύει την ταχύτητα πάνω από την οποία η παραγόμενη ισχύς γίνεται ίση με την ονομαστική ισχύ της εκάστοτε ανεμογεννήτριας
(~ 12-17m/s)
- η ταχύτητα αποκοπής ή αποσύνδεσης $V_{cut-out}$ (ή $V_{max}/ V_{cut-off}$), η οποία αντιπροσωπεύει την ταχύτητα πάνω από την οποία η ανεμογεννήτρια σταματάει να λειτουργεί, για λόγους ασφαλείας και αποφυγής καταπονήσεων του συστήματος. Η ακινητοποίηση, κατά κόρον, γίνεται μέσω συστημάτων πέδησης ή μέσω της απομάκρυνσης των πτερυγίων από την κατεύθυνση του πνέοντος ανέμου.
(~ 25-30m/s)

2.2.2 Βαθμός Απόδοσης

Ο προσδιορισμός του βαθμού απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου παρουσιάζεται στο ακόλουθο γράφημα:



Γράφημα 15: Διάγραμμα C_p συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου

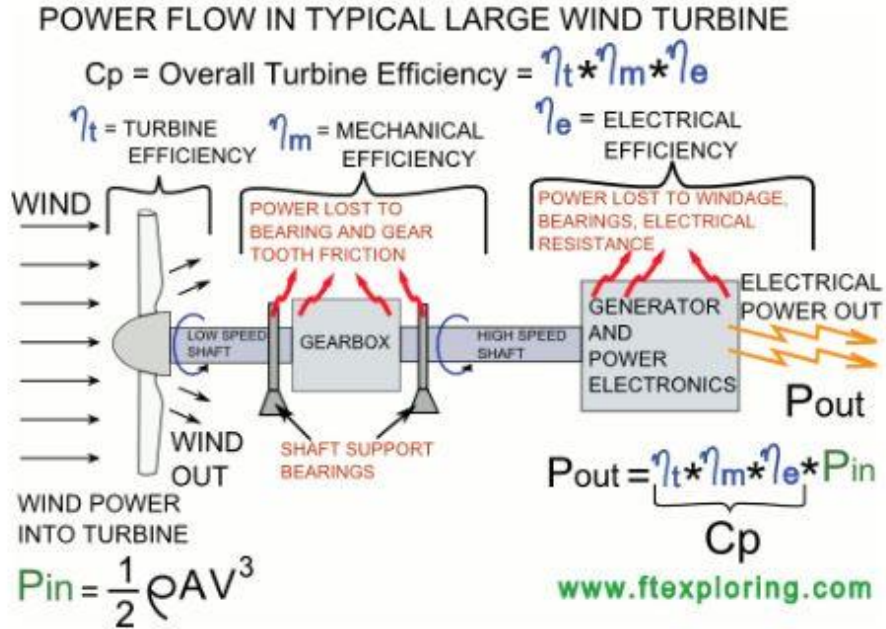
Είναι προφανές ότι κάθε ανεμογεννήτρια μπορεί να είναι βελτιστοποιημένη ώστε να αποδίδει καλύτερα σε ένα εύρος ταχυτήτων. Μεταβάλλοντας μεγέθη όπως το ύψος της ή την γωνία και τη γεωμετρία των πτερυγίων ή το μέγεθος των πτερυγίων ή το μέγεθος της γεννήτριας μεταβάλλεται η ενεργειακή συμπεριφορά της. Αλλάζοντας τα δύο τελευταία μεγέθη μεταβάλλεται η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, ενώ το ύψος της επηρεάζει μόνο την ταχύτητα του ανέμου. Γενικά, οι ανεμογεννήτριες πρέπει να έχουν τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης στις ταχύτητες ανέμου που παράγεται η περισσότερη ενέργεια ετησίως (δηλ. στο εύρος των συχνότερων υψηλών ταχυτήτων). [21]

2.3 Δομή Ανεμογεννητριών

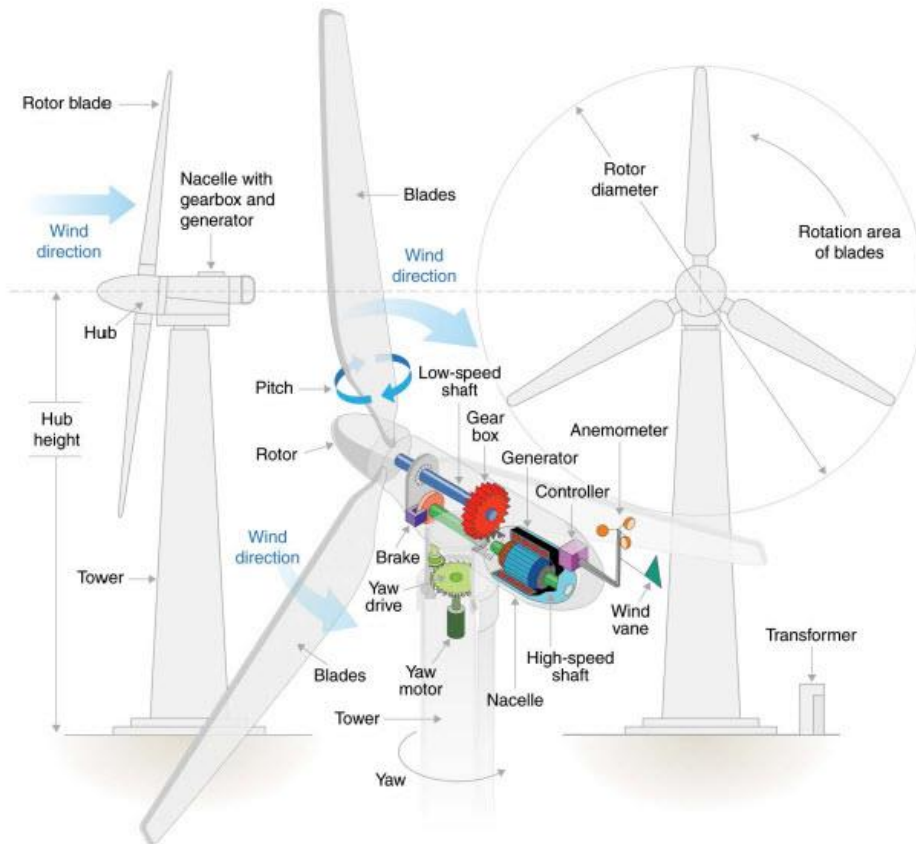
Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, οι οποίες αποτελούν τον πυλώνα της εν λόγω πτυχιακής εργασίας, μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων τους σε μονόπτερες, δίπτερες, τρίπτερες κλπ. Να σημειωθεί εδώ ότι οι μονόπτερες έχουν το πλεονέκτημα του φθηνού οικονομικού κόστους, αλλά αντιμετωπίζουν προβλήματα ισορροπίας και οπτικής αποδοχής. Ανάλογα με το αν ο άνεμος συναντά πρώτα τον δρομέα ή τον θάλαμο με τη γεννήτρια διακρίνονται σε ανεμογεννήτριες ανάντη (upwind) και κατάντη (downwind) της ροής αντίστοιχα.[20]

Βασικό χαρακτηριστικό των ανεμογεννητριών τύπου έλικας είναι η μεγάλη αεροδυναμική. Παλιά τα πτερύγια των μηχανών τέτοιου τύπου ήταν πλατιά, σήμερα κατασκευάζονται μηχανές με λεπτά πτερύγια για να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ενέργειας που συμβαίνουν σ' αυτά λόγω του ιξώδους του αέρα. Η γωνία που σχηματίζουν τα πτερύγια με τον άξονα περιστροφής τους, αποτελεί κατασκευαστικό χαρακτηριστικό για κάθε έλικα και καθορίζει την γωνία με την οποία ο άνεμος προσπίπτει πάνω στην έλικα.

Ας θυμίσουμε εδώ, κάτι που αναφέραμε στο 1ο κεφάλαιο, ότι η θεωρητική απόδοση των ανεμογεννητριών τύπου έλικας, όπως επίσης και όλων των υπόλοιπων τύπων που δουλεύουν με παρόμοιο τρόπο, σύμφωνα με το κριτήριο του Betz είναι 59%. Δεν μπορεί να υπάρξει μεγαλύτερη τιμή από αυτή για το λόγο ότι υπάρχει περιορισμός στην ταχύτητα του ανέμου που διαπερνά την έλικα μιας ανεμογεννήτριας επειδή σύμφωνα με το θεώρημα διατήρησης μάζας ο άνεμος διατηρεί ένα μέρος της κινητικής του ενέργειας για να μπορεί να απομακρυνθεί από την ανεμογεννήτρια. Συνεπώς, δεν μπορούμε να έχουμε εκμετάλλευση της ολικής ποσότητας της αιολικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, για μια ιδανική έλικα, η ταχύτητα του ανέμου που διαπερνά την έλικα θα πρέπει θεωρητικά να είναι τουλάχιστο το 1/3 της ταχύτητας του ανέμου πριν την έλικα. Ένας ακόμα λόγος για τον οποίο δεν υπάρχει ολική εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας είναι η παράκαμψη που συμβαίνει από ένα μικρό ποσοστό της μάζας του αέρα όταν αυτή πλησιάζει τον δρομέα. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται με την εφαρμογή της εξίσωσης συνέχειας στο σημείο πριν και μετά τον δρομέα. Ο άνεμος επιβραδύνεται καθώς πλησιάζει τον δρομέα ενώ η πίεση αυξάνεται. Εφόσον όμως η μάζα του αέρα σε οποιαδήποτε απόσταση από την έλικα θα πρέπει να παραμείνει σταθερή, συνεπάγεται ότι θα πρέπει να αυξηθεί το εμβαδόν το οποίο καταλαμβάνουν οι γραμμές ροής του αέρα, προκαλώντας έτσι την παράκαμψη του μικρού ποσοστού αέρα που αναφέρθηκε πριν. Επίσης, η χρονική καθυστέρηση στρέψης του μηχανισμού προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας στη διεύθυνση του ανέμου είναι ένας ακόμα παράγοντας που συντελεί στη μερική εκμετάλλευση της ισχύος του ανέμου.[20]



Εικόνα 36: <http://www.ftexploring.com/wind-energy/wind-power-coefficient.htm>



Εικόνα 37: Βασική δομή ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

2.3.1 Μηχανικό Σύστημα Ανεμογεννητριών

Για την καλύτερη κατανόηση του μηχανικού συστήματος βλέπε εικόνα 36 και 37 μαζί με τις ακόλουθες.



2.3.1.1 Ρότορας (Rotor)

Ο ρότορας αποτελείται από τα πτερύγια και την πλήμνη². Είναι το διασυνδεδετικό εξάρτημα των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας και είναι κατασκευασμένος από ένα αριθμό χάλκινων ή αλουμινένιων ράβδων οι οποίες είναι ενωμένες στις άκρες τους και στο κέντρο του υπάρχει μεταλλικός πυρήνας. Πάνω του τοποθετούνται και βιδώνονται κατά την εργοστασιακή κατασκευή του τρία ρουλεμάν, ένα για κάθε πτερύγιο. Τα ρουλεμάν χρησιμοποιούνται για την μεταβολή της γωνίας των πτερυγίων που έχει ως αποτέλεσμα την πέδηση του ρότορα όπως θα δούμε αναλυτικά στο 2.4 κεφάλαιο. Η διεύθυνση περιστροφής του ρότορα είναι δεξιόστροφη.[11] [22]



Εικόνα 38: Ρότορας ανεμογεννήτριας-προετοιμασία πριν την τοποθέτηση [Πηγή: Καλατζής, 2008]

2.3.1.2 Πτερύγια Ρότορα (Blades)

Τα πτερύγια θεωρούνται ως το πιο σημαντικό εξάρτημα της ανεμογεννήτριας μιας και η μετατροπή της αιολικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική περιστροφική εξαρτάται ως επί το πλείστο από αυτά. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους διαφέρουν ανάλογα με το μέγεθος του ανεμοκινητήρα. Σε μικρές ανεμογεννήτριες συναντάμε σαν κύριο υλικό το υαλόνημα και το ξύλο με εσωτερική γέμιση την πολυουρεθάνη(που είναι ασταθή στα εναλλασσόμενα φορτία, ανθεκτικά όμως στη διάβρωση). Σε μεσαίου μεγέθους πτερύγια χρησιμοποιούνται επίσης υαλόνημα με εναλλαγή της κατεύθυνσης των υαλονημάτων σε πολλαπλές στρώσεις, ή ακόμα και ξύλο το οποίο εμφανίζει μεγάλη αντοχή και μικρή κόπωση. Τέλος, σε μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται, το εποξικό υλικό ενισχυμένο με υαλόνημα καθώς και ανθρακονήματα, ενώ χρησιμοποιείται η τεχνολογία ελίκων των αεροσκαφών. [11] [22]

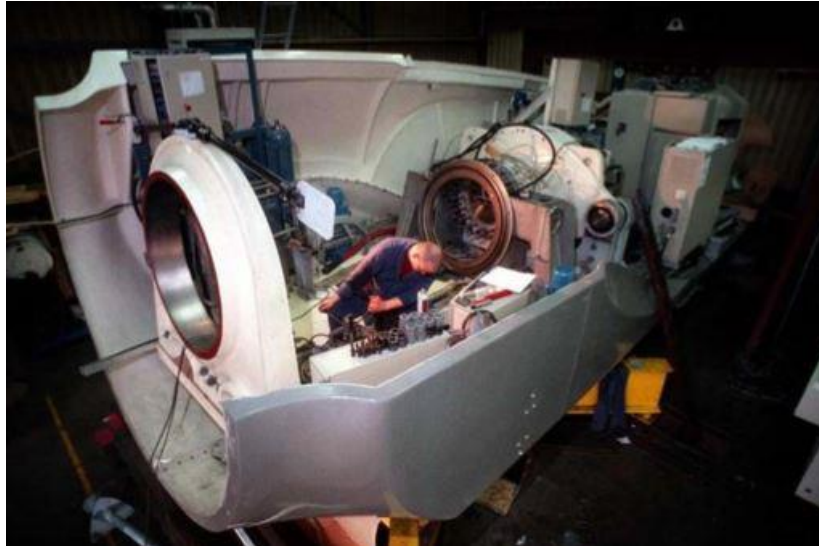


Εικόνα 39: Πτερύγια ανεμογεννήτριας-προετοιμασία πριν την τοποθέτηση [Πηγή: Καλαντζής, 2008]

² Πλήμνη είναι ένα μηχανικό εξάρτημα πάνω στο οποίο προσδένονται τα πτερύγια.

2.3.1.3 Άτρακτος(Nacelle)

Η άτρακτος βρίσκεται στην κορυφή του πύργου και περιέχει όλα τα βασικά στοιχεία που συμβάλλουν στην λειτουργία της ανεμογεννήτριας, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων ή πολλαπλασιαστής στροφών, το σύστημα περιστροφής και προσανατολισμού, την γεννήτρια κ.λπ. Το κέλυφος της άτρακτου(Nacelle) είναι συνήθως κατασκευασμένο από πολυεστερικό υλικό ενισχυμένο με υαλοβάμβακα και σκοπός του είναι να προστατεύει τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 40: Συναρμολόγηση ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού άτρακτου [Πηγή: Καλαντζής, 2008]



Εικόνα 41: Άτρακτος ΑΓ της εταιρίας Vestas [Πηγή: www.greentechlead.com]



Εικόνα 42: Ατρακτος Α/Γ E-82 της εταιρίας Enercon
[Πηγή: <http://www.interwind.nl/finder/enercon-e82-23mw-germany/>]

2.3.1.4 Ηλεκτρική Γεννήτρια (Generator)

Η γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια του ρότορα σε ηλεκτρική ενέργεια και είναι τοποθετημένη στην κορυφή του πύργου. Όλες οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν επαγωγικές και σύγχρονες μηχανές που συνδέονται με ένα μετασχηματιστή για την κατάλληλη προσαρμογή της παραγόμενης τάσης στο εκάστοτε δίκτυο. Όταν οι μηχανές αυτές δε χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος κατά τη σύνδεση τους με το δίκτυο, τότε η ανεμογεννήτρια περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Αντίθετα, αν η ανεμογεννήτρια συνδυαστεί με ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος είναι δυνατή η περιστροφή με μεταβλητή ταχύτητα.[12]



Εικόνα 43: Δείγματα ηλεκτρικών γεννητριών Α/Γ
[Πηγή: <http://new.abb.com/motors-generators/generators/generators-for-wind-turbines/>]

Αυτή τη στιγμή, οι περισσότεροι και μεγαλύτεροι παραγωγοί ανεμογεννητριών στον κόσμο κατασκευάζουν μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτριες με έλεγχο γωνίας βήματος πτερυγίων. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος γεννήτριας είναι οι επαγωγικές γεννήτριες, ενώ σε πολύ μικρό ποσοστό που όμως τελευταία παρουσιάζει κάποιες τάσεις αύξησης χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμο μαγνήτη. Κυρίαρχος τύπος ανεμογεννήτριας στην αγορά ανεμογεννητριών (σε ποσοστό που ξεπερνά το 70%) είναι αυτός με επαγωγική μηχανή διπλής τροφοδοσίας (DFIG), με μεταβλητή ταχύτητα και μεταβλητό έλεγχο γωνίας κλίσης των πτερυγίων. Για ισχύς της τάξης των MW, μια ανεμογεννήτρια μπορεί να εξοπλιστεί με οποιονδήποτε τύπο τριφασικής γεννήτριας. Οι γενικές κατηγορίες γεννητριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ανεμογεννήτριες είναι οι εξής [13]:

- **Σύγχρονες γεννήτριες**
 1. Σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμο μαγνήτη (PMSG)
 2. Σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG)
- **Ασύγχρονες ή επαγωγικές γεννήτριες**
 3. Επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG)
 4. Επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG)
 5. Επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (OSIG)
 6. Επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα διπλής τροφοδοσίας (DFIG)

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι πολύ πιο ακριβή και μηχανολογικά πολύ πιο πολύπλοκη από μια επαγωγική γεννήτρια ανάλογου μεγέθους. Το πλεονέκτημά της όμως σε σύγκριση με την ασύγχρονη γεννήτρια, είναι ότι το ρεύμα μαγνήτισης δε δημιουργείται από το κύκλωμα του στάτη. Το μαγνητικό πεδίο στις σύγχρονες γεννήτριες μπορεί να δημιουργηθεί με τη χρήση μόνιμων μαγνητών ή συμβατικών τυλιγμάτων στο δρομέα. Αν η σύγχρονη γεννήτρια έχει ένα κατάλληλο, μεγάλο αριθμό πόλων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων. Σα σύγχρονη μηχανή, είναι καταλληλότερη για έλεγχο πλήρους ισχύος, μιας και συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας αυτός αποσβένει τις διαταραχές ισχύος που οφείλονται στις ριπές ανέμου και τα μεταβατικά φαινόμενα που προέρχονται από το δίκτυο και ελέγχει τη μαγνήτιση έτσι ώστε η μηχανή να παραμένει συγχρονισμένη με τη συχνότητα του δικτύου, επιτρέποντας τη λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα στην ανεμογεννήτρια.

