

**ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ**

**Α. Ε. Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ**

**ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**Επιβλέπων: ΗΡΑΚΛΗΣ ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ, Καθηγητής Εφαρμογών**

**Συν/βλέπουσα: ΕΡΙΕΤΤΑ Ι. ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, Εργ. Συνεργάτης**

**Μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος και  
ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους σε αυτόνομη οικία**

**(Installation study of photovoltaic and generator unit in autonomous resident)**



**Πτυχιακή Εργασία:  
Παραμύθης Α. Παναγιώτης (Α.Μ. 33106)  
Ρεκτσίνης Ε. Παναγιώτης (Α.Μ. 37821)**

**ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2017**





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ανάλυση όλων των χαρακτηριστικών μεγεθών της ηλιακής ενέργειας και της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, καθώς και του επιμέρους εξοπλισμού που απαρτίζει ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα. Επίσης πραγματοποιείται σύντομη μελέτη ενός υβριδικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής αποτελούμενο από φωτοβολταϊκή γεννήτρια, ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, αντιστροφείς και συσσωρευτές, το οποίο είναι εγκατεστημένο σε οικία εμβαδού 150m<sup>2</sup> στο νομό Αττικής.

- Το **Κεφάλαιο 1** ασχολείται με την φύση του φωτός και την ηλιακή ενέργεια, αναλύοντας την ηλιακή ακτινοβολία και το πως αυτή διαχέεται και κατανέμεται στην ατμόσφαιρα της γης. Επίσης γίνεται αναφορά στον ήλιο, ουσιαστικά στην ατελείωτη πηγή ενέργειας βάση της οποίας αναπτύχθηκε η συγκεκριμένη τεχνολογία και αναλύονται όλα τα γεωμετρικά μεγέθη που αφορούν την σχέση του με την Γη.
- Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται ανάλυση της θεωρίας της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας ξεκινώντας από τα στερεά σώματα και την ηλεκτρική ικανότητα της ύλης, ερευνώντας σε βάθος το Φ/Β φαινόμενο και αναπτύσσοντας όλα τα εμπλεκόμενα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και καταλήγοντας στα φωτοβολταϊκά στοιχεία και τις διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών γεννητριών που έχουν αναπτυχθεί.
- Το **Κεφάλαιο 3** αναφέρεται σε ολοκληρωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία ταξινομούνται σύμφωνα με διάφορους τρόπους με τους οποίους αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, καθώς και στις διαφορετικές αρχές λειτουργίας οι οποίες πρέπει να τηρούνται κάθε φορά, αναφέροντας τους τρόπους διαστασιολόγησης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών βάση των εκάστοτε περιορισμών. Επίσης γίνεται εκτενής αναφορά σε όλες τις διατάξεις και τα μέρη του εξοπλισμού που απαρτίζει αυτά τα συστήματα με στόχο την πλήρη ενημέρωση του αναγνώστη, κυρίως πάνω σε βασικά θέματα ηλεκτρονικών ισχύος και συνδεσμολογίας του εξοπλισμού ανάλογα με το είδος της εφαρμογής, αλλά και στα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος όπως οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας και τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη.
- Στο **Κεφάλαιο 4** πραγματοποιείται μελέτη ενός αυτόνομου συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο είναι υβριδικής φύσεως, με σκοπό την κάλυψη όσο το δυνατόν περισσότερων αναγκών από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την χρήση ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους αποκλειστικά σαν εφεδρεία, σε δυσμενείς χειμερινές περιόδους για την αποφυγή διακοπής των φορτίων της εγκατάστασης. Παρουσιάζεται μελέτη παραγωγής και αυτονομίας του συστήματος για όλο το έτος σύμφωνα με τα πραγματικά δεδομένα της εγκατάστασης, καθώς και προσδιορισμός των ορών λειτουργίας του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους. Τέλος, προσδιορίζεται το κόστος ενός τέτοιου συστήματος αναφέροντας το κόστος του κάθε στοιχείου που το απαρτίζει.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ηλιακή ενέργεια, φωτοβολταϊκή γεννήτρια, αυτόνομο υβριδικό σύστημα.

## **ABSTRACT**

The purpose of this thesis is to analyze all the characteristics of the solar energy and photovoltaic technology as well as the individual equipment that constitutes an autonomous photovoltaic system. Also, a brief study of a hybrid power system, consisting of a photovoltaic generator, generator set, inverters and accumulators, is being carried out. The system is installed in a house of 150m<sup>2</sup> in the region of Attica.

- **Chapter 1** deals with the nature of light and the solar energy, analyzing solar radiation and how it diffuses and spreads to the atmosphere of the earth. Also, reference is made to the sun, the endless energy source on which the photovoltaic technology was developed and all the geometric dimensions related to its relation with Earth are analyzed.
- **Chapter 2** analyzes the theory of photovoltaic technology starting from the solids and the electrical capability of the matter, exploring in depth the photovoltaic phenomenon, developing all involving electrical characteristics and ending with the photovoltaic elements and the various technologies of photovoltaic generators that have been developed.
- **Chapter 3** refers to integrated photovoltaic systems that are classified according to the different ways in which they can be used, and to the different operating principles to be observed each time, indicating how photovoltaic arrays are dimensioned on the basis of each limitation. In addition, extensive reference is made to all the devices and parts of the equipment making up these systems with the aim of fully informing the reader, mainly on basic issues of power electronics and equipment connection depending on the type of application, but also on other elements such as energy storage units and generating sets.
- **Chapter 4** provides a study of an autonomous hybrid power generation system with target to cover as many energy needs as possible from renewable energy and with the use of a generator set only as a reserve in winter periods in order to avoid interruption of loads of the installation. An autonomy study of the system for the whole year is presented according to the actual data of the installation, as well as the determination of the operating hours of the power generator. Finally, the cost of such a system is determined by referring to the cost of each component.

## **KEY WORDS**

Solar energy, photovoltaic generator, autonomous hybrid system.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ηρακλή Βυλλιώτη και την συνεπιβλέπουσα καθηγήτρια κα. Εριέττα Ζουντουρίδου, για τη δυνατότητα που μας έδωσαν να πραγματοποιήσουμε την παρούσα εργασία, για την πολύτιμη βοήθεια που μας έδωσαν καθώς και για την εμπιστοσύνη που μας έδειξαν κατά τη διάρκεια εκπόνηση.

Επίσης, οφείλουμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας, που μας στήριξαν και μας στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια και που χωρίς την πολύτιμη παρουσία τους δε θα είχαμε καταφέρει τίποτα από όσα έχουμε μέχρι σήμερα επιτύχει.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.1 Η φύση του φωτός.....	9
1.1.1 Η δυκρότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	9
1.1.1.1 Η κυματική φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας .....	9
1.1.1.2 Η σωματιδιακή φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	11
1.1.2 Η εκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	13
1.1.2.1 Η θερμική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.....	14
1.1.2.2 Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ηλεκτρικής εκκένωσης.....	17
1.1.3 Το δυναμικό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας .....	20
1.1.3.1 Το φάσμα έντασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	20
1.1.3.2 Η ποσοτική περιγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας .....	23
1.2 Η διάχυση του φωτός.....	26
1.2.1 Η εκπομπή της ηλιακής ακτινοβολίας.....	26
1.2.2 Η διάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας .....	29
1.2.2.1 Η διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας εν κενό .....	30
1.2.2.2 Η διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα της γη .....	31
I Η διαδικασία εξασθένησης της ηλιακής ακτινοβολίας .....	32
II Το φάσμα απορρόφησης από την γήινη ατμόσφαιρα.....	34
1.2.3 Η συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας .....	38
1.2.3.1 Ο διαχωρισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης.....	38
1.2.3.2 Η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης.....	41
1.3 Το δυναμικό του φωτός .....	45
1.3.1 Η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο .....	45
1.3.2 Ο σφαιρικός προσδιορισμός της ηλιακής τροχιάς .....	49
1.3.3 Ο γεωγραφικός προσδιορισμός της θέσης ήλιου - παρατηρητή .....	56
1.3.4 Η ποσοτική ανάλυση του ηλιακού δυναμικού.....	61
1.3.4.1 Η ανάλυση του ηλιακού δυναμικού στα όρια της γης.....	62
1.3.4.2 Η ανάλυση του ηλιακού δυναμικού στην επιφάνεια της γης .....	63
I Η ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια στο επίπεδο της γης .....	64
II Η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια στο επίπεδο της γης .....	66

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

2.1 Η φωτοβολταϊκή προέλευση.....	75
2.1.1 Η φυσική της στερεάς κατάστασης της ύλης.....	75
2.1.1.1 Η κβαντική μηχανική του ατόμου.....	76
2.1.1.2 Η περιοδική διάκριση της ύλης.....	81
2.1.1.3 Η ηλεκτρονιακή δόμηση της ύλης.....	84
2.1.1.4 Η κρυσταλλογραφία της στερεάς ύλης.....	87
2.1.2 Η ενεργειακή συμπεριφορά της στερεάς ύλης.....	88
2.1.2.1 Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση της στερεάς ύλης.....	89
2.1.2.2 Οι ενεργειακές ζώνες ηλεκτρονίων της στερεάς ύλης .....	92
2.1.3 Η τεχνολογική ανάπτυξη του κρυσταλλικού ημιαγωγού.....	96
2.1.3.1 Ο ενδογενής ή αυτοτελής κρυσταλλικός ημιαγωγός.....	97
2.1.3.2 Οι εξωγενής ή πρόσμειξης κρυσταλλικός ημιαγωγός.....	99

I	Ο κρυσταλλικός ημιαγωγός τύπου N .....	100
II	Ο κρυσταλλικός ημιαγωγός τύπου P .....	101
III	Ο κρυσταλλικός ημιαγωγός επαφής P-N .....	103
2.1.4	Η ηλεκτρική ικανότητα του ημιαγωγού επαφής P-N .....	107
2.1.4.1	Η ανορθωτική ικανότητα του ημιαγωγού επαφής P-N .....	107
2.1.4.2	Η οπτικό-ηλεκτρική ικανότητα του ημιαγωγού επαφής P-N .....	112
I	Η απορρόφηση ηλιακής ενέργειας από το ημιαγωγικό υλικό .....	112
II	Η απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας από το ημιαγωγικό υλικό .....	116
2.2	Το φωτοβολταϊκό στοιχείο .....	119
2.2.1	Η τεχνολογική ανάπτυξη του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	119
2.2.1.1	Η τεχνική παρασκευής του φωτοβολταϊκού ημιαγωγού επαφής .....	119
2.2.1.2	Η κατασκευαστική διαμόρφωση του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	122
I	Η ενδογενής διαμόρφωση του ημιαγωγικού υλικού .....	122
II	Η κατασκευαστική δόμηση της μονάδας ΦΒ στοιχείου .....	123
2.2.1.3	Η παραγωγική εξέλιξη του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	125
I	Το φωτοβολταϊκό στοιχείο κρυσταλλικού Πυριτίου .....	128
II	Το φωτοβολταϊκό στοιχείο λεπτών υμένων .....	129
III	Το φωτοβολταϊκό στοιχείο νέας τεχνολογίας .....	130
2.2.2	Η ενεργειακή ικανότητα του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	133
2.2.2.1	Η ηλεκτρική κατάσταση του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	133
I	Η ιδανική λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	133
II	Η πραγματική λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	135
2.2.2.2	Η ενεργειακή απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	139
I	Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	139
II	Η εξάρτηση μέγιστης απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	143
III	Η διατήρηση μέγιστης απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	145
2.3	Ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης .....	147
2.3.1	Η κατασκευαστική διαμόρφωση του φωτοβολταϊκού συλλέκτη .....	147
2.3.1.1	Η ενδογενής διαμόρφωση της μήτρας ΦΒ στοιχείων .....	149
2.3.1.2	Η κατασκευαστική δόμηση της μονάδας ΦΒ συλλέκτη .....	151
2.3.2	Η ενεργειακή αποδοτικότητα του φωτοβολταϊκού συλλέκτη .....	155

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

3.1	Η σύνθεση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας .....	165
3.1.1	Η ταξινόμηση των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας .....	168
3.1.2	Η συγκρότηση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος .....	168
3.2	Η ανάλυση διατάξεων φωτοβολταϊκού συστήματος .....	171
3.2.1	Η φωτοβολταϊκή συστοιχία .....	171
3.2.1.1	Η ενεργειακή ικανότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας .....	172
3.2.1.2	Η θέση εφαρμογής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας .....	175
I	Η στήριξη προσανατολισμού της φωτοβολταϊκής συστοιχίας .....	175
II	Η απόσταση τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών .....	179
3.2.2	Ο ηλεκτρικός συσσωρευτής .....	184
3.2.2.1	Η χαρακτηριστική ανάλυση του ηλεκτρικού συσσωρευτή .....	185
3.2.2.2	Η ενεργειακή διαστασιολόγηση του ηλεκτρικού συσσωρευτή .....	189
3.2.3	Τα ηλεκτρονικά διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας .....	193



3.2.3.1	Ο μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε συνεχή.....	193
3.2.3.2	Ο ελεγκτής σημείου μέγιστης ισχύος.....	195
3.2.3.3	Ο ελεγκτής φόρτισης ηλεκτρικών συσσωρευτών.....	196
3.2.3.4	Ο μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσεως σε συνεχή.....	198
3.2.3.5	Ο μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη.....	201
	I Η ταξινόμηση του αντιστροφέα βάση της αρχής λειτουργίας.....	201
	II Η ταξινόμηση του αντιστροφέα βάση του ΦΒ συστήματος.....	205
3.3	Η μελέτη αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.....	208
3.3.1	Η ενεργειακή αποδοτικότητα του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.....	208
3.3.2	Η ενεργειακή διαστασιολόγηση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.....	217
3.3.2.1	Ο υπολογισμός της ισχύος αιχμής φωτοβολταϊκής συστοιχίας.....	218
	I Το μοντέλο συνεχών αίθριων ημερών.....	218
	II Το μοντέλο κάλυψης ημερών αυτονομίας.....	218
3.3.2.2	Ο υπολογισμός της χωρητικότητας ηλεκτρικού συσσωρευτή.....	219
	I Το μοντέλο συνεχών αίθριων ημερών.....	219
	II Το μοντέλο κάλυψης ημερών αυτονομίας.....	220
3.3.2.3	Ο καθορισμός μεγέθους της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.....	222
	I Ο αρχικός καθορισμός συνολικού αριθμού ΦΒ συλλεκτών.....	222
	II Ο καθορισμός αριθμού ΦΒ συλλεκτών συνδεδεμένων σε σειρά.....	223
	III Ο καθορισμός αριθμού παράλληλων κλάδων ΦΒ συλλεκτών.....	225
3.3.2.4	Ο καθορισμός χαρακτηριστικών του ελεγκτή φόρτισης.....	226
3.3.2.5	Ο καθορισμός χαρακτηριστικών του αντιστροφέα.....	226
3.3.2.6	Ο υπολογισμός αποδιδόμενης ισχύς του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους.....	226
3.3.2.7	Ο υπολογισμός διατομής καλωδίων της γραμμής μεταφοράς.....	227
3.3.2.8	Ο υπολογισμός συνολικού κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος.....	229

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

4.1	Η περιγραφή της τοποθεσίας και χωροθέτησης της υπό μελέτης αυτόνομης οικίας.....	232
4.2	Η εκτίμηση για την επιλογή διατάξεων του υπό μελέτης υβριδικού συστήματος.....	236
4.3	Η ανάλυση της ηλεκτρικής ενεργειακής ανάγκης της υπό μελέτης αυτόνομης οικίας.....	238
4.4	Η διαστασιολόγηση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας του υβριδικού συστήματος.....	240
4.5	Η χωροθέτηση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας του υβριδικού συστήματος.....	242
4.6	Η διαστασιολόγηση των αντιστροφέων του υβριδικού συστήματος.....	245
4.7	Η διαστασιολόγηση των ηλεκτρικών συσσωρευτών του υβριδικού συστήματος.....	249
4.8	Η διαστασιολόγηση του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους του υβριδικού συστήματος.....	251
4.9	Ο υπολογισμός της διατομής καλωδίων του υβριδικού συστήματος.....	253
4.10	Τα μονογραμμικά σχέδια της καλωδίωσης του υβριδικού συστήματος.....	259
4.11	Οι παρατηρήσεις για τις διατάξεις του υπό μελέτη υβριδικού συστήματος.....	261
4.12	Η εκτίμηση του οικονομικού κόστους του υπό μελέτη υβριδικού συστήματος.....	265

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

# ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### 1.1 Η φύση του φωτός

---

Το θεμελιώδες ερώτημα "περί φύσης του φωτός", απασχόλησε πολύ από τους αρχαιότετους χρόνους, φιλόσοφους και φυσιοδίφες, προσπαθώντας να κατανοήσουν και να ερμηνεύσουν τη φύση του φωτός. Πρώτοι οι αρχαίοι Έλληνες, αντιλήφθηκαν την σωματιδιακή φύση του φωτός. Σε αυτή ακριβώς τη σκέψη, στηρίχτηκαν πολύ, οι μεταγενέστεροι φυσικοί, ενώ υπέρ της άποψης αυτής, πρώτος τάχτηκε ο Isaac Newton, για να διατυπώσει, με βάση τις αρχές της διατήρησης της ενέργειας και της ορμής, το νόμο της ανάκλασης του φωτός. Οι Christian Huygens το 1607 και Tomas Young το 1803, μέσα από πειραματικές διαδικασίες επάνω στη περίθλαση και τη συμβολή του φωτός, απέδειξαν ότι, το φως έχει κυματική φύση και συγκεκριμένα ότι είναι εγκάρσια κύματα.

Η πιο σημαντική εξέλιξη του 19<sup>ου</sup> αιώνα, στη μελέτη παραγωγής και διάδοσης του φωτός, υπήρξε το έργο του James Clerk Maxwell, ο οποίος το 1865, διατύπωσε τη μεγαλειώδη θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπου απέδειξε πως το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, ο Max Planck χρησιμοποίησε τη σωματιδιακή φύση του φωτός, για να ερμηνεύσει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπουν τα θερμά σώματα και εισήγαγε τη θεωρία του κβάντο φωτός. Την θεωρία αυτή, στην πιο σύγχρονη εποχή, εφάρμοσε ο Albert Einstein, για να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, κάνοντας αποδεκτό ότι, το φως έχει διττή φύση, σωματιδιακή και κυματική, δηλαδή συμπεριφέρεται ως κύμα αλλά και ως σωματίδιο.

#### 1.1.1 Η δεικνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

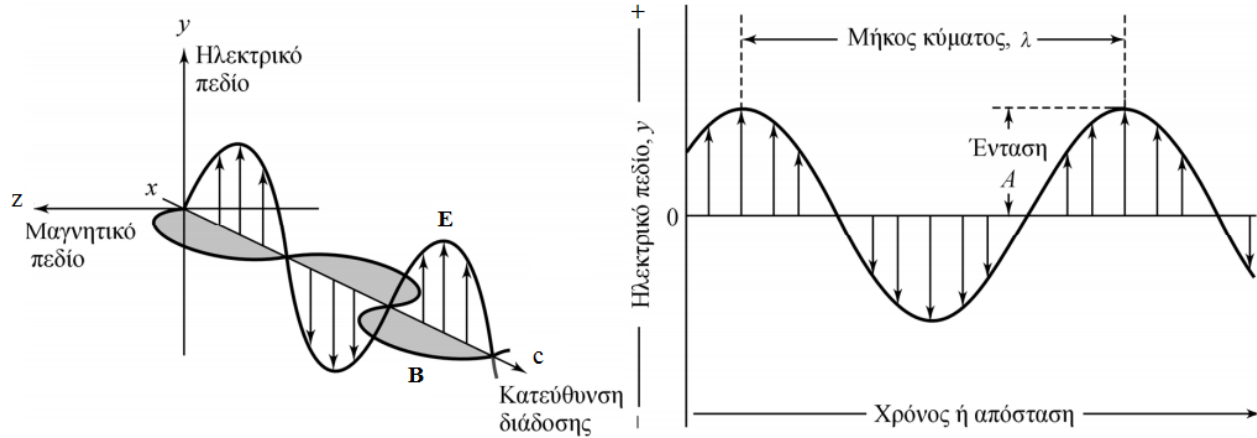
---

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελεί μορφή ενέργειας, που εκπέμπεται και διαδίδεται δια μέσου ύλης αλλά και εν κενό, με κύριο γνώρισμα της, την φύση σύστασης και διάδοσης της. Ο **κυματοσωματιδιακός δεικνός**, εκφράζει τη διττή φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για την ικανοποίηση των οπτικών φαινομένων κατά την εκπομπή-απορρόφηση από την ύλη και διάδοση εν κενό ή δια μέσου ύλης, με αποτέλεσμα η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία να συμπεριφέρεται ως κύμα και ως στοιχειώδες σωματίδιο. Σε φαινόμενα όπως η συμβολή, η περίθλαση και η πόλωση, εκδηλώνεται η κυματική φύση της, ενώ σε φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση της με την ύλη, όπως η σκέδαση και η απορρόφηση, εκδηλώνεται η σωματιδιακή φύση της. Τα φαινόμενα της ανάκλασης και της διάθλασης, ερμηνεύονται και με τις δύο φύσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

##### 1.1.1.1 Η κυματική φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Τα ηλεκτρικά φορτία των ατόμων της ύλης ενός σώματος, όταν πάλλονται (ταλαντώνονται), παρατηρείται ότι, γύρω από το σώμα δημιουργούνται δύο μεταβαλλόμενα πεδία, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο. Η εμφάνιση των δύο πεδίων, αποτελούν εκδηλώσεις του ίδιου φαινομένου που συνιστά ο **ηλεκτρομαγνητισμός** και απορρέει από το σώμα, ενώ από την ενοποίηση των δύο πεδίων, προκύπτει το **ηλεκτρομαγνητικό πεδίο**, η διάδοση του οποίου αποτελεί την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και σύμφωνα με τη κυματική θεωρία, διαδίδεται ως **ηλεκτρομαγνητικό κύμα**. Ο όρος κύμα, χαρακτηρίζει μια διαταραχή που διαδίδεται στο χώρο, μεταφέροντας ενέργεια και ορμή με σταθερή ταχύτητα.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, είναι εγκάρσιες διαταραχές ηλεκτρικού και μαγνητικού κύματος, που μεταφέρουν ενέργεια από ένα σημείο του χώρου στο άλλο, με χωρική και χρονική μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού κύματος (πεδίου) του, χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιου μέσου, το οποίο επηρεάζει την ταχύτητα διάδοσης  $u$  τους. Η πιο απλή μορφή ηλεκτρομαγνητικού (ΗΜ) κύματος, είναι το αρμονικά επίπεδο, η μορφή του οποίου φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.



Σχήμα 1.1: αρμονικά επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα

Κάθε χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο  $E$ , δημιουργεί ένα αντίστοιχο παλλόμενο μαγνητικό πεδίο  $B$  και αντίστροφα. Οι διευθύνσεις ταλάντωσης του  $E$  και του  $B$ , είναι κάθετες μεταξύ τους και ταυτόχρονα, κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, παίρνουν δηλαδή ταυτόχρονα τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές τους, άρα τα δύο πεδία έχουν την ίδια φάση κάθε χρονική στιγμή και διαδίδονται, με την ίδια ταχύτητα  $u$ . Τα μεταβαλλόμενα, αυτά μεγέθη ( $E$ ,  $B$ ) είναι διανυσματικά:

$$E = E_{max} * \cos(kx - \omega t) \quad (1.1)$$

$$B = B_{max} * \cos(kx - \omega t) \quad (1.2)$$

όπου, ο κυματάριθος  $k = 2\pi / \lambda$ , η γωνιακή ταχύτητα  $\omega = 2\pi * v$  και με μονάδες μέτρησης στο SI, για την ένταση ηλεκτρικού πεδίου  $E$  το 1 V/m, ενώ για την ένταση μαγνητικού πεδίου  $B$  το 1 A/m.

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (1.1) και (1.2), παριστάνεται ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που διαδίδεται με ταχύτητα  $u$ :

$$u = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 * \epsilon_0}} \quad (1.3)$$

Χρησιμοποιώντας τις σταθερές της μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$  (Wb/A\*m) και της ηλεκτρικής διαπερατότητας (διηλεκτρική σταθερά)  $\epsilon_0 = 8,8542 * 10^{-12}$  (C<sup>2</sup>/N\*m<sup>2</sup>), βρίσκεται ότι η ταχύτητα διάδοσης  $u$  των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, στο κενό, είναι:

$$u = 2,99792 * 10^8 \text{ (m/sec)}$$

η οποία είναι ίδια με την ταχύτητα  $c$  του φωτός.

Η ταχύτητα διάδοσης  $c$  του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, η συχνότητα  $\nu$  ταλάντωσης και το μήκος κύματος  $\lambda$  του, συνδέονται με τη **θεμελιώδη εξίσωση κυματικής**:

$$c = \lambda * \nu \quad (1.4)$$

άρα, η ταχύτητα διάδοσης  $u$  στο κενό, είναι για όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, ανεξαρτήτως πηγής εκπομπής, σταθερή και διαδίδονται με την ταχύτητα  $c$  του φωτός.

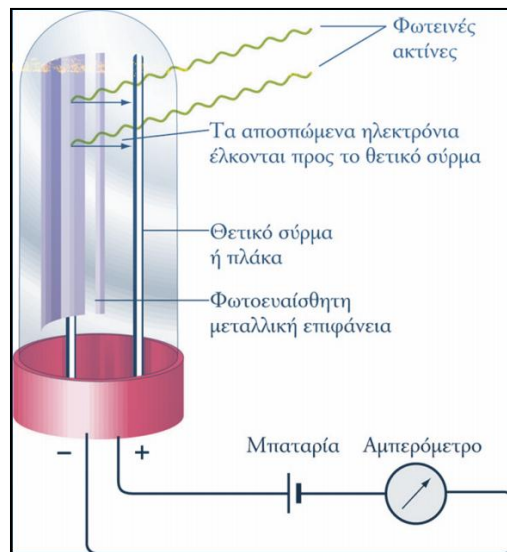
Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, καθώς διαδίδονται στον χώρο μεταφέρουν ενέργεια. Η ενέργεια αυτή ή μάλλον καλύτερα ο ρυθμός ροής της ενέργειας, περιγράφεται με το διάνυσμα Poynting και συνεπάγεται, την ενέργεια στην μονάδα του χρόνου, με άλλα λόγια την ισχύ μέσα από μια μοναδιαία επιφάνεια, που είναι κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος, δηλαδή τη πυκνότητα ισχύος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας:

$$S = \frac{1}{\mu_0} * E * B \quad (1.5)$$

με μονάδα μέτρησης της στο SI, το  $1 \text{ W/m}^2$ . Η διεύθυνση του διανύσματος  $S$ , είναι κάθετη στο επίπεδο που ορίζουν τα διανύσματα  $E$  και  $B$ . Με την υπόθεση ότι το διάνυσμα  $S$ , κατευθύνεται κατά την διεύθυνση του άξονα  $y$  και το  $B$  κατά την διεύθυνση του άξονα  $z$ , τότε το διάνυσμα  $S$  κατευθύνεται προς τη διεύθυνση του άξονα  $x$ , με ταχύτητα  $c$ .

### 1.1.1.2 Η σωματιδιακή φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η σωματιδιακή θεωρία, προτείνει ότι η ακτινοβολία, ναι μεν διαδίδεται με τη μορφή ΗΜ κύματος, αλλά ταυτόχρονα και με τη μορφή ποσότητας ενέργειας, ισοδύναμη με πολλαπλάσιο σωματιδίου. Ένα από τα φαινόμενα που οδήγησαν στην υιοθέτηση της σωματιδιακής φύσης, είναι το λεγόμενο **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**, το οποίο σχετίζεται με την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη. Όταν ακτινοβολία πέσει πάνω σε ορισμένες επιφάνειες (μεταλλικές), τότε από τις επιφάνειες αυτές, εκπέμπονται ηλεκτρόνια που ονομάζονται **φωτοηλεκτρόνια**. Έτσι, για την ερμηνεία της εκπομπής και της απορρόφησης ΗΜ ακτινοβολίας, δεν αρκούσαν μόνο κάποιες επεκτάσεις της κυματικής θεωρίας.



Σχήμα 1.2: απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και εκπομπή φωτοηλεκτρονίων

Σύμφωνα με την σωματιδιακή θεωρία ή αλλιώς κβαντική θεωρία, κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εκπέμπεται και απορροφάται από τα άτομα της ύλης, όχι κατά συνεχή τρόπο αλλά ασυνεχώς, δηλαδή κάθε άτομο, εκπέμπει ή απορροφά στοιχειώδη ποσό ενέργειας (ελάχιστο ποσό - quantum) που ονομάζεται **κβάντο φωτός** ή **φωτόνιο**. Από το άτομο λοιπόν, δεν εκπέμπονται συνεχώς κύματα, αλλά ασυνεχώς φωτόνια, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη συχνότητα  $\nu$  και έχει συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας, σαν ένα πακέτο ενέργειας (κυματοπακέτο).

Όταν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στην ύλη, τα άτομα της ύλης απορροφούν την ενέργεια της ασυνεχώς, που σημαίνει ότι κάθε άτομο, απορροφά μεμονωμένα φωτόνια (πακέτα ενέργειας) και μεταφέρεται ενέργεια, από ένα φωτόνιο σε ένα από τα ηλεκτρόνια του ατόμου. Συνεπώς, το ηλεκτρόνιο αλληλεπιδρά με ένα από τα φωτόνια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, σαν να είναι το φωτόνιο ένα σωματίδιο. Στην παράγραφο (2.1.1), όπου αναφέρεται η κβαντομηχανική θεωρία του ατόμου, περιγράφεται αναλυτικότερα η μηχανική απορρόφησης και εκπομπής φωτονίων. Για κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η **ενέργεια φωτονίου**  $E_{pt}$ , δίνεται από τη σχέση:

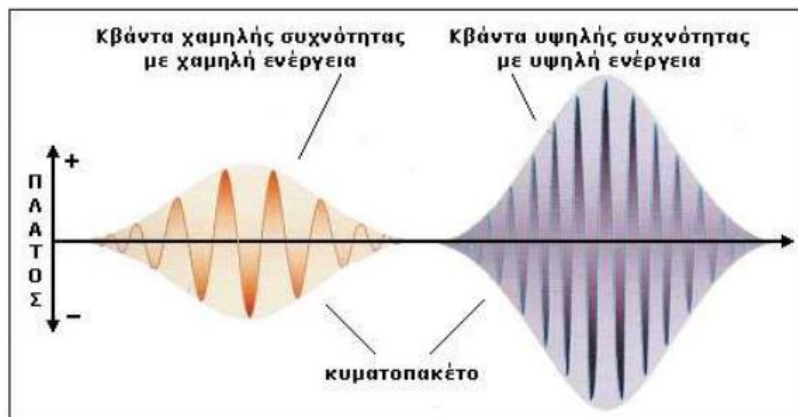
$$E_{pt} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.6)$$

όπου,  $h = 6,67 \cdot 10^{-34}$  (J\*s) η σταθερά του Planck, ενώ μονάδα μέτρησης του φωτονίου είναι το 1 eV (1 eV =  $1,602176462 \cdot 10^{-19}$  J).