Οι δύο πιο συνηθισμένοι τύποι σύγχρονων γεννητριών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία των ανεμογεννητριών είναι: η σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG) και η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG). [13]

2.3.1.5 Σύστημα περιστροφής και προσανατολισμού (Yaw system)

Προκειμένου να εξαχθεί όσο το δυνατόν περισσότερη από την κινητική ενέργεια του ανέμου, ο άξονας της ανεμογεννήτριας πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένος με την διεύθυνση του ανέμου. Για τον προσανατολισμό της ανεμογεννήτριας σε παράλληλη θέση του άξονά της με την διεύθυνση του ανέμου χρησιμοποιείται συνήθως σέρβο-κινητήρας που περιστρέφει την άτρακτο της μηχανής με τη βοήθεια γραναζιών. Ο σέρβο-μηχανισμός ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη που βρίσκεται στην κορυφή της ατράκτου. Ο ρότορας προσανατολίζεται (yaw control) με δύο ηλεκτροκίνητους οδοντωτούς τροχούς προσανατολισμού που εφαρμόζουν σε μια οδοντωτή στεφάνη τοποθετημένη στην κορυφή του πύργου. Η οδόντωση της στεφάνης είναι εσωτερική ή εξωτερική και εξαρτάται από το τρόπο που τοποθετούνται τα ηλεκτρικά συγκροτήματα γραναζιών (yaw gear) που περιστρέφουν την άτρακτο. Τα ηλεκτρικά συγκροτήματα γραναζιών χρησιμοποιούνται για τον αυτόματο προσανατολισμό της ατράκτου κατά την διεύθυνση του ανέμου και συγκρατούν την άτρακτο με τα ηλεκτρικά φρένα που έχουν οι ηλεκτροκινητήρες ώστε να μην περιστραφεί. Ο κάθε ηλεκτροκινητήρας παίρνει εντολή από έναν ελεγκτή για δεξιά ή αριστερή παρέκκλιση ανάλογα με τις πληροφορίες που δέχεται για την διεύθυνση του ανέμου από τον ανεμοδείκτη. Κάθε ανεμογεννήτρια ανάλογα με το μέγεθός της διαθέτει και τον ανάλογο αριθμό ηλεκτρικών συγκροτημάτων γραναζιών. Οι ανεμογεννήτριες άνω των 2MW διαθέτουν συνήθως τέσσερα, ενώ οι μικρότερες του 1 MW έχουν συνήθως δύο. [11] [22]



Εικόνα 44: Σύστημα περιστροφής ανεμογεννήτριας [Πηγή: Καλαντζής, 2008]



Εικόνα 45: Κατόψεις συστήματος περιστροφής ανεμογεννήτριας [Πηγή: www.keywordlister.com]



Εικόνα 46: Ηλεκτροκινητήρας με γρανάτζι [Πηγή: Καλαντζής, 2008]



Εικόνα 47: Γρανάζι ηλεκτροκινητήρα στην οδοντωτή στεφάνη της ατράκτου [Πηγή: Καλατζής, 2008]

2.3.1.6 Πύργος Στήριξης (Tower)

Ο πύργος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση της ατράκτου και κατασκευάζεται από χάλυβα και η ακαμψία του είναι σημαντικός παράγοντας στην απορρόφηση των κραδασμών που δημιουργούνται από το ρότορα. Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος του πύργου τόσο μεγαλύτερα ποσά αιολικής ενέργειας μπορεί να δεσμεύσει ο ρότορας της ανεμογεννήτριας. Οι δύο κύριοι τύποι πύργων που έχουν επικρατήσει είναι ο σωληνωτός και ο δικτυωτός. Ο δικτυωτός είναι ευκολότερος στη συναρμολόγηση, ελαφρύτερος για ανάρτηση και φθηνότερος από άποψη κόστους. Ο σωληνωτός πύργος των μεγάλων ανεμογεννητριών μπορεί να γίνει θάλαμος στέγασης για όλα τα εσωτερικά όργανα της ανεμογεννήτριας και ακόμα είναι δυνατόν να περιλαμβάνει εσωτερική σκάλα ή ανελκυστήρα για την πρόσβαση στην άτρακτο που βρίσκεται στην κορυφή του. [12]



Εικόνα 48: Σωληνωτός και δικτυωτός πύργος [Πηγή: Καλαντζής, 2008]



Εικόνα 49: Συγκόλληση τμημάτων χαλύβδινου πύργου [Πηγή: Καλαντζής, 2008]

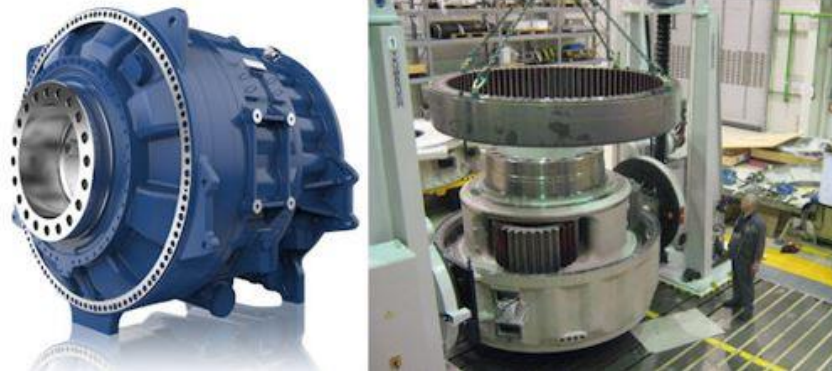
2.3.1.7 Κιβώτιο Πολλαπλασιασμού Στροφών (Gear box)

Ο πολλαπλασιαστής στροφών (gear box) έχει στόχο την προσαρμογή των στροφών του δρομέα στις στροφές της γεννήτριας. Η ενέργεια της περιστροφής του ρότορα της ανεμογεννήτριας μεταφέρεται στην γεννήτρια μέσω του άξονα χαμηλών ταχυτήτων, του κιβωτίου ταχυτήτων και του άξονα υψηλών ταχυτήτων. Ο σκοπός του κιβωτίου ταχυτήτων εν ολίγοις είναι να επιταχύνει το ρυθμό περιστροφής του ρότορα από μια χαμηλή τιμή (δεκάδες rpm) σε μια υψηλή τιμή (εκατοντάδες ή χιλιάδες rpm) που αρκούν για την οδήγηση μιας τυπικής γεννήτριας. [12] Λόγω της συνεχούς μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου ο πολλαπλασιαστής στροφών λειτουργεί συνεχώς με κρουστικά φορτία που οδηγούν σε πολύ γρήγορη φθορά του και μείωση της διάρκειας ζωής του. Το κιβώτιο ταχυτήτων επιλέγεται να έχει ονομαστική ισχύ πολύ μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της Α/Γ και ονομαστική ροπή κατά 200% μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή της αιολικής μηχανής. Υπάρχουν γενικά δύο είδη κιβωτίων:

- Κιβώτιο με παράλληλες οδοντώσεις γραναζιών (κιβώτιο παράλληλων αξόνων). Απλούστερο κατασκευαστικά και με μικρό κόστος συντήρησης.

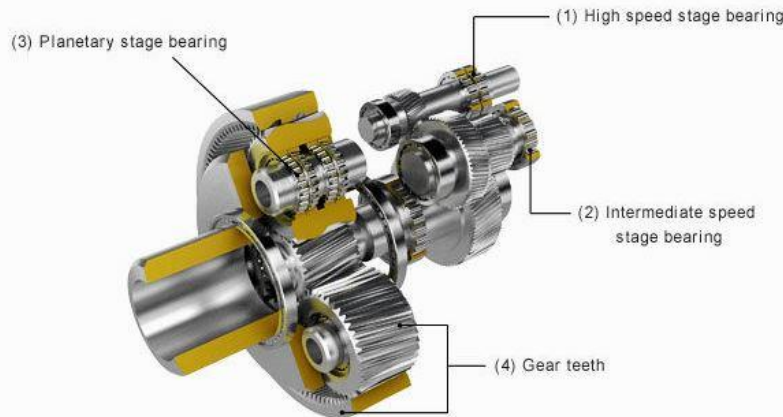
- Κιβώτιο όπου οι οδοντωτοί τροχοί έχουν ελικοειδή οδόντωση (κιβώτιο με πλανητικό σύστημα τροχών). Υψηλό κόστος αγοράς και συντήρησης, αλλά με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και χαμηλότερες στάθμες θορύβου.[22]

Αξίζει να σημειωθεί, ότι υπάρχουν Α/Γ από τις οποίες απουσιάζει το κιβώτιο ταχυτήτων, ανεμογεννήτριες Enercon. Η απουσία πολλαπλασιαστή στροφών συντελεί στην εξάλειψη των ταλαντώσεων που θα προκύπτανε από αυτόν και συνακόλουθα των αντίστοιχων παραμορφώσεων της κυματομορφής της παραγόμενης τάσης. Εξάλλου η μετάδοση ισχύος από τον ρότορα στην ηλεκτρική γεννήτρια χωρίς την παρεμβολή κιβωτίου ταχυτήτων συντελεί στην αξιοπιστία της ανεμογεννήτριας καθώς και σε υψηλό βαθμό απόδοσης της μετάδοσης. Τέλος, η απουσία πολλαπλασιαστή στροφών συντελεί στην μείωση του εκπεμπόμενου μηχανικού θορύβου από την ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 50: Κιβώτιο ταχυτήτων-ZW Wind Power

[Πηγή: <https://www.vdi-wissensforum.de/news/reliability-engineering-of-8-mw-giants-in-serial-production/>]



Εικόνα 51: Κιβώτιο ταχυτήτων [Πηγή: <https://nevadanscleanenergy.org/wind-turbine-gearbox/>]

2.3.1.8 Διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων-κύριος άξονας(Low-speed shaft)

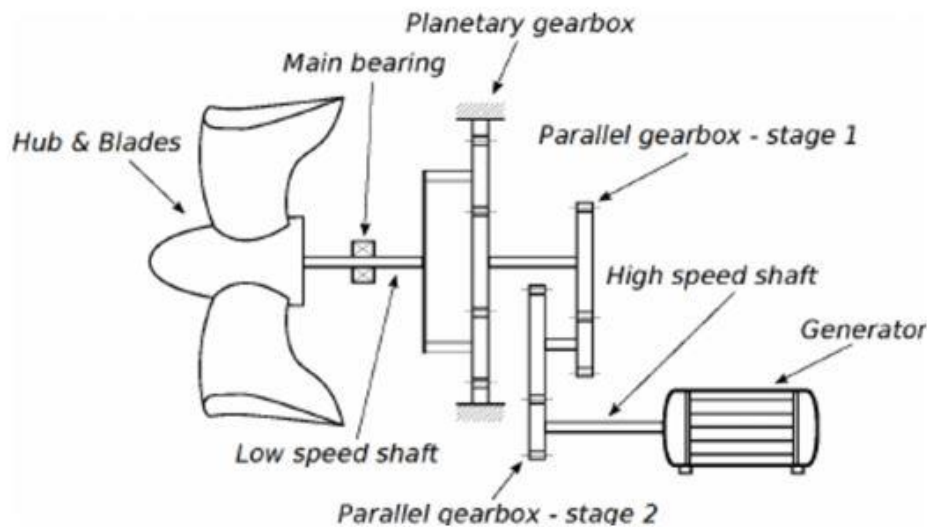
Το διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων συνδέει την πλήμνη με το κιβώτιο ταχυτήτων. Ο κύριος άξονας μεταβιβάζει τη μηχανική ισχύ του ρότορα στο κιβώτιο πολ/μου στροφών. Στο ένα άκρο του καταλήγει σε σχήμα φλάντζας μέσω της οποίας συνδέεται με την πλήμνη ενώ στο άλλο εδράζεται το κιβώτιο ταχυτήτων. Για τον περιορισμό του όγκου και βάρους της κατασκευής ο κύριος άξονας μπορεί, να συνδεθεί απευθείας στο κιβώτιο πολ/σμού στροφών χωρίς την παρεμβολή εδράνων, το κιβώτιο όμως πρέπει να είναι μεγαλύτερης ισχύος επειδή δέχεται απευθείας τα φορτία του ρότορα. Λόγω των υψηλών φορτίων ροπής, ο κύριος άξονας είναι ευπαθής σε στο ία κόπωσης. Κατά συνέπεια γι' αυτό το εξάρτημα είναι ενδεδειγμένες οι προ-συντήρησης, μη καταστρεπτικές δοκιμές. Είναι συμπαγής ή κοίλος και κατασκευάζεται από χάλυβα υψηλής αντοχής με κύριες προσμίξεις χρώμιο, νικέλιο και μολυβδαίνιο. Ο κύριος άξονας στηρίζεται και περιστρέφεται σε δυο σφαιρικά κυλινδρικά ρουλεμάν μέσω των οποίων μεταφέρονται οι ακτινικές και ωστικές δυνάμεις στην άτρακτο και από εκεί διά του πύργου στη θεμελίωση.[11]

2.3.1.9 Διαφορικό υψηλών ταχυτήτων(High-speed shaft)

Ο άξονας υψηλής ταχύτητας βρίσκεται στην έξοδο του πολλαπλασιαστή στροφών και μέσω ενός ελαστικού συνδέσμου συνδέεται με τον άξονα της ηλεκτρικής γεννήτριας. Άρα στην ουσία αποτελεί τον ρότορα της γεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής του είναι συνήθως 1500 (RPM). Πάνω του είναι προσαρτημένο ένα υδραυλικό δισκόφρενο σε περίπτωση αστοχίας των μηχανισμών ρύθμισης του βήματος του κάθε πτερυγίου ώστε να επιτευχθεί ακινητοποίηση του ρότορα. [11] [23]



Εικόνα 52: Άξονας υψηλής ταχύτητας στην έξοδο του πολλαπλασιαστή στροφών [Πηγή: Καλαντζής, 2008]



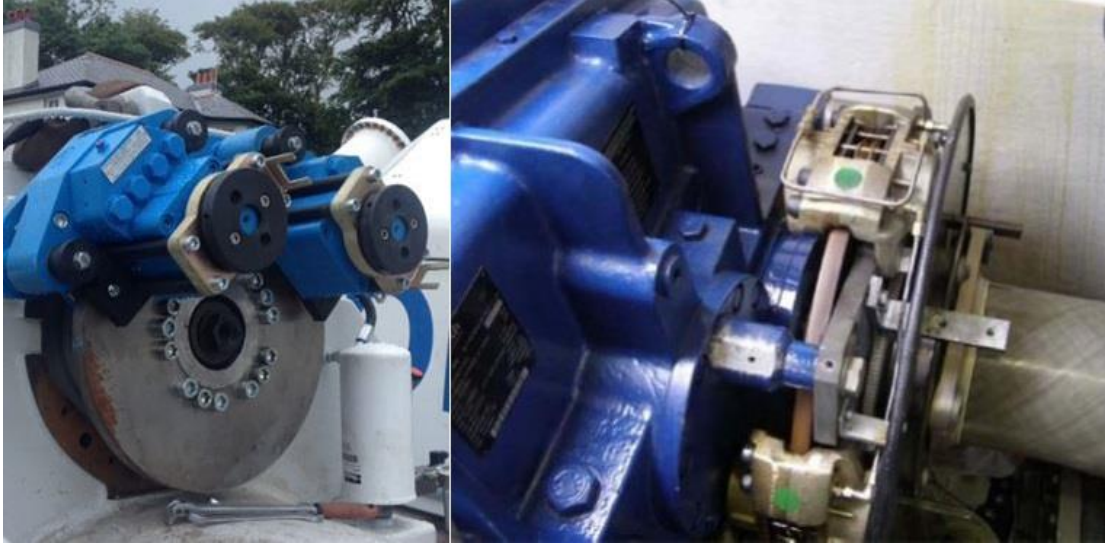
Εικόνα 53: Βασικά μηχανικά εξαρτήματα ανεμογεννητριών [Πηγή: <https://www.researchgate.net>]

2.3.1.10 Σύστημα Πέδησης(Brake)

Το σύστημα πέδησης εφαρμόζεται για προστασία της ανεμογεννήτριας στις υψηλές ταχύτητες ανέμου (άρα κίνδυνο καταστροφής της ανεμογεννήτριας), για έλεγχο ή και για εργασίες συντήρησης. Το σύστημα πέδησης είναι τοποθετημένο στην έξοδο του πολλαπλασιαστή στροφών. Μπορεί να συμπεριλαμβάνει αεροδυναμικό και μηχανικό σύστημα ασφαλείας, που συνίστανται από:

1. Μερικό έλεγχο του ανοίγματος(πετύγιο, μεταπετύγιο)
2. Μηχανικό φρένο

Το μηχανικό φρένο ενεργοποιείται ταυτόχρονα με την ταχεία ρύθμιση του βήματος των φτερών. Το υδραυλικό δισκόφρενο για να προστατεύσει τον ρότορα από υπερβολικά μεγάλες ταχύτητες σε συνθήκες υψηλού ανέμου επεμβαίνει αυτόματα στον άξονα του ρότορα και μειώνει την ταχύτητα περιστροφής του. [11] [23] [18]



Εικόνα 54: Υδραυλικό δισκόφρενο [Πηγή: <http://www.icpwind.com/>; Καλαντζής, 2008]

2.3.1.11 Αισθητήρια(Sensors)

➤ Ανιχνευτής ταλάντωσης(vibration sensor)

Ο ανιχνευτής ταλάντωσης είναι ένας αισθητήρας τοποθετημένος σε κατάλληλο σημείο της άτρακτου που αναγνωρίζει μεγάλες ταλαντώσεις αυτής και ενεργοποιεί τη διαδικασία άμεσης παύσης λειτουργίας της ανεμογεννήτριας με γρήγορη ρύθμιση της γωνίας των πτερυγίων.

➤ Συστροφή καλωδίων

Τα καλώδια ελέγχου και τροφοδοσίας είναι αναρτημένα μέσα στον πύργο και περιστρέφονται, αλλά μέχρι ένα βαθμό. Ο αριθμός περιστροφής όπως και η διεύθυνση τους ελέγχονται από έναν ηλεκτρομηχανικό διακόπτη. Αν πραγματοποιηθούν τέσσερις περιστροφές προς την ίδια κατεύθυνση, η ανεμογεννήτρια σταματάει την λειτουργία της και ξετυλίγει τα καλώδια περιστρέφοντας την άτρακτο (nacelle) αντίθετα. Αν το σήμα συστροφής καλωδίων δεν αναγνωριστεί, ο οριακός διακόπτης θα λειτουργήσει σε τέσσερις και μισό (4 1/2) περιστροφές και θα σταματήσει οποιαδήποτε περαιτέρω κίνηση σε αυτή τη διεύθυνση. Σ' αυτή την περίπτωση η ανεμογεννήτρια σταματάει τη λειτουργία της.

➤ Ανιχνευτής υπερτάχυνσης(acceleration sensor)

Αν ο δρομέας φθάσει σ' ένα συγκεκριμένο ποσοστό υπερτάχυνσης, ένας ηλεκτρομηχανικός διακόπτης υπερτάχυνσης ενεργοποιεί την διαδικασία "emergency

stop" (παύση έκτακτης λειτουργίας) με την ταχεία ρύθμιση του βήματος των πτερυγίων. Απαιτείται διάγνωση πριν την επανέναρξη της μηχανής.

➤ Ανιχνευτής υπερθέρμανσης γεννήτριας(generator over temperature)

Εάν για οποιοδήποτε λόγο η θερμοκρασία της γεννήτριας (στάτη-δρομέα) περάσει την μέγιστη τότε αυτόματα σταματάει η λειτουργία της φρενάροντας τον δρομέα. Υπάρχουν δυο ξεχωριστά αισθητήρια θερμότητας στον στάτη και στο δρομέα.

➤ Ανιχνευτής εξωτερικής θερμοκρασίας

Μετράει την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Εάν αυτή ξεπεράσει τα όρια ασφαλής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, τότε σταματάει αυτόματα η ανεμογεννήτρια, με ταχεία ρύθμιση του βήματος των πτερυγίων (900).

➤ Ανιχνευτής θερμοκρασίας ρουλεμάν

Όπως όλα τα κινούμενα μέρη εμφανίζουν δυνάμεις τριβής, έτσι και ο ρότορας της ανεμογεννήτριας εμφανίζει δυνάμεις τριβής που εμφανίζονται με την μορφή θερμότητας, η οποία ανεβάζει τα όρια θερμοκρασίας. Η λίπανση των ρουλεμάν γι' αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητη. Εφ' όσον η θερμοκρασία των ρουλεμάν (bearing) υπερβεί την ανώτατη επιτρεπτή τιμή λειτουργίας, τότε εμφανίζει σφάλμα η μηχανή και φρενάρει, μέχρις ότου πέσει η θερμοκρασία στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας. Φαινόμενα τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε υπερθέρμανση των ρουλεμάν είναι κακής ποιότητας γράσα ή απότομες και συχνές αυξομειώσεις της ταχύτητας του ανέμου (ριπές ανέμου). Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

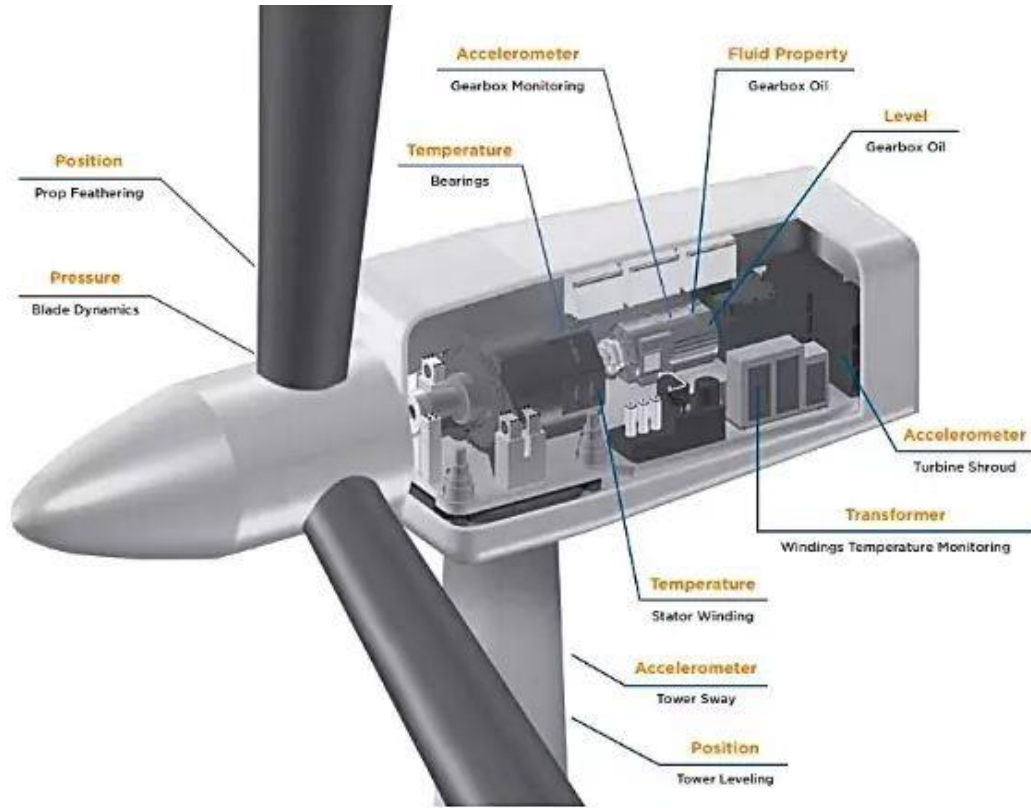
➤ Ανιχνευτής θερμοκρασίας μετασηματιστή

Οι μετασηματιστές και όλοι οι μετατροπείς ενέργειας, εμφανίζουν απώλειες οι οποίες είναι ανάλογες με την ισχύ τους. Γι' αυτό το λόγο υπάρχουν και τα μέσα ψύξης των μετασηματιστών τα οποία είναι κατά κύριο λόγο με κυκλοφορία λαδιού, που χρησιμοποιείται ταυτόχρονα και σαν μονωτικό, ή με αέρα.

➤ Ανιχνευτής θερμοκρασίας καμπινών ελέγχου

Λόγω του μετασηματιστή και των ηλεκτρονικών στοιχείων που υπάρχουν στην καμπίνα ελέγχου εκλύονται ποσά θερμότητας τα οποία ανεβάζουν την θερμοκρασία. Κατά την λειτουργία του μετατροπέα υπάρχουν σε συνεχή λειτουργία ανεμιστήρες (fan coolers) οι οποίοι κρατάνε την θερμοκρασία της καμπίνας σε ανεκτά επίπεδα. Εάν για κάποιο λόγο σταματήσει η λειτουργία ενός ανεμιστήρα τότε ανιχνεύοντας το αισθητήριο την αύξηση της θερμοκρασίας πέρα από τα ανεκτά επίπεδα σταματάει την λειτουργία του μετατροπέα.

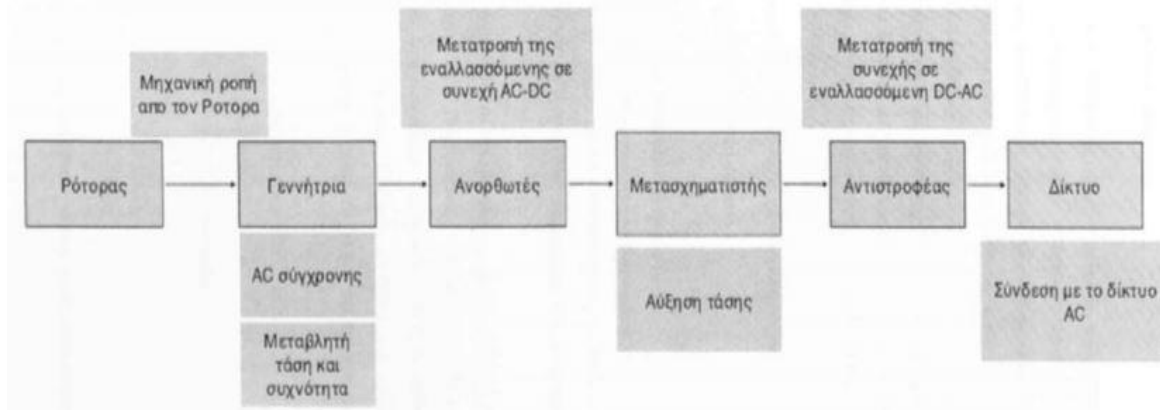
Ας σημειωθεί εδώ ότι κατασκευάστρια εταιρία με κατασκευάστρια εταιρία προφανώς διαφέρει, τα προαναφερθέντα αισθητήρια χρησιμοποιούνται κατά κόρον σχεδόν απ' όλες, σίγουρα όμως υπάρχουν κι άλλα αισθητήρια με διαφορετικές ή και ίδιες λειτουργίες.



Εικόνα 55: Απεικόνιση σημείων τοποθέτησης βασικών αισθητήριων [Πηγή: www.semanticscholar.org]

2.3.2 Ηλεκτρικό Σύστημα Ανεμογεννητριών

Η μεταβλητή τάση και η μεταβλητή συχνότητα που παράγεται κατά την κίνηση του ρότορα μετατρέπεται σε DC από ανορθωτές. Στη συνέχεια αυξάνεται με ένα μετασχηματιστή(chopper), και μέσω του αντιστροφέα μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα AC και έτσι προσαρμόζεται η τάση της ανεμογεννήτριας με την τάση του δικτύου.



Εικόνα 56: Ανάλυση του ηλεκτρικού συστήματος της ΑΓ [Πηγή: Κόλλιας; Ντούπης, 2012]

2.3.2.1 Σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο

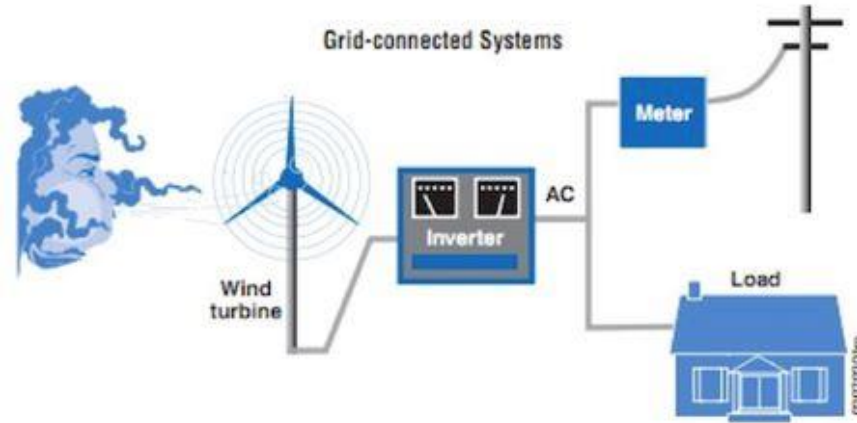
Η επιλογή του τρόπου σύνδεσης ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μια ανεμογεννήτρια στο δίκτυο αποτελεί αντικείμενο τεχνικοοικονομικής εξέτασης, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος κεφαλαίου των έργων ενίσχυσης και επέκτασης του δικτύου και αφετέρου τις απώλειες ενέργειας κάθε τρόπου διασύνδεσης καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, αλλά και άλλους παράγοντες (χρόνος και δυνατότητα κατασκευής των έργων, χρηματοδότηση τους κλπ.). Στον ακόλουθο πίνακα δίνεται, ενδεικτικά και μόνο, ο πιθανός (ή προτιμητέος) τρόπος διασύνδεσης, ανάλογα με την ισχύ του σταθμού. [24] [18]

Ισχύς (MW)	Τρόπος Σύνδεσης στο Δίκτυο
Έως 0,1	Δίκτυο XT
Έως 4	Δίκτυο MT σε υφιστάμενη γραμμή
Έως 6	Δίκτυο MT μέσω αποκλειστικής γραμμής
Έως 20	Δίκτυο MT μέσω αποκλειστικής γραμμής διπλού κυκλώματος
Άνω των 20	Δίκτυο YT με κατασκευή ιδιαίτερου Y/Σ ανύψωσης YT/MT

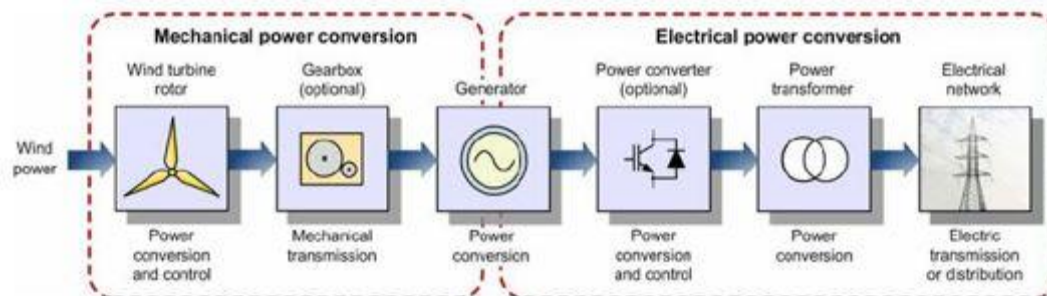
Η σύνδεση των παραγωγών στο δίκτυο μέσης τάσης (MT) ή χαμηλής τάσης (XT) έχει ως κοινό στόχο την διασφάλιση της ομαλής συνεργασίας των εγκαταστάσεων με το δίκτυο, την ασφάλεια προσώπων και εγκαταστάσεων και την εξασφάλιση αποδεκτής ποιότητας ισχύος. Βασικά κριτήρια και προϋποθέσεις που εξετάζονται προκειμένου να επιτραπεί η σύνδεση νέων εγκαταστάσεων παραγωγής είναι τα ακόλουθα:

- Επάρκεια δικτύου (γραμμών, μετασχηματιστών κλπ.)
- Συμβολή στη στάθμη βραχυκύκλωσης
- Αργές μεταβολές της τάσης (μόνιμης κατάστασης)
- Ταχείες μεταβολές της τάσης
- Εκπομπές flicker³
- Εκπομπές αρμονικών
- Διαμόρφωση των προστασιών της διασύνδεσης εγκαταστάσεων-δικτύου

³ Οι αξιοσημείωτες διακυμάνσεις ισχύος και οι παραμορφώσεις της κυματομορφής της παραγόμενης τάσης ονομάζεται flickering ή flicker effect.



Εικόνα 57: [Πηγή: www.windenergy.com]



2.3.2.2 Αποθήκευση παραγόμενης ενέργειας

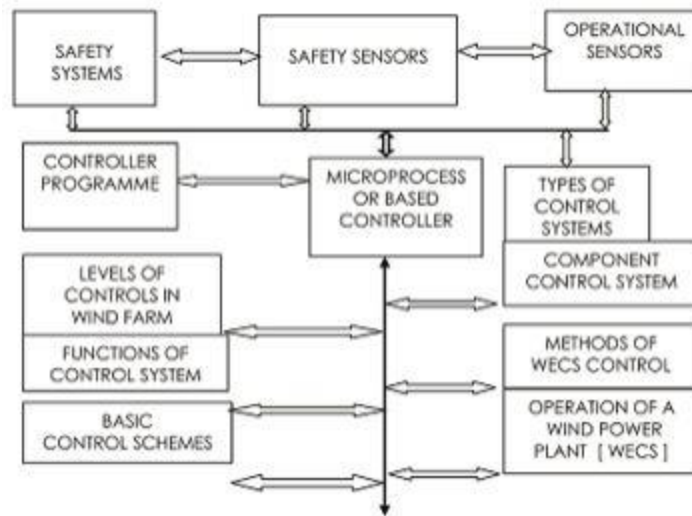
Το βασικότερο ίσως μειονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι η ασυνέχεια παραγωγής της, καθώς και η αδυναμία παραγωγής ενέργειας κατά βούληση με σκοπό την κάλυψη της στιγμιαίας ζήτησης. Το γεγονός αυτό δημιουργεί την ανάγκη αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας, ώστε να καλυφθούν οι ενεργειακές μας ανάγκες σε περιόδους άπνοιας ή σε μία προσπάθεια καλύτερης προσαρμογής της ενεργειακής ζήτησης και προσφοράς. Βέβαια η χρήση συστημάτων αποθήκευσης αυξάνει σημαντικά το κόστος αρχικής εγκατάστασης, ενώ προσθέτει και επιπλέον απώλειες μετατροπής.