Η σωματιδιακή θεωρία δεν αναιρεί την κυματική φύση της για κάθε ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολία ακτινοβολίας, καθώς η ενέργεια των φωτονίων  $E_{pt}$  σχετίζεται άμεσα με τη συχνότητα  $\nu$  ταλάντωσης του ΗΜ κύματος, που είναι κατ'εξοχήν κυματική ιδιότητα και μεταδίδεται με την ταχύτητα  $c$  του φωτός. Έτσι, το ΗΜ κύμα του οποίου τα κβάντα ενέργειας εμφανίζονται ως φωτόνια, αναφέρεται και ως **υλικό κύμα**, με το κάθε φωτόνιο που μεταφέρει ενέργεια  $E_{pt}$ , να έχει και **ορμή φωτονίου**  $P_{pt}$ , ίση με:

$$P_{pt} = \frac{h}{\lambda} \quad (1.7)$$

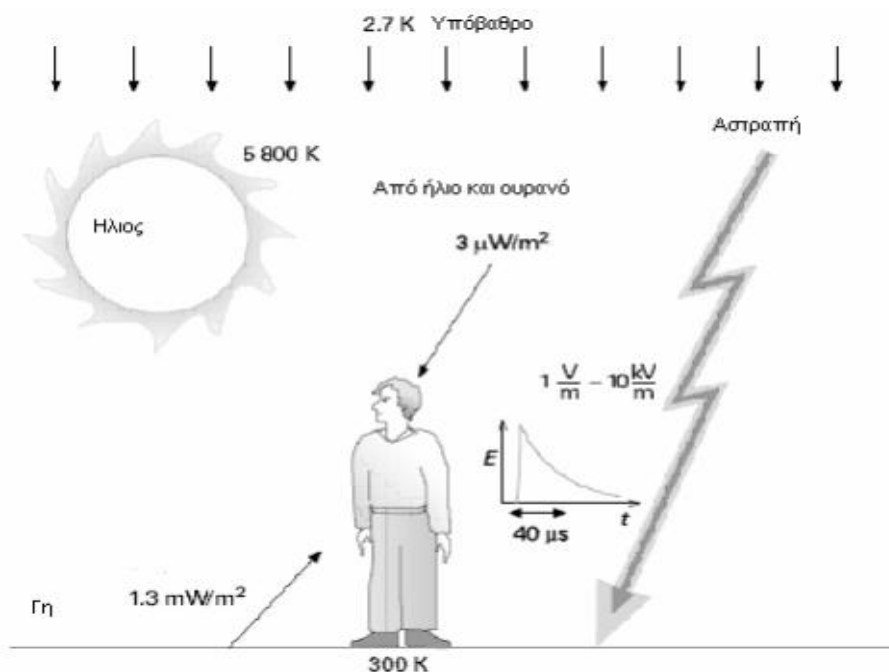
Από τη σχέση (1.6) της ενέργειας φωτονίου  $E_{pt}$ , προκύπτει ότι τα φωτόνια μιας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος  $\lambda$  και μικρότερης συχνότητας ταλάντωσης  $\nu$ , μεταφέρουν μικρότερη ενέργεια, σε αντίθεση με τα φωτόνια ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μικρότερου μήκους κύματος  $\lambda$  και μεγαλύτερης συχνότητας ταλάντωσης  $\nu$ , που μεταφέρουν υψηλότερη ενέργεια.



Σχήμα 1.3: πακέτα ενέργειας προς σύσταση φωτονίων διαφορετικής συχνότητας

### 1.1.2 Η εκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Ο άνθρωπος, ήταν πάντοτε εκτεθειμένος στη φυσική ΗΜ ακτινοβολία που προέρχεται τόσο από τη γη, δηλαδή την **γήινη ακτινοβολία**, όσο και από το διάστημα, όπως είναι η **ηλιακή ακτινοβολία** από τον ήλιο και η **κοσμική ακτινοβολία**, που προέρχεται από το απώτερο διάστημα. Επίσης, εκτίθεται από την **ανθρωπογενή ΗΜ ακτινοβολία** (τεχνητή), όπως είναι οι ακτινοβολίες που χρησιμοποιούνται στην ιατρική (διάγνωση και θεραπεία), στην βιομηχανία (ραδιογραφήσεις, έλεγχο διεργασιών-ποιότητας), στην παραγωγή ενέργειας (πυρηνικοί σταθμοί) και οι ακτινοβολίες που εκπέμπονται στο τομέα των ηλεκτροτεχνικών εφαρμογών, στις τηλεπικοινωνίες και στη διανομή-χρήση ηλεκτρικής ενέργειας (ηλεκτρικά καλώδια-κυκλώματα, οικιακές συσκευές, λαμπτήρες φωτισμού κτλ.).



**Σχήμα 1.4:** ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που δέχεται ο άνθρωπος από φυσικές πηγές

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προέρχεται από αλλαγές σε καταστάσεις ενέργειας στους δομικούς λίθους της ύλης (άτομα, μόρια και ιόντα). Αλλαγή στην κατάσταση ενέργειας της ύλης, προκαλείται είτε όταν η ύλη διεγείρεται και αποδιεγείρεται, είτε όταν η ύλη διασπάται ή συντίθεται. Έτσι, η εκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, σχετίζεται με:

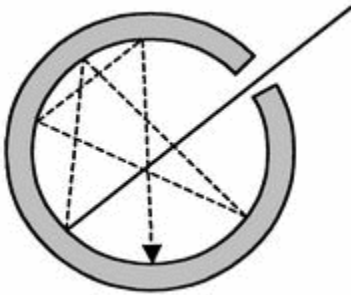
- την θερμοκρασία των σωμάτων (θερμική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία)
- τις ηλεκτρονικές αποδιεγέρσεις διεγερμένων δομικών λίθων της ύλης, που προκαλούνται από άλλη αιτία, εκτός της θερμοκρασίας, όπως κατά τις κρούσεις επιταχυνόμενων ιόντων ή ηλεκτρονίων με ιόντα ή μόρια της ύλης, υπό τη δράση μακροσκοπικού ηλεκτρικού πεδίου, είτε μετά από απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, από τους δομικούς λίθους της.

Στη συνέχεια, περιγράφονται δύο, από τις περιπτώσεις εκπομπής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

### 1.1.2.1 Η θερμική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Όταν σε ένα αδιαφανές σώμα προσπέσει ΗΜ ακτινοβολία (ενέργεια), ένα μέρος της ανακλάται και το υπόλοιπο απορροφάται. Το σώμα λόγω της απορρόφησης ΗΜ ακτινοβολίας, θερμαίνεται και εκπέμπει με τη σειρά του ΗΜ ακτινοβολία (ενέργεια), προκειμένου να απάγει τη θερμότητα. Έτσι, παρουσιάζεται θερμική ταλάντωση των δομικών λίθων του, δηλαδή θερμική διέγερση και αποδιέγερση τους. Η κατανομή του ρυθμού έκλυσης της ΗΜ ακτινοβολίας, σε σχέση με το μήκος κύματος που εκπέμπει ένα τέτοιο σώμα, καθορίζεται από την θερμοκρασία την οποία έχει όταν εγκαθιδρυθεί θερμοδυναμική ισορροπία, όταν δηλαδή επανεκπέμπει ενέργεια, με τον ίδιο ρυθμό που την απορροφά.

Για τη κατανόηση της ΗΜ ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα υλικό σώμα, χρησιμοποιείται το μοντέλο του Max Planck, το οποίο βασίζεται στη θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ των ηλεκτρομαγνητικών ταλαντωτών, που αντιπροσωπεύουν τις ταλαντώσεις των δομικών λίθων (άτομα, μόρια, ιόντα) των τοιχωμάτων μιας κοιλότητας του σώματος και της ΗΜ ακτινοβολίας των ταλαντωτών, προς το χώρο της κοιλότητας.



**Σχήμα 1.5:** εισερχόμενη ακτινοβολία, έπειτα από πολλαπλές αντανακλάσεις, απορροφάται σχεδόν ολοκληρωτικά από τα τοιχώματα της κοιλότητας

Αν η κοιλότητα του σώματος επικοινωνεί προς τα έξω με λεπτό αυλό, η εξερχόμενη από την οπή, ΗΜ ακτινοβολία, σε στενή περιοχή μηκών κύματος, έχει ένταση που καθορίζεται από το μήκος κύματος  $\lambda$  και τη θερμοκρασία  $T$ , της κοιλότητας. Αντίστροφα, κάθε ακτίνα προερχόμενη από άλλο σώμα, εισερχόμενη δια του αυλού, στο χώρο της κοιλότητας, απορροφάται από τους ηλεκτρομαγνητικούς ταλαντωτές. Δηλαδή, η οπή της κοιλότητας λειτουργεί ως παγίδα για την προσπίπτουσα ΗΜ ακτινοβολία και ταυτόχρονα, εκπέμπει ιδανικά ΗΜ ακτινοβολία που οφείλεται στη θερμική κατάσταση των δομικών του λίθων. Το ιδανικό ή πρότυπο αυτό σώμα, με τις ιδιότητες αυτές, ονομάστηκε **μέλαν (μαύρο) σώμα**.

Ο όρος μέλαν σώμα, χρησιμοποιείται για να γίνει διάκριση από τα σώματα που ανακλούν την ΗΜ ακτινοβολία και αναφέρεται στο γεγονός, ότι ένα τέτοιο υποθετικό σώμα, έχει την ιδιότητα να απορροφά πλήρως κάθε ακτινοβολία, που προσπίπτει επάνω του, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος  $\lambda$  και τη θερμοκρασία του ή τη θερμοκρασία του σώματος που του την εκπέμπει. Ύστερα, το μέλαν σώμα, εκπέμπει (επανεκπέμπει) με τη σειρά του **ακτινοβολία μέλανος σώματος**, με ορισμένη φασματική κατανομή της ενέργειας της, χαρακτηριστική της θερμοκρασίας  $T$  του μέλανος σώματος.

Αυτή η μορφή εκπεμπόμενης ενέργειας, ονομάζεται **θερμική ακτινοβολία** και υπολογίζεται από το νόμο του Planck, από τον οποίο προκύπτει ότι, η κατανομή των τιμών της πυκνότητα ισχύος (ενέργεια) ΗΜ ακτινοβολίας, που επανεκπέμπεται από την επιφάνεια  $S$  του μέλανος σώματος, ανά μοναδιαία περιοχή μηκών κύματος, σε κάθε μήκος κύματος  $\lambda$ , αποτελεί τη συνάρτηση για την **φασματική κατανομής πυκνότητας ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας**  $E_{\lambda T}$ , μετρούμενη σε  $W/m^2 \cdot nm$ :

$$E_{\lambda T} = \frac{c_1}{\lambda^5} * \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (1.8)$$

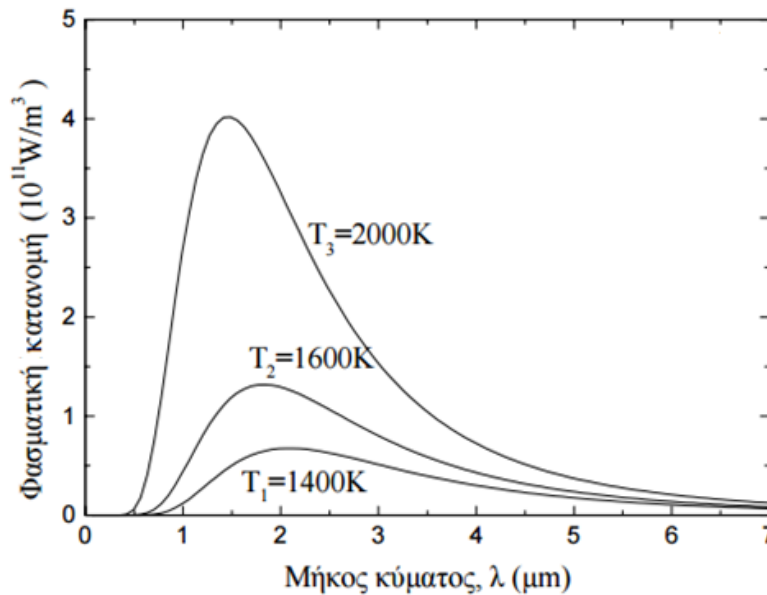
όπου,  $c_1 = 2\pi c^2 h = 3,746 \cdot 10^{-16} W \cdot m^2$ ,  $c_2 = hc/k_B = 0,0144 (m \cdot K)$ ,  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} (J/K)$  η σταθερά του Boltzmann και  $c$  η ταχύτητα του φωτός.

Επιπλέον, αν αθροιστεί η πυκνότητα ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας ανά μοναδιαία περιοχή μηκών κύματος  $E_{\lambda T}$ , μπορεί να υπολογιστεί η **ολική φασματική πυκνότητα ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας**  $E_T$ , σε όλα τα μήκη κύματος  $\lambda$ , που εκλύεται ημισφαιρικά, από το εσωτερικό προς την επιφάνειά ενός μέλαν σώματος, μιας συγκεκριμένης θερμοκρασίας  $T_\mu$ , συναρτήσει της φύσης  $\sigma$  του. Αυτή, ακολουθεί το νόμο των Stefan-Boltzmann, μετρούμενη σε  $W/m^2$ :

$$E_T = \sigma * T_\mu^4 \quad (1.9)$$

όπου,  $\sigma = 5,67 * 10^{-8} Wm^{-2}K^4$  η σταθερά των Stefan-Boltzmann.

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται η φασματική κατανομή των τιμών της πυκνότητας ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας  $E_{\lambda T}$ , που επανεκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα, σε συνάρτηση με το μήκος κύματος  $\lambda$  της ΗΜ ακτινοβολίας και για καταστάσεις, διαφορετικών θερμοκρασιών  $T$  του μέλανος σώματος.



**Σχήμα 1.6:** φασματική κατανομή ΗΜ ακτινοβολίας μέλανος σώματος για διαφορετικές θερμοκρασίες του

Το φάσμα της πυκνότητας ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας  $E_{\lambda T}$  που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα, παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά. Ένα από αυτά είναι ότι, ένα μέλαν σώμα με θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός  $T > 0 K$ , εκπέμπει σε όλα τα μήκη κύματος, αλλά όχι το ίδιο ποσό ενέργειας. Επιπλέον, παρατηρείται ότι υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος κύματος  $\lambda_{\mu\epsilon\gamma}$ , στο οποίο ένα μέλαν σώμα, εκπέμπει το μέγιστο της ενέργειας του. Αυτό προσδιορίζεται από το νόμο μετατοπίσεως του Wien:

$$\lambda_{\mu\epsilon\gamma} * T = 2897,8 \text{ (}\mu\text{m}\cdot\text{K)} \quad (1.10)$$

και προκύπτει ότι, το μήκος κύματος  $\lambda$  μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα της θερμοκρασίας  $T$ .

Σύμφωνα με τον νόμο μετατοπίσεως, όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, ένα θερμότερο μέλαν σώμα, εκπέμπει το μέγιστο της ενέργειας του, σε μικρότερα μήκη κύματος, απ ότι ένα ψυχρότερο μέλαν σώμα. Έτσι, σώματα με υψηλή θερμοκρασία, εκπέμπουν ακτινοβολία με μικρά μήκη κύματος, ενώ σώματα με χαμηλή θερμοκρασία, εκπέμπουν μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία. Αν είναι



γνωστό το κρίσιμο μήκος κύματος  $\lambda_{\text{μεγ}}$ , τότε η θερμοκρασία που βρίσκεται από την επίλυση της προηγούμενης σχέσης (1.10) ως προς τη θερμοκρασία  $T$  του σώματος, λέγεται **θερμοκρασία χρώματος**.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που είναι εμφανές στο φάσμα, δείχνει ότι το ύψος της καμπύλης αυξάνει για το μέλαν σώμα, αυξανομένης της θερμοκρασίας  $T$  του κι άρα, αυξάνει το ολικό ποσό της εκπεμπόμενης πυκνότητας ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας  $E_T$  του. Αυτό διαπιστώνεται από το νόμο των Stefan-Boltzmann, καθώς η ακτινοβολία  $E_T$  που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα, αυξάνει πολύ γρήγορα, αυξανομένης της θερμοκρασίας  $T$  του. Έτσι, εάν ένα σώμα είναι δύο φορές θερμότερο (διπλάσια θερμοκρασία) από ένα άλλο, εκπέμπει  $2^4$ , δηλαδή 16 φορές περισσότερη ενέργεια σε όλα τα μήκη κύματος, σε σχέση με το ψυχρότερο μέλαν σώμα.

Στόχος του Max Planck, είναι η περιγραφή ενός πραγματικού σώματος, το οποίο συμπεριφέρεται με τρόπο που προσεγγίζει, περισσότερο ή λιγότερο, τη συμπεριφορά του μέλαν σώματος. Έτσι, εισάγεται η ο συντελεστής εκπομπής  $\epsilon_T$ , που εκφράζει την ικανότητα του πραγματικού να εκπέμπει ΗΜ ακτινοβολία, σε σχέση με αυτή του μέλανος σώματος. Ποσοτικά, ο συντελεστής εκπομπής  $\epsilon_T$ , ορίζεται από το πηλίκο της εκπεμπόμενης ενέργειας από το πραγματικό σώμα, για ένα ορισμένο μήκος κύματος  $\lambda$ , προς την εκπεμπόμενη ενέργεια του ίδιου μήκους κύματος, που εκπέμπει το μέλαν σώμα, ίδιας θερμοκρασίας  $T$ .

Λαμβάνοντας υπόψη το νόμο των Stefan-Boltzmann (σχέση 1.9) και δεδομένου ότι  $P = E * S$ , η **ισχύς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας πραγματικού σώματος  $P_T$** , σε θερμοκρασία  $T_\pi$ , είναι:

$$P_T = \epsilon_T * \sigma * (T_\mu^4 - T_\pi^4) * S \quad (1.11)$$

όπου,  $S$  το εμβαδό επιφάνειας του πραγματικού σώματος, ενώ ο συντελεστής εκπομπής  $\epsilon_T$ , παίρνει τιμές από 0 (τέλεια ανακλαστική επιφάνεια), μέχρι 1 (μέλαν σώμα ή τέλεια απορροφητική επιφάνεια).

Το πιο σημαντικό σύστημα εκπομπής-απορρόφησης-επανεκπομπής ηλεκτρομαγνητικής θερμικής ακτινοβολίας, είναι ο ήλιος με τη γη. Ο ήλιος αποτελεί αυτοεκπεμπόμενο σώμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (αυτόφωτο), λόγω του φαινομένου της πυρηνικής σύντηξης (πυρηνική ενέργεια), από το οποίο προκύπτει η τεράστια ποσότητα θερμικής ενέργειας, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία του και θεωρείται θερμότερο σώμα. Η γη είναι ετεροεκπεμπόμενο σώμα (ετερόφωτο), καθώς εκπέμπει, την απορροφούμενη ΗΜ ακτινοβολία από τον ήλιο, σε μικρότερες ποσότητες και θεωρείται ψυχρότερο σώμα. Με τον ίδιο τρόπο, εκπέμπεται ΗΜ ακτινοβολία, από τους υπόλοιπους πλανήτες του ηλιακού συστήματος της γης.

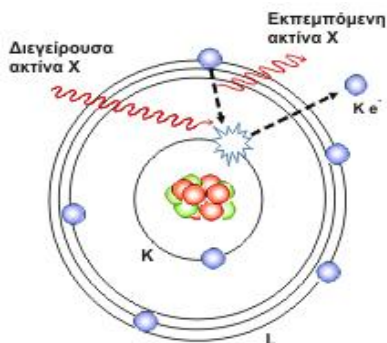
### 1.1.2.2 Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ηλεκτρικής εκκένωσης

Η ΗΜ ακτινοβολία αυτή, προέρχεται από τις ηλεκτρονικές αποδιεγέρσεις διεγερμένων δομικών λίθων της ύλης, που προκαλούνται από άλλη αιτία και όχι λόγω τη θερμοκρασία του σώματος. Διεγείρουσα αιτία, είναι είτε οι κρούσεις επιταχυμένων ιόντων ή ηλεκτρονίων με ιόντα ή μόρια της ύλης, υπό τη δράση μακροσκοπικού ηλεκτρικού πεδίου σε ιονισμένη ύλη, είτε άλλη ΗΜ ακτινοβολία, που προσπίπτει στο σώμα και απορροφάται από τους δομικούς λίθους της ύλης. Η ένταση της ΗΜ ακτινοβολίας που εκπέμπεται με αυτό τον τρόπο, εξαρτάται από το ποσοστό των διεγερμένων ατόμων, κατά τη συγκεκριμένη ενεργειακή μετάβαση, από την αρχική στην τελική ενέργεια.

Ένα είδος αυτής της ΗΜ ακτινοβολίας, εκπέμπουν πηγές (σώματα), των οποίων η λειτουργία οφείλεται στην αγωγιμότητα του αερίου που περιέχουν, δηλαδή στην αγωγιμότητα των δομικών λίθων του αερίου. Έτσι, η ΗΜ ακτινοβολία που εκπέμπουν, δεν οφείλεται στη θερμοκρασία του αερίου, αλλά στην διέγερση των ατόμων του αερίου, κατά την εκκένωση που δημιουργείται σε αυτό. Ένα αέριο, για να καταστεί αγωγός, πρέπει μέσα στη μάζα του να υπάρχουν φορείς του ηλεκτρισμού, δηλαδή ελεύθερα ηλεκτρόνια ή ιόντα. Αν εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο αέριο, τότε τα ηλεκτρόνια και τα αρνητικά ιόντα κινούνται προς το θετικό ηλεκτρόδιο, τα θετικά ιόντα προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο και έτσι παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Η αγωγιμότητα των αερίων, ιδίως όταν συνοδεύεται από φωτεινά φαινόμενα, ονομάζεται **ηλεκτρική εκκένωση**.

Αν οι φορείς υπάρχουν πριν αρχίσει η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος και παραμένουν σταθεροί, κατά τη διάρκεια του φαινομένου η αγωγιμότητα ονομάζεται μη αυτοτελής. Αν όμως δημιουργούνται κατά τη διάρκεια του φαινομένου, λόγω των κρούσεων των φορέων με τα ουδέτερα άτομα και μόρια, η αγωγιμότητα ονομάζεται αυτοτελής. Τα φαινόμενα της αυτοτελούς αγωγιμότητας, είναι πολλά και διακρίνονται σε φυσικά, όπως ο κεραυνός και το δισκούρειο φως ή τεχνητά φαινόμενα, όπως η φωτοβολία των λαμπτήρων αερίου (αίγλης, φθορισμού, τόξου) και οι σπινθήρες που δημιουργούνται στα διάφορα ηλεκτρικά κυκλώματα (στεμματόμορφη εκκένωση, εκκένωση θυσάνου).

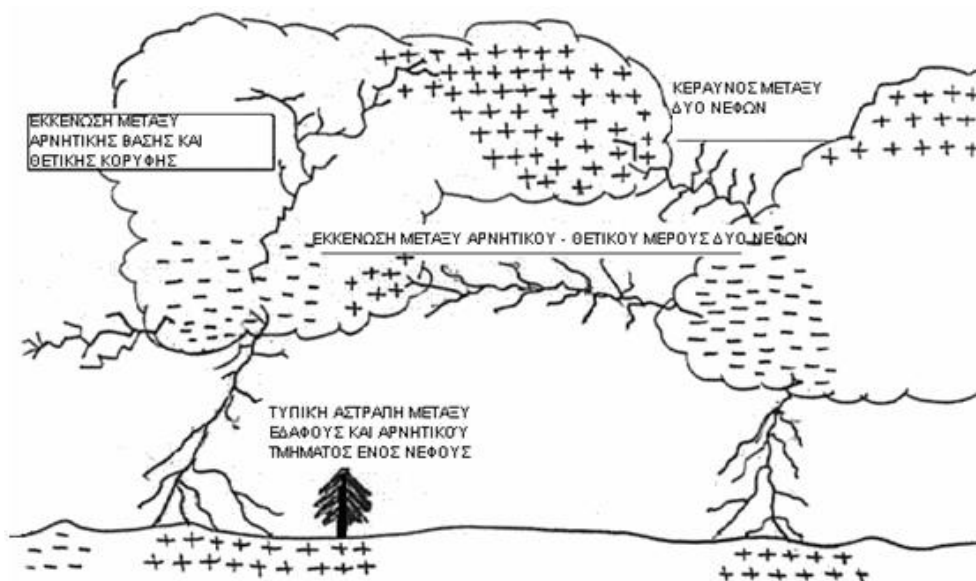
Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται η διέγερση ενός ατόμου με επίδραση ηλεκτρικής ενέργειας και η αποδιέγερση, με την εκπομπή φωτονίων και την επιστροφή των ηλεκτρονίων στην αρχική τους τροχιάς, όπως συμβαίνει π.χ. στους λαμπτήρες των ατμών Νατρίου, των ατμών Υδραργύρου, φθορισμού κ.α.. Το φάσμα τους, διαφέρει ριζικά απ αυτό του μέλανος σώματος, χαρακτηριζόμενο από αυξημένες τιμές έντασης, στα μήκη κύματος που σχετίζονται με την κυρίαρχη αποδιέγερση των διεγερμένων ατόμων.



**Σχήμα 1.7:** παραγωγή ακτινοβολίας φθορισμού, με μετάπτωση ηλεκτρονίου από στιβάδα L, σε κενή θέση στιβάδας K, κατόπιν διέγερσης του ατόμου με ακτινοβολία X

Ο κεραυνός είναι το γνωστότερο και εντονότερο, από τα φυσικά φαινόμενα εκκένωσης των αερίων. Δημιουργείται μεταξύ νέφους και εδάφους της γης ή μεταξύ νεφών ή μέσα στο ίδιο το νέφος, συνοδεύεται δε από ένα ηχητικό φαινόμενο, τη βροντή. Ο όρος κεραυνός, επικράτησε να αναφέρεται κυρίως στο σπινθήρα μεταξύ νέφους και εδάφους της γης, ενώ οι άλλες δύο περιπτώσεις, χαρακτηρίζονται με τον όρο αστραπή, αν και πρόκειται για το ίδιο ακριβώς φαινόμενο ηλεκτρικής αγωγιμότητας αερίου.

Ο κεραυνός ή η αστραπή, οφείλονται στη συσσώρευση, σε ξεχωριστές περιοχές, αμιγών θετικών και αρνητικών ηλεκτρικών φορτίων. Το έδαφος της γης και η ηλεκτόσφαιρα (κάτω τμήμα της ιονόσφαιρας), είναι οι δύο αντίθετοι πόλοι ενός σφαιρικού πυκνωτή, τους οποίους χωρίζει η ατμόσφαιρα. Το σύστημα ισορροπεί καθώς η διηλεκτρική αντοχή  $E_d$  του αέρα λειτουργεί ως μονωτής, μην επιτρέποντας την εκδήλωση φαινομένων εκκένωσης με αίθριο καιρό, όπως π.χ. συμβαίνει και με τη λειτουργία στους ηλεκτρομηχανικούς πυκνωτές αέρα.



Σχήμα 1.8: ηλεκτρικές εκκενώσεις στην ατμόσφαιρα της γης προς δημιουργία του κεραυνού

Αν δημιουργηθούν καταιγιδοφόρα νέφη, η κατάσταση φορτίζεται επικίνδυνα, καθώς είναι κατ' ουσίαν τεράστιες μηχανές παραγωγής ηλεκτρικού φορτίου. Στο εσωτερικό τους, επικρατούν βίαια ρεύματα, μεταφέροντας φορτισμένα σωματίδια πάγου (παγοκρύσταλλοι), ενώ αυτά συγκρούονται συνεχώς μεταξύ τους. Κατά τη διάρκεια των συγκρούσεων, μεταφέρονται αρνητικά φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρόνια) από το ένα σωματίδιο στο άλλο, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται θετικό ή αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο.

Συνήθως, οι παγοκρύσταλλοι που έχουν μεγαλύτερη μάζα, αποκτούν αρνητικό φορτίο μετά την σύγκρουση και καταλήγουν στην βάση του νέφους, λόγω της επίδρασης της βαρύτητας. Αντίθετα, οι παγοκρύσταλλοι με μικρότερη μάζα, αποκτούν συνήθως θετικό φορτίο και οδηγούνται προς την κορυφή του νέφους, με την βοήθεια των ανοδικών ρευμάτων. Η αύξηση του αρνητικού φορτίου στη βάση του σύννεφου, απωθεί τα αρνητικά φορτία που βρίσκονται στο έδαφος της γης προς το εσωτερικό του, με αποτέλεσμα, η επιφάνεια της γης να αποκτήσει ένα ισχυρό θετικό φορτίο.

Η ύπαρξη αρνητικού φορτίου στην βάση του σύννεφου και θετικού φορτίου στο έδαφος της γης, δημιουργεί τα κατάλληλα “μονοπάτια”, μέσα στα οποία μπορεί τώρα να μετακινηθεί το ηλεκτρικό φορτίο

προς το έδαφος. Έτσι λοιπόν, όταν υπάρχουν οι συνθήκες για να δημιουργήσουν μια καταιγίδα, όπως υγρασία στην ατμόσφαιρα, πολλή θερμότητα κλπ., τότε ο αέρας που στροβιλίζεται, παρασύρει ιόντα από τα σύννεφα και από το έδαφος της γης ή της θάλασσας και έτσι, δημιουργείτε συσσώρευση ηλεκτρικών φορτίων στα σύννεφα και φυσικά διαφορά δυναμικού μεταξύ των σύννεφων (συνήθως αρνητικά φορτισμένων) και του εδάφους ή της θάλασσας. Στην ουσία προκαλείται φόρτιση με επαγωγή.

Ο αέρας που υπάρχει μεταξύ της βάσης του νέφους και του εδάφους, όπως είναι γνωστό, είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού και έτσι, τα φορτία δεν μπορούν να κυκλοφορήσουν ώστε να εξουδετερωθούν. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η διαφορά δυναμικού συνεχώς αυξάνεται και παίρνει τιμές πάρα πολύ υψηλές. Όταν λοιπόν η διαφορά δυναμικού λάβει τόσο υψηλές τιμές, ξεπερνά τη διηλεκτρική αντοχή  $E_d$  της ατμόσφαιρας, γίνεται διάτρηση του αέρα (~21 kV/cm) και δημιουργείται ηλεκτρικός σπινθήρας, όπως συμβαίνει με όλες τις ηλεκτρικές εκκενώσεις μεταξύ αντίθετων ηλεκτρικών πεδίων. Ακριβώς εκείνη τη στιγμή ξεσπά το φαινόμενο του κεραυνού.

Από το σύννεφο ξεκινά μια αρχική εκτόνωση (κίνηση ηλεκτρικού φορτίου), η οποία λέγεται “εκτόνωση οδηγός” και προχωρεί με ταχύτητα 100 km/sec προς την γη. Η διαδρομή που ακολουθεί ο οδηγός, είναι έντονα διακλαδισμένη και αποτελείται από πολλά “βήματα”. Κατά τη διαδρομή προς το έδαφος, ο οδηγός κάνει μια παύση 50 μsec ανάμεσα σε κάθε βήμα 50 m, όπου αναζητά κάποιο αντικείμενο για να χτυπήσει, αν δε βρει, επαναλαμβάνει την ίδια διαδικασία μέχρι να βρει ένα αντικείμενο. Όλη η διαδικασία διαρκεί περίπου 50 msec και αποτελείται από περίπου 10000 βήματα.

Καθώς ο οδηγός πλησιάζει τη γη (μερικές δεκάδες μέτρα πριν φτάσει στο έδαφος), όλα τα αντικείμενα στην επιφάνεια της γης αρχίζουν να ανταποκρίνονται στην έντονη ηλεκτρική δύναμη, δημιουργώντας ισχυρά ρεύματα που φέρουν θετικό φορτίο με κατεύθυνση προς τα πάνω, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα. Τελικά, ο οδηγός θα διαλέξει ένα από αυτά για να ενωθεί, όχι όμως απαραίτητα το πιο κοντινό ρεύμα στο σύννεφο.

Μετά τη συνάντηση του οδηγού με το ανερχόμενο ρεύμα, το αρνητικό φορτίο κινείται γρήγορα προς την γη. Μόλις τα πρώτα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια φτάσουν στη γη, ένα πολύ ισχυρό ηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζεται με φορά από το έδαφος προς το σύννεφο, ακολουθώντας την ίδια διαδρομή. Έτσι, από την γη ξεκινά μια εκτόνωση με αντίθετη πολικότητα που ονομάζεται “εκτόνωση ανάκλησης”, που αποτελεί ρεύμα επιστροφής και είναι αυτό που εμφανίζεται στον ουρανό, ως το φαινόμενο του κεραυνού.

Το μήκος του τόξου της ηλεκτρικής εκκένωσης αυτής, πολλές φορές φθάνει και τα 10 km, με αποτέλεσμα η διαφορά δυναμικού μεταξύ των αντίθετων φορτίων, να παίρνει τιμές πάρα πολύ υψηλές, από 80 MV έως και 10 GV. Έτσι, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να φθάσει τα 200 kA, αν και το 85% των κεραυνών, έχουν εντάσεις μικρότερες των 60 kA. Η ηλεκτρική ισχύς λοιπόν ενός κεραυνού, στην καλύτερη περίπτωση είναι 6 TW.