Ουσιαστική αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας μπορεί να προκύψει με την εγκατάσταση αποθήκευσης ενέργειας, ώστε η ενέργεια που δύναται να παραχθεί από τις Α/Γ, αλλά δεν μπορεί να απορροφηθεί από το σύστημα, να αποθηκεύεται αντί να απορρίπτεται. Η ενέργεια αυτή ακολούθως ανακτάται σε ώρες όπου η αιολική παραγωγή υπολείπεται της δυνατότητας απορρόφησης. Οι πλέον ώριμες, σήμερα, τεχνολογίες αποθήκευσης (κύκλος AC - AC) με αξιόλογες εφαρμογές στα ηλεκτρικά δίκτυα και με γνωστό κόστος είναι:

- οι αντλητικοί/υδροηλεκτρικοί σταθμοί ή αναστρέψιμοι ΥΗΣ (μηχανική αποθήκευση, στατική),
- συστοιχίες συσσωρευτών,
- συστήματα παραγωγής υδρογόνου,

- υδραυλο - πνευματική αποθήκευση ενέργειας μέσω συμπίεσης αερίων (με συμπιεσμένο αέριο, άζωτο σε υδραυλο-πνευματικούς συσσωρευτές),
- αποθήκευση ενέργειας σε σφόνδυλο
- υβριδικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (συνδυασμός των παραπάνω μέσων).

2.3.3 Σύστημα Ελέγχου



Εικόνα 58: Μπλοκ διάγραμμα συστήματος ελέγχου

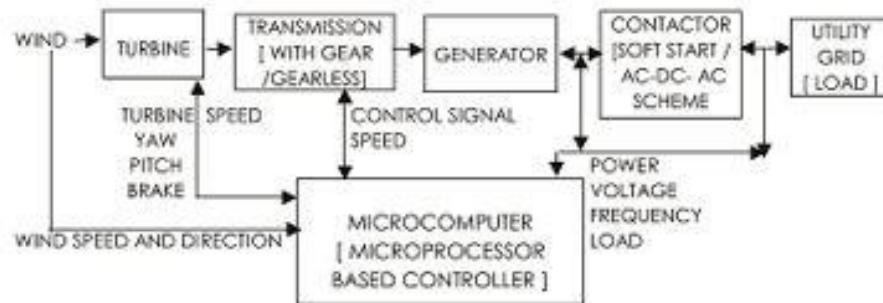
[Πηγή: <http://www.electricalindia.in/blog/post/id/6230/grid-connected--wind-energy-control-system/>]

Το σύστημα ελέγχου συνίσταται από πλήθος τοποθετημένων μικροελεγκτών στην ανεμογεννήτρια. Οι πολλαπλοί μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται για καθολική παρακολούθηση και έλεγχο του συστήματος (ρύθμιση ισχύος και βήματος, εφαρμογή πέδησης στον κύριο άξονα και στο σύστημα προσανεμισμού κ.α.). Το σύστημα ελέγχου είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργεί σε ιδιαίτερα αντίξοες συνθήκες (ενδεικτικά σε: θερμοκρασίες -25ο έως +70οC, υγρασία 0% έως 100%). Υπάρχει μια κύρια μονάδα επεξεργασίας η οποία επικοινωνεί, μέσω οπτικής ίνας, με τους μικροελεγκτές στα διάφορα υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας. Οι κύριοι μικροελεγκτές είναι συνήθως τρεις(3):

- *Ground controller*, ο οποίος βρίσκεται στη βάση του πύργου και ελέγχει τους κύριους διακόπτες. Από αυτόν ένας χειριστής μπορεί να λειτουργήσει την ανεμογεννήτρια και να δει όλα τα στοιχεία της (σφάλματα, προειδοποιήσεις, σήματα αισθητήρων, κατάσταση κύριων και βοηθητικών συστατικών).
- *Converter controller*, ο οποίος βρίσκεται στην άτρακτο και φροντίζει την παρέμβαση και διακοπή της γεννήτριας, τη μέτρηση του ρεύματος, της τάσης και τον έλεγχο του μετατροπέα.
- *Top controller*, ο οποίος συλλέγει σήματα εισόδου/εξόδου (input/output), σήματα εισόδου προερχόμενα από τα αισθητήρια, εξόδου προερχόμενα από απεσταλμένα σήματα προς τους ενεργοποιητές. Βρίσκεται στην άτρακτο και φροντίζει τη

λειτουργία της μηχανής π.χ. θερμοκρασίες (λαδιού στο κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, ρουλεμάν, εσωτερική της ατράκτου, εξωτερική του περιβάλλοντος), την περιστροφική ταχύτητα του ρότορα (άξονας χαμηλής ταχύτητας), την υδραυλική πίεση(εφόσον γίνεται χρήση υδραυλικού συστήματος), την γωνία περιστροφής των πτερυγίων, την γωνία περιστροφής της ατράκτου, την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου, το μέγεθος και τη συχνότητα των ταλαντώσεων της ατράκτου και των πτερυγίων, τον αριθμό συστροφής των καλωδίων, εάν η πόρτα εισόδου στον πύργο είναι ανοιχτή ή κλειστή (σύστημα συναγερμού). Οι περισσότερες λειτουργίες του εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο(real-time).

Ουσιαστικά, ο ρόλος του συστήματος ελέγχου είναι η συλλογή και καταγραφή στατιστικών πληροφοριών βάση των οποίων γίνονται αναλύσεις απόδοσης και διαγνώσεις σφαλμάτων.



Εικόνα 59: Μπλοκ διάγραμμα συστήματος μετατροπής αιολικής ενέργειας

[Πηγή: <http://www.electricalindia.in/blog/post/id/6230/grid-connected--wind-energy-control-system/>]

2.4 Ανάλυση Συστήματος & Διαδικασίας Πέδησης Ανεμογεννητριών

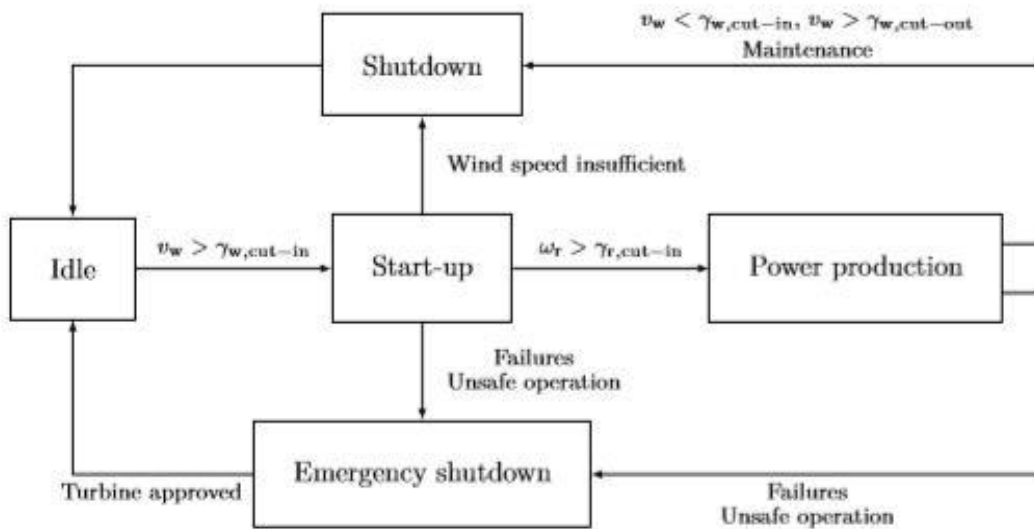
▲ Ανάλυση Συστήματος Πέδησης:

Βασίζόμενοι στο κεφάλαιο 2.3.3 και στην βιβλιογραφική ανασκόπηση [25] μπορούμε να πούμε ότι η γενική λειτουργία των ανεμογεννητριών ελέγχεται από έναν «κύριο» ελεγκτή ο οποίος δέχεται και αποστέλλει σήματα σε «δευτερεύοντες» ελεγκτές οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε στρατηγικά σημεία ελέγχου της ανεμογεννήτριας διασφαλίζοντας την ομαλή και ασφαλή λειτουργία της. Οι δευτερεύοντες ελεγκτές, λειτουργούν ως ελεγκτές επαλήθευσης(ή ενεργοποιητές/actuators), ελέγχουν τη γενική λειτουργία της ανεμογεννήτριας με βάση τις συνθήκες του ανέμου. Η γενική λειτουργία μπορεί τυπικά να λάβει το ακόλουθο σύνολο καταστάσεων :

- *Αδράνεια* (idle)
- *Εκκίνηση* (start-up)
- *Παραγωγή ισχύος* (power production)

- Τερματισμός λειτουργίας (shutdown)
- Έκτακτη διακοπή (emergency shutdown)

Οι καταστάσεις αδράνειας και παραγωγής ισχύος είναι στατικές, ενώ οι υπόλοιπες καταστάσεις είναι μεταβάσεις μεταξύ των στατικών καταστάσεων. Οι μεταβολές μεταξύ αυτών των γενικών καταστάσεων λειτουργίας βασίζονται πρωτίστως στις μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου. Η δομή της γενικής λειτουργίας με τις μεταβάσεις μεταξύ καταστάσεων απεικονίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα(εικόνα 60) :



Εικόνα 60: Διάγραμμα γενικής λειτουργίας καταστάσεων τυπικής ανεμογεννήτριας [Πηγή: Pedersen; Steiniche, 2012]

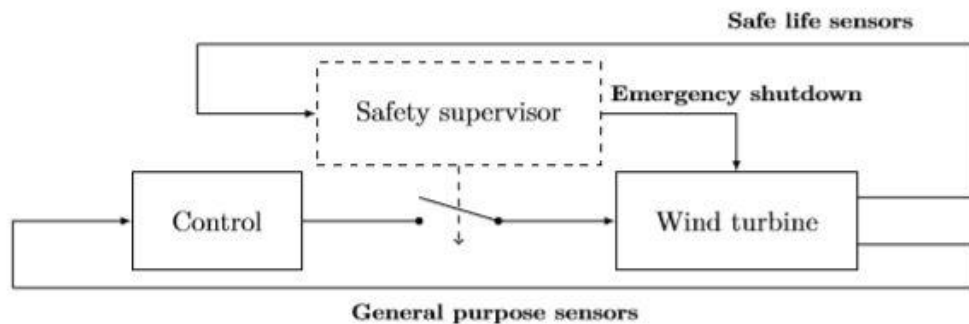
Η μετάβαση μεταξύ της κατάστασης παραγωγής ισχύος και της κατάστασης έκτακτης διακοπής είναι το επίκεντρο αυτής της εργασίας.

Όταν η ταχύτητα ανέμου u_w δεν είναι επαρκής για την παραγωγή ισχύος, η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε αδρανή κατάσταση ($u_w < u_{w,cut-in}$). Σε αδρανή κατάσταση βρίσκεται και στην περίπτωση που η ταχύτητα ανέμου u_w είναι μεγαλύτερη από την προκαθορισμένη μέγιστη ταχύτητα που έχει ορίσει ο εκάστοτε κατασκευαστής και έχει εφαρμοστεί το μηχανικό φρένο ($u_w > u_{w,cut-out}$), μετά από την κατάσταση έκτακτης διακοπής δηλαδή.

Όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί την ταχύτητα έναρξης ($u_w > u_{w,cut-in}$ ή V_{cut-in}), ο ελεγκτής θέτει σε κατάσταση εκκίνησης την ανεμογεννήτρια. Σε αυτή την κατάσταση, ο δρομέας επιταχύνεται. Αν η ταχύτητα του ανέμου είναι επαρκής, ο ρότορας φτάνει την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής $u_{w,cut-in}$ (V_{rated}). Αφότου, ο ρότορας φτάσει την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής, η γεννήτρια περνάει σε κατάσταση παραγωγής ισχύος και αρχίζει να παράγει ενέργεια. Εάν δεν είναι δυνατή η επίτευξη της ταχύτητας του περιστρεφόμενου δρομέα, ο ελεγκτής ενεργοποιεί το κλείσιμο του δρομέα, επαναφέροντάς το στην κατάσταση αδράνειας. Στην κατάσταση παραγωγής ισχύος ο στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή ενέργειας.

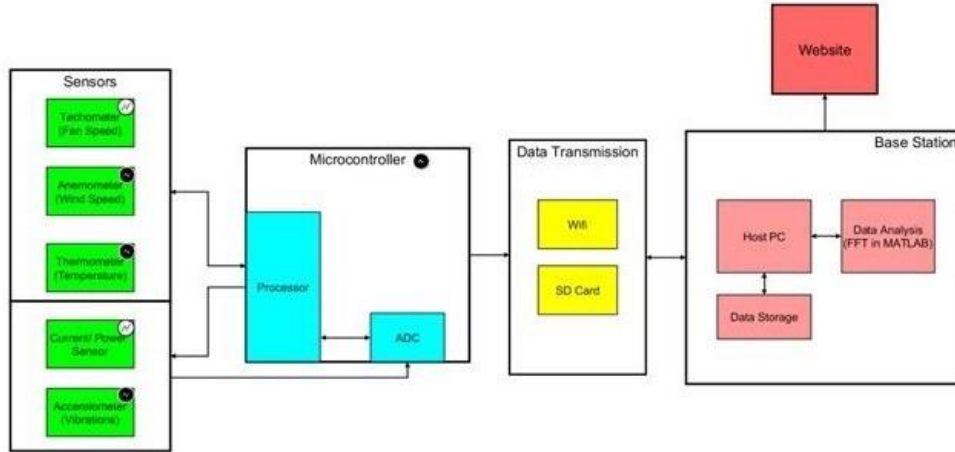
Εάν παρουσιαστεί σφάλμα ή η ανεμογεννήτρια εκτεθεί σε κίνδυνο (όπως υψηλές ριπές ανέμου), η έκτακτη διακοπή ενεργοποιείται. Η διαδικασία και η στρατηγική που ακολουθείται για την έκτακτη διακοπή μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από το εκάστοτε μοντέλο. Όταν η ανεμογεννήτρια έχει εισέλθει στην κατάσταση έκτακτης διακοπής, κατά κόρον, απαιτείται να παραμείνει σε αυτή την κατάσταση, μέχρι να εγκριθεί από πιστοποιημένο τεχνικό. Κατά συνέπεια, η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να επανέλθει αυτόματα στην κατάσταση αδράνειας. Το τμήμα του ελεγκτή που παρακολουθεί την ασφάλεια της ανεμογεννήτριας και ενεργοποιεί τη διαδικασία έκτακτης ανάγκης που ακολουθείται, αναφέρεται ως «εποπτικό σύστημα»(safety supervisor).

Το εποπτικό σύστημα, χρησιμοποιεί αισθητήρια ασφαλείας(safe life sensors) εκ των οποίων λαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες και καθορίζει την ασφαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Όταν εντοπιστεί σφάλμα, το εποπτικό σύστημα παρακάμπτει τα λειτουργικά συστήματα ελέγχου και ξεκινά τη διαδικασία απενεργοποίησης έκτακτης ανάγκης. Η παράκαμψη του λειτουργικού συστήματος ελέγχου και η λειτουργία της έκτακτης διακοπής απεικονίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 61).



Εικόνα 61: Διάγραμμα παράκαμψης λειτουργικού συστήματος ελέγχου & λειτουργίας έκτακτης ανάγκης
[Πηγή: Pedersen; Steiniche, 2012]

Το ακόλουθο μπλοκ διάγραμμα απεικονίζει τη γενική ροή πληροφοριών και ελέγχου στα διάφορα επίπεδα λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.



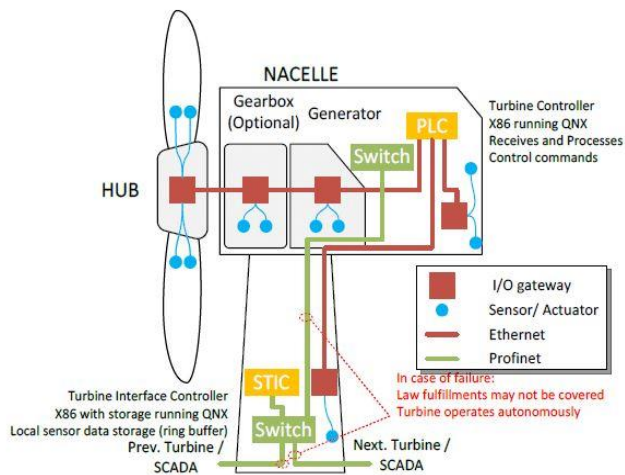
Εικόνα 62: Γενική ροή πληροφοριών και ελέγχου [Πηγή: <https://windturbinecms.soe.ucsc.edu/node/17>]

Τέρμα αριστερά(πράσινο χρώμα) αποτελείται από τα **βασικά αισθητήρια** [26]:

- Μετεωρολογικών μετρήσεων (ταχύμετρο, ανεμόμετρο, θερμόμετρο)
- Μετρήσεων γωνιών/μοιρών/στροφών (ταχύτητα ρότορα, γωνία συστήματος προσανατολισμού, γωνία και ταχύτητα συστήματος περιστροφής περυγίων)
- Ηλεκτρικών μετρήσεων (ισχύς-τάση-ρεύμα γεννήτριας, μετασχηματιστές κ.α.)
- Μηχανικών μετρήσεων (θερμοκρασία, στιβαρότητα, επιτάχυνση δρομέα κ.α.)

που μεταβιβάζουν πληροφορία στον ελεγκτή (microcontroller). Τα δεδομένα τα οποία συλλέγονται από τα αισθητήρια μπορούν να μεταφερθούν στον «κύριο υπολογιστή»(host-pc) μέσω δύο μεθόδων. Πρώτη μέθοδος η ασύρματη αποστολή(Wifi) , δεύτερη μέθοδος η αποθήκευση και κατόπιν αποστολή από κάρτα μνήμης(SD card) που βρίσκεται τοποθετημένη σε κάποιο σημείο της ανεμογεννήτριας, ανάλογα τον κατασκευαστή.

Σχηματικά προκύπτει :



Εικόνα 63: Σημεία τοποθέτησης βασικών αισθητήριών & βασικών ενεργοποιητών [Πηγή: www.researchgate.net]

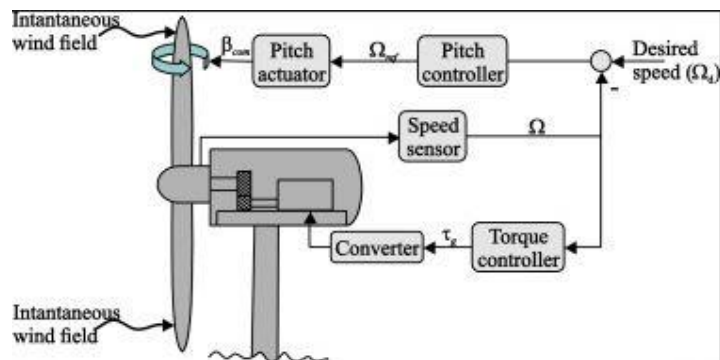
Εκτός από τα αισθητήρια, εξίσου σημαντικοί για την λειτουργία της ανεμογεννήτριας είναι και οι ενεργοποιητές(actuators). Οι **τέσσερις βασικοί ενεργοποιητές** μιας τυπικής ανεμογεννήτριας βρίσκονται τοποθετημένοι [26]:

1. **Στο σύστημα ρύθμισης βήματος/γωνίας πτερυγίων(blade pitch)**

Το σύστημα βήματος/γωνίας πτερυγίων είναι μια μηχανική, ηλεκτρική ή υδραυλική συσκευή που ενεργεί στη βάση του πτερυγίου(στο σημείο όπου συνδέεται με τον ρότορα) για να το περιστρέφει προς τις δύο κατευθύνσεις (αριστερόστροφα, δεξιόστροφα). Ο ρόλος του συστήματος ρύθμισης βήματος/γωνίας είναι κρίσιμος για την απόδοση της γεννήτριας όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 1.5, αλλά και για την ασφάλεια της ανεμογεννήτριας στο σύνολό της, αφού αποτελεί τον πρώτο και κύριο τρόπο πέδησης(αεροδυναμική πέδηση), γι' αυτό αποκαλείται και κύριος ενεργοποιητής. Μια λανθασμένη λειτουργία ή ρύθμιση του βήματος μπορεί να προκαλέσει σημαντικές και μη αναστρέψιμες καταστροφές. Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων, στις μεγάλες και σύγχρονες ανεμογεννήτριες, πλέον εφαρμόζεται αυτόνομο και ανεξάρτητο σύστημα ρύθμισης βήματος σε κάθε πτερύγιο. Ο ηλεκτρονικός ελεγκτής ελέγχει την έξοδο κάθε πτερυγίου αρκετές φορές το δευτερόλεπτο. Έτσι, σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος ή εμφάνισης οποιασδήποτε δυσλειτουργίας κάποιου πτερυγίου, τα υπόλοιπα, «λειτουργικά», πτερύγια θέτονται αυτόματα σε ασφαλή θέση (ή αλλιώς εφεδρεία) και η ανεμογεννήτρια σταματά εξασφαλίζοντας έτσι την ασφάλεια ολόκληρης της ανεμογεννήτριας. Για την αυτόνομη λειτουργία των πτερυγίων σε περιπτώσεις απώλειας δικτύου, απαιτείται μία μονάδα αποθηκευμένης/συσσωρευμένης ενέργειας(π.χ. μπαταρία).



Εικόνα 64: Αριστερά υδραυλικό - δεξιά ηλεκτρικό σύστημα ρύθμισης βήματος
[Πηγή: www.ifm.com & M. Karimirad, 2014]



Εικόνα 65: Βρόγχος ανάδρασης ελέγχου ρύθμισης βήματος [Πηγή: www.researchgate.net]

2. Στο σύστημα προσανεμισμού ή περιστροφής (yaw system)

Το σύστημα προσανεμισμού είναι υπεύθυνο για την περιστροφή της ατράκτου όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 2.3.1.5. Είναι εξίσου σημαντικό με το σύστημα ρύθμισης βήματος διότι εξασφαλίζει και αυτό με την σειρά του την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος (ειδικά σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου) αλλά πρωτίστως την ασφαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

3. Στο μηχανικό σύστημα πέδησης (rotor brake)

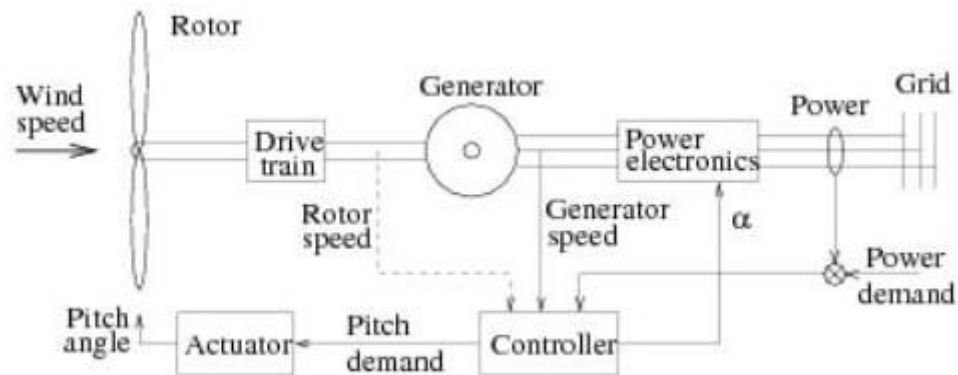
Το μηχανικό σύστημα πέδησης είναι τοποθετημένο στον άξονα/διαφορικό υψηλών ή χαμηλών ταχυτήτων του κιβωτίου πολλαπλασιασμού στροφών. Προτιμάται ο άξονας υψηλών ταχυτήτων διότι η ροπή που χρειάζεται να εφαρμοστεί εκεί για την πέδηση είναι πολύ μικρότερη από την ροπή που χρειάζεται να εφαρμοστεί στον άξονα χαμηλών στροφών, αποτρέποντας έτσι τις κατά συνέπεια «στρεσογόνες» καταστάσεις που μπορούν να επιφέρουν σημαντικές ζημιές σε ολόκληρο το ηλεκτρομηχανικό σύστημα. Αποτελείται συνήθως από μία συσκευή, δισκόφρενο, που χρειάζεται υδραυλική πίεση για να ενεργοποιηθεί. Η απαιτούμενη υδραυλική πίεση παρέχεται από το υδραυλικό σύστημα το οποίο αποτελείται κατά κόρον από μία μονάδα ισχύος, βρίσκεται τοποθετημένο μέσα στην άτρακτο και είναι εξοπλισμένο με μία αντλία η οποία είναι υπεύθυνη για την μεταφορά/διακίνηση του λαδιού μέσω των σωλήνων στα υδραυλικά έμβολα.



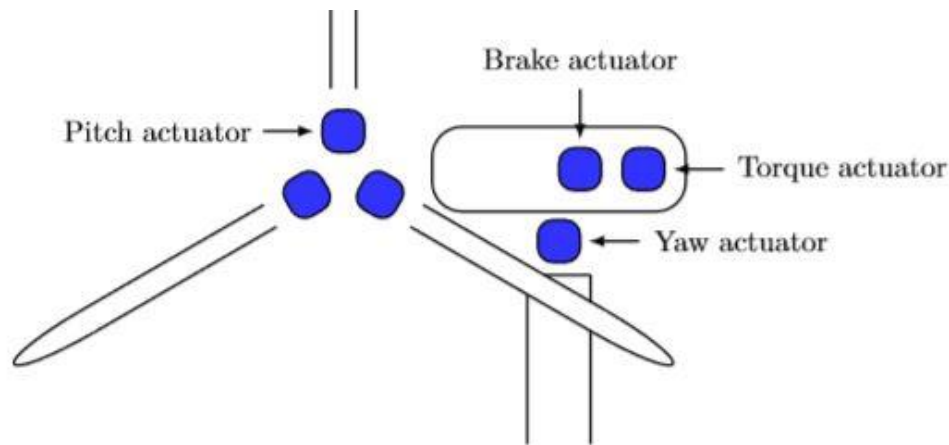
Εικόνα 66: Αριστερά υδραυλικό σύστημα - δεξιά δισκόφρενο [Πηγή: Πατης, 2010 & www.windpowerengineering.com]

4. Στον άξονα της γεννήτριας (generator torque)

Η ροπή του ενεργοποιητή είναι μια αριθμητική έκφραση της ποσότητας της ροπής όπου δύναται να παράγει ένας ενεργοποιητής. Ως γνωστόν, η ροπή είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να καθορίσει την έκταση στην οποία μια κινητήρια ενέργεια αναστρέφει ένα αντικείμενο γύρω από τον άξονά του ή ένα σημείο. Κατά αντιστοιχία, η ροπή της γεννήτριας αφορά την κινητήρια ενέργεια η οποία προκαλεί επιτάχυνση στον άξονα με σκοπό να «ακολουθήσει» τις αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου και θεωρητικά να «κρατήσει», όσο το δυνατόν περισσότερο, τον λόγο ταχύτητας του ακροπτερυγίου λ (tip speed ratio) ίσο με τον βέλτιστο λόγο ταχύτητας του ακροπτερυγίου λ_{opt} , δηλαδή $\lambda = \lambda_{opt}$. Αυτό ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη αεροδυναμική απόδοση (C_{pmax}) (βλ Region 1 & 2 στο γράφημα 14)



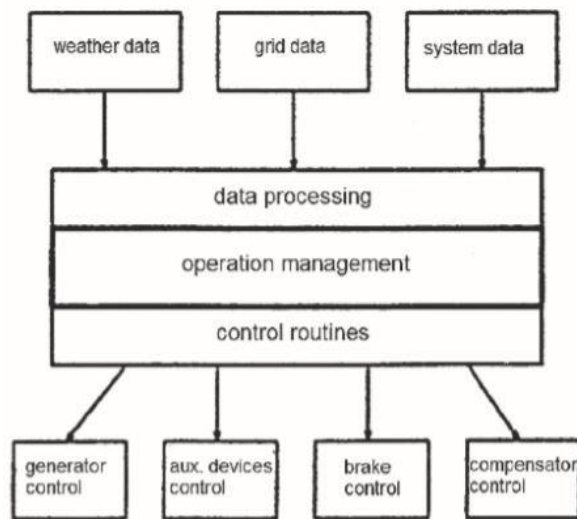
Οι ενεργοποιητές, όπως παρατηρούμε, είναι ελέγξιμοι και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο παραγωγής ισχύος αλλά και για την ασφαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 67: Σημεία τοποθέτησης βασικών ενεργοποιητών [Πηγή: Pedersen; Steiniche, 2012]

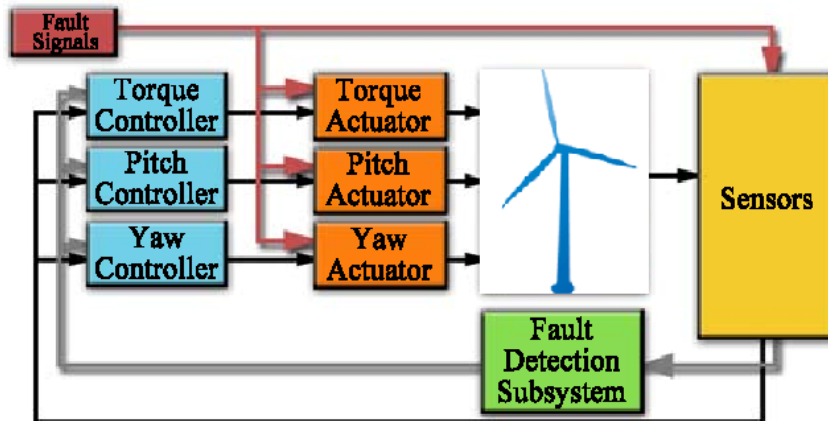
Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν την σπουδαιότητα των αισθητηρίων (sensors) και των ενεργοποιητών(actuators) για την εφαρμογή οποιουδήποτε ελέγχου. Είναι οι βασικοί πυλώνες ελέγχου όλου του συστήματος. Διότι τι χρειαζόμαστε για την αυτοματοποίηση ενός τέτοιου συστήματος;

1. Τις **πληροφορίες/δεδομένα** του περιβάλλοντος χώρου που μας παρέχουν τα αισθητήρια (θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου, διεύθυνση ανέμου κ.α.), τις πληροφορίες του συστήματος(θερμοκρασία, ταχύτητα περιστροφής πτερυγίων κ.α.) που εξίσου μας παρέχουν τα αισθητήρια. Οι στατιστικές αυτές πληροφορίες λειτουργίας συλλέγονται από τους αντίστοιχους ελεγκτές/μικροεπεξεργαστές που παρακολουθούν συνεχώς την κατάσταση της ανεμογεννήτριας. Τις πληροφορίες/δεδομένα που έχει ορίσει ως ονομαστικές τιμές λειτουργίας ο εκάστοτε κατασκευαστής (ονομαστική ταχύτητα περιστροφής, ταχύτητα αποκοπής κ.α.) και είναι αποθηκευμένες στους κατάλληλους ελεγκτές/μικροεπεξεργαστές.
2. Την **επεξεργαστική ισχύ** ώστε να επεξεργάζεται το σύστημα όλες τις πληροφορίες εισόδου/εξόδου που δέχεται από τα ανάλογα αισθητήρια/ενεργοποιητές καθώς και τις ήδη υπάρχουσες εγκατεστημένες πληροφορίες/δεδομένα λειτουργίας που έχουν ορισθεί από τον κατασκευαστή. Επεξεργαστική ισχύς υπάρχει στους ελεγκτές/μικροεπεξεργαστές για επιμέρους διεργασίες του συστήματος οι οποίοι πάντα επικοινωνούν με τον κεντρικό ελεγκτή/επεξεργαστή.
3. Τους **ενεργοποιητές** για την εκτέλεση, του προκείμενου από τον ανάλογο ελεγκτή/μικροεπεξεργαστή, ελέγχου.



Εικόνα 68: Διάγραμμα ροής πληροφοριών & ελέγχου [Πηγή: www.researchgate.net]

Αφού σχηματίστηκε μια, γενική μεν, πλήρη δε εικόνα των καταστάσεων και του συστήματος ελέγχου που ακολουθείται από μία τυπική ανεμογεννήτρια, είμαστε σε θέση να αναλύσουμε αυτές τις επιμέρους καταστάσεις επι το έργων, δηλαδή πως «αντιδρά» το σύστημα πέδησης στις μεταβαλλόμενες συνθήκες ανέμου, ώστε να εξασφαλίσει την ομαλή λειτουργία, την μέγιστη παραγωγή ισχύος αλλά πρωτίστως την ασφάλεια της ανεμογεννήτριας.

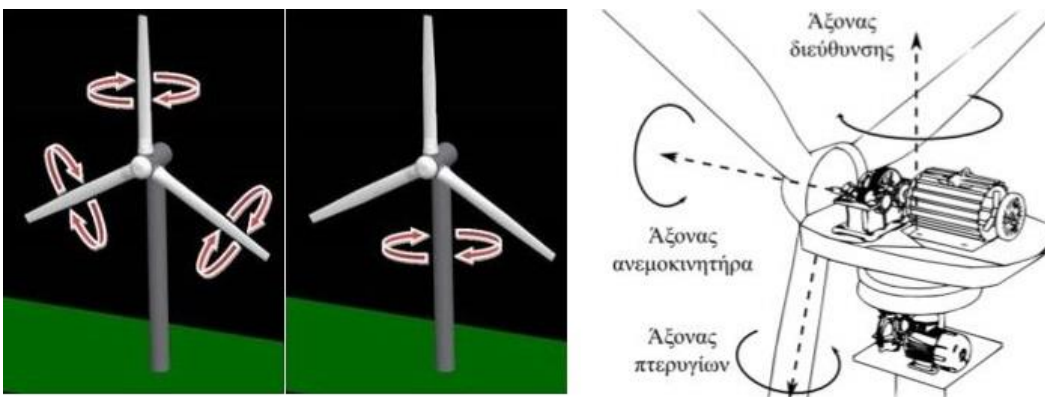


Εικόνα 69: Επισκόπηση διαγράμματος ροής πληροφοριών & ελέγχου [Πηγή: www.semanticscholar.org]

▲ Ανάλυση Διαδικασίας Πέδησης:

Για την αποφυγή ζημιών αλλά και για την αύξηση της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών σχεδιάζονται διάφορα είδη ελέγχου ισχύος. Ο μηχανικός έλεγχος ισχύος είναι ο πιο πρώιμος και εφαρμόζεται στα πτερύγια του ανεμοκινητήρα. Περιορίζει την απορροφούμενη από τον άνεμο ισχύ και τις εφαρμοζόμενες αεροδυναμικές δυνάμεις στο δρομέα σε υψηλές εντάσεις ανέμου. Εφαρμόζεται με **δύο βασικούς** τρόπους [16]:

1. Αεροδυναμικά
2. Μηχανικά
3. Άλλοι τρόποι



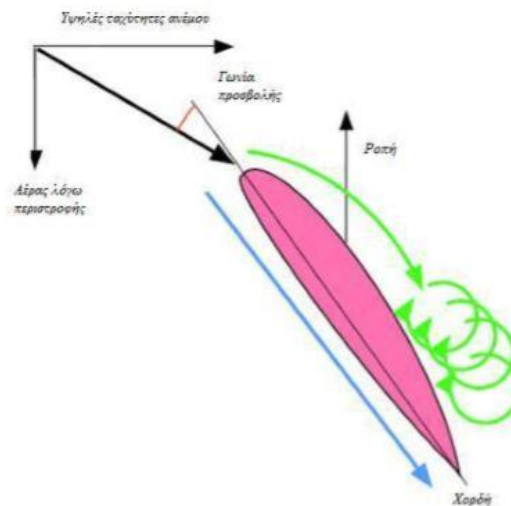
Εικόνα 70: Αριστερά, Pitch & Yaw rotation-Δεξιά, άξονες περιστροφής [Πηγή : <http://www.ni.com/white-paper/8189/en/>; Μεσεμανόλης, 2014]

Αεροδυναμικά:

Βάση του τύπου ελέγχου των πτερυγίων που χρησιμοποιούν οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε **τρεις βασικούς** [29], [27]:

- **Passive Stall-Παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης**

Ο παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης είναι ο απλούστερος τύπος μηχανικού ελέγχου ισχύος στον οποίο τα πτερύγια είναι τοποθετημένα στον άξονα της ανεμογεννήτριας σε σταθερή γωνία. Βασίζεται στο φαινόμενο stall, σύμφωνα με το οποίο η αεροδυναμική ισχύς δεν υπερβαίνει το όριο της μέγιστης ισχύος, όπως αυτό καθορίζεται από την σχεδίαση του δρομέα και της γεννήτριας στην οποία συνδέεται. Ιδανικά, η ισχύς θα έπρεπε να αυξάνεται μέχρι το όριο της μέγιστης ισχύος και στη συνέχεια να παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την αλλαγή στην ταχύτητα του ανέμου (ιδανική ρύθμιση απώλειας στήριξης). Όμως, στην πραγματικότητα οι ανεμογεννήτριες δεν παρουσιάζουν τέτοια ιδανική συμπεριφορά. Όταν έχουμε ταχύτητες ανέμου που ξεπερνούν την ονομαστική, η ισχύς δεν παραμένει σταθερή, αλλά μειώνεται λόγω του φαινομένου stall που αναφέρθηκε. Η μέγιστη ισχύς μιας ανεμογεννήτριας με χρήση του φαινομένου stall εξαρτάται από την πυκνότητα του ανέμου, τη συχνότητα του δικτύου και άλλες επιδράσεις αεροδυναμικής φύσεως.