Η θερμοκρασία μέσα στο κανάλι του κεραυνού, είναι περίπου 6 φορές μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία της επιφάνειας του ηλίου (30000 K), με αποτέλεσμα ο αέρας γύρω από τον κεραυνό να θερμαίνεται πολύ έντονα, να συμπιέζεται και ισχυρές μάζες του να μετατοπίζονται. με αποτέλεσμα να εκρήγνυται. Η εκρήξη ακολουθείται σύντομα από έναν ήχο που είναι γνωστός ως βροντή. Η ισχυρή βροντή του κεραυνού, δημιουργείτε από την διάσπαση του αέρα λόγω υψηλής θερμοκρασίας. Λόγω της τεράστιας διαφοράς στην ταχύτητα διάδοσης του φωτός και του ήχου, η βροντή ακούγεται μετά την εκδήλωση της ηλεκτρικής εκκένωσης.

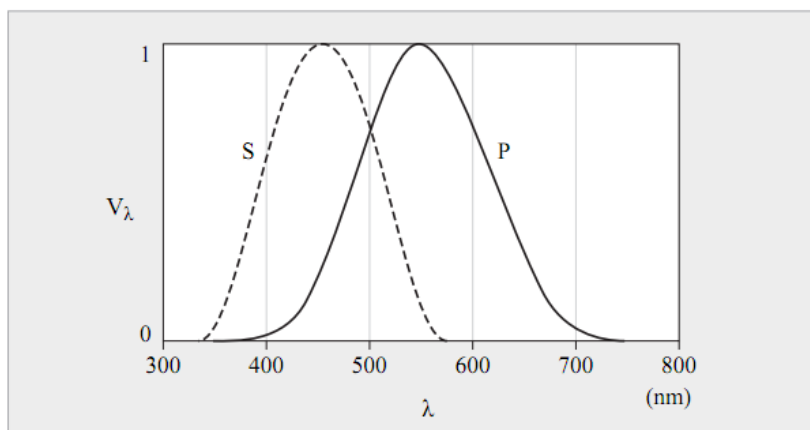
### 1.1.3 Το δυναμικό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που δέχεται ή χρησιμοποιεί ο άνθρωπος, εκπέμπεται από διάφορες πηγές. Όλες οι ΗΜ ακτινοβολίες, απ όπου και εάν εκπέμπονται, έχουν την ίδια φυσική υπόσταση (κυματική και σωματιδιακή μορφή), με κοινό χαρακτηριστικό όλων, την ταχύτητα  $u$  τους (300000 km/s), ενώ διαφοροποιούνται μόνο τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, το μήκος κύματος  $\lambda$  και η συχνότητα  $\nu$  τους, τα οποία είναι αλληλένδετα και επομένως, όσο πιο μικρό είναι το μήκος κύματος  $\lambda$ , τόσο πιο υψηλή είναι η συχνότητα  $\nu$  εκπομπής μιας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το σύνολο όλων των ΗΜ κυμάτων, συνιστά το **ηλεκτρομαγνητικό φάσμα έντασης ακτινοβολίας**. Τέλος, η ΗΜ ακτινοβολία περιγράφεται ποσοτικά, με τη χρήση χαρακτηριστικών μεγεθών, που αφορούν την ίδια και την πηγή εκπομπής ΗΜ ακτινοβολίας.

#### 1.1.3.1 Το φάσμα έντασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα έντασης της ακτινοβολίας, διακρίνεται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την ενέργεια και την επίδραση της ΗΜ ακτινοβολίας στην ύλη. Η **ιοντίζουσα ακτινοβολία**, είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα ΗΜ κύματα, που μεταφέρουν ενέργεια, ικανή να εισχωρήσει στην ύλη, να προκαλέσει ιοντισμό των ατόμων της, να διασπάσει βίαια χημικούς δεσμούς και να προκαλέσει βιολογικές βλάβες σε ζώντες οργανισμούς της γης. Η **μη ιοντίζουσα ακτινοβολία**, είναι αυτή που μεταφέρει σχετικά μικρή ενέργεια, ανίκανη να προκαλέσει ιοντισμό, ικανή όμως να προκαλέσει ηλεκτρικές, χημικές και θερμικές επιδράσεις στα κύτταρα, που μπορούν να αποβούν άλλοτε επιβλαβείς και άλλοτε ευεργετικές, για τη λειτουργία τους.

Κάθε ΗΜ ακτινοβολία, χαρακτηρίζεται από το μήκος κύματος  $\lambda$  της. Όταν το μήκος κύματος μιας ακτινοβολίας είναι μεταξύ μιας πολύς μικρής περιοχής του φάσματος, δηλαδή μεταξύ  $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,76 \mu\text{m}$ , τότε ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται την ΗΜ ακτινοβολία, καθώς έχει την ιδιότητα να διεγείρει την όραση του και ονομάζεται **ορατή ή φωτεινή ακτινοβολία ή ορατό φως**.

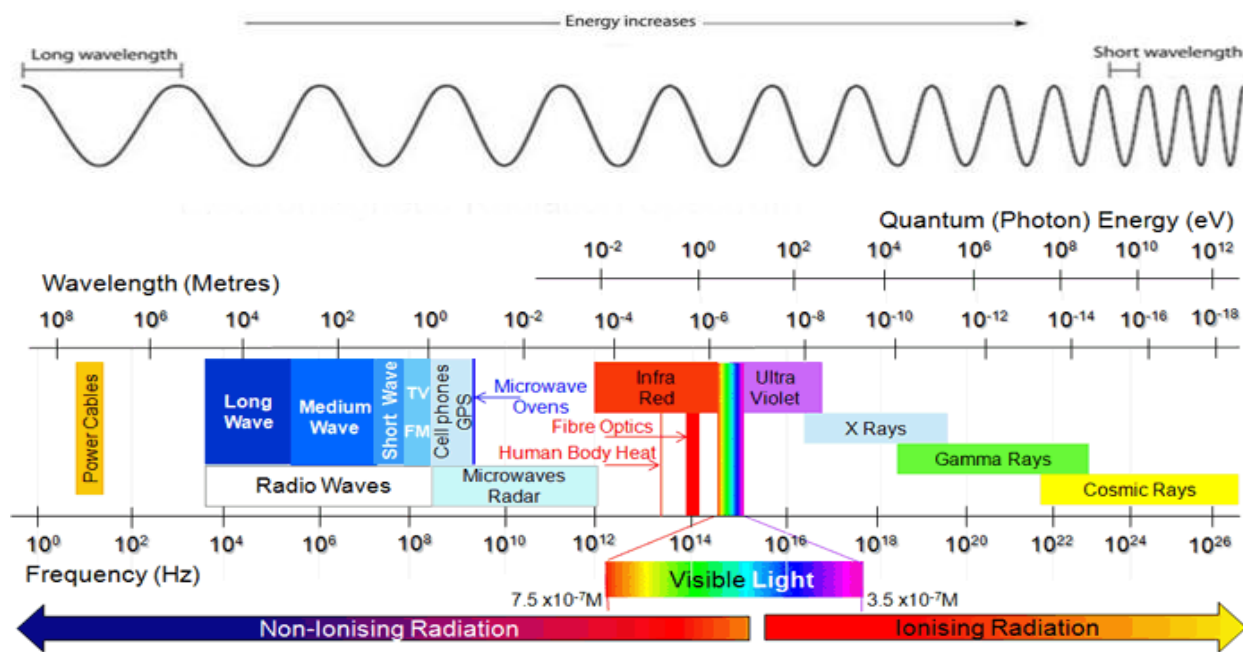


Σχήμα 1.9: καμπύλη ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού

Ο ανθρώπινος οργανισμός δεν αντιλαμβάνεται άμεσα όλες τις συχνότητες της ΗΜ ακτινοβολίας, επειδή δεν διαθέτει τα κατάλληλα αισθητήρια όργανα. Το ορατό φως, το αντιλαμβάνεται επειδή στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού, υπάρχουν ειδικά κύτταρα, τα οποία διεγείρονται με την ορατή ακτινοβολία και δίνουν, την κατάλληλη πληροφορία στον εγκέφαλο, ώστε να δημιουργηθεί η αίσθηση

της όρασης. Στο παραπάνω σχήμα, η καμπύλη S (scotopic), αφορά στην όραση στο σκοτάδι, οφειλόμενη στα ραβδία, ενώ η καμπύλη P (photopic), αφορά στην όραση ημέρας, οφειλόμενη στα κωνία.

Υπάρχουν όμως και ΗΜ ακτινοβολίες, οι οποίες δεν διεγείρει το μάτι και γι αυτό, ονομάζεται **αόρατη ακτινοβολία**. Η αόρατη που βρίσκεται πέρα από το ερυθρό χρώμα, ονομάζεται **υπέρυθρη ακτινοβολία**, την οποία επίσης αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος, μέσω της θερμότητας (θερμική ακτινοβολία). Η αόρατη ακτινοβολία που βρίσκεται πέρα από το ιώδες χρώμα, ονοματίζεται **υπεριώδης ακτινοβολία**.



Σχήμα 1.10: φάσμα συχνοτήτων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία, προερχόμενη από τη κοσμική ( $\lambda < 0,28 \mu\text{m}$ ) και την ηλιακή ακτινοβολία ( $0,28 < \lambda < 4 \mu\text{m}$ ), περιλαμβάνει τις κοσμικές ακτίνες έως ένα μέρος των υπέρυθρων ακτίνων, οι οποίες παράγονται από την ανακατανομή των δομικών λίθων της ύλης (πυρηνική αντίδραση), ενώ είναι πολύ υψηλών συχνοτήτων και μεγάλης ενέργειας. Η μεγάλη μήκους κύματος ακτινοβολία, προερχόμενη από την γήινη ακτινοβολία ( $4 < \lambda < 100 \mu\text{m}$ ) και τεχνητές πηγές οι οποίες εκπέμπουν θερμοκρασίες κοντά στις περιβαλλοντικές ( $\lambda > 100 \mu\text{m}$ ), περιλαμβάνοντας τις υπέρυθρες ακτίνες έως τα μακρά ραδιοκύματα, παράγεται από τα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία (ηλεκτρικό ρεύμα) και είναι χαμηλότερων συχνοτήτων.

Παρακάτω, ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή, της κάθε περιοχής μήκους κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

#### Ιοντίζουσα ακτινοβολία (ionizing radiation):

- τις **κοσμικές ακτίνες** (cosmic rays), παράγονται από υπερκαινοφανείς αστέρες, αποτελούνται κυρίως από **ακτίνες  $\alpha$**  ( $\alpha$  decay) και **ακτίνες  $\beta$**  ( $\beta$  decay), ενώ ένα μικρό ποσοστό είναι ακτίνες  $\gamma$  ( $\gamma$  rays),
- τις **ακτίνες  $\gamma$**  ( $\gamma$  rays), εκπέμπονται από ραδιενεργά στοιχεία ή κατά τις πυρηνικές αντιδράσεις, μήκους:  $\lambda < 10^{-5} \mu\text{m}$ ,

- τις **ακτίνες X** (X rays), παράγονται συνήθως από την επιβράδυνση ταχέως κινούμενων ηλεκτρονίων, όταν αυτά προσκρούουν πάνω σε ένα μεταλλικό στόχο, μήκους:  $10^{-5} \mu\text{m} < \lambda > 10^{-2} \mu\text{m}$ , με επιμέρους περιοχές:  $10^{-5} \mu\text{m} < \text{HX (hard X-rays)} > 10^{-4} \mu\text{m} < \text{SX (soft X-rays)} > 10^{-2} \mu\text{m}$  και
- μια μικρή περιοχή από **υπεριώδεις ακτίνες** (ultraviolet rays), την EUV (extreme ultraviolet) μήκους:  $0,01 < \lambda > 1 \mu\text{m}$ .

#### Μη ιοντίζουσα ακτινοβολία (non-ionizing radiation):

- την μεγαλύτερη περιοχή από **υπεριώδεις ακτίνες** (ultraviolet rays), παράγονται από την ανακατανομή των ηλεκτρονίων στα άτομα, μήκους:  $1 \mu\text{m} < \lambda > 0,4 \mu\text{m}$ , με επιμέρους περιοχές:  $1 \mu\text{m} < \text{FUV (far ultraviolet)} > 0,29 \mu\text{m} < \text{MUV (middle ultraviolet)} > 0,32 \mu\text{m} < \text{NUV (near ultraviolet)} > 0,4 \mu\text{m}$ ,
- τις **ορατές ακτίνες** (ορατό φάσμα - visible light), παράγονται από την ανακατανομή των ηλεκτρονίων στις διάφορες ηλεκτρονικές στοιβάδες στα άτομα και όταν γίνει φασματοσκοπική ανάλυση της ακτινοβολίας, εμφανίζονται τα χρώματα που περιέχονται σε αυτή, μήκους:  $0,4 \mu\text{m} < \lambda > 0,76 \mu\text{m}$ :

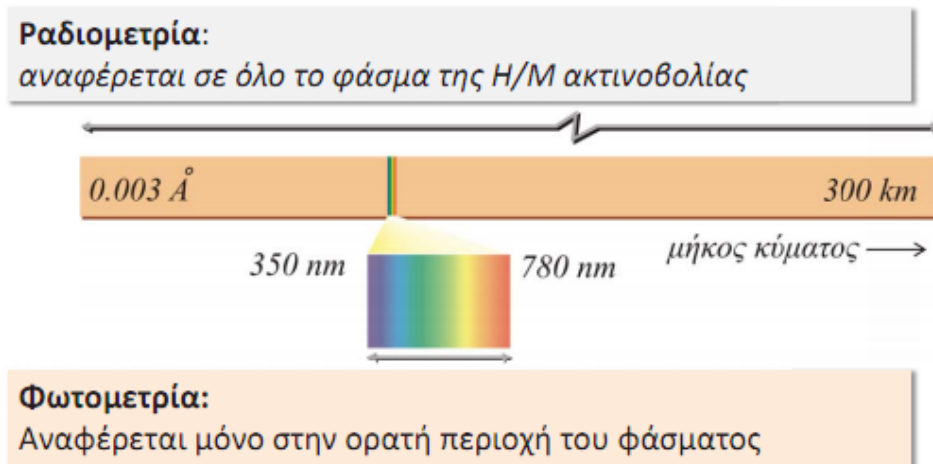


Σχήμα 1.11: χρώματα του ορατού φάσματος της ΗΜ ακτινοβολίας

- τις **υπέρυθρες ακτίνες** (infrared rays), εκπέμπονται από τα διάφορα θερμά σώματα και μόρια, λόγω των ταλαντώσεων και κινήσεων των μορίων τους, μήκους:  $0,76 \mu\text{m} < \lambda > 1000 \mu\text{m}$ , με επιμέρους περιοχές:  $0,76 \mu\text{m} < \text{NIR (near infrared)} > 1,4 \mu\text{m} < \text{SWIR (short infrared)} > 3 \mu\text{m} < \text{MID (mid infrared)} > 8 \mu\text{m} < \text{LWIR (long infrared)} > 15 \mu\text{m} < \text{FIR (far infrared)} > 1000 \mu\text{m}$ ,
- τα **μικροκύματα** (microwaves), παράγονται από ηλεκτρονικά κυκλώματα, μήκους:  $1000 \mu\text{m} < \lambda > 100 \text{cm}$ , με επιμέρους περιοχές:  $1000 \mu\text{m} < \text{EHF (extremely high frequency)} > 10 \text{mm} < \text{SHF (super high frequency)} > 10 \text{cm} < \text{UHF (ultra high frequency)} > 100 \text{cm}$ ,
- τα **ραδιοκύματα** (radio waves), παράγονται από ηλεκτρονικά κυκλώματα, μήκους:  $100 \text{cm} < \lambda > 100 \text{km}$ , με επιμέρους περιοχές:  $100 \text{cm} < \text{VHF (veryhigh frequency)} > 10 \text{m} < \text{HF (high frequency)} > 100 \text{m} < \text{MF (medium frequency)} > 1000 \text{m} < \text{LF (low frequency)} > 10 \text{km} < \text{VLF (very low frequency)} > 100 \text{km}$  και
- τα **μακρά ραδιοκύματα** (long radio waves), παράγονται από ηλεκτρονικά κυκλώματα, μήκους:  $100 \text{km} < \lambda > 100000 \text{km}$ , με επιμέρους περιοχές:  $100 \text{km} < \text{VF/ULF (voice frequency/ultra low frequency)} > 1000 \text{km} < \text{SLF (super low frequency)} > 10000 \text{km} < \text{ELF (extremely low frequency)} > 100000 \text{km}$ .

### 1.1.3.2 Η ποσοτική περιγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η ακτινοβολία των σωμάτων, περιγράφεται ποσοτικά με χρήση χαρακτηριστικών μεγεθών, που αφορούν την ίδια και την πηγή της ακτινοβολίας, αναφέρεται σε όλο το ΗΜ φάσμα της ακτινοβολίας και χρησιμοποιείται ο όρος **ραδιομετρία**, χαρακτηρίζοντας με το δείκτη  $e$  (electromagnetic = ηλεκτρομαγνητισμός). Για την περιγραφή της φωτεινής ακτινοβολίας, που προσπίπτει σε δεδομένη επιφάνεια, χρησιμοποιείται ο όρος **φωτομετρία**. Σε πλήρη αντιστοιχία με τα μεγέθη που περιγράφουν όλο το ΗΜ φάσμα της ακτινοβολίας, τα φωτομετρικά μεγέθη, που αναφέρονται μόνο στο ορατό φάσμα, διαχωρίζονται χρησιμοποιώντας το δείκτη  $v$  (visual = ορατό) και ορίζονται με τις ίδιες σχέσεις με τα πρώτα. Στην περίπτωση π.χ. των φωτοβολταϊκών στοιχείων, χρησιμοποιούνται τα γενικά μεγέθη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ενώ σε λαμπτήρες φωτισμού, τα φωτομετρικά μεγέθη



Σχήμα 1.12: περιοχές μέτρησης της ραδιομετρίας και της φωτομετρίας

- **Ισχύς ή ροή ακτινοβολίας  $\Phi_e$**  (radiant power) και **Φωτεινή ισχύς ή ροή  $\Phi_v$**  (luminous power), ορίζεται ως το πηλίκο της ακτινοβολούμενης σε χρόνο  $dt$ , ενέργειας  $dQ$ , μέσα σε στερεά γωνία  $d\Omega$ . Δηλαδή:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1.13)$$

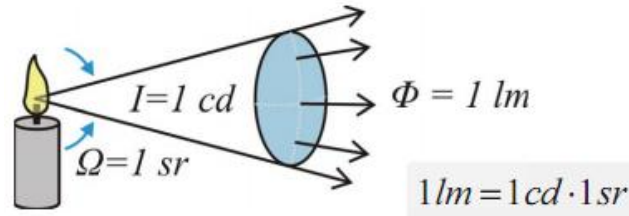
μονάδα μέτρησης της  $\Phi_e$  στο SI, είναι το 1 W (watt) και μονάδα μέτρησης της  $\Phi_v$  στο SI, είναι το 1 lm (1 lumen = 1 cd/sr). Ραδιομετρική ροή 1 W, μονοχρωματικής ακτινοβολίας στο μέγιστο της οφθαλμικής ευαισθησίας (554 nm), ισοδυναμεί με 680 lm.

- **Γωνιακή κατανομή ροής ή ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας  $I_e$**  (radiant intensity) και **Φωτοβολία ή ένταση φωτεινής πηγής  $I_v$**  (luminous intensity), καθορίζει το ποσό της ροής ακτινοβολίας  $d\Phi$ , ανά μονάδα στοιχειώδους στερεάς γωνίας  $d\Omega$  και υπολογίζεται από την σχέση:

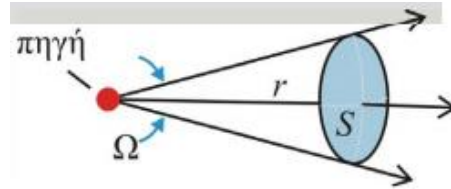
$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1.14)$$

μονάδα μέτρησης της  $I_e$  στο SI, είναι το 1 W/sr και μονάδα μέτρησης της  $I_v$  στο SI, είναι το 1 cd (1 candela = 1 lm/sr). Ορίζεται 1 cd ως το 1/60 της φωτεινής ισχύος, που εκπέμπεται από επιφάνεια 1 cm<sup>2</sup>·Pt και βρίσκεται σε θερμοκρασία τήξεως.





- **Στερεά γωνία  $\Omega$** , με κορυφή  $O$ , προσδιορίζεται ως εξής: Έστω μια σφαίρα με κέντρο το  $O$  και ακτίνα  $r$ . Θεωρήστε τις άπειρες ημιευθείες  $Ox$ , οι οποίες ξεκινώντας από το κέντρο  $O$ , αποκόπτουν από τη σφαιρική επιφάνεια ένα τμήμα στοιχειώδους εμβαδού  $dS$ . Η αντίστοιχη στερεά γωνία  $d\Omega$ , ορίζεται από το πηλίκο:



$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} \quad (1.15)$$

μονάδα μέτρησης της  $d\Omega$  στο SI, είναι το 1 sr (steradian ή στερεακτίνιο). 1 sr είναι η στερεά γωνία της οποίας οι γενέτειρες ευθείες προσδιορίζουν, σε σφαίρα ακτίνας 1 m, τμήμα της σφαιρικής επιφάνειας εμβαδού 1 m<sup>2</sup>.

Επειδή η συνολική επιφάνεια μιας σφαίρας είναι  $S = 4\pi r^2$ , η στερεά γωνία που ορίζεται από ολόκληρη τη σφαίρα αντιστοιχεί σε στερεά γωνία:

$$d\Omega = \frac{4 * \pi * r^2}{r^2} = 4\pi \quad (1.16)$$

- **Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας  $E_e$**  (irradiance) και **Φωτισμός** ή **πυκνότητα φωτεινής ακτινοβολίας  $E_v$**  (illuminance), αφορά στοιχειώδη ισχύς ακτινοβολίας  $d\Phi$ , σ όλα τα μήκη κύματος, ανά μονάδα στοιχειώδη επιφάνεια  $dS$ , μέσα από την οποία διέρχεται ή πάνω στην οποία προσπίπτει ή από την οποία εκπέμπεται:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1.17)$$

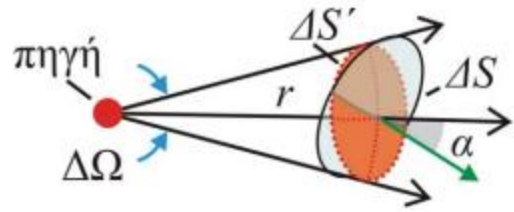
μονάδα μέτρησης της  $E_e$  στο SI είναι το 1 W/m<sup>2</sup> και μονάδα μέτρησης της  $E_v$  στο SI, είναι το 1 lx (1 Lux = 1 lm/m<sup>2</sup>).

Η φασματική κατανομή πυκνότητας ισχύος  $E_{\lambda T}$ , αφορά την εξάρτηση της πυκνότητας ισχύος, μέσα σε στενή περιοχή μηκών κύματος από  $\lambda$  έως  $\lambda + d\lambda$ , από το μήκος κύματος  $\lambda$ , σε θερμοκρασία  $T$  του σώματος:

$$E_{\lambda T} = \frac{dE_e}{d\lambda} \quad (1.18)$$

μονάδες μέτρησης της  $E_{\lambda T}$  στο SI, είναι το 1 W/m<sup>2</sup>\*nm ή W/m<sup>2</sup>\*μm, εκφράζοντας το  $d\lambda$  σε nm ή σε μm αντίστοιχα.

- Νόμος φωτισμού: Ο φωτισμός που προκαλεί μια σημειακή φωτεινή πηγή σε ένα σημείο μιας επιφάνειας, είναι ανάλογος με την ένταση της φωτεινής πηγής  $I_v$ , ανάλογος με το συνημίτονο της γωνίας  $\alpha$ , με την οποία προσπίπτουν οι ακτίνες στη στοιχειώδη επιφάνεια και αντιστρόφως ανάλογος με το τετράγωνο της απόστασης  $r$ , της φωτεινής πηγής από το φωτιζόμενο σημείο.



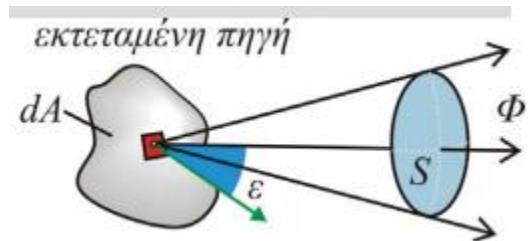
$$\left. \begin{aligned} E_v &= \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I * d\Omega}{dS} \\ d\Omega &= \frac{dS'}{r^2} = \frac{dS * \cos(\alpha)}{r^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow E = \frac{I * \cos(\alpha)}{r^2} \quad (1.19)$$

- **Ένταση ακτινοβολίας  $J$**  (radiosity), ονομάζουμε την στοιχειώδη ισχύς ακτινοβολίας  $d\Phi$ , που διαπερνά κάθετα τη στοιχειώδη επιφάνεια  $dS$ , τοποθετημένη στη θέση προσδιορισμού και δίδεται από την σχέση:

$$J = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1.20)$$

μονάδα μέτρησης της  $J$  στο SI, είναι το  $1 \text{ W/m}^2$ .

- **Γωνιακή αφετική ικανότητα  $Le$**  (radiance) και **Λαμπρότητα  $L_v$**  (luminance), το μέγεθος αυτό αφορά είτε στην εκπομπή ακτινοβολίας από επιφάνεια, είτε στη δίοδο της ακτινοβολίας από επιφάνεια και ιδιαίτερα αναφέρεται σε εκτεταμένες πηγές ΗΜ ακτινοβολίας. Ορίζεται ως η ισχύς ακτινοβολίας  $d\Phi$ , ανά μονάδα στοιχειώδους επιφάνειας της πηγής  $dA$ , ανά μονάδα στοιχειώδους στερεάς γωνίας  $d\Omega$  και το συνημίτονο της γωνίας  $\theta$ , μεταξύ της κατεύθυνσης παρατήρησης και της καθέτου στην επιφάνεια της πηγής:



$$L = \frac{d^2\Phi}{dA * \cos(\theta) * d\Omega} \quad (1.21)$$

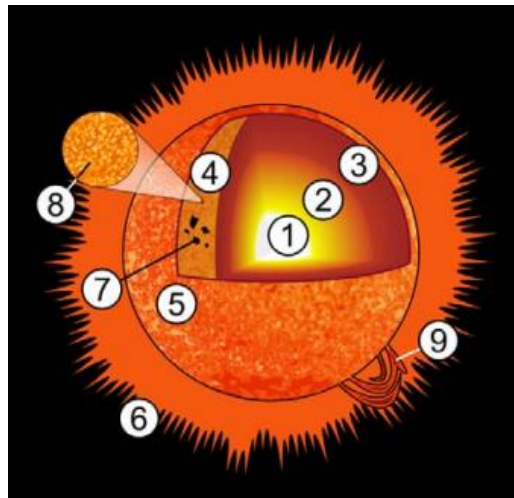
μονάδα μέτρησης της  $Le$  στο SI, είναι το  $1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$  και μονάδα μέτρησης της  $L_v$  στο SI, είναι το  $1 \text{ nt}$  ( $1 \text{ Nit} = 1 \text{ cd/m}^2$ ).

## 1.2 Η διάχυση του φωτός

Ο ήλιος είναι ο αστέρας του ηλιακού συστήματος της γης, είναι δε το λαμπρότερο σώμα του ουρανού. Η φωτεινότητά του είναι τέτοια, ώστε κατά την διάρκεια της ημέρας, όταν είναι πάνω από τον ορίζοντα, να μην επιτρέπει, λόγω της έντονης διάχυσης του φωτός σε άλλα ουράνια σώματα, να εμφανίζονται (με εξαίρεση την σελήνη και σπανιότερα την αφροδίτη). Σύμφωνα με την αρχαία ελληνική μυθολογία, υπήρξε γιος του τιτάνα Υπερίωνος (κατά τους Όμηρο, Ησίοδο). Φοίβος, δηλαδή φωτοβόλος, ήταν η προσωνυμία του ήλιου, η ίδια με του θεού Απόλλωνα. Κατά την εξέλιξη του αρχαίου ελληνικού πολιτισμού, οι ηλιακές ιδιότητες αποδόθηκαν στον θεό Απόλλωνα. Στη σύγχρονη εποχή, η σημασία του ήλιου, στην εξέλιξη και την διατήρηση της ζωής στην γη, είναι καίρια, καθώς με τη θεμελιώδη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, προσφέρει την απαραίτητη ενέργεια για την ανάπτυξη των ζωντανών οργανισμών και διατηρεί, την επιφανειακή θερμοκρασία της γης, σε ανεκτά για τη ζωή επίπεδα.

### 1.2.1 Η εκπομπή της ηλιακής ακτινοβολίας

Το σώμα που εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία, ονομάζεται **φωτεινή πηγή**. Υπάρχουν φυσικές και τεχνητές πηγές, ενώ διακρίνονται στα **αυτόφωτα σώματα** όπως είναι ο ήλιος και στα **ετερόφωτα σώματα**, όπως είναι η γη και τα υπόλοιπα άστρα, τα οποία όμως δεν παράγουν από μόνα τους φως, αλλά εκπέμπουν το φως που δέχονται από άλλα αυτόφωτα σώματα. Η εκπομπή φωτός από τα αυτόφωτα σώματα, συνήθως οφείλεται την αύξηση της θερμοκρασίας τους, μεγαλύτερης των 525°C (θερμική ακτινοβολία). Ο ήλιος θεωρείται η σημαντικότερη πηγή φωτός, καθώς χωρίς το φως και τη θερμότητα που εκπέμπει, δεν θα μπορούσε να υπάρχει ζωή στον πλανήτη μας, ενώ είναι ιδανική πηγή φωτός, καθώς διατηρεί μια φυσική ισορροπία μεταξύ του θερμού και του ψυχρού φωτός, περιέχοντας όλα τα μήκη κύματος της ορατής ακτινοβολίας, σε σωστή αναλογία.



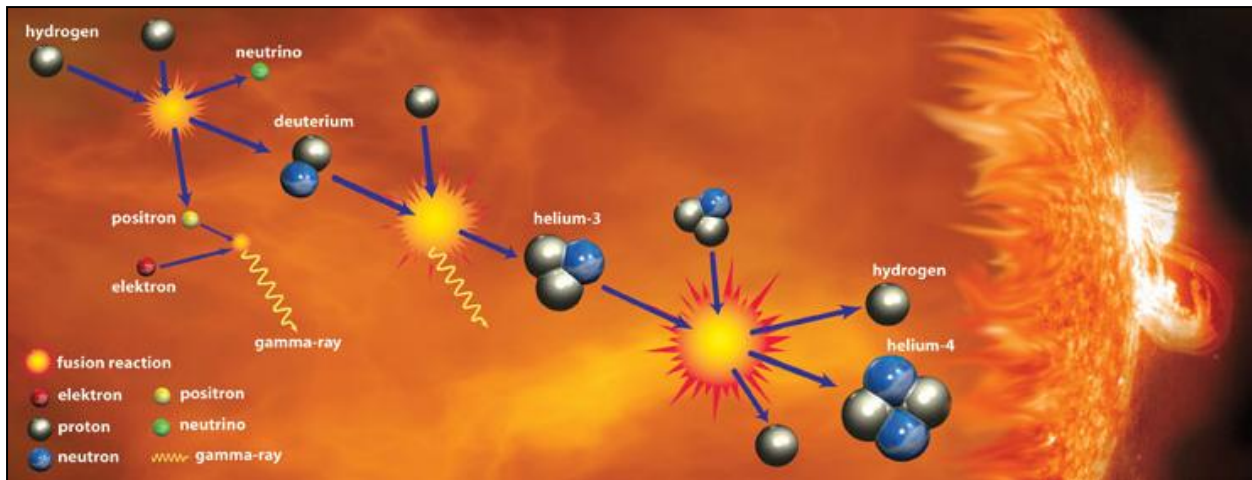
Σχήμα 1.13: ηλιακός δίσκος (δομή Ήλιου)

1) πυρήνας, 2) ζώνη ακτινοβολίας, 3) ζώνη μεταφοράς, 4) φωτόσφαιρα, 5) χρωμόσφαιρα, 6) στέμμα, 7) ηλιακή κηλίδα, 8) κοκκίδωση και 9) έκλαμψη

Ο ήλιος είναι ένα τυπικό αστέρι, με μάζα  $2 \cdot 10^{30}$  kg, ακτίνα 700000 km, ηλικία  $5 \cdot 10^9$  χρόνια και υπολογίζεται ότι έχει μπροστά του άλλα 5 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια ζωής. Η επιφανειακή θερμοκρασία του είναι περίπου 5800 K, ενώ η εσωτερική περίπου 15000000 K. Η υψηλή θερμοκρασία του ήλιου οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του.