Εικόνα 71: Γωνία απώλειας στήριξης [Πηγή: Μπάρας, 2012]

Το βασικό πλεονέκτημα της διαμόρφωσης αυτής, είναι η απλότητα, η σύνδεση των πτερυγίων σε σταθερή γωνία στην πλήρη του δρομέα και η αποφυγή κινούμενων μηχανικών μερών και άλλων σύνθετων διαδικασιών ελέγχου που σχετίζονται με τον έλεγχο της γωνίας βήματος.

Ωστόσο, στα μειονεκτήματα αυτού του ελέγχου έχουμε την απρόβλεπτη αεροδυναμική συμπεριφορά των πτερυγίων για υψηλές ταχύτητες ανέμου, εφόσον δεν υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας βήματος των πτερυγίων. Η ισχύς εξόδου μετά την εμφάνιση του φαινομένου stall παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις προκαλώντας

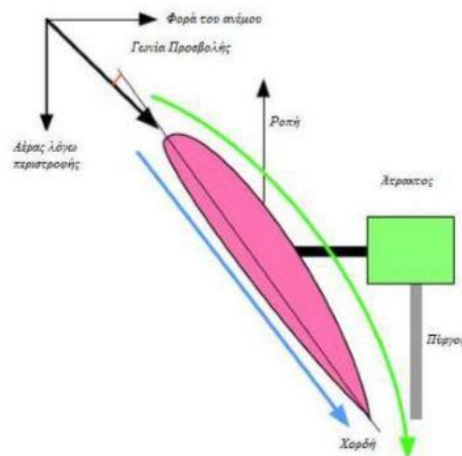
σοβαρές φορτίσεις στα πτερύγια και στον πύργο στήριξης. Επίσης, έχουμε μειωμένη απόσβεση δονήσεων των πτερυγίων, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ευαισθησία των ανεμογεννητριών σε καταπονήσεις αεροδυναμικής φύσεως.

Ο παθητικός έλεγχος χρησιμοποιείται συχνότερα σε ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας και έχει γενικά εφαρμογή σε ανεμογεννήτριες ισχύος μικρότερης του 1 MW, ενώ σε ισχύς μεγαλύτερες χρησιμοποιείται ο ενεργός έλεγχος, για τον οποίο γίνεται αναφορά παρακάτω.

- **Blade Pitch Control-Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων**

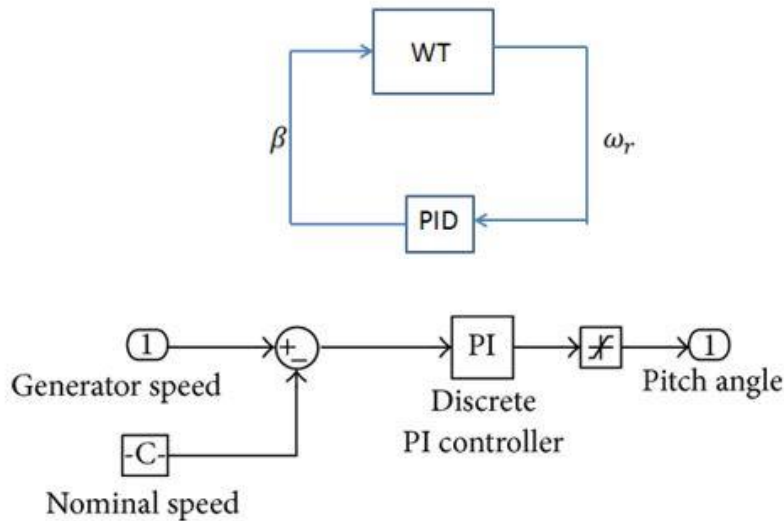
Άλλος τύπος ελέγχου, ίσως και ο πιο διαδεδομένος, είναι ο έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων (blade pitch control). Σε αυτόν το τύπο τα πτερύγια μπορούν να στραφούν είτε ενάντια, είτε προς την διεύθυνση του αέρα ανάλογα με το αν η παραγόμενη ενέργεια είναι πολύ μεγάλη ή πολύ μικρή, αντίστοιχα. Αυτό το σύστημα εξυπηρετεί δύο βασικές λειτουργίες όπως αναφέραμε και παραπάνω στους ενεργοποιητές. Η πρώτη λειτουργία είναι η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και κατά συνέπεια η ρύθμιση της ισχύος εξόδου. Η δεύτερη εξίσου σημαντική λειτουργία είναι η ακινητοποίηση του δρομέα για λόγους ασφάλειας τοποθετώντας το πτερύγιο (χορδή της πτέρυγας) παράλληλα στην ροή του ανέμου, δηλαδή 90ο. Βασικό εξάρτημα για τους παραπάνω σκοπούς είναι η περιστροφική βάση που καθιστά το πτερύγιο ικανό να περιστρέφεται ως προς τον άξονα που περνάει κάθετα από την τομή του πτερυγίου. Οπότε στα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου ελέγχου είναι ότι προσφέρει καλό έλεγχο της ισχύος, βοηθάει κατά την εκκίνηση και το σημαντικότερο, προσφέρει σχεδόν άμεση διακοπή λειτουργίας αν υπάρξει ανάγκη.

Στην περίπτωση που η διεύθυνση του ανέμου είναι διαφορετική στο κάθε ένα πτερύγιο το σύστημα δίνει τις κατάλληλες γωνίες, στο κάθε πτερύγιο ξεχωριστά, ώστε η πτερωτή να είναι δυναμικά ζυγισμένη. [16] [20] [27]

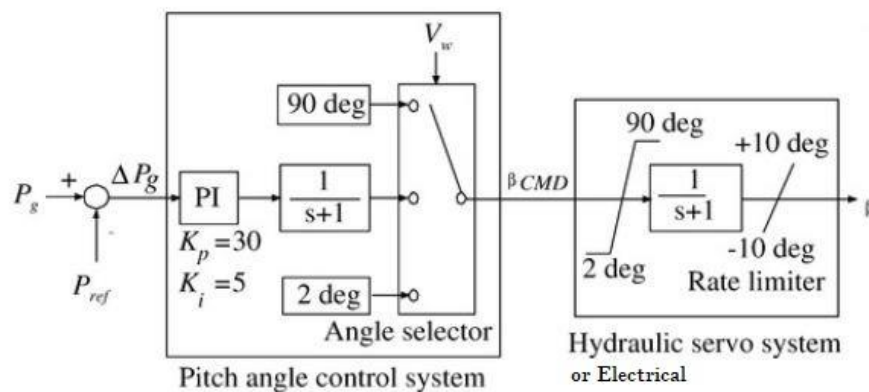


Εικόνα 72: Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίου β [Πηγή: Μπάρλας, 2012]

Αναλυτικότερα, σε αυτή την μέθοδο ελέγχου, μετράται η ισχύς στην έξοδο της ανεμογεννήτριας και συγκρίνεται με την ισχύ αναφοράς. Το σφάλμα τροφοδοτείται σε έναν αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή (PID Controller). Όπως είδαμε και στο κομμάτι των ενεργοποιητών η έξοδος του ελεγκτή χρησιμοποιείται για να οδηγήσει έναν υδραυλικό ή ηλεκτρικό ενεργοποιητή, ο οποίος μεταβάλλει κατάλληλα την κλίση των πτερυγίων ή τμήματός τους. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο συντελεστής C_p που εξαρτάται από τη γωνία κλίσης των πτερυγίων β και κατά συνέπεια η ισχύς που απομαστεύεται από τον άνεμο για ταχύτητες του ανέμου μεγαλύτερες από την ονομαστική. Ο ολοκληρωτικός όρος στον ελεγκτή εξασφαλίζει τη γρήγορη σύγκλιση και το μηδενισμό του μόνιμου σφάλματος ισχύος για μεταβολές της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας, που οφείλονται στο στροβιλισμό του αέρα, απαιτείται μεγάλη τιμή στο κέρδος του αναλογικού όρου του ελεγκτή. Για λόγους, όμως, ευστάθειας του συστήματος, η τιμή αυτού του κέρδους περιορίζεται με αποτέλεσμα την εμφάνιση διακυμάνσεων υψηλής συχνότητας στην έξοδο της ανεμογεννήτριας.

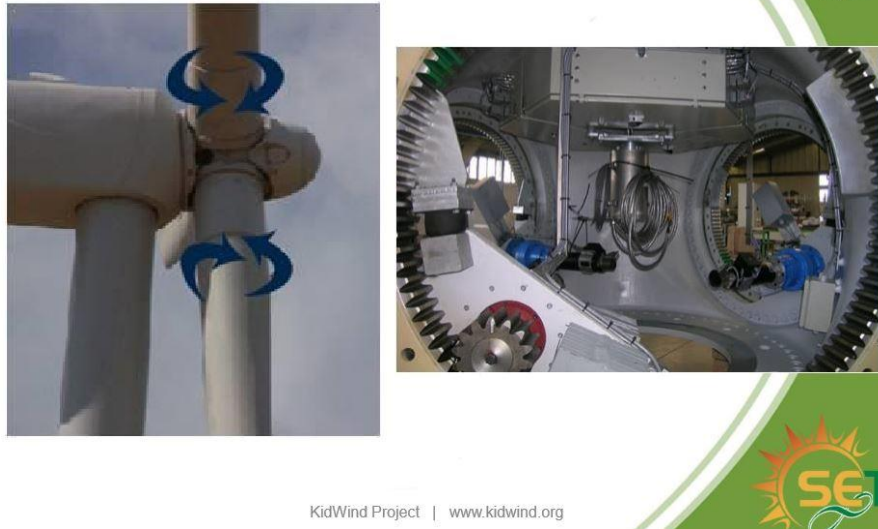


Εικόνα 73: Σύστημα ρύθμισης γωνίας βήματος με PI controller [Πηγή: www.researchgate.net]



Εικόνα 74: Σύστημα ρύθμισης γωνίας βήματος-υπόδειγμα PI controller [Πηγή: www.researchgate.net]

Pitch Control Mechanisms



KidWind Project | www.kidwind.org

Εικόνα 75: [Πηγή: Dr. Ali M. Eltamaly]

- **Active Stall-Ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης**

Ο τρίτος τρόπος μηχανικού ελέγχου είναι ο ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης (active stall). Όπως παραπέμπει και η ονομασία, η απώλεια στήριξης των πτερυγίων ελέγχεται ενεργά με περιστροφή των πτερυγίων. Σε χαμηλές ταχύτητες τα πτερύγια στρέφονται με τον ίδιο τρόπο όπως και στις ανεμογεννήτριες με έλεγχο γωνίας βήματος, προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη απόδοση. Σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου, τα πτερύγια πηγαίνουν σε μεγαλύτερη απώλεια στήριξης στρεφόμενα ελάχιστα σε αντίθετη φορά από αυτή που θα στρέφονταν αν είχαν έλεγχο γωνίας βήματος. Οι ανεμογεννήτριες με ενεργό έλεγχο απώλειας στήριξης επιτυγχάνουν πιο ομαλό περιορισμό της ενέργειας, χωρίς μεγάλες διαταραχές στην ισχύ απ' ότι στην περίπτωση του ελέγχου βήματος πτερυγίων. Αυτός ο τύπος ελέγχου έχει το πλεονέκτημα να διαχειρίζεται αυξομειώσεις στην πυκνότητα του αέρα. Ο συνδυασμός με τον μηχανισμό γωνίας βήματος κάνει πιο εύκολη τη διαχείριση καταστάσεων που χρειάζεται άμεση διακοπή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και επιπλέον βοηθά κατά την εκκίνηση. [28]

Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι επίσης δυνατό, αν και όχι συνηθισμένο, να πετύχουμε αεροδυναμικό έλεγχο κάνοντας «pitching» μόνο στα άκρα των πτερυγίων, ή με χρήση ailerons, flaps, air jets ή άλλες συσκευές που να τροποποιούν τις αεροδυναμικές ιδιότητες. Αυτές οι μέθοδοι έχουν ως αποτέλεσμα τα περισσότερα από τα πτερύγια να επιβραδύνονται σε υψηλούς ανέμους.

Μηχανικά:

Το μηχανικό φρένο χρησιμοποιείται συνήθως ως εφεδρικό σύστημα (ασφαλείας-αστοχίας) για το αεροδυναμικό σύστημα πέδησης σε περιπτώσεις ακραίων συνθηκών(π.χ. υπερτάχυνση άξονα ρότορα) και ως φρένο στάθμευσης, σε ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν παθητικό έλεγχο απώλειας στήριξης. Οι ανεμογεννήτριες με έλεγχο κλίσης βήματος σπανίως χρειάζεται να ενεργοποιήσουν το μηχανικό φρένο (εκτός αν πρόκειται για εργασίες συντήρησης), καθώς ο ρότορας, δύναται, περιστρέφοντας τα πτερύγια στις 90^ο ως προς το επίπεδο του δρομέα, να «πηγαίνει» σε κατάσταση αδράνειας ή σε κατάσταση έκτακτης διακοπής ανάλογα το σήμα που έχει αποσταλεί από τον εκάστοτε ελεγκτή. Το μηχανικό φρένο, κατά κόρον δισκόφρενο, αποτελείται από έναν κυκλικό δίσκο, την δισκόπλακα, και από μία διάταξη που φέρει τις δαγκάνες οι οποίες πιέζουν την δισκόπλακα μέσω υδραυλικού συστήματος. Είναι προσαρτημένο στον άξονα του ρότορα, όπως αναφέραμε πιο πάνω στο κομμάτι των βασικών ενεργοποιητών. Με την τοποθέτηση μηχανικού φρένου οι κατασκευάστριες εταιρίες επιδιώκουν να εξασφαλίσουν τη βέβαιη και αξιόπιστη πέδηση και ακινητοποίηση της ανεμογεννήτριας όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο.

Άλλοι τρόποι:

- **Yaw out of the wind-Περιστροφή άτρακτου παράλληλα στη ροή του ανέμου**

Όπως αναφέραμε και στην ενότητα 2.3.1.5 η παραγόμενη ισχύ συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με την περιοχή σάρωσης. Οπότε, είναι πολύ σημαντικό ο ρότορας να είναι κατευθειάν στον ερχόμενο αέρα. Οποιαδήποτε απόκλιση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ισχύος. Παρόλα αυτά, το σύστημα προσανεμισμού(yaw system) το οποίο περιστρέφει την άτρακτο και ως εκ τούτου τον δρομέα, με βάση τις ληφθείσες πληροφορίες από τον κεντρικό ελεγκτή, αξιοποιείται και στη διαδικασία της πέδησης. Δηλαδή, όταν οι άνεμοι είναι επικίνδυνα θυελλώδεις το σύστημα περιστρέφει την άτρακτο παράλληλα στη ροή του ανέμου, στρέφει επί της ουσίας την άτρακτο(οπότε και τον ρότορα) «έξω» από τη διεύθυνση του ανέμου. Βάση αυτών γίνεται κατανοητό ότι το σύστημα προσανεμισμού προσφέρεται ακόμα και για την ρύθμιση της ισχύος εξόδου. Στις ανάντη μηχανές η περιστροφή γίνεται με ηλεκτρικό ή υδραυλικό σύστημα, ενώ στις κατάντη μηχανές ο μηχανισμός είναι περιττός καθώς η περιστροφή γίνεται αυτόματα χάρη στο σχεδιασμό τους. [16]

Εν κατακλείδι, το σύστημα πέδησης είναι εκείνο που εξασφαλίζει στην ανεμογεννήτρια την ασφαλή λειτουργία της και τη μακροζωία της. Αφού εφαρμόζεται για την προστασία της στις υψηλές ταχύτητες, για τον έλεγχό της αλλά και για τις εργασίες συντήρησης. Το κύριο όμως μέλημα του συστήματος πέδησης είναι η σταθεροποίηση της ταχύτητας περιστροφής όταν η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε κατάσταση παραγωγής ισχύος (βλ αρχές κεφαλαίου 2.4) και η ομαλή ακινητοποίηση της ανεμογεννήτριας όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Οι τρόποι όπως είδαμε άνωθεν ποικίλουν και η χρήση τους αποτελεί «προσωπική» επιλογή των κατασκευαστριών εταιριών.

3. Σύγκριση αποδοτικότητας μεταξύ Vestas-Enercon σε φαινόμενα υψηλών ριπών ανέμου

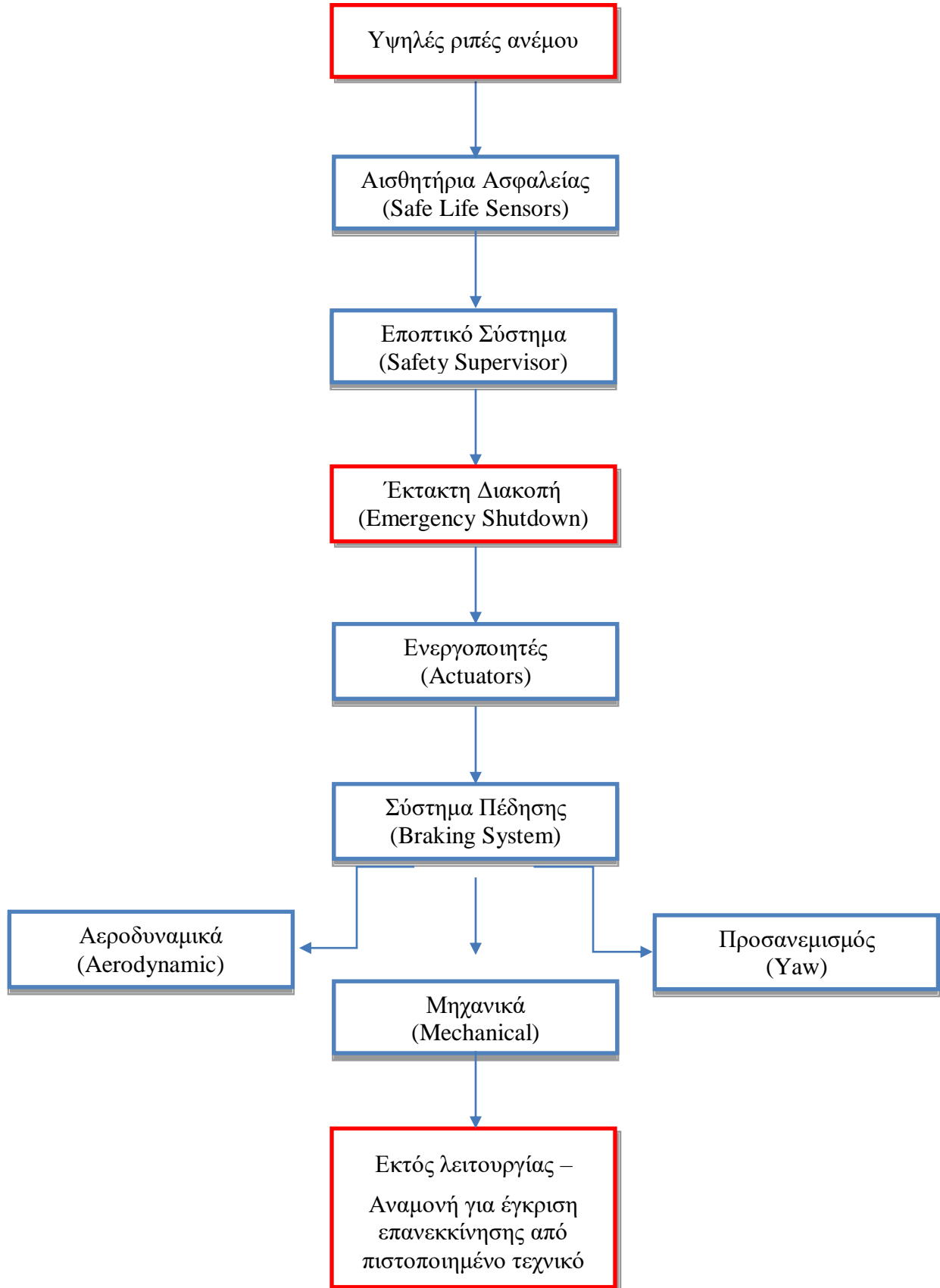
Ριπή ανέμου ορίζεται ως η ξαφνική μικρής διάρκειας (μικρότερη των 20 δευτερολέπτων) αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου μετά το πέρας της ριπής επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα. Αν οι ριπές διαρκέσουν περισσότερο από 30 δευτερόλεπτα θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη η αιολική μηχανή να τεθεί εκτός λειτουργίας.



Εικόνα 76 : Διακυμάνσεις του ανέμου - Ριπή του ανέμου

Τέτοιου είδους φυσικά φαινόμενα καθιστούν αναγκαία την ύπαρξη συστήματος προστασίας (overspeed protection) το οποίο θα ακινητοποιεί αυτόματα την ανεμογεννήτρια. Αν οι στροφές του ρότορα ξεπεράσουν τις ονομαστικές στροφές κατά 30% (διαφέρει για κάθε κατασκευαστή, συνήθως από 25 μέχρι 36) ένας ηλεκτρικός διακόπτης υπερτάχυνσης ενεργοποιεί το κύκλωμα (emergency stop) και το μηχανικό φρένο ενεργοποιείται ταυτόχρονα με την ταχεία ρύθμιση του βήματος των φτερών. Ενεργοποιείται και στην περίπτωση αστοχίας των μηχανισμών ρύθμισης του βήματος του κάθε πτερυγίου (pitch control) ώστε να επιτευχθεί και εκεί ακινητοποίηση του ρότορα.

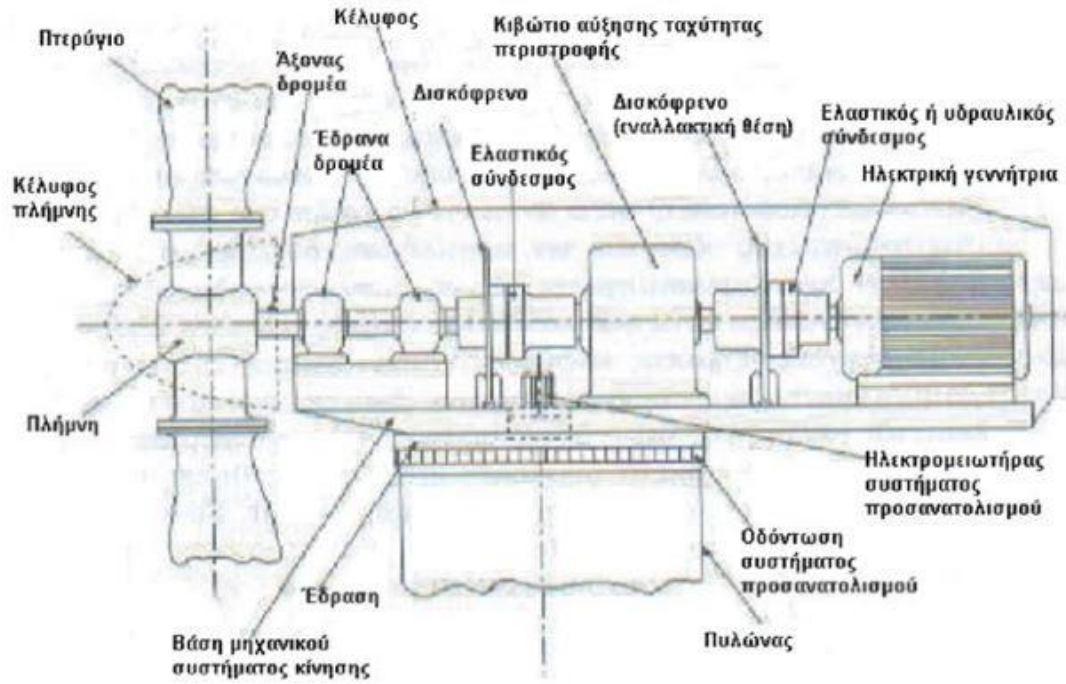
Σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση που βασίστηκε η ανάπτυξη του δευτέρου κεφαλαίου το «σενάριο» που ακολουθείται κατά την διαδικασία πέδησης περιλαμβάνει τα εξής:



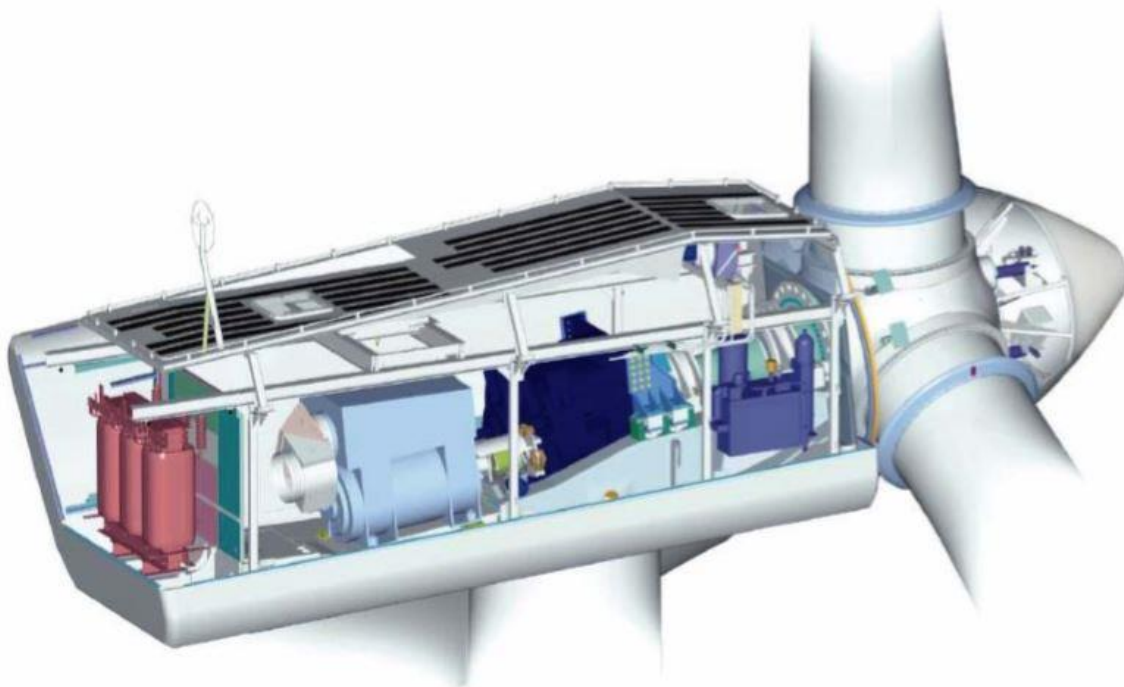
Πρακτική εφαρμογή αυτού του σεναρίου παρατηρούμε σε όλες τις μεγάλες & σύγχρονες ανεμογεννήτριες, παρακάτω παρουσιάζονται οι εταιρίες Vestas και Enercon:

Η Vestas Wind Systems A/S είναι δανέζικη εταιρία κατασκευής, πώλησης, εγκατάστασης και συντήρησης ανεμογεννητριών. Ιδρύθηκε το 1945 και μέχρι και σήμερα βρίσκεται ανάμεσα στις 5 κορυφαίες εταιρίες παγκοσμίως. [33] Στην Ελλάδα έχει εγκατασταθεί σημαντικός αριθμός ανεμογεννητριών της Vestas. Κάποια από τα μοντέλα που έχουν εγκατασταθεί στον ελλαδικό χώρο ανά τα έτη είναι V52-850kW, V80-1.8MW, V82-1.65MW, V80-2.0MW, V90- 1.8MW & 2.0MW, V90-3.0MW. Σαν εταιρία έχει αναπτύξει συστήματα με τα οποία εξοπλίζει τις ανεμογεννήτριες της έτσι ώστε να τους δώσει την ικανότητα να έχουν καλύτερη απόδοση με λιγότερες φθορές στα μηχανικά τους μέρη [1]. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται από την Vestas είναι:

- ✓ Σύστημα OptiTip: χρησιμοποιείται για την ρύθμιση του βήματος της πτερωτής της ανεμογεννήτριας με δυνατότητα ελέγχου και ρύθμισης μέσω μικροεπεξεργαστών. [31]
- ✓ Γεννήτρια OptiSpeed: πρακτικά επιτρέπει στον ρότορα της ανεμογεννήτριας να κινείται με συγκεκριμένη ταχύτητα. Η γεννήτρια OptiSpeed πρακτικά επιτρέπει στον ρότορα να κινείται με ταχύτητα από 14 έως 31 rpm λαμβάνοντας υπόψη τον ισχύων άνεμο που επικρατεί την κάθε στιγμή. Για να αυξήσουμε την έξοδο με την OptiSpeed ορίζουμε ως ταχύτητα περιστροφής του ρότορα την μεγαλύτερη τιμή της αργής και μεταβλητής περιστροφής της, αποθηκεύοντας αποτελεσματικά με αυτό το τρόπο το πλεόνασμα της ενέργειας σε μορφή περιστροφής. Με τον τρόπο αυτό η ανεμογεννήτρια εκμεταλλεύεται την πλήρη ισχύ από την ένταση της ριπής του ανέμου. [31]
- ✓ Γεννήτρια OptiSlip: επιτρέπει στον ρότορα της ανεμογεννήτριας να κινείται με ταχύτητα από 9 έως 19 rpm. Σκοπός της γεννήτριας είναι να αυξήσει τα έσοδα, η αύξηση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας αλλά και ο περιορισμός των φθορών στα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας, λόγω της χαμηλής και ελεγχόμενης περιστροφής του ρότορα.[31]
- ✓ Υδραυλική τεχνολογία Active- Stall: εξασφαλίζει στον ρότορα την συλλογή της μέγιστη ισχύ από την ένταση της ριπής του ανέμου ελαχιστοποιώντας τα καμπτικά και στρεπτικά φορτία, ελέγχοντας ταυτόχρονα την παραγωγή ενέργειας. [31]
- ✓ Σύστημα Det Norse Veritas (DNV): σύστημα το οποίο παρέχει στη ανεμογεννήτρια την ικανότητα να συντονίζει την γεννήτρια της. 30 Εκτός από τα παραπάνω συστήματα η Vestas διεξοδικά έχει τροποποιήσει την άτρακτο της βασισμένη στην εμπειρία από τα προηγούμενα μοντέλα της. Εξελίσσει επίσης και τον σχεδιασμό των πτερυγίων της τόσο στα υλικά κατασκευής όσο και στον αεροδυναμικό τους σχεδιασμό. [31]

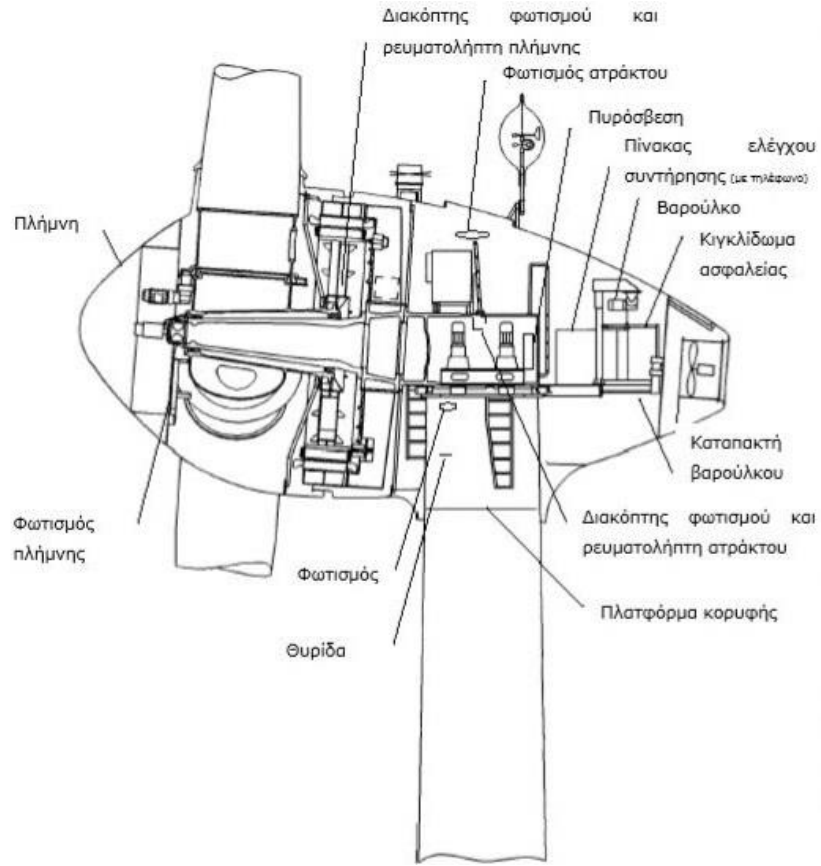


Εικόνα 77 : [Πηγή: Κουτσιουμπέλης Παναγιώτης, 2016]



Εικόνα 78 [Πηγή: Πατής, 2010]