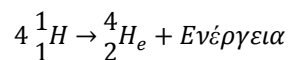
Λόγω της βαρυτικής έλξης προς το κέντρο του ήλιου, οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις που επικρατούν εκεί είναι τόσο υψηλές, που παρόλο που η ύλη βρίσκεται σε αέρια και ιονισμένη μορφή (πλάσμα), είναι πιο συνεκτική από τα στερεά, ενώ η πυκνότητά της επίσης είναι πολύ υψηλή. Τα παραπάνω, αποτελούν αποτέλεσμα του φαινομένου της πυρηνικής αλυσωτής αντίδρασης (σύντηξης), στον πυρήνα του ήλιου.

Η αλυσωτή αντίδραση, ονομάζεται **αλυσίδα pp**, είναι εξώθερμη και απελευθερώνει ενέργεια στο περιβάλλον, με την μορφή ακτινοβολίας  $\gamma$  και κινητικής ενέργειας συγκεκριμένων νετρίνων. Τα φωτόνια αυτής της ακτινοβολίας  $\gamma$ , απορροφούνται απ τα διπλανά άτομα και επανεκπέμπονται συνεχώς σε τυχαία κατεύθυνση, χάνοντας κάθε φορά λίγη από την ενέργειά τους. Τελικώς, και μέσα από μια διαδικασία που διαρκεί δεκάδες χιλιάδες χρόνια, κάποια από αυτά τα φωτόνια φτάνουν στα εξωτερικά στρώματα του ήλιου και ακτινοβολούν προς όλες τις κατευθύνσεις στο σύμπαν. Μέσα από όλη αυτή τη διαδικασία, ο ήλιος παράγει τα τεράστια ποσά ενέργειας, την **ηλιακή ενέργεια**, η οποία διαδίδεται στο σύμπαν εν κενό ως **ηλιακή ακτινοβολία**, με τη μορφή κυρίως ΗΜ κυμάτων αλλά και με σωματιδιακή μορφή.



**Σχήμα 1.14:** πυρηνική σύντηξη με αποτέλεσμα παραγωγή ενέργειας στο εσωτερικό του ήλιου

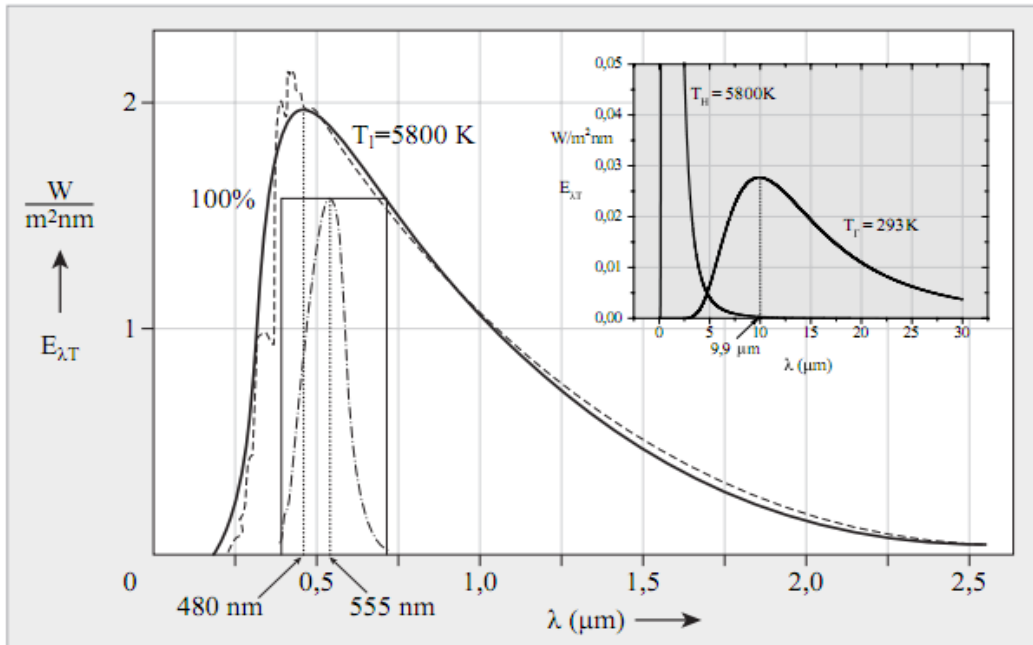
Ο ήλιος αποτελείται κατά 74 % από Υδρογόνο  $H$ , κατά 25 % από Ήλιο  $H_e$  και 1 % από άλλα στοιχεία. Το Υδρογόνο αποτελεί το κύριο καύσιμο για τις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις, που παράγουν την ενέργεια που ακτινοβολεί, ενώ το Ήλιο, προέρχεται κυρίως από τα προϊόντα της πυρηνικής σύντηξης του υδρογόνου. Σε υποατομικό επίπεδο, οι πυρήνες ατόμων Υδρογόνου  $H$ , λόγω των ακραίων συνθηκών του πυρήνα του ήλιου, συγκρούονται και σχηματίζουν πυρήνες του στοιχείου ήλιου  $H_e$ . Σύμφωνα με την θεωρία αυτή, η πυρηνική αντίδραση:



δικαιολογεί με το έλλειμμα μάζας, την ελκύμενη ενέργεια με βάση τη γνωστή σχέση  $E = m * c^2$ , από την ειδική θεωρία της σχετικότητας του Einstein. Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο Υδρογόνου  $H$ , που μετατρέπεται σε Ήλιο  $H_e$ , ελκύεται ενέργεια ίση με  $1,67 * 10^5$  kWh.

Στο παρακάτω σχήμα, αποδίδεται η γραφική παράσταση της φασματικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος  $E_{\lambda T}$  της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στα όρια της ατμόσφαιρας της γης AM0 (εστιγμένη καμπύλη). Η εκπεμπόμενη ηλιακή ακτινοβολία, καλύπτει ένα ποικίλο μέρος της φασματικής κατανομής του ΗΜ φάσματος, την υπεριώδη, την ορατή και ένα μικρό μέρος της υπέρυθρης περιοχής. Αποτελεί την

ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, καθώς το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας περιλαμβάνεται μεταξύ των μηκών  $\sim 0,17 < \lambda < 6 \mu\text{m}$ . Επίσης, προσεγγίζεται, κατά το δυνατό καλύτερο τρόπο, με φάσμα μέλανος σώματος θερμοκρασίας  $T = 5800 \text{ K}$  και μέγιστο στο μήκος κύματος  $\lambda_{\text{μεγ}} = 0,48 \mu\text{m}$  (συνεχής καμπύλη).



Σχήμα 1.15: γραφική παράσταση φασματικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας

Στο αριστερό τμήμα, της γραφικής παράστασης της ηλιακής ακτινοβολίας (εστιγμένη καμπύλη), διακρίνονται κάποιες διακυμάνσεις της εκπεμπόμενης ενέργειας, σε αντίθεση με την γραφική του αντίστοιχου μέλανος σώματος (συνεχή καμπύλη). Οι διακυμάνσεις αυτές της ενέργειας, οφείλονται στις απορροφήσεις που υφίσταται η ηλιακή ακτινοβολία, που εκπέμπεται από τα εσωτερικά στρώματα του ήλιου, καθώς αυτή διαπερνά τα ανωτέρα, χαμηλής θερμοκρασίας, στρώματα. Στην χρωμόσφαιρα του ήλιου, η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από χαμηλής θερμοκρασίας αέρια στοιχεία (απορροφήσεις των στοιχείων Fe, Mg, Ca).

Στο ίδιο σχήμα επίσης, απεικονίζεται η καμπύλη ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού, στο ορατό φάσμα από 360 nm έως 750 nm, με μέγιστο ευαισθησίας στο  $\lambda = 555 \text{ nm}$ . Ενώ, στο ένθετο διάγραμμα επάνω-δεξιά, παρουσιάζονται δύο γραφικές φασματικές κατανομής της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας μέλανος σώματος, για το σύστημα ήλιου-γης, η μια γραφική για την ακτινοβολία της γης και η άλλη για την ηλιακή ακτινοβολία.

Η **ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας**  $P_T$ , της συνολική φασματικής κατανομής, δηλαδή σε όλα τα μήκη κύματος, που εκπέμπει ο ήλιος ημισφαιρικά από την φωτόσφαιρά του, υπακούει στον νόμο των Stefan-Boltzmann, δίνοντας τιμή  $3,91 \cdot 10^{23} \text{ kW}$ , συναρτήσει της μέσης ηλιακής ακτίνας  $r_o$ , της ικανότητας εκπομπής  $\epsilon_T$  του ήλιου και της θερμοκρασίας φωτόσφαιρας  $T$  του:

$$P_T = \epsilon * \sigma * T^4 * (4\pi * r_o) \quad (1.22)$$

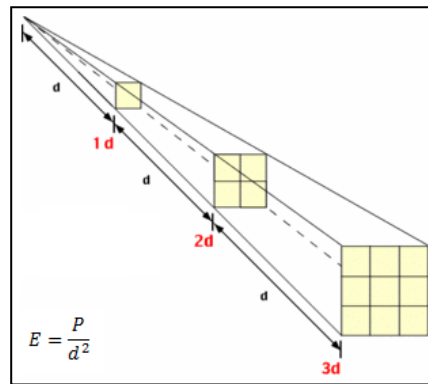
όπου,  $\epsilon_T = 1$ ,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (Wm}^{-2}\text{K}^4)$  η σταθερά Boltzmann,  $T \approx 5800 \text{ K}$  και  $r_o \approx 6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$ .

## 1.2.2 Η διάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία που απελευθερώνεται από την επιφάνεια του ήλιου, μεταδίδεται στο κενό, όπου και στην συνέχεια εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της γης. Κατά την διέλευση της στο κενό, βαθμιαία χάνει μέρος της ενέργειας της, μέχρι την είσοδο της στην γήινη ατμόσφαιρα. Από τη στιγμή, που τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας θα εισέλθουν στην ατμόσφαιρα, θα επηρεαστούν από την ανομοιογενή κατανομή αέριων σωματιδίων της ατμόσφαιρας ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $SF_6$ , σκόνη), θα χάσουν κι άλλο μέρος της ενέργειάς τους, ενώ το μήκος κύματός τους θα εξακολουθήσει να αυξάνεται, όσο αυτά διασχίζουν την ατμόσφαιρα και μέχρι να φτάσουν στο έδαφος. Είναι φανερό ότι υπάρχουν διαφορές ανάλογα με τη μάζα του ατμοσφαιρικού αέρα που διαπερνά η ηλιακή ακτινοβολία.

### 1.2.2.1 Η διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας εν κενό

Η ηλιακή ακτινοβολία κατά την εκπομπή της στην φωτόσφαιρα του ήλιου, έχει μικρό μήκος κύματος και άρα υψηλή ενέργεια, όσο όμως διαχέεται ακτινικά προς όλες τις κατευθύνσεις του διαστήματος, εν κενό, το μήκος κύματος της μεγαλώνει, με αποτέλεσμα όταν πλησιάζει στη γη να έχει μικρότερη ενέργεια, από ότι την στιγμή της εκπομπής της. Η παραπάνω διατύπωση, γίνεται κατανοητή από το φυσικό νόμο του αντίστροφου τετραγώνου (inverse square law). Έτσι, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία απομακρύνεται από την πηγή προς τον χώρο διάδοσης της και η ισχύς  $P$  της, εξασθενεί αντιστρόφως ανάλογα, με το τετράγωνο της απόστασης  $d$  από την πηγή της. Αυτό σημαίνει ότι, αν διπλασιαστεί η απόσταση  $d$ , η ισχύς  $P$  της ακτινοβολίας θα υποτετραπλασιαστεί και ούτω καθεξής, με αποτέλεσμα τη μείωση της ενέργειας  $E$  της ακτινοβολίας.



**Σχήμα 1.16:** μείωση ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας σύμφωνα με το νόμο αντίστροφου τετραγώνου

Από το νόμο του αντίστροφου τετραγώνου και σε συνδυασμό με το νόμο των Stefan-Boltzmann (σχέση 1.22), προκύπτει η **πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας εν κενό**  $G_{ext}$  (Extraterrestrial), ενώ η αριθμητική τιμή της στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας, δίνεται από τη σχέση:

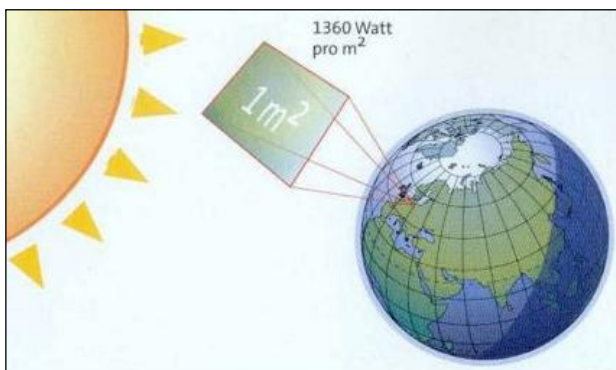
$$G_{ext} = \frac{P_T}{4\pi * d^2} \quad (1.23)$$

είναι σχετικά σταθερή, με μικρές διακυμάνσεις, που οφείλονται στην μεταβολή της απόστασης ήλιου-γης ( $\pm 3,5\%$ ) όπως επίσης, στη περιοδική εμφάνιση των ηλιακών κηλίδων ( $\pm 1,5\%$ ), όπου η περιστροφή του ήλιου γύρω από τον άξονα του, προκαλεί περιοδική απόκρυψη των κηλίδων (ενδεκαετής κύκλος). Παρόλα αυτά, οι διακυμάνσεις είναι ασήμαντες, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι η συνολική απορροφούμενη ακτινοβολία από την γη, είναι σταθερή για κάθε μέρα του έτους.

Όταν η γη βρίσκεται στη μέση απόσταση  $d$  της από τον ήλιο ( $\approx 149,5 \cdot 10^6$  km) και υπό γωνία  $32^\circ$  από αυτόν, τότε η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που αποδίδεται στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας  $G_{ext}$ , στην μονάδα του χρόνου, σε επιφάνεια  $1 \text{ m}^2$  και με προσανατολισμένη την επιφάνεια κάθετα στις ακτίνες του ηλίου, τότε ορίζεται ως σημείο αναφοράς η **ηλιακή σταθερά**  $G_{SC}$  (Solar Constant) με μέση τιμή  $1367 \text{ W/m}^2$ . Αυτή η τιμή είναι πολύ σημαντική, καθώς αντιπροσωπεύει το διαθέσιμο ποσό ηλιακής ενέργειας που υπάρχει στη γη, για τις διάφορες εφαρμογές προς εκμετάλλευση της. Με βάση αυτή την σταθερά, είναι δυνατό να υπολογιστεί η πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας  $G_{ext}$ , που φτάνει στα όρια της ατμόσφαιρα της γης, για κάθε μέρα διαφορετικά.

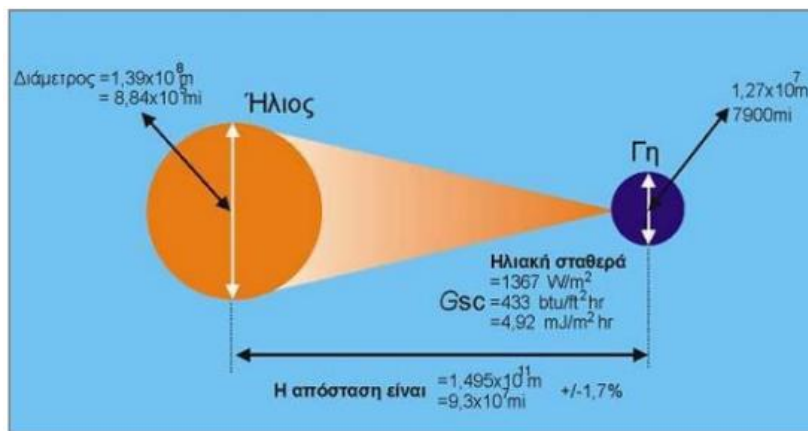
$$H_{ext} = G_{SC} * R_o \quad (1.24)$$

όπου,  $R_o$  ο διορθωτικός συντελεστής απόστασης ήλιου-γης και δίνεται παρακάτω, από τη σχέση (1.28).



Σχήμα 1.17: απεικόνιση ηλιακής σταθεράς

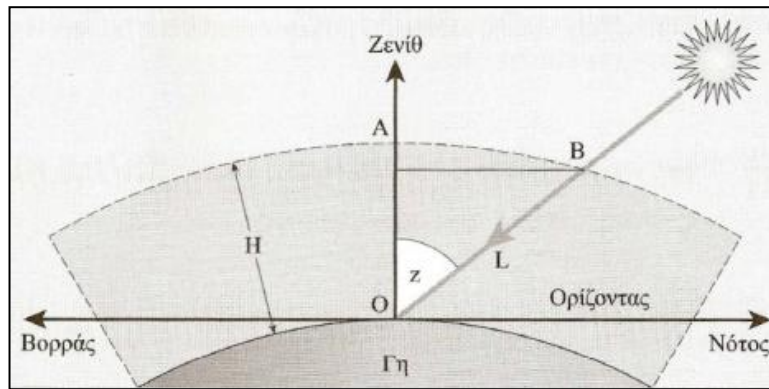
Λαμβάνοντας υπόψη τον νόμο του Boltzmann, προκύπτει αποδιδόμενη ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας  $P_T$  με τιμή  $3,91 \cdot 10^{26} \text{ W}$ . Ο ήλιος βρίσκεται σε απόσταση  $1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$  από την γη, με δεδομένο ότι αυτός έχει 125 φορές τη διάμετρο τη γης και την βλέπει σαν ένα κύκλο, προκύπτει ότι η γη δέχεται μόλις το  $1/10^9$  της ακτινοβολίας που εκπέμπει ο ήλιος, κατά μέσο όρο  $137 \cdot 10^{15} \text{ W}$  και είναι κατά τάξεις μεγαλύτερη, της μέσης ισχύος που απαιτεί για τη διατήρηση του γήινου οικοσυστήματος, δηλαδή  $7 \cdot 10^{12} \text{ W}$ . Λόγω όμως της εξασθένησης που προκαλεί η ατμόσφαιρα, τελικά στη γη, στο επίπεδο της θάλασσας, φθάνει πυκνότητα ισχύος, μόνο  $1000 \text{ W/m}^2$  (στην καλύτερη περίπτωση, συνήθως αρκετά λιγότερο), το οποίο στη διάρκεια του 24ώρου δίνει μια μέση ετήσια ισχύς  $126 \cdot 10^{15} \text{ W}$ .



Σχήμα 1.18: γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ ήλιου-γης

### 1.2.2.2 Η διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα της γης

Η ηλιακή ακτινοβολία, καθώς αυτή διεισδύει την γήινη ατμόσφαιρα, εξασθενεί σε όλα τα μήκη κύματος της, κατά την αρχική κατεύθυνση τους. Έτσι, βαθμιαία χάνει μέρος της ενέργειας της κατά τη διαδρομή προς το έδαφος της γης, τόσο λόγω της απόστασης που διανύει η ηλιακή ακτινοβολία (νόμος αντίστροφου τετραγώνου), όσο και των μηχανισμών εξασθένησης, όπως αυτοί αναλύονται παρακάτω, που συναντά κατά την διέλευση της από τη γήινη ατμόσφαιρα. Το πόσο έντονα θα επιδράσουν οι μηχανισμοί εξασθένησης, εξαρτάται από την **αέρια μάζα AM**, που συναντά η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διέλευση της προς το έδαφος της γης. Καθορίζει ουσιαστικά την εξασθένηση, που προκαλείται από τον μεγαλύτερο δρόμο που διανύουν, σε κάθε περίπτωση, οι ακτίνες του ήλιου μέσα στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 1.19: καθορισμός ελάττωσης της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας

Έχει μετρηθεί ότι, στη στάθμη της θάλασσας η μέγιστη πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει περίπου στα  $900-1000 \text{ W/m}^2$ , ενώ αυξάνεται κατά περίπου  $7 \text{ W/m}^2$ , για κάθε  $100 \text{ m}$  ύψος της τοποθεσίας, λόγω μείωσης του πάχους  $H$  της γήινης ατμόσφαιρας που διασχίζουν οι ηλιακές ακτίνες. Άρα, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που διανύει μια ηλιακή ακτίνα μέσα στην γήινη ατμόσφαιρα, τόσο μικρότερη είναι η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο έδαφος της γης. Αντίστοιχα, όσο πιο κάθετα προσπίπτει μια ηλιακή ακτίνα πάνω στο έδαφος της γης, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας.

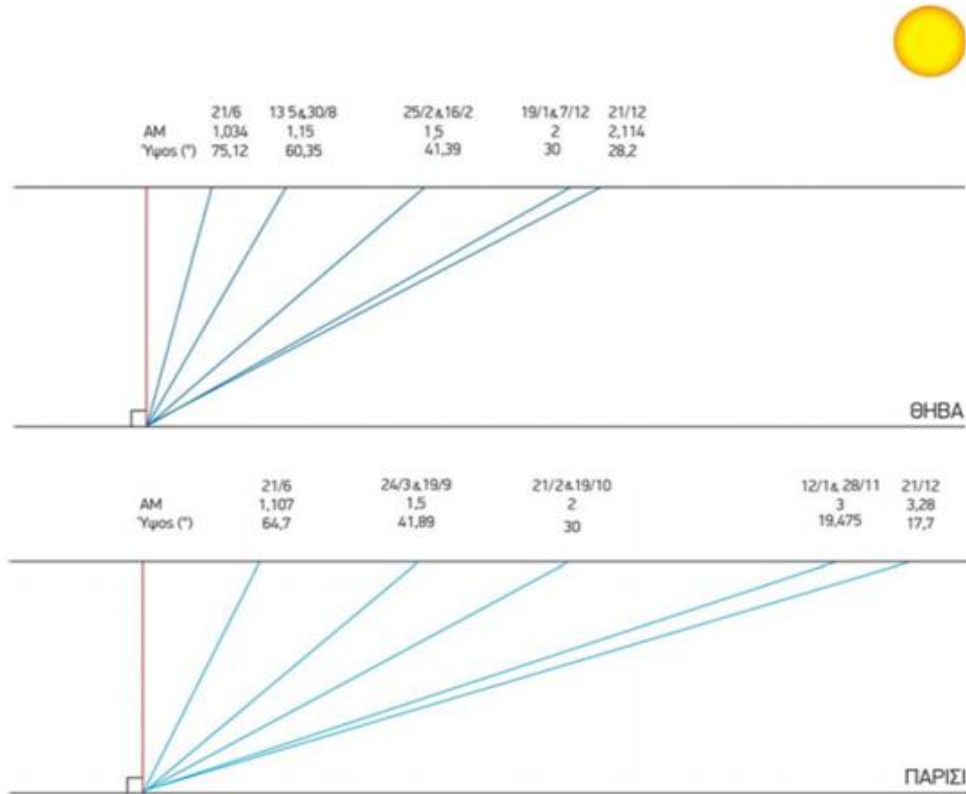
Ο λόγος  $m = \lambda/H$ , του μήκους  $\lambda$  της διαδρομής των ηλιακών ακτινών μέσα στην ατμόσφαιρα της γης, σε σχέση με το πάχος  $H$  της ατμόσφαιρας, προσδιορίζει τον αριθμό που τίθεται μετά τα ακρόνυμα **AM** των λέξεων Air Mass (αέρια μάζα). Με καλή, σχετικά, προσέγγιση για μικρές ζενιθίες γωνίες ( $\theta_z < 60^\circ$ ), μπορούμε να υπολογίζουμε το λόγο  $m$  από τη σχέση:

$$m \left( = \frac{\lambda}{H} \right) \approx \frac{1}{\sin(\theta_z)} \quad (1.25)$$

δηλαδή αν  $m = 1,5$ , τότε το δεδομένο αυτό γράφεται **AM 1,5**. Όπως είναι φανερό, ο λόγος  $m$  εξαρτάται από την ζενιθία γωνία  $\theta_z$ , μεταξύ των ηλιακών ακτινών και της κατεύθυνσης του ζενίθ του τόπου. Η σχέση είναι ακριβής για  $0^\circ \leq \theta_z \leq 70^\circ$  και στο επίπεδο της θάλασσας.

Ως **AM0** ορίζεται το κλάσμα μάζας για το διάστημα, δηλαδή έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα. Ως **AM1** ορίζεται το κλάσμα μάζας που αντιστοιχεί σε γωνία ζενίθ  $0^\circ$ , όταν δηλαδή ο ήλιος είναι κάθετα πάνω από έναν τόπο και **AM1,5** ή **AM2**, είναι μια τυπική τιμή του κλάσματος μάζας αέρα στην επιφάνεια της γης μια καθαρή μέρα με γωνία ζενίθ διαφορετική από  $0^\circ$ .





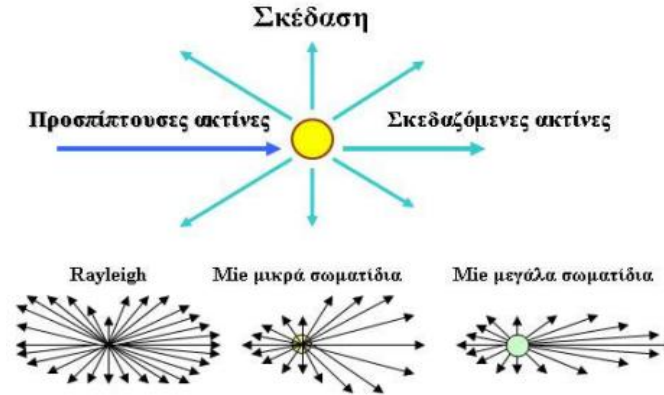
Σχήμα 1.21: μεταβολή αέριας μάζας κατά την διάρκεια του έτους για διαφορετικούς τόπους της γης

### I. Η διαδικασία εξασθένησης της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ελάττωση πάντως, σε κάθε περίπτωση, οφείλεται σε δύο μηχανισμούς εξασθένησης, στην ελαστική σκέδαση και στην μοριακή διέγερση συντονισμού.

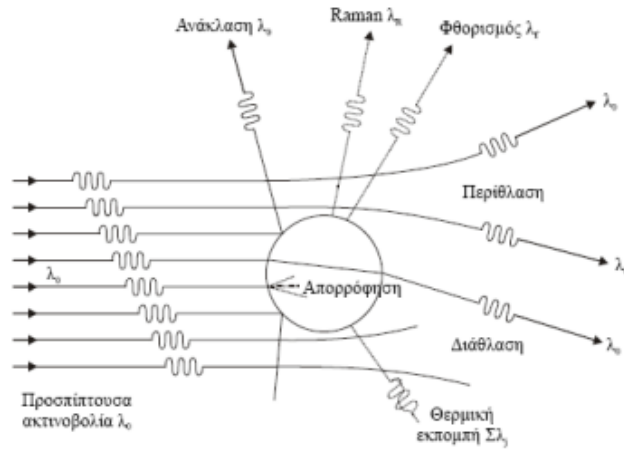
Η **ελαστική σκέδαση**, αφορά την ελαστική απορρόφηση και επανεκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, δηλαδή την αλλαγή κατεύθυνσης διάδοσης των φωτονίων, λόγω συγκρούσεων με τα ηλεκτρόνια των μορίων της ατμόσφαιρας. Η ελαστική απορρόφηση και εκπομπή της ακτινοβολίας, χαρακτηρίζεται από το ότι, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία έχει την ίδια συχνότητα και το ίδιο επίπεδο πόλωσης με την προσπίπτουσα. Η ένταση των ηλιακών ακτινών ελαττώνεται, καθώς τα φωτόνια σκεδάζονται αφενός στα μόρια της ατμόσφαιρας και στα πολύ μικρής διαμέτρου  $d$  σωματίδια ( $d \leq \lambda$ , σκέδαση Rayleigh), αφετέρου στα μεγαλύτερης διαμέτρου αιωρούμενων σωματιδίων (aerosols), δηλαδή υδρατμών, σκόνης και καπνού (σκέδαση Mei) στην ατμόσφαιρα.

Οι ιώδες και οι κυανές ακτίνες, σκεδάζονται εντονότερα απ ότι οι ερυθρές. Η εξάρτηση αυτή δικαιολογεί το μπλε χρώμα του ουρανού καθώς και το κόκκινο χρώμα των σύννεφων, τα οποία βρίσκονται απέναντι από τα σημεία της ανατολής και της δύσης του ήλιου, αντίστοιχα. Όταν ο ήλιος δύει ή ανατέλλει φαίνεται κόκκινος, πολλές φορές επειδή υπάρχουν σύννεφα και σκόνη στην ατμόσφαιρα, αυτά απορροφούν και σκεδάζουν το γαλάζιο φως πολύ πιο έντονα από ότι το κόκκινο και το κίτρινο φως, με αποτέλεσμα ο ίδιος ο ουρανός προς τη διεύθυνση της δύσης του ήλιου να εμφανίζεται κοκκινωπός. Αν η σκέδαση των ηλιακών ακτινών ήταν ανεξάρτητη του μήκους κύματος  $\lambda$ , το χρώμα του ουρανού θα ήταν λευκό, ενώ αν δεν συνέβαινε σκέδαση στα μόρια του αέρα, ο ουρανός θα φαινόταν μαύρος.



Σχήμα 1.22: αλλαγή κατεύθυνση φωτονίων κατά Rayleigh και Mei

Η **απορρόφηση συντονισμού**, αφορά τα διερχόμενα από την ατμόσφαιρα φωτόνια του ηλίου, που απορροφούνται από αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν Πυρίτιο, αλλά κυρίως στα μόρια της ατμόσφαιρας. Περιλαμβάνει μετατροπή της ενέργειας της ακτινοβολίας, η οποία απορροφάται από ορισμένα συστατικά της ατμόσφαιρας, σε θερμότητα και κατά συνέπεια σε επανεκπομπή της με τη μορφή ακτινοβολίας μεγαλύτερου μήκους κύματος. Χαρακτηρίζεται από γραμμές και περιοχές απορρόφησης, οι οποίες εμφανίζονται ως βαθιές ελαττώσεις της έντασης του καταμετρούμενου ηλιακού φωτός, σε όλο το εύρος των φασμάτων από επίγειες μετρήσεις.

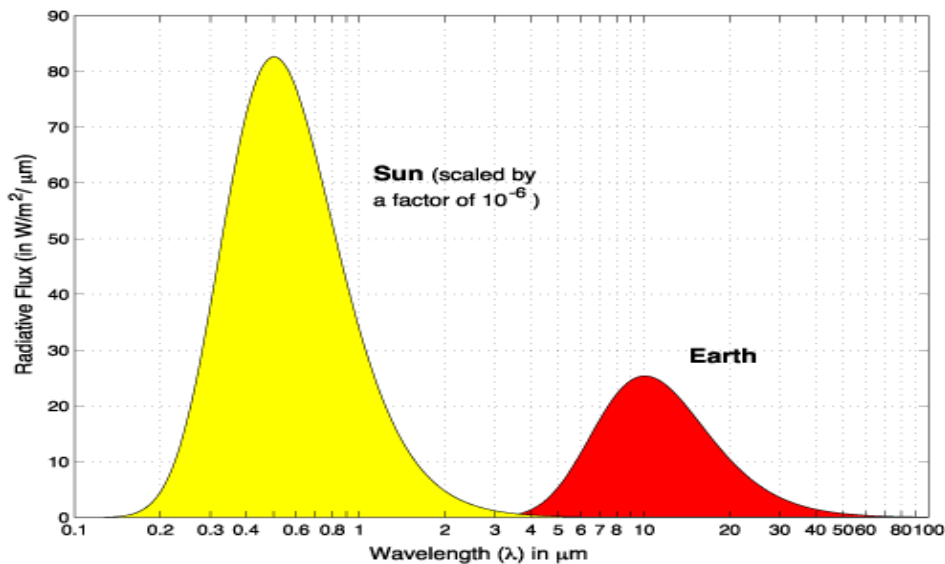


Σχήμα 1.23: απορρόφηση φωτονίων και επανεκπομπή με μεγαλύτερο μήκος κύματος

Η πλευρά των μικρών μήκων κύματος του ΗΜ φάσματος ( $\lambda < 0,4$ ), χαρακτηρίζεται από την απορροφητική δράση των μορίων του όζοντος ( $O_3$ ) στα ανώτερα στρώματα της κύριας μάζας της γήινης ατμόσφαιρας. Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος, διεισδύουν βαθύτερα στην ατμόσφαιρα, μέχρι όπου να απορροφηθούν και αυτά από τα διάφορα ατμοσφαιρικά αέρια, όπως οι υδρατμοί ( $H_2O$ ), το διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ), τα οξείδια του αζώτου ( $NO, N_2O$ ) κ.α..

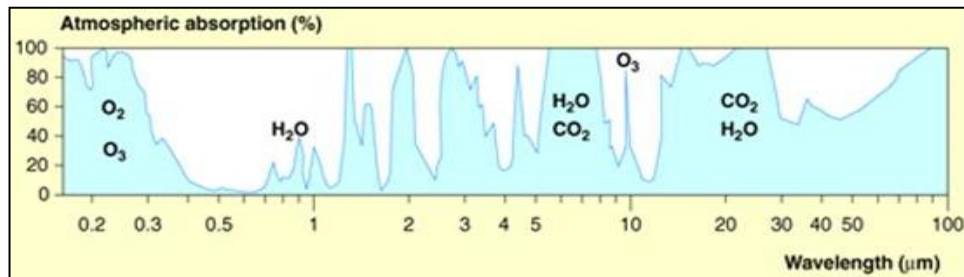
## II. Το φάσμα απορρόφησης από την γήινη ατμόσφαιρα

Το σύστημα έδαφος-ατμόσφαιρα της γης, απορροφά ηλιακή ακτινοβολία, επιστρέφοντας μέρος αυτής στο διάστημα μέσω επανεκπομπής. Με τον όρο γήινη ακτινοβολία, εννοείται το σύνολο των ΗΜ ακτινοβολιών που επανεκπέμπονται από το σύστημα έδαφος-ατμόσφαιρα της γης. Η γήινη ακτινοβολία, σε σύγκριση με την ηλιακή, καλύπτει εξίσου μεγάλο μέρος της φασματικής κατανομής του ΗΜ φάσματος των ακτινοβολιών και συγκεκριμένα στην υπέρυθρη φασματική περιοχή. Αποτελεί την ΗΜ ακτινοβολία μεγαλύτερου μήκους κύματος, σε σύγκριση με την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς το φάσμα της γήινης ακτινοβολίας, περιλαμβάνεται μεταξύ των μηκών κύματος  $\sim 4 < \lambda > 110 \mu\text{m}$ , ενώ προσεγγίζεται με το φάσμα μέλανος σώματος θερμοκρασίας  $T = 288 \text{ K}$  και με μέγιστο, στο μήκος κύματος  $\lambda_{\text{μεγ}} = 10 \mu\text{m}$ .



Σχήμα 1.24: φασματική κατανομή ηλιακής και γήινης ακτινοβολίας

Όταν το ΗΜ φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, λαμβάνεται και καταγράφεται από διάταξη στο έδαφος της γης, εκτός τις απορροφήσεις που οφείλονται στον ίδιο τον ήλιο, όπως έχει αναφερθεί στη παράγραφο (1.2.1), εμφανίζει μια γενικότερη ελάττωση της πυκνότητας ισχύος σε όλα τα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας, με νέες χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης στο ΗΜ φάσμα της. Οι νέες αυτές απορροφήσεις, δεν εμφανίζονται σε φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας AM0, επομένως, οφείλονται στη δράση των μορίων των αερίων συστατικών και μικροσωματιδίων της ατμόσφαιρας της γης, μέσω των δύο μηχανισμών εξασθένησης της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως περιγράφεται παραπάνω, δηλαδή στην ελαστική σκέδαση και στην μοριακή διέγερση συντονισμού.

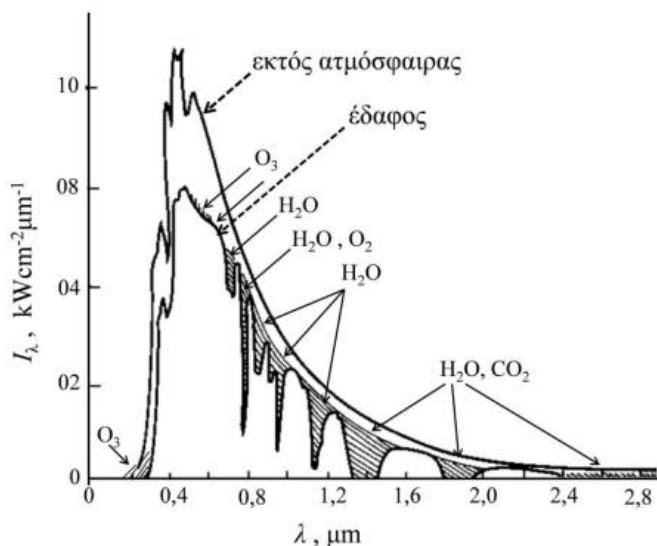


Σχήμα 1.25: φάσμα απορροφήσεων ΗΜ ακτινοβολίας της γήινης ατμόσφαιρας

Το αποτέλεσμα των παραπάνω διεργασιών, είναι η γήινη ατμόσφαιρα να εμφανίζει το φάσμα απορρόφησης ΗΜ ακτινοβολίας, όπως αποτυπώνεται στο παραπάνω σχήμα και να μεταβάλλεται η κατανομή του ΗΜ φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά φθάνει στο έδαφος της γης. Παρακάτω, περιγράφεται η απορρόφηση της ηλιακής και της γήινης ακτινοβολίας, όπως επίσης και η σημασία των απορροφήσεων αυτών, αλλά και των φασματικών κενών απορρόφησης, δηλαδή της διαπερατότητας που παρουσιάζει το φάσμα απορρόφησης της γήινης ατμόσφαιρας προς την ΗΜ ακτινοβολία, τα οποία ονομάζονται **ατμοσφαιρικά παράθυρα** και αποτελούν ζωτικής σημασίας, για τους ζώντες οργανισμούς της γης.

### II.A Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας :

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται η εξασθένηση που υφίσταται η ηλιακή ακτινοβολία στην γήινη ατμόσφαιρα. Η εξωτερική καμπύλη είναι το ΗΜ φάσμα, περίπου ίδιο με αυτό του μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5600 K, όπως μετρείται πριν εισέλθει στην ατμόσφαιρα της γης και στα όρια της ΑΜ0. Η εσωτερική καμπύλη είναι το ΗΜ φάσμα, που μετρείται στο έδαφος της γης. Η μείωση που εκφράζεται από τη μετατόπιση μεταξύ των δύο καμπύλων, οφείλεται στην εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω των διεργασιών σκέδασης (Rayleigh και Mie) και ανάκλασης στα νέφη, ενώ οι σκιασμένες περιοχές αποτελούν περιοχές απορρόφηση κυρίως των μορίων του H<sub>2</sub>O ή CO<sub>2</sub> και δευτερευόντως του O<sub>3</sub>.

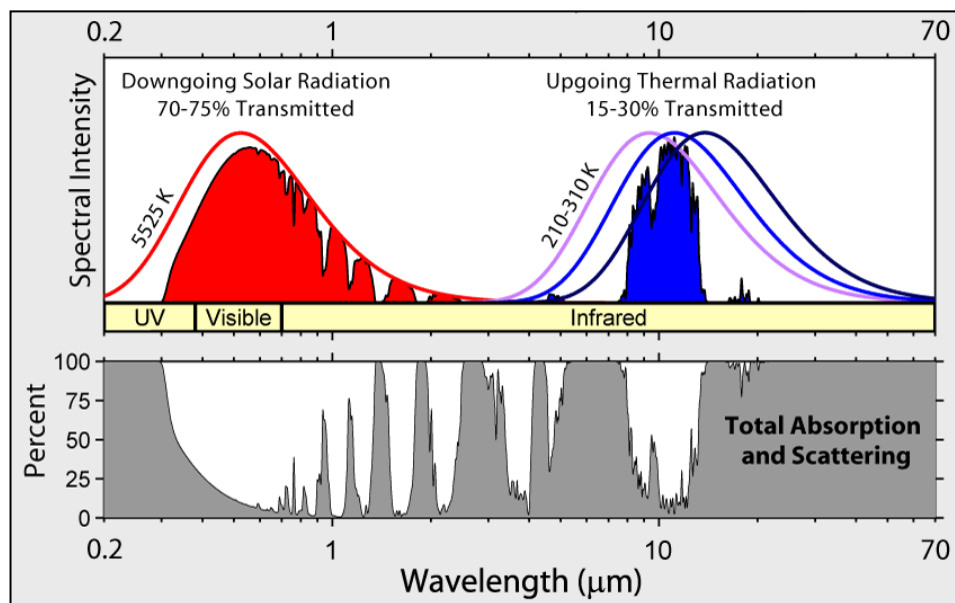


**Σχήμα 1.26:** φάσμα απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από τη γήινη ατμόσφαιρα

Η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στο έδαφος της γης, παρουσιάζει μειωμένες τιμές ενέργειας, σε όλη την έκταση της φασματικής κατανομής της, καθώς απορροφάται στην ατμόσφαιρα της γης, από τα διάφορα αέρια της. Συγκεκριμένα, η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται από το O<sub>3</sub>, με σχεδόν πλήρη απορρόφηση για μήκη κύματος μικρότερα των  $\lambda < 0,29 \mu\text{m}$  και σε σημαντικό βαθμό, για μήκη κύματος μεταξύ  $0,3-0,4 \mu\text{m}$ , ενώ η απορρόφηση από το O<sub>2</sub>, αφορά μια στενή περιοχή περίπου  $\lambda = 0,76 \mu\text{m}$ . Για μήκη κύματος μεγαλύτερα από  $2,5 \mu\text{m} < \lambda$ , υπάρχει ισχυρή απορρόφηση της υπέρυθρης ηλιακής ακτινοβολίας από CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O. Επομένως το στρώμα του O<sub>3</sub> στα ανώτερα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας, προστατεύει τα βιολογικά συστήματα της γης, από τη βλαβερή για αυτά υπεριώδη ακτινοβολία, μετατρέποντας την σε θερμότητα (υπέρυθρη ακτινοβολία).

## II.B Απορρόφηση γήινης ακτινοβολίας :

Η γήινη ακτινοβολία, απορροφάται έντονα από τα συστατικά της γήινης ατμόσφαιρας, με μεγάλο μοριακό βάρος, όπως οι Υδρατμοί (H<sub>2</sub>O), το Όζον (O<sub>3</sub>), το διοξείδιο του Άνθρακα (CO<sub>2</sub>), το Μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), το υποξείδιο του Αζώτου (N<sub>2</sub>O), αναφέρονται και ως αέρια του θερμοκηπίου. Αποτέλεσμα αυτής της απορρόφησης, είναι η θέρμανση της γήινης ατμόσφαιρας και τους εδάφους της γης, να γίνεται κατά κύριο λόγο από την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, δηλαδή την γήινη υπέρυθη ακτινοβολία και συγκεκριμένα, μεταξύ των 5-8 μm και μετά τα 13,5 μm - 1 cm του ΗΜ φάσματος.



**Σχήμα 1.27:** συνδυαστικό γράφημα απορρόφησης και διαπερατότητας, της ηλιακής και γήινης ακτινοβολίας, από την ατμόσφαιρα της γης

## II.Γ Φασματικά κενά ατμόσφαιρας :

### **1<sup>ο</sup> ατμοσφαιρικό παράθυρο**

Η απορροφητική δράση των αερίων της γήινης ατμόσφαιρας, στη περιοχή μεταξύ των μηκών κύματος 0,36-0,75 μm του φάσματος απορρόφησης ΗΜ ακτινοβολίας, εμφανίζεται μειωμένη, επιτρέποντας στο ορατό φως (φωτεινή ακτινοβολία), που είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία της φωτοσύνθεσης στα φυτά, όπως και για την όραση των ανθρώπων, να φτάσει, σε επαρκή ένταση στο έδαφος της γης. Η γήινη ατμόσφαιρα λοιπόν, ανοίγει το “1<sup>ο</sup> ατμοσφαιρικό παράθυρο” στην εξαιρετικά πολύτιμη, από βιολογικής πλευράς, ορατή περιοχή του φάσματος ηλιακής ακτινοβολίας, συνιστώντας το παράθυρο ορατού φωτός.

### **2<sup>ο</sup> ατμοσφαιρικό παράθυρο**

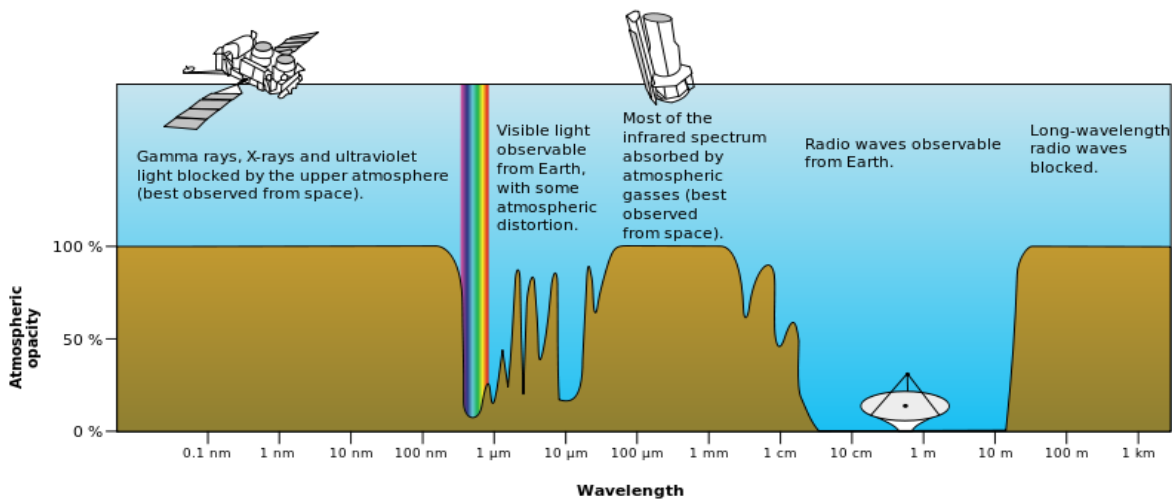
Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η γήινη ακτινοβολία παρουσιάζει μέγιστη ένταση στο μήκος κύματος  $\lambda_{\text{μεγ}} = 10 \mu\text{m}$ . Η περιοχή του φάσματος απορρόφησης ΗΜ ακτινοβολίας, μεταξύ των μηκών κύματος 8-13,5 μm, αποτελεί εξαιρετικής σημασίας καθώς μπορεί να θεωρηθεί διαφανής στη γήινη ακτινοβολία και είναι γνωστή ως “2<sup>ο</sup> ατμοσφαιρικό παράθυρο”. Τα διάφορα συστατικά της γήινης ατμόσφαιρας στη συγκεκριμένη φασματική περιοχή, παρουσιάζουν ήπια σχετικά απορρόφηση, επομένως, μέσω αυτής της φασματικής περιοχής, ένα σημαντικό ποσοστό της γήινης ακτινοβολίας, διαφεύγει προς το διάστημα.

Αποτέλεσμα της διαφυγής σημαντικού μέρους της γήινης ακτινοβολίας, είναι η παρατηρούμενη κατά τις ανέφελες νύχτες, σημαντική ψύξη, των επιφανειακών στρωμάτων της γήινης ατμόσφαιρας και του εδάφους της γης, δηλαδή η θερμική ανακούφιση της γης, συνιστώντας έτσι ένα παράθυρο ψύξης της γης. Αντίθετα, κατά τις νεφοσκεπείς νύχτες, δεν παρατηρείται σημαντική ψύξη, επειδή η ύπαρξη των νεφών προκαλεί το “κλείσιμο” του ατμοσφαιρικού παραθύρου.

Σύμφωνα με τις παρούσες συνθήκες, λόγω απορροφήσεων και επανεκπομπής της υπέρυθρης ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, με απορρόφηση και επανεκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου, η θερμοκρασία της γης παραμένει σημαντικά υψηλή. Η υπέρμετρη αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου, περιορίζει την θερμική ανακούφιση της γης και συντελεί, στην απόκλιση από το κανονικό φαινόμενο θερμοκηπίου της γης.

### 3<sup>ο</sup> ατμοσφαιρικό παράθυρο

Η ανθρωπογενής ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (τεχνητή) στις περιοχές των μικροκυμάτων και ραδιοσυχνοτήτων του ΗΜ φάσματος, με μήκος κύματος από 1 cm - 30 m, διαδίδεται χωρίς απορρόφηση από την ατμόσφαιρα της γης. Η περιοχή αυτή, του φάσματος απορρόφησης ΗΜ ακτινοβολίας, αποτελεί το “3<sup>ο</sup> ατμοσφαιρικό παράθυρο”, επιτρέποντας την ηλεκτρονική επικοινωνία μεταξύ των επίγειων σταθμών επικοινωνίας, αλλά και με το υπόλοιπο σύμπαν και φυσικά με τα διαστημικά οχήματα, συνιστώντας ένα παράθυρο τηλεπικοινωνίας μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.



**Σχήμα 1.28:** φασματικά κενά απορρόφησης της γήινης ατμόσφαιρας, κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας και την εκπομπή της γήινης ακτινοβολίας

### 1.2.3 Η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο της γης

---

Κατά τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα της γης, υφίσταται μεταβολή στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα της, που οφείλεται στα συστατικά της γήινης ατμόσφαιρας (άτομα, μόρια, υδρατμοί). Ένα ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται (σκεδάζεται) και μετατρέπεται σε θερμότητα στην γήινη ατμόσφαιρα, ένα άλλο ανακλάται και επιστρέφει στο διάστημα και το υπόλοιπο προσπίπτει στο έδαφος της γης, διαχωριζόμενη όμως η ηλιακή ακτινοβολία σε συνιστώσες. Είναι σημαντικό η κατηγοριοποίηση του διαχωρισμού της ηλιακής ακτινοβολίας στις συνιστώσες της, γιατί με τη βοήθεια οργάνων μέτρησης και επιστημονικών μεθόδων, τα δεδομένα αυτά, αποδεικνύονται πολύ χρήσιμα προς τη μελέτη και την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.

#### 1.2.3.1 Ο διαχωρισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης

Η **ολική ηλιακή ακτινοβολία  $g$**  (global) που προσπίπτει σε κάθε επιφάνεια, κάθετη ή οριζόντια, επάνω στο επίπεδο (έδαφος) της γης, είναι το άθροισμα της άμεσης, της διάχυτης και της διάχυτα ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

- Η **άμεση (απευθείας) ηλιακή ακτινοβολία  $b$**  (beam), προέρχεται απευθείας από τον ηλιακό δίσκο (σύνολο δομής ήλιου) που προσπίπτει στο επίπεδο της γης, χωρίς να έχει υποστεί αρχικά σκέδαση, στη διαδρομή της μέσα από τη γήινη ατμόσφαιρα. Από αυτό φαίνεται ότι, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία έχει κάποια διεύθυνση με την οποία προσπίπτει στο επίπεδο της γης και γι αυτό, κάθε επιφάνεια επάνω στη γη, θα πρέπει να προσανατολίζεται κατάλληλα ώστε να δεχθεί το μεγαλύτερο μέρος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.
- Η **διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία  $d$**  (diffuse), προέρχεται από τον ουράνιο θόλο της γης, δηλαδή έμμεσα από τον ήλιο που προσπίπτει στο επίπεδο της γης, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία σκεδάζεται κατά Rayleigh και Meί, στη διαδρομή της μέσα από τη γήινη ατμόσφαιρα. Από αυτό φαίνεται ότι, η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία δεν έχει κάποια διεύθυνση με την οποία προσπίπτει στο επίπεδο της γης, οπότε και είναι ανούσιος ο προσανατολισμός μιας επιφάνειας επάνω στη γη, ώστε να δεχθεί την διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία.
- Η **διάχυτα ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία  $d_{gr}$**  (diffuse ground reflected), προέρχεται από το επίπεδο της γης, δηλαδή έμμεσα και σε αυτή την περίπτωση από τον ήλιο, καθώς η διάχυτα ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε κάθε επιφάνεια επάνω στη γη, αρχικά σκεδάζεται και ανακλάται από την μορφολογία της γύρω περιοχής, όπου προσπίπτουν η άμεση και η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, επάνω στο επίπεδο της γης. Η διάχυτα ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία και σε αυτή την περίπτωση, δεν έχει κάποια διεύθυνση με την οποία προσπίπτει στο επίπεδο της γης, οπότε και είναι ανούσιος ο προσανατολισμός της επιφάνειας, ώστε να δεχθεί την διάχυτα ανακλώμενη ακτινοβολία.

Η αριθμητική τιμή της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, εξαρτάται από τη σύσταση - κατάσταση της γήινης ατμόσφαιρας, την δεδομένη στιγμή (υγρασία και γενικά τα αιωρήματα της ατμόσφαιρας), την ημέρα κατά τη διάρκεια του έτους και τέλος, την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών σε κάθε επιφάνεια επάνω στο επίπεδο της γης, η οποία μεταβάλλεται, καθώς αλλάζει το ύψος του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Γενικά, τις ηλιόλουστες ημέρες, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη διάχυτη, ενώ τις ημέρες με συννεφιά, υπάρχει κατά κύριο λόγο διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία.

Η αριθμητική τιμή της διάχυτα ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας, εξαρτάται από την **ανακλαστικότητα (λευκαύγεια - albedo)**, δηλαδή την μορφολογία και το χρώμα του εδάφους ή της επικάλυψης του (γρασίδι ή χιόνι, κτιριακές κατασκευές κ.α.) και την πυκνότητα των νεφών. Έτσι, καθορίζεται το ποσοστό της σκεδαζόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, από την μορφολογία της γύρω περιοχής, ορίζεται ως **συντελεστής διάχυτης ανάκλασης  $\rho_{gr}$** . Η τιμή της διάχυτα ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας, προκύπτει από τη σχέση:

$$d_{gr} = d * \rho_{gr} \quad (1.26)$$

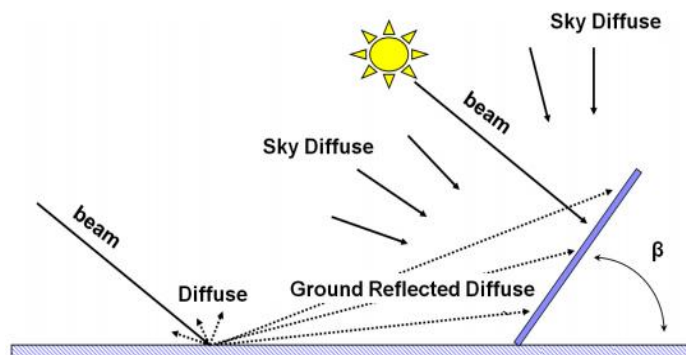
Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης
Νερό, θάλασσα	0,05
Ασφαλτόστρωμα	0,07
Αγρός με σκούρο χρώμα	0,08
Πράσινος αγρός	0,15
Βραχώδης επιφάνεια	0,20
Παλιό τσιμέντο	0,24
Νέο τσιμέντο	0,30
Χιόνι	0,60

**Σχήμα 1.29:** τυπικές τιμές albedo για διαφορετικά είδη επιφανειών

Σε ένα ηλιακό ενεργειακό σύστημα, γενικά, συλλέγεται (π.χ. φωτοβολταϊκή εφαρμογή) ή μετρείται με όργανο (πχ. πυρανόμετρο) η ολική οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία  $g$ , που προκύπτει από τη διάχυτη ακτινοβολία  $d$  και την άμεση ακτινοβολία  $b$ , για κάποια οριζόντια επιφάνεια στο επίπεδο της γης. Στη περίπτωση κεκλιμένης επιφάνειας, υπό κλίση γωνίας  $\beta$  προς το επίπεδο της γης, προκύπτει από την **κάθετη άμεση ηλιακή ακτινοβολία  $bn$**  (beam normal). Για την αριθμητική τιμή της ολικής ηλιακής ακτινοβολία  $g$ , ισχύει:

$$g = b + d + d_{gr} = bn * \sin(\theta_z) + d + d_{gr} \quad (1.27)$$

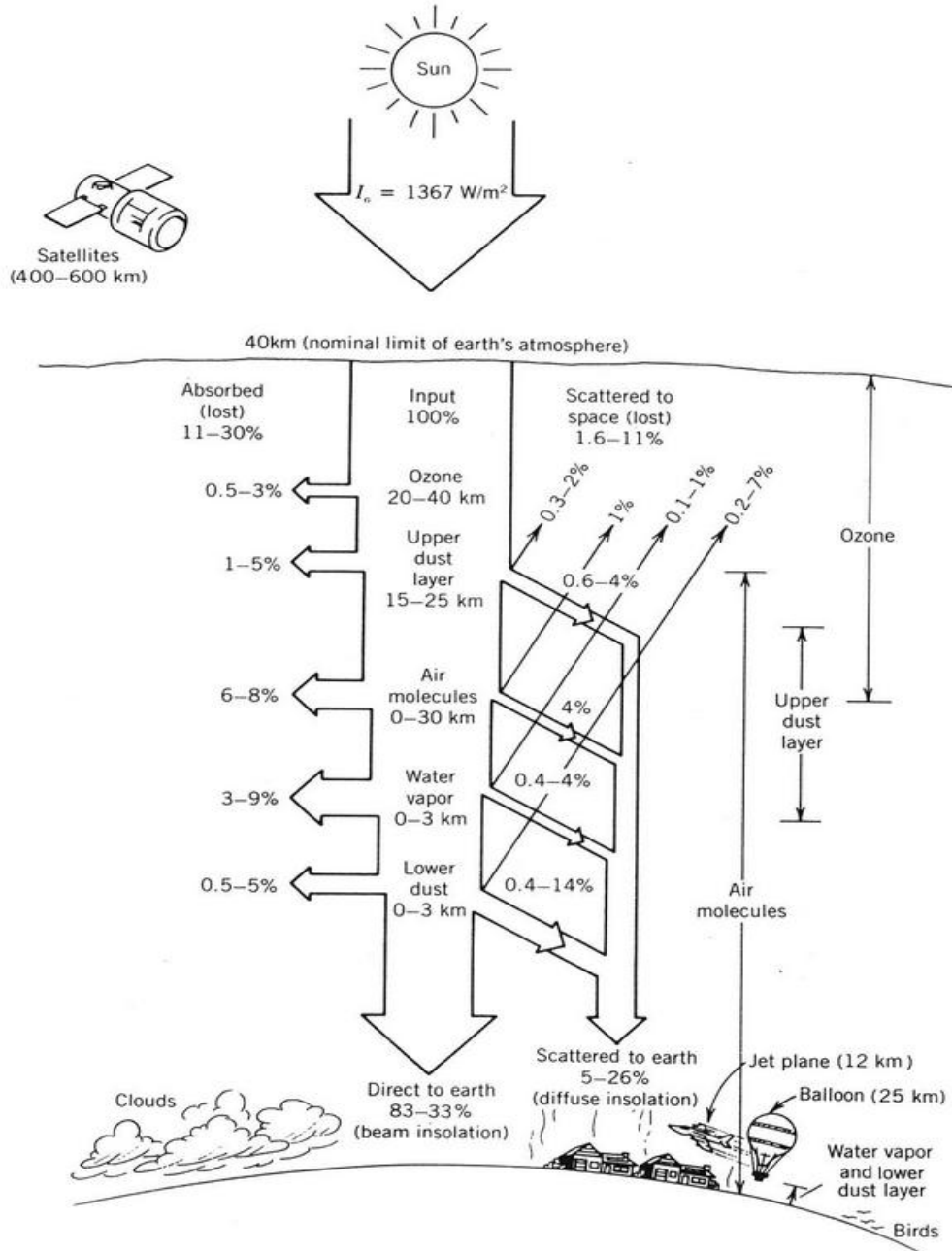
όπου,  $\theta_z$  η ζενίθια γωνία του ήλιου, η οποία στην παράγραφο (1.3.3), περιγράφεται αναλυτικότερα με τον γεωγραφικό προσδιορισμό της θέσης ήλιου - παρατηρητή. Κατά την ανατολή του ήλιου, η ζενίθια γωνία είναι  $90^\circ$ , άρα η ολική πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας  $g$ , καθορίζεται κυρίως από την διάχυτη  $d$ .



**Σχήμα 1.30:** προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια στο επίπεδο της γης



Σύμφωνα με τα παραπάνω, όταν η γήινη ατμόσφαιρα είναι καθαρή και ο ήλιος αρκετά ψηλά, ώστε οι ακτίνες του να προσπίπτουν σχεδόν κάθετα στο επίπεδο της γης, το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει άμεσα, είναι περίπου 72% και ένα ποσοστό 7%, προσπίπτει διάχυτα, λόγω της σκέδασης στα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, δεν φτάνει στο επίπεδο της γης, ένα ποσοστό περίπου 18% απορροφάται από όζον, υδατμούς, αέρα και σκόνη και ένα 3%, επιστρέφει διάχυτα ανακλώμενο, από το επίπεδο της γης και την ατμόσφαιρα της, πίσω στο διάστημα. Σε περίπτωση που οι ποσότητες υδατμών και σκόνης είναι περισσότερες, η απορρόφηση είναι μεγαλύτερη και το ποσοστό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης, είναι μικρότερο από 79%.



Σχήμα 1.32: σχεδιάγραμμα εξασθένησης και διαχωρισμού ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι την επιφάνεια της γης

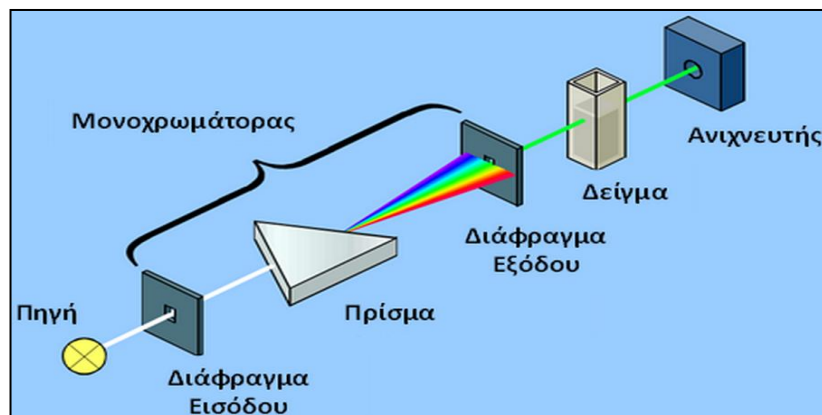
### 1.2.3.2 Η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης

Η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας, αποτελεί διαχρονικά ένα ζητούμενο για μελετητές και μετεωρολόγους και για το λόγο αυτό, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την εύρεση των κατάλληλων οργάνων, προκειμένου να καταλήγουν σε σωστά συμπεράσματα, με σχετικά απλούς και εύχρηστους μηχανισμούς. Χρησιμοποιώντας τα όργανα, είναι αρκετά απλό να συγκεντρωθούν στοιχεία και μετρήσεις για την ηλιακή ακτινοβολία και κίνηση. Διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους θερμικούς ανιχνευτές (ακτινόμετρα) και στους αισθητήρες ηλεκτρονικής διέγερσης (φασματοφωτόμετρα). Η επιλογή του κατάλληλου οργάνου γίνεται ανάλογα, με τη συνιστώσα της ακτινοβολίας που ζητάμε και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που θέλουμε.

#### A) Φασματοφωτομετρικά όργανα :

Τα φασματοφωτόμετρα είναι οπτικές διατάξεις με τις οποίες η συλλεγόμενη ακτινοβολία αναλύεται στα μήκη κύματος (ή συχνότητες) που την αποτελούν, με τη διάταξη ανάλυσης του φωτός, η οποία ονομάζεται μονοχρωμάτορας και στη συνέχεια γίνεται επιλεκτική μέτρηση των διαφόρων μηκών κύματος. Στην πράξη ένα φασματοφωτόμετρο μετρά τον αριθμό των φωτονίων ανά μονάδα χρόνου που περιέχονται σε ένα φασματικό εύρος  $d\lambda$ . Σε ένα μονοχρωμάτορα, για την ανάλυση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πρίσμα είτε ένα διάφραγμα ανάκλασης, όπως χρησιμοποιούν τα σύγχρονα φασματοφωτόμετρα. Και στις δύο περιπτώσεις στην έξοδο της μονάδας ανάλυσης έχουμε εμφάνιση του φάσματος του εισερχόμενου φωτός, λόγω του ότι τα διάφορα μήκη κύματος εκτρέπονται κατά διαφορετικές γωνίες.