Η Enercon GmbH είναι γερμανική εταιρία κατασκευής, πώλησης, εγκατάστασης και συντήρησης ανεμογεννητριών. Ιδρύθηκε το 1984 και ανήκει εξίσου στις 5 κυρίαρχες της αγοράς. [33] Οι επινοήσεις που έχει υλοποιήσει η Enercon κατά τη σχεδίαση ανεμογεννητριών συγκροτούν τη διαφορετική φιλοσοφία της, κατατάσσοντάς την στην τεχνολογική πρωτοπορία του τομέα. Ο κύριος στόχος κατά την ανάπτυξη και το σχεδιασμό όλων των μετατροπέων αιολικής ενέργειας της Enercon είναι η ελαχιστοποίηση των φορτίων. Βασισμένοι σε αυτό, όλα τα εξαρτήματα έχουν αναπτυχθεί και σχεδιασθεί ανάλογα. Το αποτέλεσμα είναι ανεμογεννήτριες οι οποίες διακρίνονται, μεταξύ άλλων, για τα χαμηλά φορτία καταπόνησης. Οι αιολικές μηχανές της Enercon βασίζονται στην αρχή της ανεμογεννήτριας χωρίς πολλαπλασιαστή στροφών (σασμάν), χρησιμοποιώντας τη γεννήτρια, τα περύγια, τον ηλεκτρονικό έλεγχο και το σύστημα διαχείρισης του δικτύου Enercon. Λέγοντας ότι ο ρότορας και η γεννήτρια είναι χωρίς σασμάν, εννοείται ότι είναι απ' ευθείας συζευγμένα το ένα με το άλλο, γι' αυτό η γεννήτρια κινείται απ' ευθείας από τον ρότορα. Δεν υπάρχει θόρυβος από πολλαπλασιαστή στροφών, ούτε βέβια αλλαγή ή απώλεια λαδιού, ούτε επίσης επιπρόσθετη τριβή (φθορά) και βλάβη των μηχανολογικών εξαρτημάτων σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Η γεννήτρια που χρησιμοποιούν είναι μια γεννήτρια δώδεκα πόλων, σύγχρονη μεταβλητής ταχύτητας με συνεχόμενη ρύθμιση των στροφών. Η μέγιστη απόδοση της γεννήτριας επιτυγχάνεται σε διάφορες περιοχές στροφών για αέρα ~14,5 - 25 m/sec(ανάλογα το μοντέλο). Ο ρότορας της ανεμογεννήτριας συνδέεται άμεσα με το ρότορα της γεννήτριας μέσω της κυρίας ατράκτου. Η ταχύτητα του ρότορα της ανεμογεννήτριας είναι ίδια με την ταχύτητα του ρότορα της γεννήτριας. Άρα η γεννήτρια περιστρέφεται με ταχύτητα μικρότερη απ' αυτήν των ανεμογεννητριών με κιβώτιο ταχυτήτων οπότε και παρουσιάζει πολύ λιγότερες φθορές. Η γεννήτρια της Enercon είναι μεταβλητής ταχύτητας και δεν είναι άμεσα συνδεδεμένη με το δίκτυο. Η μεταβλητή τάση και η μεταβλητή συχνότητα που παράγεται, μετατρέπεται σε συνεχή τάση, DC, από ανορθωτές, στην συνέχεια αυξάνεται από ένα μετασχηματιστή (chopper) και τέλος μέσω ενός αντιστροφέα (ο οποίος αποτελείται από IGBT) μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα AC, και έτσι προσαρμόζεται η τάση της ανεμογεννήτριας με την τάση του δικτύου. Η σύγχρονη γεννήτρια της Enercon με τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι ικανή να λειτουργεί σε μια ευρεία κλίμακα συντελεστών ισχύος, αλλά ο σταθερός συντελεστής ισχύος κατά τη λειτουργία της γεννήτριας είναι σχεδόν πάντα ίσος με ένα. [23] [32]

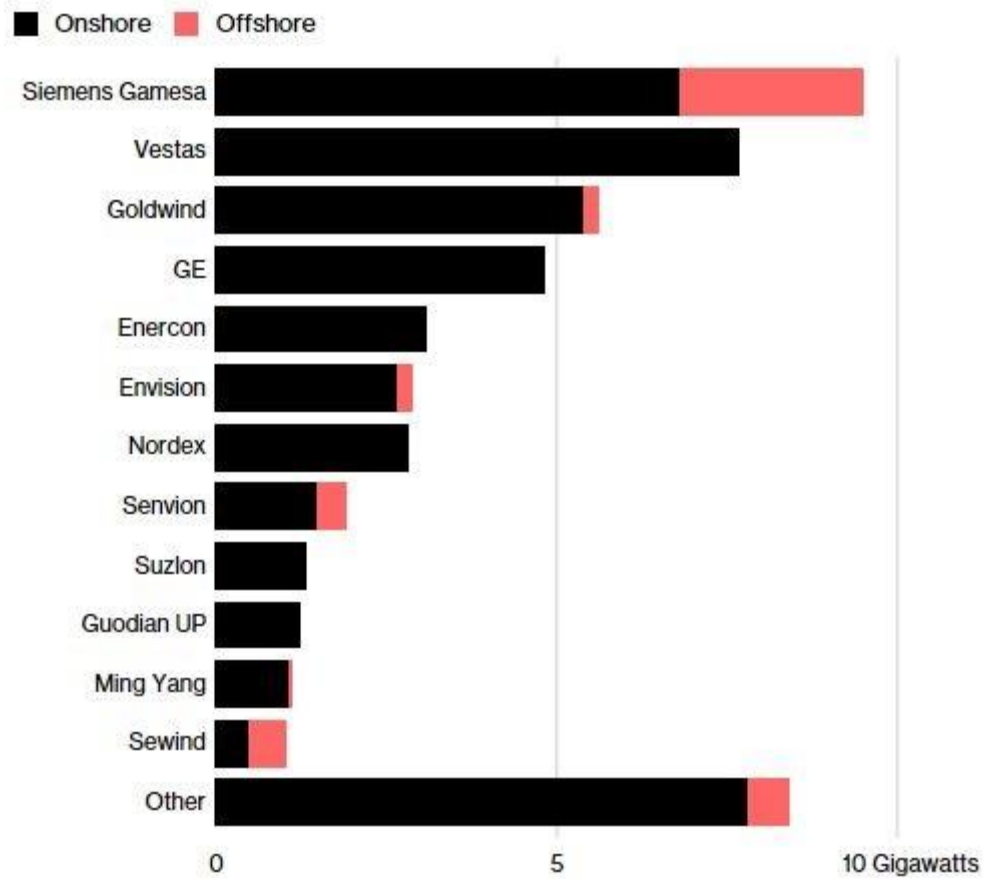


Εικόνα 79 [Πηγή: www.researchgate.net]



Εικόνα 80 [Πηγή: www.enercon.com]

Top Wind Manufacturers of 2017



Εικόνα 81: Κορυφαίες κατασκευάστριες εταιρίες για το έτος 2017

[Πηγή: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-02-26/these-four-power-giants-rule-the-world-s-growing-wind-market>]

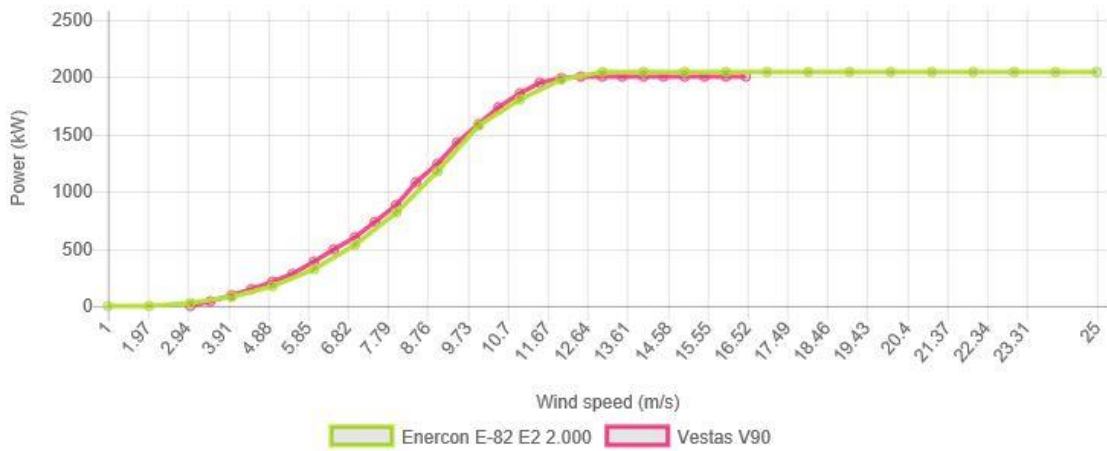
Για να μπορεί να υλοποιηθεί σύγκριση αποδοτικότητας μεταξύ των δύο, σε αυτό το σημείο θα παρατεθεί ένα παράδειγμα, πιο συγκεκριμένα, θα γίνει αναφορά σε δύο μοντέλα ανεμογεννητριών, ένα για την κάθε κατασκευάστρια εταιρία, ίδιας παραγόμενης ισχύος (2 MW). Vestas V90 και Enercon E-82.



Εικόνα 82 : Διάγραμμα ισχύος Vestas V90 [Πηγή: <https://en.wind-turbine-models.com/>]



Εικόνα 83 : Διάγραμμα ισχύος Enercon E-82 [Πηγή: <https://en.wind-turbine-models.com/>]



Εικόνα 84 : Διάγραμμα ισχύος-Σύγκριση των δύο [Πηγή: <https://en.wind-turbine-models.com/>]

Datasheet

Power

Rated power:	2,000.0 kW
Cut-in wind speed:	4.0 m/s
Rated wind speed:	13.0 m/s
Cut-out wind speed:	25.0 m/s

Εικόνα 85: Πληροφορίες λειτουργίας Vestas V90 [Πηγή: <https://en.wind-turbine-models.com>]

Datasheet

Power

Rated power:	2,000.0 kW
Cut-in wind speed:	2.0 m/s
Rated wind speed:	12.5 m/s
Cut-out wind speed:	34.0 m/s

Εικόνα 86: Πληροφορίες λειτουργίας Enercon E-82 [Πηγή: <https://en.wind-turbine-models.com>]

Από την καμπύλη ισχύος (power curve) για την εκάστοτε ανεμογεννήτρια (εικόνα 82,83) και από τις χαρακτηριστικές τιμές της ταχύτητας του ανέμου(εικόνα 85,86) παρατηρούμε ότι η ταχύτητα αποκοπής(cut-out speed), που αντιπροσωπεύει την ταχύτητα πάνω από την οποία η ανεμογεννήτρια για λόγους ασφαλείας και αποφυγής καταπονήσεων του συστήματος σταματάει να λειτουργεί (βλ κεφάλαιο 2.2.1), παρουσιάζει διαφορετικές τιμές σε κάθε ανεμογεννήτρια, συγκεκριμένα της Enercon E-82 είναι 34m/s έναντι της Vestas V90 που είναι 25m/s. Συμπερασματικά, σε φαινόμενα υψηλών ριπών ανέμου η Enercon υπερτερεί, καθώς, τίθεται εκτός λειτουργίας μετά από υψηλότερες ταχύτητες ανέμων. Επιπλέον παρατηρούμε ότι και η απόδοση παραγόμενης ισχύος της Enercon συγκριτικά με την Vestas παραμένει σε υψηλότερες τιμές για αντίστοιχες τιμές ταχύτητας ανέμου.

Η επιλογή της ανεμογεννήτριας προκύπτει βασιζόμενη σε πολλούς παράγοντες, ενδεικτικά :

1. Την περιοχή εγκατάστασης (μορφολογία, προσβασιμότητα, αιολικό δυναμικό κ.α.)
2. Την καμπύλη ισχύος
3. Τις διαστάσεις της ανεμογεννήτριας σε συνάρτηση με τη διαθέσιμη έκταση εγκατάστασης και την επιθυμητή ισχύ του αιολικού πάρκου
4. Τεχνικά και κατασκευαστικά θέματα (μεταφορά, συντήρηση κ.α.)

Οπότε η επιλογή ανεμογεννήτριας αποτελεί καθαρά προσωπική επιλογή του εκάστοτε μελετητή/ενδιαφερόμενου αγοραστή, ο οποίος είναι και αυτός που καθορίζει τους επιθυμητούς στόχους για το αντίστοιχο έργο.

Βιβλιογραφία

- [1] <<https://el.wikipedia.org>>
- [2] <www.ypeka.gr>
- [3] **Κουτσιουμπέλης Παναγιώτης** «*Μελέτη υπερτάσεων σε αγωγούς σημάτων ανεμογεννήτριας λόγω κεραυνικού πλήγματος*» - Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών 2016
- [4] <www.mechanicalsolutions.gr>
- [5] **Μπάρλας Ιωάννης** «*Μελέτη Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου και Σύνδεσή του στο Δίκτυο*» – Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών 2012
- [6] **Γεωργίου Σωτήριος & Τριανταφύλλου Δημήτριος** «*Ενεργειακή κάλυψη αναγκών μονοκατοικίας με ανεμογεννήτρια και με αποθήκευση πλεονάζουσας ενέργειας*» - Πάτρα: ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας 2017
- [7] **Μπιτζιώνης Δ. Βασίλης** εκδ. Τζιόλα «*Βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, Κίνηση-Αυτοματισμός-Εναλλακτικές Μορφές Ενέργειας-Υποσταθμοί*» International Standard Book Number 978-960-428-468-2
- [8] **Πελοποννήσιος Εμμανουήλ** «*Αιολική ενέργεια-Μελέτη και εφαρμογές*» - Αθήνα: ΑΤΕΙ Πειραιά 2013
- [9] **Σαρλάνης Γεώργιος** «*Μελέτη και υπολογισμός λειτουργικών χαρακτηριστικών ανεμογεννήτριας με τη βοήθεια λογισμικού προγράμματος επεξεργασίας windrose. Εφαρμογή σε πραγματικό μοντέλο*» - Αθήνα: ΑΤΕΙ Πειραιά 2014
- [10] **Θυμάκης Γεώργιος & Τσούνης Δημήτριος** «*Μελέτη αιολικού πάρκου ισχύος 2.4 MW*» - Αθήνα: ΑΤΕΙ Πειραιά 2013
- [11] **Καλατζής Μηνάς** «*Ανεμογεννήτριες: Περιγραφή, Προδιαγραφές, Στοιχεία Κόστους-Ωφελείας*» - Σέρρες: ΤΕΙ Σερρών 2008
- [12] **Πριόνας Ευάγγελος** «*Μελέτη Επίδρασης στο Δίκτυο Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών*» - Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών 2015
- [13] **Διζέ Σπυρίδωνας** «*Αδιάλειπτη λειτουργία ανεμογεννήτριας υπό μειωμένη τάση ή σφάλμα*» - Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών 2015
- [14] **Τσακίρη Χριστίνα & Ακαντζιλιώτης Στέφανος** «*Σχεδιασμός και κατασκευή ανεμογεννητριών*» - Καβάλα: ΤΕΙ Καβάλας 2010

- [15] **Γιαννόπουλος Γεώργιος & Τσέλα Ενκελεντ** «Έλεγχος σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών» - Αθήνα: ΑΤΕΙ Πειραιά 2017
- [16] **Μυρίδης Χαράλαμπος** «Αιολική Ενέργεια: Τεχνολογία, δυναμικό και προοπτικές. Λογισμικό διαστασιολόγησης Αιολικού πάρκου. Μελέτη περίπτωσης περιοχής «Καλόγηρος Ηρακλείου Κρήτης»» - Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης 2011
- [17] **Βάγιας Γκουντρουμάνη** «Ανάλυση και Έλεγχος Αιολικού Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Σύγχρονη Μηχανή με μόνιμους μαγνήτες» - Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών 2012
- [18] **Κόλλιας Ιωάννης & Ντούπης Γιώργος** «Ανάλυση Συστήματος Μετάδοσης Ισχύος Ανεμογεννήτριας Μεγάλης Ισχύος» - Αθήνα: ΑΤΕΙ Πειραιά 2012
- [19] <<http://medilab.pme.duth.gr>>
- [20] **Παχύ Παρασκευή** «Βελτιστοποίηση απόδοσης πάρκου ανεμογεννητριών με εφαρμογή μεταευσριστικών μεθόδων» - Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο 2012
- [21] **Γαρίνη Ευδοξία** «Ανάλυση διαθεσιμότητας και βαθμού χρησιμοποίησης αιολικών συστημάτων» - Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών 2012
- [22] Σκορδάς Γεώργιος «Ανοικτά Ψηφιακά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας-Ηπεις και νέες μορφές ενέργειας» - Φλώρινα: Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας 2015
- [23] **Πατής Παναγιώτης** «Κατασκευή, Λειτουργία & Συντήρηση Πάρκων Αιολικής Ενέργειας στην Στερεά Ελλάδα» - Κρήτη: ΤΕΙ Κρήτης 2010
- [24] **A. B. Γκίκα Α** «Μοντελοποίηση ηλεκτρονικών μετατροπέων ευρέως χρησιμοποιούμενων σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών» - Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο 2008
- [25] **Andreas Sondergaard Pedersen & Christian Sigge Steiniche** «*Safe Operation and Emergency Shutdown of Wind Turbines*» - Denmark: Aalborg University 2012
- [26] **Mario Garcia-Sanz & Constantine H. Houpis** «*Wind Energy Systems-Control Engineering Design*» 2012 by Taylor & Francis Group, LLC International Standard Book Number-13: 978-1-4665-5224-1

- [27] **Σταμούλη Λεωνόρα** «*Ανάλυση και Μοντελοποίηση Αιολικού Συστήματος Μεταβλητών Στροφών*» – Πάτρα : Πανεπιστήμιο Πατρών 2016
- [28] **Αντωνιάδης Ηλίας** «*Μελέτη συμπεριφοράς συστήματος ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με φορτίο επαγωγική μηχανή και σύνδεση με το δίκτυο*» – Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών 2011
- [29] **Anca D. Hansen** «*Wind Turbine Technologies*» - Denmark : Technical University of Denmark, Roskilde 2017
- [30] **Κυρανός Αντώνιος & Χατζηγηγορίου Ηλίας** «*Συντήρηση και Βλάβες*» - Αθήνα : AEI Πειραιά TT 2016
- [31] <www.vestas.com>
- [32] <www.enercon.de/en>
- [33] <<https://windturbiner.com/manufacturers/top/>>

Χρήσιμα links για άντληση & διασταύρωση πληροφοριών :

www.windpower.org/en/

<https://www.tudelft.nl/en/library/>

<https://www.nap.edu/>

<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>

<https://www.heal-link.gr/>