Σ ένα κλασσικό φασματοφωτόμετρο, αν στο φάσμα που προκύπτει από το πρίσμα, παρεμβληθεί διάφραγμα εξόδου με χαραγμένη μία σχισμή, τότε θα διέλθει ακτινοβολία που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μήκος κύματος, ανάλογα με τη θέση της κατά μήκος του φάσματος. Στην πραγματικότητα από τη σχισμή διέρχονται όλα τα μήκη κύματος που περιέχονται σε μια στενή φασματική περιοχή  $d\lambda$ , το εύρος της οποίας καθορίζεται από το πάχος της σχισμής. Αν η σχισμή μετακινηθεί κατά μήκος του φάσματος τότε κάποιο άλλο μήκος κύματος διέρχεται από αυτή και είναι δυνατόν να μετρηθεί. Όμως επειδή η παράλληλη μετατόπιση της σχισμής είναι δύσκολο να επιτευχθεί με ακρίβεια, η επιλογή του μήκους κύματος γίνεται με περιστροφή του φράγματος περί έναν κάθετο άξονα που περνάει από το κέντρο του και συμπίπτει με το επίπεδο που καθορίζει η επιφάνειά του.



Σχήμα 1.33: διάταξη ενός κλασσικού φασματοφωτομέτρου

Η ανάγκη μέτρησης διαφόρων φασματικών περιοχών της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, υπαγορεύεται από το γεγονός ότι οι διάφορες περιοχές του φάσματος παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ τους. Για παράδειγμα, η υπέρυθη περιοχή παρουσιάζει ενδιαφέρον γιατί είναι ουσιαστικά, ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη γη και παίζει ρόλο, στη διατήρηση της θερμικής ισορροπίας του πλανήτη, ενώ η υπεριώδης περιοχή, σχετίζεται με τις επιδράσεις των ακτινοβολιών αυτών, στα έμβια όντα και το οικοσύστημα γενικότερα.

## **B) Ακτινομετρικά όργανα :**

Με τον όρο ακτινόμετρα, γίνεται αναφορά στα όργανα ευρείας ή στενής φασματικής περιοχής, τα οποία μετρούν την ολική, την άμεση και τη διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, σε διάφορες φασματικές περιοχές. Ιδιαίτερα, αυτά που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της πυκνότητας ροής, σε ολόκληρο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, ολοφασματική ακτινοβολία, ονομάζονται πυρανόμετρα. Αυτά που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της άμεσης συνιστώσας, ονομάζονται πυρηλιόμετρα και μετρούν την ολοφασματική ακτινοβολία ή την ακτινοβολία, σε μεγάλες περιοχές με τη χρήση φίλτρων. Τα ακτινόμετρα για την μέτρηση χρησιμοποιούν συνήθως στήλες thermopiles, τα οποία είναι συνδυασμός έως και μερικών εκατοντάδων θερμοηλεκτρικών ζευγών (thermocouples).

Οι μισές επαφές των thermocouples, συνδεδεμένων σε σειρά, είναι εντυπωμένες στην πάνω επιφάνεια, η οποία έχει υποστεί επεξεργασία αμαύρωσης και οι άλλες μισές στην κάτω επιφάνεια, η οποία αποτελεί σώμα θερμοκρασίας αναφοράς (αντιστάθμιση). Ο συνδυασμός εκατοντάδων thermocouples (thermopile), γίνεται με σκοπό η ολική τάση στα δύο ελεύθερα άκρα τους να είναι αρκετά μεγάλη (μερικά mV), ώστε να μετρείται με ένα βολτόμετρο. Η ενεργός επιφάνεια, περιβάλλεται από δύο ομόκεντρα κρυστάλλινα ημισφαίρια, για προστασία από την υγρασία και την ψύξη λόγω αέριων ρευμάτων. Επιτρέπουν τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, στην περιοχή μηκών κύματος 0,3-3 μm, αποκόπτοντας τις ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, από και προς τη ενεργό επιφάνεια, ελαχιστοποιώντας την επίδραση τους στην ένδειξη του οργάνου.

### **B.1) Πυρανόμετρο :**

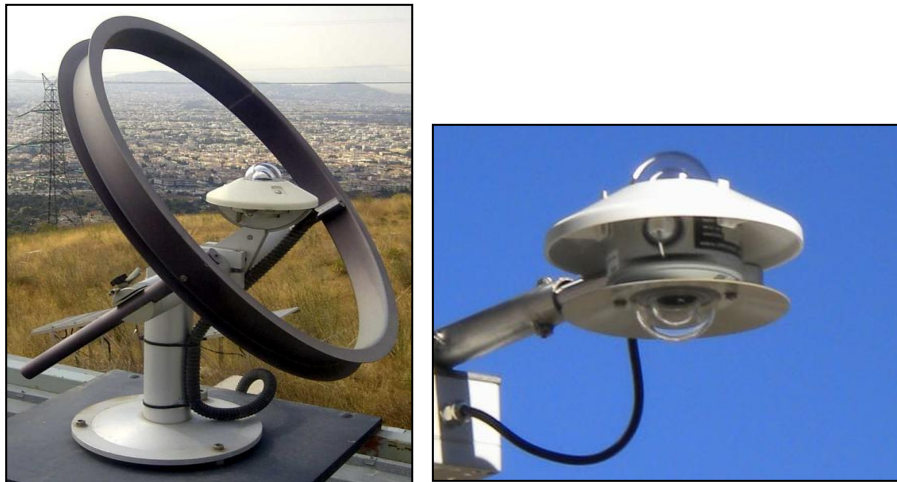
Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας (global), δηλαδή συνεκτιμά τον συνδυασμό της άμεσης και της διάχυτης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας. Τυπικά, το πυρανόμετρο τοποθετείται σε οριζόντια επιφάνεια, παρέχοντας μέγιστη απόκριση όταν ο ήλιος βρίσκεται στο τοπικό ζενίθ, και μηδενική απόκριση κατά τις ώρες της αυγής και του σούρουπου. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται απόκριση συνημίτονου. Η αρχή λειτουργίας του, βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Η ακτινοβολία που προσπίπτει στην ενεργό επιφάνεια (μαύρη επιφάνεια με κεραμικό υπόστρωμα), θερμαίνει την πλάκα αυτή, καθώς απορροφάται. Έτσι, δημιουργείται διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ της εκτεθειμένης στο φως και μιας άλλης στο εσωτερικό, η οποία παραμένει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



**Σχήμα 1.34:** πυρανόμετρο καταγραφής της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας

Για την μέτρηση της διάχυτης συνιστώσας (diffuse), το πυρανόμετρο χρησιμοποιείται με τη χρήση ενός σκιαδιού, όπως μία κυκλική ταινία (στεφάνη), εύρους δύο περίπου φορές μεγαλύτερου από τη διάμετρο του παραθύρου εισόδου του οργάνου, η οποία τοποθετείται έτσι ώστε το επίπεδό της να συμπίπτει με το επίπεδο της τροχιάς της γης. Το όργανο τοποθετείται στο κέντρο του ημικυκλίου που ορίζει η ταινία, έτσι ώστε ένα τμήμα της να παρεμβάλλεται συνεχώς μεταξύ οργάνου και ήλιου. Με τον τρόπο αυτό αποκόπτεται η άμεση συνιστώσα, αλλά και ένα μικρό ποσοστό της διάχυτης, το οποίο όμως μπορεί να εκτιμηθεί και να ληφθεί υπόψη σαν διορθωτικός παράγοντας. Τέλος, επειδή η τροχιά της γης μεταβάλλεται μέσα στο χρόνο, κατά περίπου  $47^\circ$  από την χειμερινή μέχρι την θερινή τροπή, απαιτείται κατά διαστήματα διόρθωση θέσης της ταινίας, ώστε να συμπίπτει πάντα με το επίπεδο τροχιάς της γης.

Σε μια τελευταία διάταξη, το πυρανόμετρο τοποθετείται, προσανατολισμένο προς τα κάτω, ώστε να δέχεται και να μετράει την ανακλώμενη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, από τη γύρω περιοχή ως **λευκανυγείομετρο** (albedometer).

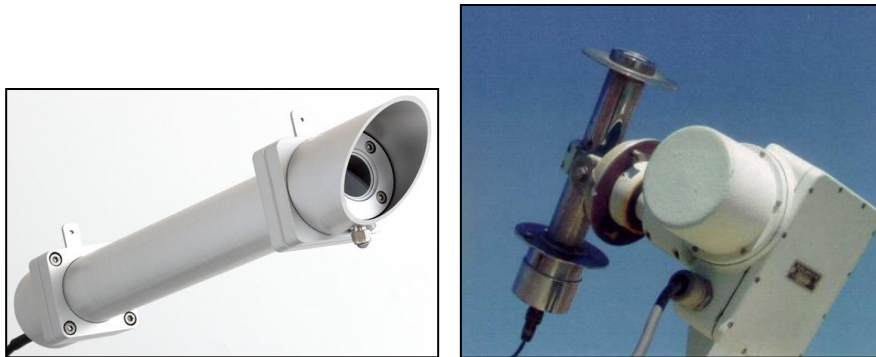


**Σχήμα 1.35:** α) πυρανόμετρο με στεφάνη για καταγραφή της διάχυτης συνιστώσας ακτινοβολίας  
β) διπλό πυρανόμετρο για καταγραφή της ολικής και της ανακλώμενης συνιστώσας ηλιακής ακτινοβολίας

## **B.2) Πυρηλιόμετρο :**

Χρησιμοποιείται για την μέτρηση της άμεσης συνιστώσας (beam) της ηλιακής ακτινοβολίας και σκοπεύει συνέχεια τον ήλιο, δηλαδή οι ηλιακές ακτίνες προσπίπτουν κάθετα στην ευαίσθητη επιφάνεια του οργάνου. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο πυροηλεκτρικό φαινόμενο, στην τροποποίηση της διπολικής ηλεκτρικής ροπής διηλεκτρικών υλικών. Η αύξηση της θερμοκρασίας του διηλεκτρικού υλικού οδηγεί σε εμφάνιση ηλεκτρίσης, δηλαδή, πόλωσης του υλικού λόγω θέρμανσης του. Χαρακτηρίζεται από σταθερή απόκριση, σε ευρεία περιοχή μηκών κύματος, δηλαδή, απόκριση ανεξάρτητη του μήκους κύματος  $\lambda$  κι αυτό τον καθιστά ιδανικό για καταγραφή φασμάτων, στην περιοχή  $0,285-4 \mu\text{m}$ .

Αποτελείται από έναν επιμήκη μεταλλικό σωλήνα, στο βάθος του οποίου υπάρχει ένας αισθητήρας τύπου thermopile. Το ηλιακό φως εισέρχεται μέσω αυτού του κυλίνδρου και επιδρά με τον αισθητήρα, ώστε ο τελευταίος να μετατρέψει την θερμότητα σε ένα μετρούμενο ηλεκτρικό σήμα. Το μετρούμενο σήμα αντιστοιχίζεται μέσω ενός κατάλληλου τύπου, σε μια ορισμένη τιμή πυκνότητας της άμεσης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας ανά επιφάνεια. Για να μπορέσει να μετρηθεί η άμεση δέσμη, το όργανο τοποθετείται σε κατάλληλη θέση, ώστε μόνο παράλληλες ηλιακές ακτίνες από τον ήλιο, να επιδρούν στον αισθητήρα.



**Σχήμα 1.36:** α) πυρηλιόμετρο καταγραφής της άμεσης συνιστώσας ακτινοβολίας  
β) πυρηλιόμετρο στηριγμένο σε ασπίτη

Η απομόνωση της άμεσης συνιστώσας, επιτυγχάνεται με τη στήριξη του μεταλλικού σωλήνα, σε σύστημα περιστροφής και σκόπευσης, το οποίο μπορεί να προσανατολίζεται κατάλληλα, ώστε να κοιτάει ακριβώς προς τον ήλιο και ο αισθητήρας που βρίσκεται στην βάση του, να προσλαμβάνει εξ ολοκλήρου την άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο προσανατολισμός του συστήματος, γίνεται είτε χειροκίνητα, είτε μέσω προγράμματος που υπολογίζει την θέση του ηλίου στη ουράνια σφαίρα (αστροστάτης), δηλαδή το ύψος και την αζιμουθιακή γωνία, για την συγκεκριμένη περιοχή και ώρα και στρέφει κατάλληλα την διάταξη. Το πυρηλιόμετρο συνδυάζεται ιδανικά με ένα καλό πυρανόμετρο, ώστε να καθορισθεί η διάχυτη συνιστώσα της ακτινοβολίας του ήλιου.

Στην παρακάτω εικόνα, παρατηρείται ένας **ακτινομετρικός σταθμός** κατάλληλα εξοπλισμένος με δύο πυρανόμετρα και το πυρηλιόμετρο. Όπως προκύπτει, τα πυρανόμετρα τοποθετούνται σε οριζόντια επιφάνεια, οπότε το ένα καταγράφει την ολική ακτινοβολία, ενώ το δεύτερο με το σκιάδιο (σφαίρα), καταγράφει τη διάχυτη συνιστώσα της ακτινοβολίας σε οριζόντια θέση, σε αντίθεση με το πυρηλιόμετρο, που τοποθετείται με κλίση προς τον ήλιο και δίνει την άμεση συνιστώσα σε κάθετη επιφάνεια.



**Σχήμα 1.37:** ακτινομετρικός σταθμός

Το ρόλο του σκιαδίου, μπορεί να παίξει εκτός της ταινίας και η σφαίρα (ή δίσκος). Το πλεονέκτημά συγκριτικά με την ταινία είναι, ότι η σφαίρα δεν αποκόπτει σημαντικό μέρος της διάχυτης συνιστώσας, η οποία τοποθετείται συνεχώς μεταξύ του ηλιακού δίσκου και του πυρανόμετρου, με τη χρήση μηχανοκίνητης ηλεκτρονικής διάταξης (αστροστάτης), όπως και στην περίπτωση του πυρηλιόμετρου.

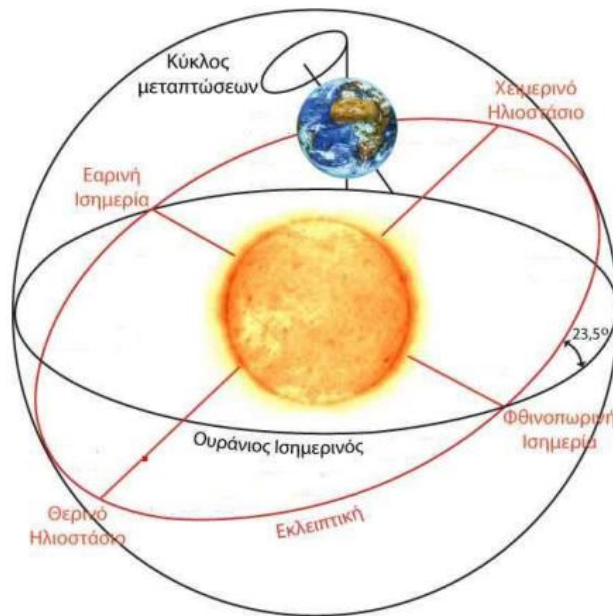
### 1.3 Το δυναμικό του φωτός

Η αρχική προέλευση της ηλιακής ενέργειας είναι ουσιαστικά ο ήλιος, αλλά πολλές φορές ενδιαφέρει η μέτρηση της, ανάλογα με την τελική προέλευση της, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία διαχωρίζεται σε συνιστώσες στο γήινο περιβάλλον. Οι μετρήσεις της ηλιακής ενέργειας ή αλλιώς του ηλιακού δυναμικού, είναι απαραίτητες για την επιστημονική έρευνα, όπως τη μετεωρολογία ή για δραστηριότητες, όπως την αξιολόγηση μιας φωτοβολταϊκής εφαρμογής. Γενικά, η μέτρηση του ηλιακού δυναμικού που φτάνει στο επίπεδο της γης, όπως και διαφόρων μαθηματικών και εμπειρικών μοντέλων για τον υπολογισμό του, συνίστανται στη μέτρηση της ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο (πυκνότητα ισχύος), που μεταφέρεται στη μονάδα του χρόνου, κάτω από ορισμένους, κατά περίπτωση, γεωμετρικούς περιορισμούς και σε κάποια καθορισμένη φασματική περιοχή, λόγω των στοιχείων διακύμανσης και εξασθένησης του φωτός.

#### 1.3.1 Η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο

Η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο είναι σύνθετη, καθώς μπορεί να αναλυθεί σε δύο κύριες συνιστώσες:

- 1) Την ημερήσια περιστροφή γύρω από τον άξονα B-N, με διεύθυνση από δυτικά προς ανατολικά, με γωνιακή ταχύτητα  $2\pi \text{ rad}/24 \text{ h}$  ή  $15^\circ/\text{h}$  και διάρκεια 24 h.
- 2) Την ετήσια κίνηση γύρω από τον ήλιο, σε ελλειπτική τροχιά (εκλειπτική) υπό γωνία  $\sim 32,5^\circ$ , με μέση ωριαία ταχύτητα 106000 km/h και διάρκεια  $\sim 365,256 \text{ D}$ .



Σχήμα 1.38: περιστροφή της γης στην ουράνια σφαίρα

Η γωνιακή απόκλιση της εκλειπτικής από τον ουράνιο ισημερινό, δηλαδή τον ισημερινό του ήλιου, που αποτελεί σημείο αναφοράς της ουράνιας σφαίρας, μεταβάλλεται κατά την κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο, στη διάρκεια του έτους μεταξύ της μέγιστης τιμής της  $+23,5^\circ$  (22 Δεκεμβρίου) και της ελάχιστης  $-23,5^\circ$  (21 Ιουνίου). Επίσης, η θέση του ήλιου δεν είναι ομόκεντρη μέσα στην εκλειπτική της γης, με μήκος μεγάλου ημιάξονα  $a = 149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$  και εκκεντρότητα  $e \approx 0,001673$ .

Έτσι, η απόσταση γης-ήλιου μεταβάλλεται περιοδικά, κατά τη διάρκεια του έτους, μεταξύ της μέγιστης τιμής της (~4 Ιουλίου), που ονομάζεται **αφήλιο** (~152,1·10<sup>6</sup> km) και της ελάχιστης (~3 Ιανουαρίου), που ονομάζεται **περιήλιο** (147,1·10<sup>6</sup> km). Η μεταβολή της απόστασης ήλιου-γης, για δεδομένη ημέρα, περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_0 = 1,5 * 10^8 * \left\{ 1 + 0,0017 \left[ \frac{360 * (\nu - 93)}{365} \right] \right\} \quad (1.28)$$

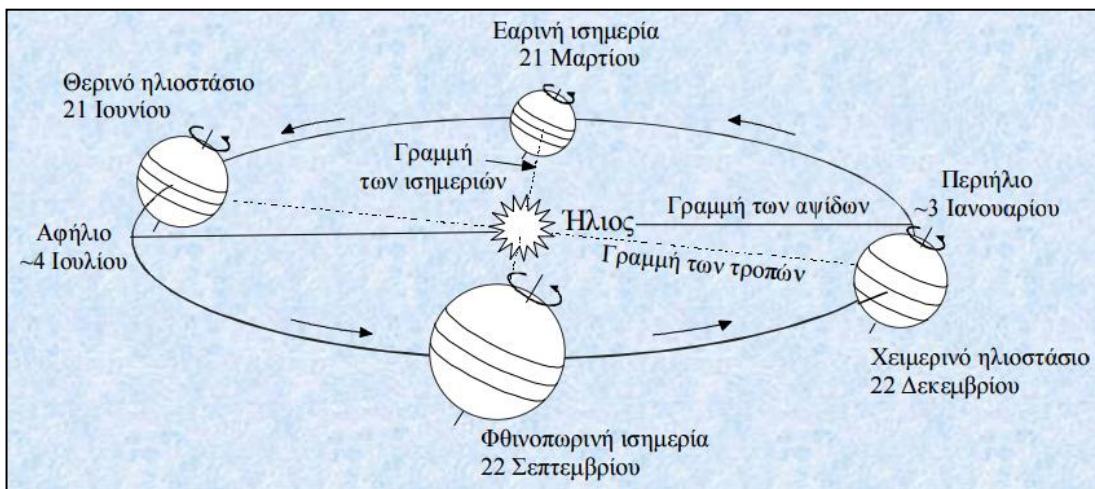
όπου,  $\nu$  ο αύξων αριθμός της εξεταζόμενης μέρας, ξεκινώντας από την αρχή του έτους (για την 1 Ιανουαρίου είναι  $\nu = 1$ , ενώ για την 31 Δεκεμβρίου είναι  $\nu = 365$ ).

Το μήκος του μεγάλου ημιάξονα  $a$ , προσεγγιστικά 150000000 km, λαμβάνεται ως μονάδα μήκους σε διαστημικές αποστάσεις, ονομάζεται **αστρονομική μονάδα** και συμβολίζεται με 1 AU (Astronomical Unit). Για να διανύσει την απόσταση αυτή το φως, με ταχύτητα των ~300000 km/s, απαιτούνται ~8,5 min.

Η κλίση της εκλειπτικής και η εκκεντρότητα του ήλιου, έχουν σαν αποτέλεσμα:

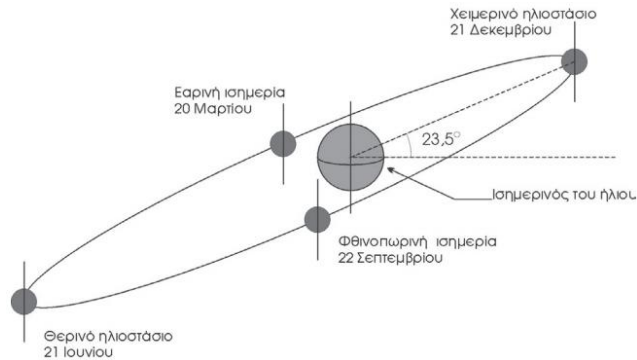
- τη μεταβλητότητα της θέσης του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι
- τη μεταβλητότητα της γωνίας με την οποία φθάνει η ηλιακή ακτινοβολία σε έναν τόπο, άλλοτε κάθετα και άλλοτε με κλίση, στη διάρκεια του έτους
- την ακολουθία των εποχών και τη διακύμανση των ωρών ηλιοφάνειας και
- την επακόλουθη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια του έτους

Η ευθεία που ενώνει το αφήλιο με το περιήλιο, ονομάζεται **γραμμή των αφίδων** και αποτελεί τον μεγάλο άξονα της ελλειπτικής τροχιάς της γης, γύρω από τον ήλιο. Τα σημεία της γης στο θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο προσδιορίζουν την ονομαζόμενη **γραμμή των τροπών**, η οποία σχηματίζει γωνία ~11°16' με τη γραμμή των αφίδων. Τέλος, η ευθεία που ενώνει τα σημεία της γης στις ισημερίες, ονομάζεται **γραμμή των ισημεριών** και είναι κάθετη των τροπών.



Σχήμα 1.39: ελλειπτική τροχιά της γης σε διάφορες χρονικές περιόδους του έτους

Έτσι, καθώς η γη κινείται προς το κοντινότερο σημείο στον ήλιο και ταυτόχρονα υψηλότερο σημείο της ελλειπτικής τροχιάς της, το περιήλιο, η ταχύτητα της είναι μικρότερη, ενώ όταν κινείται προς το πιο απομακρυσμένο από τον ήλιο και χαμηλότερο της τροχιάς της, το αφήλιο, η ταχύτητα της είναι μεγαλύτερη, επηρεάζοντας και στις δύο περιπτώσεις το μήκος διάρκειας ηλιοφάνειας, δηλαδή το χρονικό διάστημα ανατολής-δύσης του ήλιου, ορίζοντας την **ηλιακή ημέρα**. Όταν η γη βρίσκεται στο περιήλιο, δέχεται στο βόρειο ημισφαίριο ηλιακή ακτινοβολία σχεδόν οριζόντιας διεύθυνσης (υπό γωνία) και στο νότιο ημισφαίριο κάθετης διεύθυνσης, αυτό συνεπάγεται η διάρκεια της ηλιακής ημέρας στο βόρειο ημισφαίριο να είναι μικρότερη, σε αντίθεση με του νότιου. Το ανάστροφο συμβαίνει όταν η γη βρίσκεται στο αφήλιο.



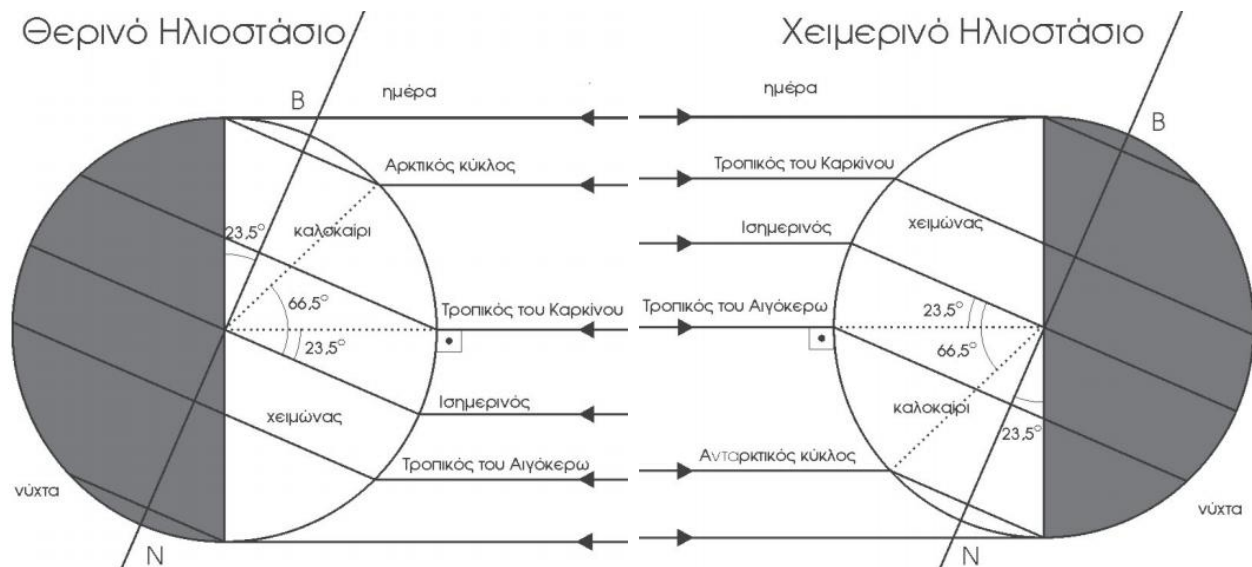
**Σχήμα 1.40:** ελλειπτική τροχιά της γης σε διάφορες χρονικές περιόδους του έτους

Στις 22/9 και 21/3, η γη βρίσκεται στο ενδιάμεσο της διαδρομής της από το περιήλιο στο αφήλιο και το αντίστροφο. Στις δύο αυτές θέσεις της γης, η ηλιακή ακτινοβολία έχει κάθετη διεύθυνση, χαράσσοντας τον κεντρικό παράλληλο της γης, τον Ισημερινό, όπου η διάρκεια της ηλιακής ημέρας και της νύχτας είναι ίσες, σχηματίζοντας την **φθινοπωρινή ισημερία** και την **εαρινή ισημερία** αντίστοιχα, ενώ ο ήλιος βρίσκεται στο ύψος ηλιακής μεσημβρίας του Ισημερινού. Ο ήλιος περνά μια φορά κατά την διάρκεια της ηλιακής ημέρας, από το μεσημβρινό ενός τόπου στη γη (θέση ήλιου σ ένα τόπο στην γη, στις 12:00 μ.μ.), ορίζοντας την **ηλιακή μεσημβρία** ή **ηλιακό μεσημέρι**. Έτσι, καθώς η γη αλλάζει θέση στην ετήσια τροχιά της περί τον ήλιο, αλλάζει το ύψος μεσημβρίας του ήλιου σε κάθε τόπο στην επιφάνεια της.

Άρα, κατά τη κίνηση της γης από την φθινοπωρινή ισημερία προς την εαρινή ισημερία, δέχεται στο βόρειο ημισφαίριο ηλιακή ακτινοβολία σχεδόν οριζόντιας διεύθυνσης και κάθετης διεύθυνσης στο νότιο ημισφαίριο, ενώ κατά τη κίνηση της από την εαρινή ισημερία προς την φθινοπωρινή ισημερία, συμβαίνει το αντίστροφο. Οπότε όταν το ένα από τα δύο ημισφαίρια δέχεται σχεδόν οριζόντιες ακτίνες, δέχεται χαμηλότερο ποσοστό ακτινοβολίας άρα επικρατούν και χαμηλότερες θερμοκρασίες (φθινόπωρο - χειμώνας), ενώ όταν το άλλο ημισφαίριο δέχεται κάθετα ακτίνες του ήλιου, δέχεται μεγαλύτερο ποσοστό ακτινοβολίας και επικρατούν υψηλότερες θερμοκρασίες (άνοιξη - καλοκαίρι), ορίζοντας τις **εποχές**.

Στις 22/12, η ηλιακή ακτινοβολία έχει κάθετη διεύθυνση, υπό γωνία  $90^\circ$ , προς το νότιο ημισφαίριο της γης και εφάπτοντας στον παράλληλο του Ισημερινού, με γεωγραφικό πλάτος  $-23,5^\circ$ , χαράσσει ο παράλληλος κύκλος που ονομάζεται **τροπικός του Αιγόκερω**. Έτσι, η διάρκεια της ημέρας για το νότιο ημισφαίριο, είναι η μεγαλύτερη όλου του έτους και ο ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος ηλιακής μεσημβρίας του, στη διάρκεια του έτους, από τον Ισημερινό, ενώ η νύχτα είναι η μικρότερη του έτους, ορίζοντας το **χειμερινό ηλιοστάσιο**. Σε αντίθεση, στο βόρειο ημισφαίριο, η διάρκεια της ημέρας είναι η μικρότερη και της νύχτας η μεγαλύτερη του έτους, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία έχει σχεδόν οριζόντια διεύθυνση, ενώ ο ήλιος βρίσκεται στο χαμηλότερο ύψος ηλιακής μεσημβρίας του από τον Ισημερινό.





Σχήμα 1.41: πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας, κατά το χειμερινό και θερινό ηλιοστάσιο

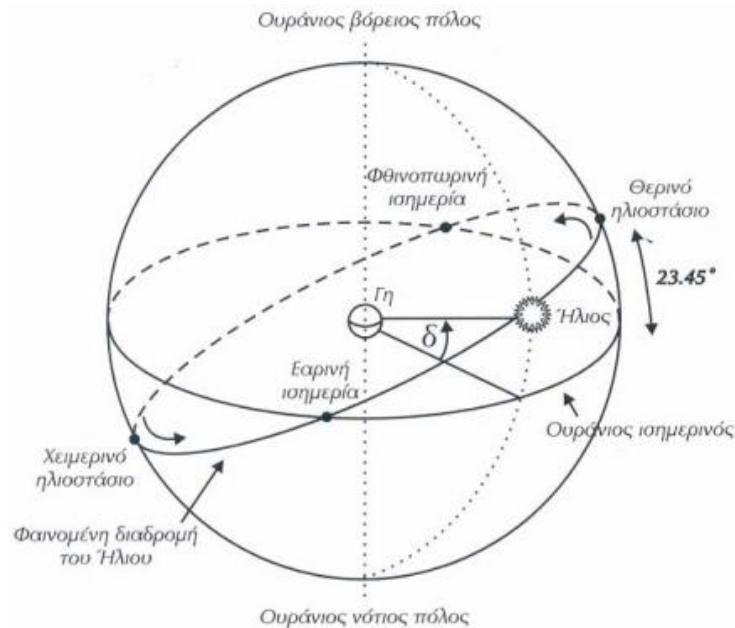
Όταν το γεωγραφικό πλάτος γίνεται μεγαλύτερο για το βόρειο ημισφαίριο, τόσο μικρότερη γίνεται η διάρκεια της ημέρας, ενώ τόσο μεγαλύτερη γίνεται η διάρκεια της νύκτας στον εκάστοτε τόπο, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία έχει σχεδόν οριζόντια διεύθυνση. Έτσι, στις 22/12 για γεωγραφικό πλάτος από  $+66,5^\circ$  και βορειότερα, η διάρκεια της νύκτας είναι 24ώρη και ο ήλιος δεν είναι ορατός. Εφάπτοντας το γεωγραφικό πλάτος, στον παράλληλο του ισημερινού, χαράσσεται ο παράλληλος που ονομάζεται **Αρκτικός κύκλος**. Σε αντίθεση, στο νότιο ημισφαίριο, για γεωγραφικό πλάτος από  $-66,5^\circ$  και πάνω, η διάρκεια της ημέρας είναι 24ώρη και ο ήλιος είναι ορατός και τα μεσάνυχτα, ενώ χαράσσεται ο **Ανταρκτικός κύκλος**.

Τέλος, στις 21/6, πραγματοποιείται το αντίθετο, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία έχει κάθετη διεύθυνση, υπό γωνία  $90^\circ$ , προς το βόρειο ημισφαίριο και χαράσσεται με γεωγραφικό πλάτος  $+23,5^\circ$  προς τον Ισημερινό ο **τροπικός του Καρκίνου**. Η διάρκεια της ημέρας είναι η μεγαλύτερη του έτους και η διάρκεια της νύκτας η μικρότερη, ενώ ο ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος ηλιακής μεσημβρίας του, στη διάρκεια του έτους, από τον Ισημερινό, ορίζοντας το **θερινό ηλιοστάσιο**. Σε αντίθεση, στο νότιο ημισφαίριο, η διάρκεια της ημέρας είναι η μικρότερη και της νύκτας η μεγαλύτερη του έτους, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία έχει σχεδόν οριζόντια διεύθυνση, ενώ ο ήλιος βρίσκεται στο μικρότερο ύψος ηλιακής μεσημβρίας του, στη διάρκεια του έτους, από τον Ισημερινό.

Επίσης, όταν το γεωγραφικό πλάτος γίνεται μεγαλύτερο για το νότιο ημισφαίριο, τόσο μικρότερη γίνεται η διάρκεια της ημέρας, ενώ τόσο μεγαλύτερη γίνεται η διάρκεια της νύκτας στον εκάστοτε τόπο, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία πέφτουν σχεδόν οριζόντιες. Έτσι, στις 21/6 για γεωγραφικό πλάτος από  $-66,5^\circ$  και πάνω, η διάρκεια της νύκτας είναι 24ώρη και ο ήλιος δεν είναι ορατός. Σε αντίθεση, στο βόρειο ημισφαίριο, για γεωγραφικό πλάτος από  $+66,5^\circ$  και πάνω, η διάρκεια της ημέρας είναι 24ώρη και ο ήλιος είναι ορατός και τα μεσάνυχτα.

### 1.3.2 Ο σφαιρικός προσδιορισμός της ηλιακής τροχιάς

Προκειμένου να υπολογιστεί το ηλιακό δυναμικό που δέχεται ένα επίπεδο στη επιφάνεια της γης, είναι απαραίτητο η αναγνώριση των γεωγραφικών συντεταγμένων της γης, αλλά και της θέσης του ήλιου στον ουράνιο θόλο, για τον καθαρισμό του οποίου, χρησιμοποιούνται σφαιρικές συντεταγμένες. Επειδή η γη κινείται γύρω από τον ήλιο, είναι δύσκολο να καθοριστεί η γεωμετρία τους, δεδομένου του ότι ο παρατηρητής κινείται. Χρησιμοποιώντας το **μοντέλο ουράνιας σφαίρας**, όπου η γη θεωρείται σαν κέντρο της εκλειπτικής, στην οποία κινείται αυτή τη φορά ο ήλιος, οι υπολογισμοί απλοποιούνται. Το μοντέλο αυτό, που περιγράφει πλέον την κίνηση του ήλιου ως προς τη γη, επιτρέπει στον παρατηρητή, ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο της γης, να εντοπίζει τον ήλιο σε γωνία από τον ουράνιο ισημερινό. Αυτό προϋποθέτει τη μεταφορά του συστήματος συντεταγμένων, στο εκάστοτε ζητούμενο σημείο, συνυπολογίζοντας τις συντεταγμένες του τόπου.

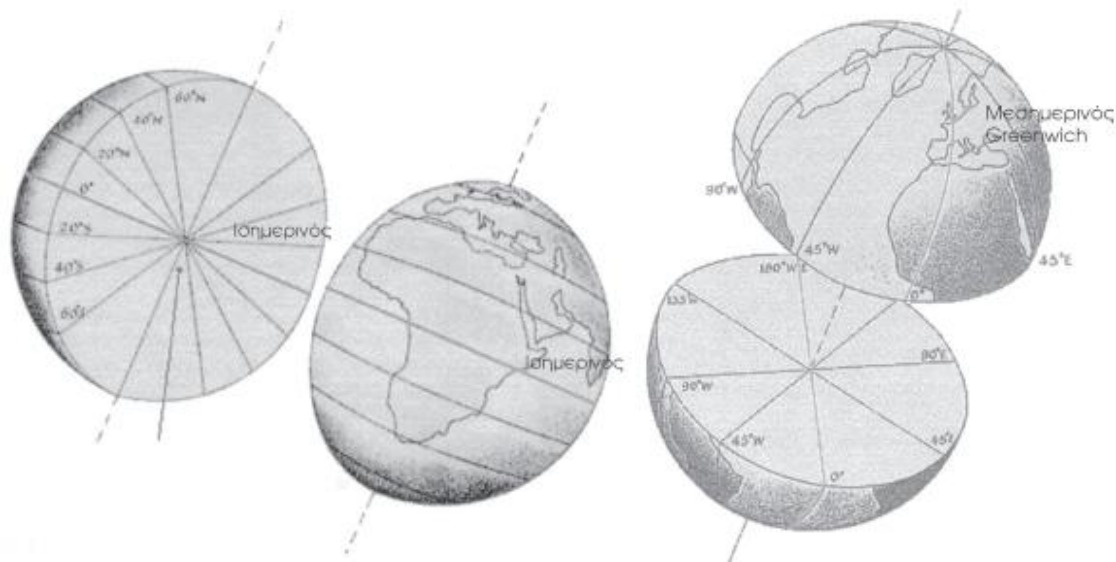


Σχήμα 1.42: ουράνια σφαίρα με την φαινόμενη ετήσια κίνηση του ήλιου

Οι σφαιρικές συντεταγμένες κάθε τόπου πάνω στην επιφάνεια της γης, προσδιορίζονται με τη βοήθεια κάθετων ημικυκλίων που ονομάζονται **μεσημβρινοί** και οριζόντιων παράλληλων κύκλων που ονομάζονται **παράλληλοι**. Αρχή σε αυτό το σύστημα αποτελούν ο μεσημβρινός **Greenwich** και ο παράλληλος **Ισημερινός**, όπου το σημείο τομής τους, αποτελεί το σημείο αναφοράς στην επιφάνεια της.

#### Γεωγραφικό πλάτος $\varphi$ :

Αφορά την απόσταση σε μοίρες ενός τόπου από τον Ισημερινό της γης, δηλαδή η γωνία του τόξου του μεσημβρινού, που περικλείεται μεταξύ του Ισημερινού και του παράλληλου του τόπου αυτού. Το γεωγραφικό πλάτος, χαρακτηρίζεται βόρειο B (north N) ή νότιο N (south S), ανάλογα σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται το σημείο. Σημεία του ίδιου ημισφαιρίου έχουν ομώνυμα πλάτη, σε αντίθεση με σημεία διαφορετικού ημισφαιρίου, που έχουν ετερόνυμα πλάτη. Η γωνία  $\varphi$  κυμαίνεται από  $0^\circ$  (θέση ισημερινού) μέχρι  $90^\circ$  B και από  $0^\circ$  μέχρι  $-90^\circ$  N. Επομένως το γεωγραφικό πλάτος έχει θετικές τιμές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για τον νότιο.



Σχήμα 1.43: διαχωρισμός της γης σε (α) γεωγραφικά πλάτη και (β) γεωγραφική μήκη

### Γεωγραφικό μήκος $\alpha$ ή $L_{LOC}$ :

Αφορά την απόσταση σε μοίρες ενός τόπου από τον μεσημβρινό του Greenwich, δηλαδή η γωνία του τόξου του Ισημερινού, που περιλαμβάνεται μεταξύ του πρώτου μεσημβρινού Greenwich και του μεσημβρινού του τόπου αυτού. Η γη είναι χωρισμένη σε 24 μεσημβρινούς και ανάμεσα σε δύο μεσημβρινούς έχουμε απόσταση ίση με  $15^\circ$ , που είναι χρονικό διάστημα 1 ώρας και αντιστοιχεί στην περιστροφή της γης. Το Greenwich είναι ένα προάστιο του Λονδίνου, του οποίου το γεωγραφικό μήκος έχει οριστεί ίσο με  $0^\circ$ .

Το γεωγραφικό μήκος, χαρακτηρίζεται ανατολικό Α (west W) ή δυτικό Δ (east E), ανάλογα σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται το σημείο. Σημεία του ίδιου ημισφαιρίου έχουν ομώνυμα μήκη, σε αντίθεση με σημεία διαφορετικού ημισφαιρίου, που έχουν ετερόνυμα μήκη. Η γωνία  $L_{LOC}$  κυμαίνεται από  $0^\circ$  (θέση του  $1^{ου}$  μεσημβρινού) μέχρι  $180^\circ$  Α και από  $0^\circ$  μέχρι και  $-180^\circ$  Δ. Επομένως το γεωγραφικό μήκος έχει θετικές τιμές για το ανατολικό ημισφαίριο και αρνητικές για τον δυτικό.

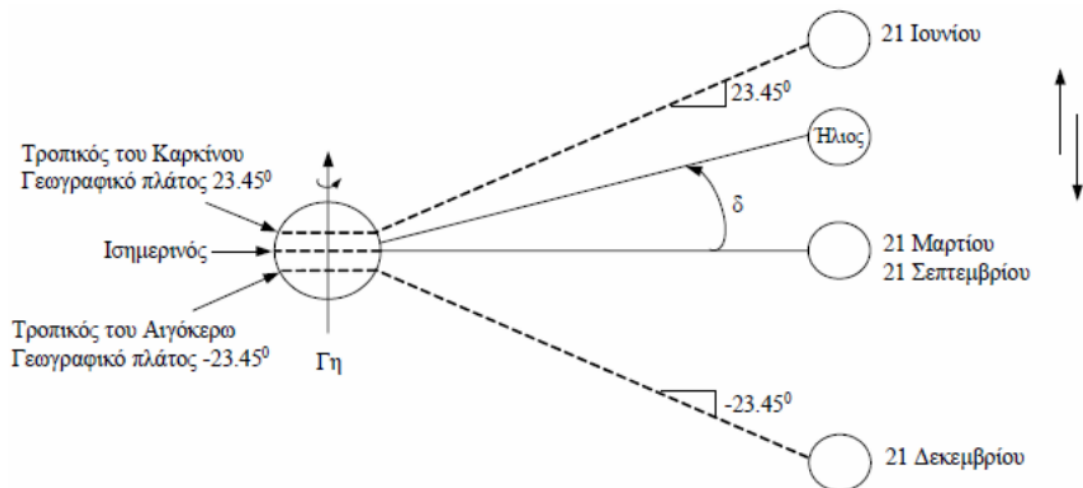
### Απόκλιση ήλιου ή γωνία ηλιακής απόκλισης $\delta$ :

Είναι η απόκλιση στην διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης και του Ισημερινού με το κέντρο του ήλιου, κατά την ηλιακή μεσημβρία. Αυτή η γωνία και όχι η ελλειπτική τροχιά είναι υπεύθυνη για το φαινόμενο των εποχών. Η τιμή της γωνίας  $\delta$  κυμαίνεται μεταξύ  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ , είναι διαφορετική για κάθε ημέρα του χρόνου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = 23,45 * \sin \left( 2 * \pi * \frac{284 + \nu}{365} \right) \quad (1.29)$$

όπου,  $\nu$  είναι ο χαρακτηριστικός αριθμός της συγκεκριμένης ημέρας του χρόνου, στην οποία την τιμή της γωνίας  $\delta$  θέλουμε να υπολογίσουμε (π.χ. για τις 20 Οκτώβρη έχουμε  $\nu = 293$ , με  $\nu = 1$  την  $1^{η}$  Ιανουαρίου και  $\nu = 365$  την  $31^{η}$  Δεκεμβρίου).

Η ηλιακή απόκλιση είναι  $0^\circ$  στην εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία (21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου), ενώ παίρνει τη μέγιστη τιμή της  $23,45^\circ$  και ελάχιστη  $-23,45^\circ$ , στο θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Ιουνίου και 21 Δεκεμβρίου) αντίστοιχα. Επομένως, η ηλιακή απόκλιση έχει θετικές τιμές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για τον νότιο.



Σχήμα 1.44: απόκλιση του ήλιου από τον ισημερινό της γης σε διάφορες χρονικές περιόδους του έτους

A/A	ΜΗΝΑΣ	ΑΥΞΩΝ ΑΡΙΘΜΟΣ ΤΗΣ 15ης ΚΑΘΕ ΜΗΝΑ (ν)
1	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	15
2	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	46
3	ΜΑΡΤΙΟΣ	74
4	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	105
5	ΜΑΙΟΣ	135
6	ΙΟΥΝΙΟΣ	166
7	ΙΟΥΛΙΟΣ	196
8	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	227
9	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	258
10	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	288
11	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	319
12	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	349

Πίνακας 1.1: αύξων αριθμός της 15ης κάθε μήνα

### Γωνία μεσουράνησης ή ηλιακής μεσημβρίας $EL_n$ :

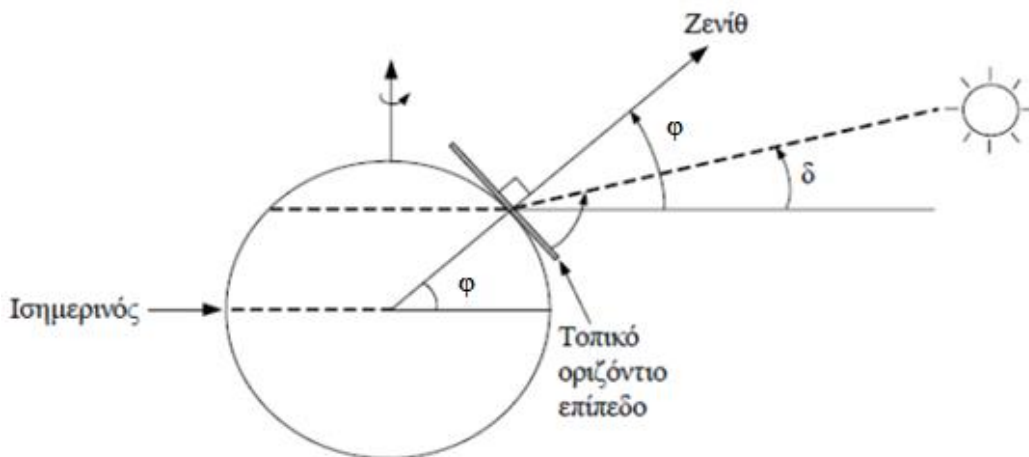
Η γωνία αυτή σχηματίζεται μεταξύ του ήλιου κατά την μεσημβρία του (μέγιστο ύψος) και του τοπικού επίπεδου. Καθώς αλλάζει συνεχώς ο ημερήσιος κύκλος του ήλιου, κατά την φαινομενική κίνηση του λόγω της απόκλισης  $\delta$ , τότε και η γωνία (ύψος) μεσουράνησης του, μεταβάλλεται καθημερινά και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$EL_n = (90^\circ - \varphi) - \delta \quad (1.30)$$

Η γωνία μεσουράνησης κυμαίνεται από την ελάχιστη τιμή κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο  $EL_{n,\chi\eta}$ , με γωνία απόκλισης  $-23,5^\circ$  (22 Δεκεμβρίου, χαμηλότερο ύψος ήλιου) μέχρι την μέγιστη τιμή κατά το θερινό

ηλιοστάσιο  $EL_{n,\theta\eta}$ , με γωνία απόκλισης  $+23,5^\circ$  (21 Ιουνίου, υψηλότερο ύψος ήλιου) και στη συνέχεια ελαττώνεται επανερχόμενη στην τιμή της 22ας Δεκεμβρίου. Στις ισημερίες 21 Μαρτίου και 22 Σεπτεμβρίου, η απόκλιση  $\delta$  του ήλιου μηδενίζεται.

$$EL_{n,\chi\eta} = (90^\circ - \varphi) - 23,5^\circ \quad \text{και} \quad EL_{n,\theta\eta} = (90^\circ - \varphi) + 23,5^\circ$$



Σχήμα 1.45: σχηματισμός γωνίας ηλιακής μεσημβρίας

#### Αληθής ηλιακή ώρα $TST$ :

Για τους υπολογισμούς της ηλιακής γεωμετρίας, ασχολούμαστε με την αληθή ηλιακή ώρα  $TST$  (True Solar Time), όπου όλα μετρούνται σχετικά με το ηλιακό μεσημέρι (ηλιακή μεσημβρία). Η ηλιακή ώρα δεν συμπίπτει με την τοπική ωρολογιακή ώρα  $LST$  (Local Standard Time) κάθε χώρας, δηλαδή, η ώρα στην οποία είναι συντονισμένα τα ρολόγια σε μια περιοχή. Ορίζεται έτσι, ώστε το ηλιακό μεσημέρι (12:00 ηλιακής ώρας), να συμπίπτει με την χρονική στιγμή όπου ο ήλιος βρίσκεται στον μεσημβρινό του παρατηρητή (μεσημβρινός αναφοράς).

Υπάρχουν δύο διευθετήσεις που θα πρέπει να γίνουν προκειμένου να συνδεθεί η αληθή ηλιακή ώρα με την τοπική ωρολογιακή ώρα:

- A) Η χρονική διόρθωση με βάση την εξίσωση του χρόνου  $E_t$ , για την συγκεκριμένη  $n$  ημέρα του έτους.
- B) Η τοπική ωρολογιακή ώρα  $LST$  (ή πολιτικός χρόνος ζώνης), το γεωγραφικό μήκος του τόπου  $L_{Loc}$  και το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού αναφοράς της ζώνης  $L_{ZCM}$  ( $ZCM$ , Zone Central Meridian).

Τα πραγματικά ρολόγια βασίζονται σ έναν ομοιόμορφα κινούμενο ήλιο, στο μέσο ήλιο, που κινείται κατά μήκος του ουράνιου ισημερινού, έτσι ώστε να τον διαγράφει στον ίδιο χρόνο, με αυτόν που απαιτείται, για να διαγράψει ο αληθής ήλιος την εκλειπτική, ορίζοντας έτσι τον μέσο ηλιακό χρόνο, αυξημένο κατά 12 ώρες, με αποτέλεσμα να περιλαμβάνει ακριβώς 24 ώρες, με αρχή την κάτω μεσουράνηση του ήλιου. Η απόκλιση μεταξύ της αληθής ηλιακής ώρας και της μέσης ηλιακής ώρας  $LMT$  (Local Mean Time), ονομάζεται **εξίσωση χρόνου  $E_t$** , η οποία λαμβάνει υπόψη της, ότι η πλήρης περιστροφή της γης δεν πραγματοποιείται ακριβώς σε 24 ώρες, εξαρτώμενη από την εποχή του έτους.

Για το μεσημέρι της  $n$  ημέρας του έτους, η  $E_t$  μπορεί να υπολογιστεί με καλή ακρίβεια, από την αναλυτική σχέση:

$$E_t = 229,2 * \left( \begin{array}{l} 0,000075 + 0,001868 * \cos(B) - 0,032077 * \sin(B) - 0,014615 * \cos(2B) \\ -0,04089 * \sin(2B) \end{array} \right) \quad (1.31)$$

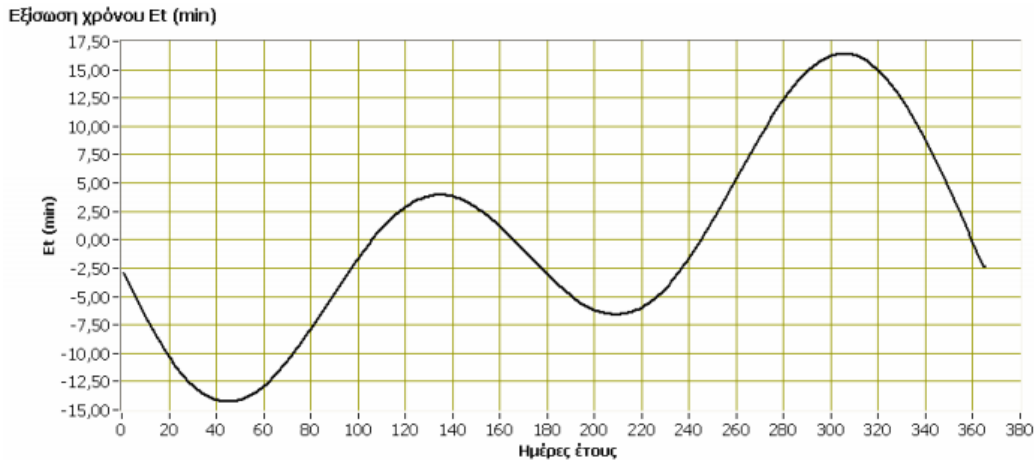
και μονάδα μέτρησης της εξίσωση χρόνου  $E_t$ , είναι το 1 min.

Η τιμή για την **γωνία ημέρας  $B$** , εκφράζει την εξάρτηση της σχέσης, από τη θέση της γης, για την κάθε ημέρα του έτους και δίνεται από την σχέση:

$$B = (n - 1) * \frac{360}{365} \quad (1.32)$$

όπου,  $n$  ο αύξων αριθμός της αντίστοιχης ημέρας του έτους (π.χ. για τις 20 Οκτώβρη έχουμε  $n = 293$ ).

Όπως είναι φανερό η δεύτερη εξίσωση είναι πολύ πιο εύχρηστη από την πρώτη αφού είναι αρκετά πιο απλή. Για να τη χρησιμοποιήσουμε βέβαια θα πρέπει να αποδειχθεί ότι δίνει τα ίδια αποτελέσματα με την πρώτη. Γι' αυτό το λόγω κατασκευάστηκε το παρακάτω συγκριτικό διάγραμμα των εξισώσεων για όλες τις μέρες του χρόνου:



**Σχήμα 1.46:** γραφική παράσταση της εξίσωσης χρόνου μέσα στο έτος

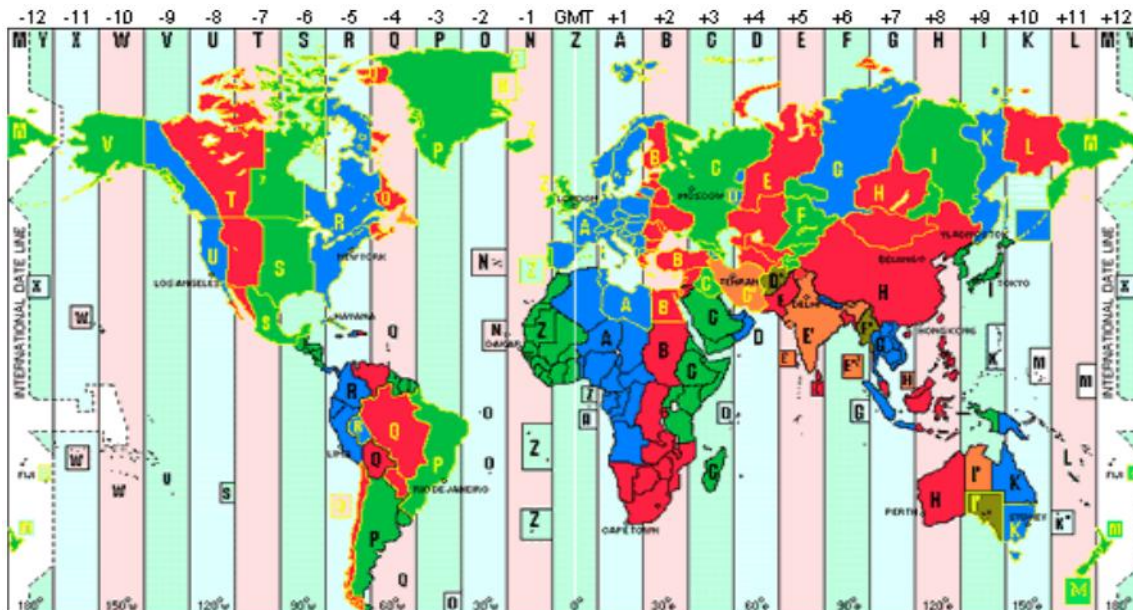
Η ακόλουθη εξίσωση, χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί ο αληθής ηλιακός χρόνος  $TST$  και εξαρτάται από τοπικό ωρολογιακό χρόνο  $LST$ :

$$TST = LST + \frac{L_{LOC} - L_{ZCM}}{15} + \frac{E_t}{60} \quad (1.33)$$

όπου,  $L_{LOC}$  το γεωγραφικό μήκος του τόπου της θέσης μελέτης και  $L_{ZCM}$ , το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού αναφορά της ζώνης της θέσης μελέτης, με θετικό πρόσημο ανατολικά του Greenwich και αρνητικό δυτικά του. Η μονάδα μέτρησης του αληθή ηλιακού χρόνου  $TST$ , είναι η 1 h.

Επομένως, το γεωγραφικό μήκος έχει θετικό πρόσημο ανατολικά του  $GMT$  (Greenwich Mean Time) και αρνητικό δυτικά του. Για την Ελλάδα, το γεωγραφικό μήκος του κεντρικού μεσημβρινού της ζώνης είναι  $L_{ZCM} = 30^\circ$ .

Πίνακας με τον οποίο, οι περιοχές της γης, χωρίζονται σε μεσημβρινούς ή χρονικές ζώνες:



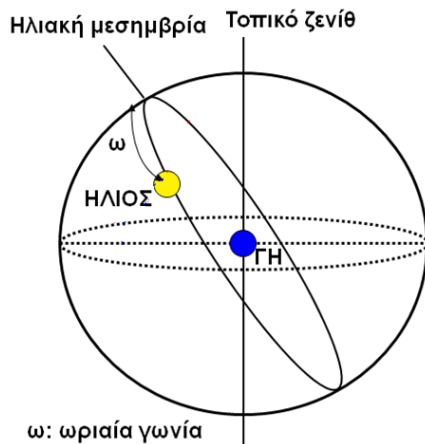
Πίνακας 1.2: ζώνες χρόνου

**Ωριαία γωνία ή γωνία ηλιακής ώρας  $\omega$  :**

Είναι η γωνία που φανερώνει την απόκλιση του ήλιου, ανατολικά ή δυτικά, από την ηλιακή μεσημβρία (θέση του ήλιου στις 12:00 το μεσημέρι) ενός σημείου στην επιφάνεια της γης, λόγω περιστροφής της γης περί τον άξονα της, δηλαδή η ωριαία γωνία  $\omega$ , αντιστοιχεί σε κάποια ώρα, πριν και μετά την ηλιακή μεσημβρία:

$$\omega = \frac{12 - TST}{24} * 360 \quad (1.34)$$

Η τιμή της ωριαίας γωνίας  $\omega$  το μεσημέρι είναι  $0^\circ$  (μεσουράνηση). Για τις ώρες πριν το ηλιακό μεσημέρι η γωνία  $\omega$  παίρνει αρνητικές τιμές ενώ αντίθετα για τις απογευματινές ώρες, παίρνει θετικές τιμές. Για παράδειγμα, στις 11:00 έχουμε  $\omega = -15^\circ$ , ενώ στις 13:00 έχουμε  $\omega = +15^\circ$ .



Σχήμα 1.47: σχηματισμός ωριαίας γωνίας ήλιου από την ηλιακή μεσημβρία του

**Ωριαία γωνία δύσης  $\omega_{SS}$  και ανατολής  $\omega_{SR}$  ήλιου :**

Η ανατολή και η δύση του ήλιου χαρακτηρίζονται από γωνία μεσουράνησης  $EL_n = 0$ . Συνεπώς, προκύπτουν η αντίστοιχες γωνίες δύσης και ανατολής του ήλιου:

$$\omega_{SR} = \cos^{-1}(-\tan(\varphi) * \tan(\delta)) \quad \text{ή} \quad \omega_{SS} = -\omega_{SR} \quad (1.35)$$

Ωριαία γωνία δύσης  $\omega'_S$  του ήλιου για ένα κεκλιμένο επίπεδο, καλείται η ωριαία γωνία  $\omega$  κατά την οποία ο ήλιος δύει ή ανατέλλει για το επίπεδο αυτό:

$$\omega'_S = \min [\omega_S, \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) * \tan(\delta))] \quad (1.36)$$

**Ημερήσιο τόξο τροχιάς ήλιου  $\tau_\alpha$  ή ηλιακή ημέρα :**

Αποτελεί, τη διάρκεια της ηλιοφάνειας μιας ημέρας και είναι ίση με τον χρόνο που ο ήλιος είναι πάνω από τον ορίζοντα του παρατηρητή, μεταξύ του ηλιακού χρόνου ανατολής  $t_{SR}$  και δύσης  $t_{SS}$ . Δίδεται από τις σχέσεις:

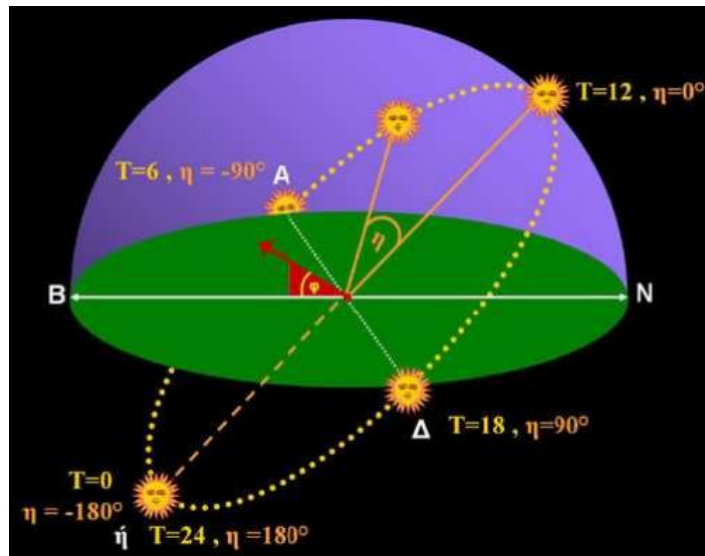
$$\tau(h) = t_{SR} - t_{SS} \quad \text{ή} \quad \tau(h) = \frac{2 * \omega_S}{15} \quad (1.37)$$

$$\text{με:} \quad t_{SR} = 12 - \frac{24}{360} * \omega_{SR} \quad \text{και} \quad t_{SS} = 12 - \frac{24}{360} * \omega_{SS}$$

μονάδα μέτρησης της διάρκειας ημέρας  $\tau$ , είναι η 1 h.

Προκειμένου να υπολογιστεί η εξίσωση, υπενθυμίζεται ότι:

- η γη πραγματοποιεί μια πλήρη περιστροφή  $360^\circ$  σε 24 h, που σημαίνει ότι σε κάθε ώρα περιστρέφεται κατά  $360/24 = 15^\circ$  και
- ο παρατηρητής, από τον γεωγραφικό τόπο του, βλέπει τον ήλιο να διαγράφει στον ορίζοντα, τόξο  $2\pi/24 = \pi/12$ , που αντιστοιχεί σε γωνία  $180/24 = 15^\circ$ .

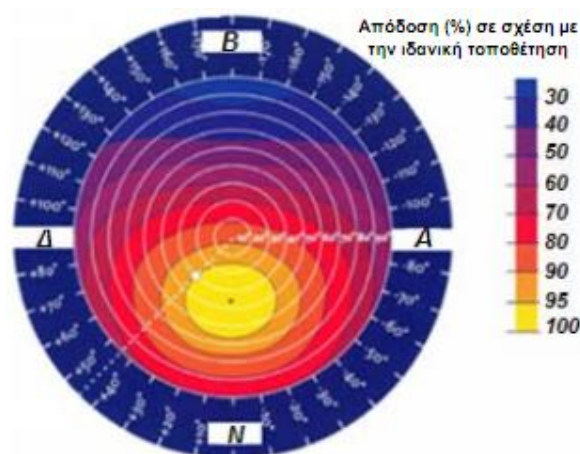


**Σχήμα 1.48:** ωριαία γωνία ήλιου ( $\eta$ ) ενός τόπου κατά την ημερήσια (24ώρες) περιστροφή της γης από τον άξονα της



### 1.3.3 Ο γεωμετρικός προσδιορισμός της θέσης ήλιου – παρατηρητή

Σημαντικό ρόλο στην αποδοτικότερη μέτρηση ή εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, παίζει η θέση του ήλιου στον ουράνιο θόλο μια δεδομένη στιγμή (μοντέλο ουράνιας σφαίρας) και ο προσανατολισμός του παρατηρητή ή ενός συλλέκτη προς τον ήλιο. Έτσι, η μέγιστη τιμή του ηλιακού δυναμικού, κατά την διάρκεια μιας αίθριας ημέρας, χαρακτηρίζεται από το προσανατολισμό ενός συλλέκτη, όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μεσημβρινό (ηλιακό μεσημέρι) του τόπου. Βασικά στοιχεία προσανατολισμού είναι η γωνία κλίσης  $\beta$  και το αζιμούθιο  $\gamma$  της επιφάνειας του συλλέκτη. Σε περιοχές στο βόρειο ημισφαίριο της γης, όπως η Ελλάδα, ο συλλέκτης υπό γωνία κλίσης προς το επίπεδο του τόπου, έχει αζιμούθιο με κατεύθυνση τον αληθή νότο του ήλιου. Έτσι, χαρακτηρίζεται από την μέγιστη τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, κατά την διάρκεια μιας αίθριας ημέρας. Στο παρακάτω σχήμα, γίνεται σαφής η παραπάνω διαπίστωση.

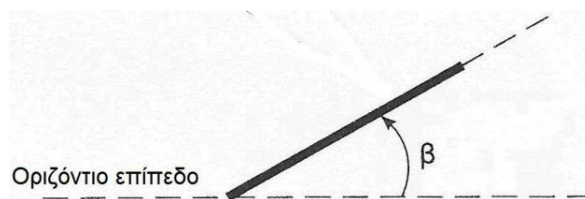


Σχήμα 1.49: μέγιστη τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο βόρειο ημισφαίριο με νότιο προσανατολισμό

#### Γωνία κλίσης επιφάνειας $\beta$ :

Αποτελεί τη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο οριζόντιο επίπεδο του τόπου στη γη και της επιφάνειας του παρατηρητή ή συλλέκτη. Η επιφάνεια έχει τη δυνατότητα να παραμείνει υπό μηδενική γωνία κλίσης ( $\beta = 0^\circ$ ), δηλαδή παράλληλη προς το επίπεδο του τόπου στη γη, είτε να στραφεί με γωνία έως  $180^\circ$ , δηλαδή κεκλιμένη προς το επίπεδο του τόπου, ώστε οι ακτίνες του ήλιου, να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια του παρατηρητή ή συλλέκτη.

Για τοποθεσίες κοντά στον Ισημερινό της γης, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία έχει σχεδόν κάθετη διεύθυνση, υπό γωνία  $90^\circ$ . Έτσι, η επιφάνεια του παρατηρητή ή συλλέκτη παραμείνει υπό μηδενική γωνία κλίσης ( $\beta = 0^\circ$ ) και χωρίς αζιμούθιο με κατεύθυνση τον αληθή νότο του ήλιου.

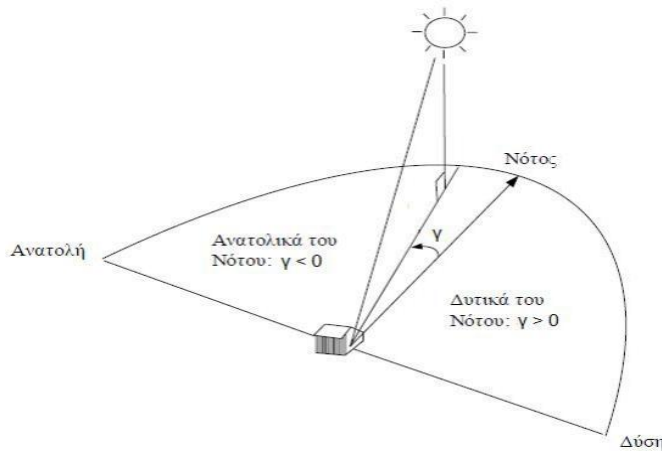


Σχήμα 1.50: γωνία κλίσης της επιφάνειας

### Αζιμούθιο ή αζιμούθια γωνία επιφάνειας $\gamma$ :

Περιγράφει την κατεύθυνση προς την οποία είναι στραμμένη η επιφάνεια ενός παρατηρητή ή συλλέκτη. Είναι η γωνία που σχηματίζεται από τη προβολή της ευθείας μεταξύ επιφάνειας και νότου, προς τη κάθετο του τοπικού μεσημβρινού του ήλιου, πάνω στο οριζόντιο επίπεδο του τόπου στη γη.

Για τοποθεσίες του βόρειου ημισφαιρίου, όπως η Ελλάδα, η αζιμούθια γωνία επιφάνειας είναι  $\gamma = 0^\circ$ , για κατεύθυνση της επιφάνειας προς το νότο, αρνητική για ανατολικό προσανατολισμό και θετική για δυτικό. Αντίθετα, για τοποθεσίες του νότιου ημισφαιρίου, η αζιμούθια γωνία είναι  $\gamma = 180^\circ$  ή  $-180^\circ$ , για κατεύθυνση της επιφάνειας προς το βορρά.



Σχήμα 1.51: αζιμούθια γωνία της επιφάνειας

### Αληθής νότος :

Ο προσδιορισμός της αληθούς διεύθυνσης Βορρά-Νότου μπορεί να γίνει με τη βοήθεια σχετικών ηλεκτρονικών οργάνων (GPS), είτε με προσδιορισμό της χρονικής στιγμής του ηλιακού μεσημεριού. Η μέθοδος προσδιορισμού της κατεύθυνσης του αληθούς Νότου σ ένα τόπο, με βάση το ηλιακό μεσημέρι, βασίζεται στον προσδιορισμό της διεύθυνσης της σκιάς που δημιουργεί μια κατακόρυφη λεπτή ράβδος, σε οριζόντιο επίπεδο, τη στιγμή που ο ήλιος βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο της φαινομένης ημερήσιας τροχιάς του. Ο καθορισμός της κατάστασης αυτής απαιτεί γνώση της αντίστοιχης χρονικής στιγμής, με βάση τον τοπικό χρόνο.

Επειδή το ζητούμενο για τον προσδιορισμό του αληθούς νότου, είναι ο προσδιορισμός της ωρολογιακής ώρας  $LST$  ή  $CT$  (Clock Time) όταν συμβαίνει το ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν  $TST = 12$  h, γράφουμε την σχέση (1.33) με την μορφή:

$$LST = 12 - \frac{L_{Loc} - L_{ZCM}}{15} - \frac{E_t}{60} \quad (1.38)$$

Τέλος, γνωρίζοντας τον ωρολογιακό χρόνο του αληθούς μεσημεριού, μπορούμε να προσδιορίσουμε στο χώρο μιας εφαρμογής, την κατεύθυνση του αληθούς νότου, αρκεί εκείνη τη στιγμή να σημειώσουμε στο οριζόντιο έδαφος τη γραμμή της σκιάς μιας σχετικής λεπτής κατακόρυφης ράβδου.

### Ζενιθία γωνία ή γωνία ηλιακού ζενίθ $\theta_Z$ :

Αποτελεί τη γωνία που σχηματίζεται από την κάθετο στο οριζόντιο επίπεδο του τόπου (Ζενίθ) προς τη προβολή της ευθείας μεταξύ παρατηρητή ή συλλέκτη και ήλιου. Για μια δεδομένη περιοχή γεωγραφικού πλάτους  $\varphi$ , ηλιακής απόκλιση  $\delta$  και ωριαίας γωνίας  $\omega$ , η ζενιθία γωνία  $\theta_Z$  για οριζόντια επιφάνεια, δηλαδή γωνία κλίσης  $\beta = 0^\circ$ , υπολογίζεται:

$$\cos(\theta_Z) = \sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(\omega) \quad (1.39)$$

Για κεκλιμένη επιφάνεια, με δεδομένη γωνία κλίσης  $\beta > 0^\circ$ , η ζενιθία γωνία  $\theta_Z$  είναι:

$$\cos(\theta_Z) = \sin(\delta) * \sin(\varphi - \beta) + \cos(\delta) * \cos(\varphi - \beta) * \cos(\omega) \quad (1.40)$$

### Ηλιακό ύψος ή γωνία ηλιακού ύψους $\alpha_S$ :

Η γωνία σχηματίζεται από τη προβολής της ευθείας μεταξύ παρατηρητή ή συλλέκτη και ήλιου προς την κάθετο του ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο του τόπου, σε δεδομένη χρονική στιγμή. Για μια δεδομένη περιοχή γεωγραφικού πλάτους  $\varphi$ , ηλιακής απόκλισης  $\delta$  και ωριαίας γωνίας  $\omega$ , το ηλιακό ύψος  $\alpha_S$  για οριζόντια επιφάνεια, δηλαδή γωνία κλίσης  $\beta = 0^\circ$ , υπολογίζεται:

$$\sin(\alpha_S) = \sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) \quad (1.41)$$

Για κεκλιμένη επιφάνεια, με δεδομένη γωνία κλίσης  $\beta > 0^\circ$ , το ηλιακό ύψος  $\alpha_S$  είναι:

$$\sin(\alpha_S) = \sin(\delta) * \sin(\varphi - \beta) + \cos(\delta) * \cos(\varphi - \beta) * \cos(\omega) \quad (1.42)$$

Έτσι, όταν η επιφάνεια στραφεί ώστε οι ακτίνες του ήλιου, να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια, τότε το ύψος του ήλιου  $\alpha_S$  και η γωνία κλίσης επιφάνειας  $\beta$ , δίνουν άθροισμα  $90^\circ$  ( $\alpha_S + \beta = 90^\circ$ ).

Τέλος, ισούται με τη συμπληρωματική της ζενιθίας γωνίας  $\theta_Z$ , δηλαδή ( $\alpha_S = 90^\circ - \theta_Z$ ) ή και το αντίστροφο ( $\theta_Z = 90^\circ - \alpha_S$ ), επομένως ισχύει ότι ( $\alpha_S + \theta_Z = 90^\circ$ )

### Αζιμούθιο ή αζιμουθιακή γωνία ήλιου $\gamma_S$ :

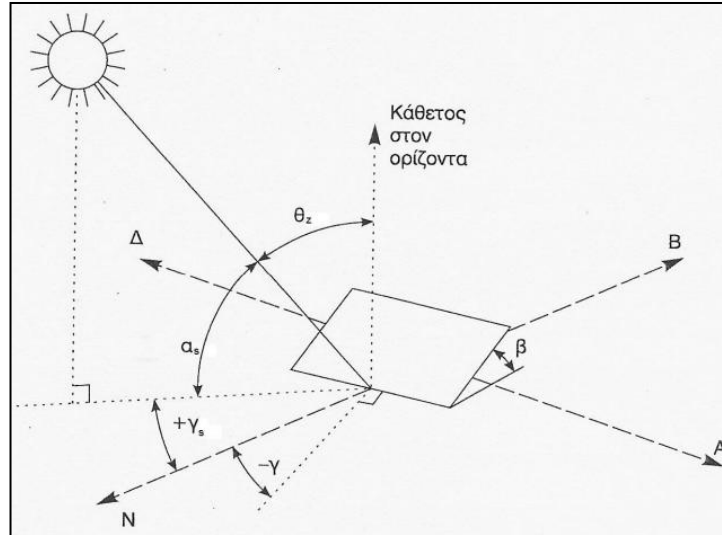
Είναι η γωνία που σχηματίζεται από τη προβολή της ευθείας μεταξύ επιφάνειας και αληθούς νότου προς τη κατακόρυφο της θέσης του ήλιου πάνω στο οριζόντιο επίπεδο του τόπου στη γη. Με ηλιακό ύψος  $\alpha_S$ , για μια δεδομένη περιοχή γεωγραφικού πλάτους  $\varphi$ , ηλιακής απόκλιση  $\delta$  και ωριαίας γωνίας  $\omega$ , το αζιμούθιο ήλιου  $\gamma_S$  για οριζόντια επιφάνεια, δηλαδή γωνία κλίσης  $\beta = 0^\circ$ , υπολογίζεται:

$$\cos(\gamma_S) = \frac{\sin(\alpha_S) * \sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\sin(\alpha_S) * \cos(\varphi)} \quad (1.43)$$

Για κεκλιμένη επιφάνεια, με δεδομένη γωνία κλίσης  $\beta > 0^\circ$ , το αζιμούθιο ήλιου  $\gamma_S$  είναι:

$$\cos(\gamma_S) = \frac{\cos(\delta) * \sin(\omega)}{\cos(\beta)} \quad (1.44)$$

Για τοποθεσίες του βόρειου ημισφαιρίου, όπως η Ελλάδα, μηδενική τιμή του  $\gamma_S$  αντιστοιχεί σε νότια κατεύθυνση, θετικές τιμές του  $\gamma_S$  αναφέρονται σε δυτικούς προσανατολισμούς, και αρνητικές τιμές του  $\gamma_S$  σε ανατολικούς προσανατολισμούς.



Σχήμα 1.52: γωνίες προσδιορισμού της θέσης του ήλιου, ως προς το σύστημα του παρατηρητή

### Γωνία πρόσπτωσης $\theta$ :

Αφορά τη γωνία που σχηματίζεται από τη προβολή της ευθείας μεταξύ επιφάνειας και ήλιου (άμεση ηλιακή ακτινοβολία) προς τη κάθετο πάνω στην επιφάνεια. Για ένα δεδομένο τόπο γεωγραφικού πλάτους  $\varphi$ , ηλιακής απόκλισης  $\delta$  και ωριαίας γωνίας  $\omega$ , η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  για οριζόντια επιφάνεια, δηλαδή γωνία κλίσης  $\beta = 0^\circ$ , ισούται με τη ζενιθία γωνία ( $\theta_Z = \theta$ ) και υπολογίζεται βάση της σχέσης (1.39):

$$\cos(\theta) = \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(\omega) + \sin(\delta) * \sin(\varphi) \quad (1.45)$$

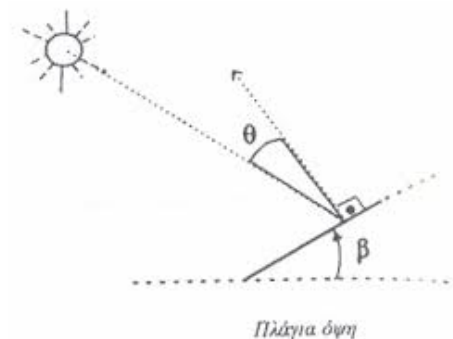
Για κεκλιμένη επιφάνεια, με δεδομένη γωνία κλίσης  $\beta > 0^\circ$  και αζιμούθια γωνία επιφάνειας συλλέκτη  $\gamma$ , η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\cos(\theta) = \cos(\alpha_s) * \sin(\beta) * \cos(\gamma_s - \gamma) + \sin(\alpha_s) * \cos(\beta) \quad (1.46)$$

$$\cos(\theta) = \cos(\theta_Z) * \sin(\beta) * \cos(\gamma_s - \gamma) + \sin(\theta_Z) * \cos(\beta) \quad (1.47)$$

Για τοποθεσίες του βόρειου ημισφαιρίου, όπως η Ελλάδα, με μηδενική τιμή της αζιμούθιας γωνίας της επιφάνειας  $\gamma = 0^\circ$ , η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$\cos(\theta) = \cos(\varphi - \beta) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) * \sin(\delta) \quad (1.48)$$



Σχήμα 1.53: γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας

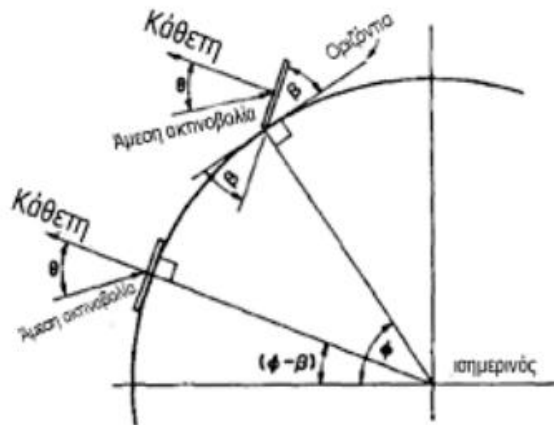
### Συντελεστής άμεσης ακτίνας $R_b$ :

Ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας ισχύος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια και της πυκνότητας ισχύος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια:

$$R_b = \frac{G_{\beta,b}}{G_{T,b}} = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \quad (1.49)$$

Όσον αφορά το βόρειο ημισφαίριο, η γωνία αζιμούθιου είναι  $\gamma = 0^\circ$ , για τον λόγο αυτό η γενική σχέση του συντελεστή άμεσης ακτίνας  $R_b$ , με την αντικατάσταση των αντίστοιχων εξισώσεων (1.45) και (1.48), γίνεται:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) * \sin(\delta)}{\cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \sin(\varphi) * \sin(\delta)} \quad (1.50)$$



Σχήμα 1.54: γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο

### Βέλτιστη γωνία κλίσης επιφάνειας $\beta_{βελτ}$ :

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται μια επιφάνεια με κλίση εξαρτάται από το γεωγραφικό της πλάτος  $\varphi$ , τη γωνία κλίσης  $\beta$  της και τη χρονική περίοδο. Αυτό σημαίνει ότι, για κάποιο χρονικό διάστημα που σε μια επιφάνεια προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία, θα πρέπει να υπάρχει μια γωνία κλίσης της επιφάνειας, τέτοια, ώστε η ολική ακτινοβολία να είναι η μέγιστη. Η γωνία αυτή είναι πολύ σημαντική διότι, μια συλλεκτική επιφάνεια τοποθετείται με αυτή τη κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο, δέχεται το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ίσως λοιπόν με βάση τα προηγούμενα, να υπέθετε κανείς ότι η μέγιστη ετήσια ενεργειακή απολαβή της ηλιακής ακτινοβολίας, θα προέκυπτε για γωνία κλίσης επιφάνειας συλλέκτη ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Αν όμως ληφθεί υπόψη ότι, κατά το καλοκαίρι το ημερήσιο τόξο του ήλιου είναι μεγαλύτερο του αντίστοιχου κατά το χειμώνα, προκύπτει ότι η βέλτιστη γωνία κλίσης της επιφάνειας πρέπει να είναι μικρότερη του γ.π.  $\varphi$  του τόπου, δηλαδή, σε βαρύτητα προς την καλοκαιρινή περίοδο. Ένας φαινομενολογικός κανόνας, για εφαρμογή σε ευρεία περιοχή γ.π. με  $\varphi \leq 20^\circ$  είναι:

$$\beta_{βελτ} = \varphi - (5^\circ \div 10^\circ) \quad (1.51)$$

### 1.3.4 Η ποσοτική ανάλυση του ηλιακού δυναμικού

Ο μακροχρόνιος υπολογισμός του ηλιακού δυναμικού στο επίπεδο της γης, είναι από δύσκολος έως και αδύνατος. Η δυσκολία αυτή οφείλεται κυρίως στα διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Έτσι συνίσταται για την αξιοποίηση του ηλιακού δυναμικού, να χρησιμοποιούνται πίνακες τιμών ηλιακής ακτινοβολίας που βασίζονται σε μακροχρόνιες μετρήσεις μετεωρολογικών σταθμών. Συνήθως, οι διάφοροι μετεωρολογικοί σταθμοί μετρούν την ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο του τόπου, με την χρήση ακτινομετρικών οργάνων. Οι τιμές αυτές, είναι απαραίτητες, αρχικά για την υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια ενός συλλέκτη και εν συνεχεία, σε κεκλιμένη επιφάνεια, ενώ πραγματοποιείται με μοντέλα ανάλυσης των συνιστωσών της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, σε διάφορες χρονικές περιόδους.

Τιμή χρονικής περιόδου συνιστωσών	Ολική		Άμεση		Διάχυτη		Διάχυτα ανακλώμενη
	οριζόντιο επίπεδο	κεκλιμένο επίπεδο	οριζόντιο επίπεδο	κεκλιμένο επίπεδο	οριζόντιο επίπεδο	κεκλιμένο επίπεδο	κεκλιμένο επίπεδο
<b>Ετήσια</b>	$G_T$	$G_\beta$	$G_{T,b}$	$G_{\beta,bn}$ $G_{\beta,b}$	$G_{T,b}$	$G_{\beta,b}$	$G_{\beta,gr}$
<b>Μηνιαία</b>	$\langle H \rangle_T$	$\langle H \rangle_\beta$	$\langle H \rangle_{T,b}$	$\langle H \rangle_{\beta,bn}$ $\langle H \rangle_{\beta,b}$	$\langle H \rangle_{T,b}$	$\langle H \rangle_{\beta,b}$	$\langle H \rangle_{\beta,gr}$
<b>Ημερήσια</b>	$H_T$	$H_\beta$	$H_{T,b}$	$H_{\beta,bn}$ $H_{\beta,b}$	$H_{T,b}$	$H_{\beta,b}$	$H_{\beta,gr}$
<b>Ωριαία</b>	$I_T$	$I_\beta$	$I_{T,b}$	$I_{\beta,bn}$ $I_{\beta,b}$	$I_{T,b}$	$I_{\beta,b}$	$I_{\beta,gr}$

Πίνακας 1.3: ορολογία συνιστωσών της πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες χρονικές περιόδους

### 1.3.4.1 Η ανάλυση του ηλιακού δυναμικού στα όρια της γης

Η ακτινοβολία που προσπίπτει καθημερινά, στα όρια της ατμόσφαιρας τη γης, διαφοροποιείται καθημερινά, βάση τη θέση της γης. Η ακτινοβολία αυτή, υπολογίζεται για AM0, αφού η ατμόσφαιρα δεν επιδρά επάνω της και δεν διαφοροποιείται πολύ στη διάρκεια του έτους. Για τον υπολογισμό, την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας  $G_{ext}$ , σε συγκεκριμένη μέρα του χρόνου, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας την απόσταση ήλιου-γης.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, έξω από τα όρια της γήινης ατμόσφαιρας σε μια οριζόντια επιφάνεια, υπολογίζεται από την σχέση:

$$H_{ext} = G_{sc} * R_o \quad (1.52)$$

όπου,  $R_o$  ο διορθωτικός συντελεστής απόστασης ήλιου-γης και  $G_{sc}$  η ηλιακή σταθερά  $1367 \text{ W/m}^2$ .

Για μεγαλύτερη ακρίβεια στην απόσταση μεταξύ ήλιου-γης, χρησιμοποιούμε την παρακάτω εξίσωση:

$$R_o = (1,000110 + 0,034221) * \cos(B) + 0,001280 * \sin(B) + 0,000719 * \cos(2B) + 0,000077 * \sin(2B) \quad (1.53)$$

$$B = (v - 1) * \frac{360}{365} \quad (1.54)$$

όπου,  $B$  η γωνία ημέρας που εξαρτάται από τον αύξων αριθμό  $v$ , της αντίστοιχης ημέρας του έτους (π.χ. για τις 20 Οκτώβρη έχουμε  $v = 293$ ).

Συχνά, είναι απαραίτητο να υπολογίζεται η ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας, για χρονική περίοδο μιας ώρας  $I_{ext}$  που προσπίπτει σε ένα οριζόντιο επίπεδο. Με ολοκλήρωση της εξίσωσης (1.44), στο πεδίο του χρόνου και για περίοδο ανάμεσα στις δύο ωριαίες γωνίες  $\omega_1$  και  $\omega_2$ , που καθορίζουν μία ώρα ( $\omega_2 > \omega_1$ ) η σχέση είναι:

$$I_{ext} = \left( \frac{12 * 3600}{\pi} \right) * G_{sc} * r_o * \left[ \cos(\varphi) * \cos(\delta) * (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1)) + \left( \frac{2 * \pi * (\omega_2 - \omega_1)}{360} \right) * \sin(\varphi) * \sin(\delta) \right] \quad (1.55)$$

Θεωρητικά, είναι δυνατόν να υπολογίσουμε την ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας για χρονική περίοδο μιας ημέρας  $H_{ext}$ , που προσπίπτει σε ένα οριζόντιο επίπεδο. Με ολοκλήρωση της εξίσωσης (1.52) στο πεδίο του χρόνου και για περίοδο μιας ημέρας, η σχέση είναι:

$$H_{ext} = \left( \frac{12 * 3600}{\pi} \right) * G_{sc} * r_o * \left[ \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \sin(\omega_s) + \left( \frac{2 * \pi * \omega_s}{360} \right) * \sin(\varphi) * \sin(\delta) \right] \quad (1.56)$$

Για να υπολογίσουμε την ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας για χρονική περίοδο ενός μηνός  $\langle H_{ext} \rangle$ , που προσπίπτει σε ένα οριζόντιο επίπεδο, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (1.52) για κάθε μια ημέρα του μήνα και στην συνέχεια, να αθροίσουμε τα επιμέρους αποτελέσματα. Εναλλακτικά, για να αποφύγουμε τους πολλούς υπολογισμούς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (1.55) και το αποτέλεσμα να το πολλαπλασιάσουμε με τις ημέρες  $d_m$ , του αντίστοιχου μήνα. Έτσι έχουμε την εξίσωση:

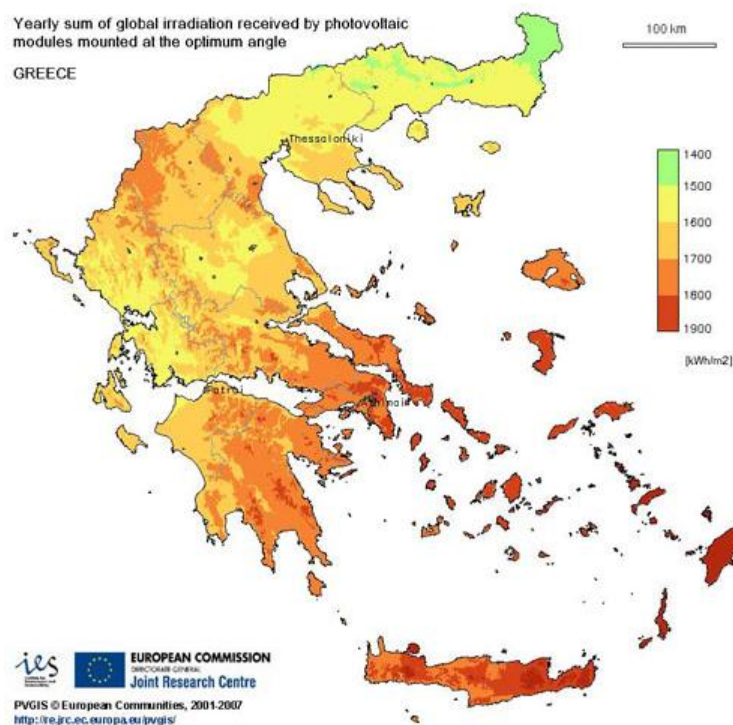
$$\langle H_{ext} \rangle = H_{ext} * d_m \quad (1.57)$$

μονάδα μέτρησης της,  $I_{ext}$ ,  $H_{ext}$  και  $\langle H_{ext} \rangle$  ακτινοβολίας στο SI, είναι το  $1 \text{ kWh/m}^2$ .

### 1.3.4.2 Η ανάλυση του ηλιακού δυναμικού στην επιφάνεια της γης

Στην Ελλάδα η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY), καταγράφει εδώ και πολλά χρόνια την πυκνότητα ισχύος της ολικής και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης, σε οριζόντιο επίπεδο του τόπου, για διάφορες περιοχές της χώρας. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν από την επεξεργασία μετρήσεων της μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας, με χρονική διάρκεια πάνω από 30 έτη. Η Ελλάδα παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό, περίπου 1400-1800 kWh/m<sup>2</sup>·yr ετησίως, σε οριζόντιο επίπεδο, ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος και το ανάγλυφο της περιοχής.

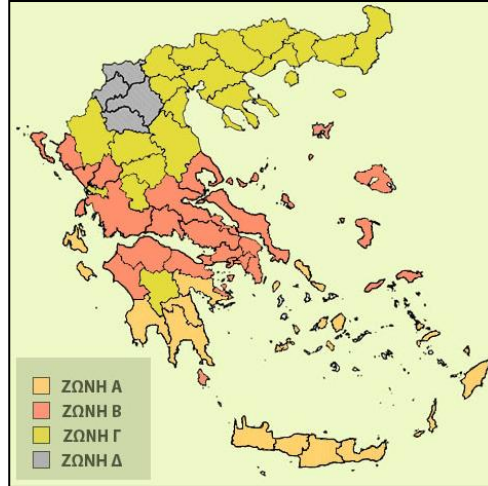
Οι μετρητικοί πίνακες τιμών της EMY, για διάφορες περιοχές της χώρας, παρουσιάζονται στο τέλος τους κεφαλαίου. Στους πίνακες αυτούς (1.4 και 1.5), δίνονται τιμές μέτρησης της μέσης μηνιαίας ολικής και της μέσης μηνιαίας διάχυτης πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας (kWh/m<sup>2</sup>·mo), στο οριζόντιο επίπεδο του τόπου της γης, για κάθε μήνα και όλο το έτος. Στον πίνακα (1.6), δίνονται τιμές μέτρησης του μέσου μηνιαίου συντελεστή αιθιρότητας, για κάθε μήνα και όλο το έτος. Τέλος, στον πίνακα (1.7), δίνονται τιμές μέτρησης της βέλτιστης γωνίας κλίσης, μέγιστης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, για κάθε μήνα και όλο το έτος.



Σχήμα 1.55: σχηματική απεικόνιση ηλιακού δυναμικού στην Ελλάδα

Στην περίπτωση που στους μετρητικούς πίνακες της EMY, δεν βρίσκεται η περιοχή που ενδιαφέρει, τότε χρησιμοποιείται ο χάρτης που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, όπου η χώρα είναι χωρισμένη σε έξι κλιματικές ζώνες και οι περιοχές της κάθε ζώνης, χαρακτηρίζονται από παρόμοιες μετρολογικές συνθήκες. Για όποιες περιοχές δεν υπάρχουν δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από την πλησιέστερη περιοχή εντός ζώνης, στην οποία παρατηρείται παρόμοια μορφολογία εδάφους (ορεινοί όγκοι, κ.α.) και παρόμοιος προσανατολισμός.





Σχήμα 1.56: σχηματική απεικόνιση κλιματικών ζωνών στην Ελλάδα

### I. Η ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια συλλεκτική επιφάνεια στο επίπεδο της γης

Το ηλιακό δυναμικό σε οριζόντια επιφάνεια, περιγράφεται από το μοντέλο κατάτμησης για διάφορες χρονικές περιόδους (μηνιαίο, ημερήσιο, ωριαίο), με τις σχετικές χρονικές μετατροπές. Αρχικά, υπολογίζονται η ολική και η διάχυτη συνιστώσα της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και κατόπιν αυτών, υπολογίζεται η άμεση συνιστώσα, για τον καθορισμό του ηλιακού δυναμικού του τόπου σε οριζόντια επιφάνεια. Σημαντικοί παράμετροι που εισάγονται στο μοντέλο, είναι η πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας και ο δείκτης της αιθριότητας του οριζοντα, ως προς το επίπεδο του τόπου.

Ο υπολογισμός της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας επί του οριζοντίου επιπέδου του τόπου, προκύπτει αποκλειστικά από τον πίνακα μετρητικών τιμών της EMY. Για τον υπολογισμό της διάχυτης συνιστώσας και του δείκτη αιθριότητας, επίσης δίδονται από τις τιμές της EMY, αλλά μπορούν να υπολογιστούν και μέσω της μαθηματικής ανάλυσης που περιγράφεται στο μοντέλο κατάτμησης. Τέλος, η άμεση συνιστώσα, υπολογίζεται από την σχέση που καθορίζει το μοντέλο κατάτμησης. Στους πίνακες (1.4), (1.5) και (1.6), δίνονται τιμές για την μηνιαία ολική, μηνιαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο του τόπου και του δείκτη αιθριότητας, για διάφορες περιοχές της Ελλάδος.

#### **Δείκτης αιθριότητας $k_T$ :**

Η συχνότητα με την οποία εμφανίζονται περίοδοι, με διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας (αίθριες και συννεφιασμένες μέρες), αποτυπώνεται με το δείκτη αιθριότητας  $k_T$ . Ο μέσος μηνιαίος δείκτης αιθριότητας  $k_T$  ορίζεται ως το πηλίκο της μέσης μηνιαίας ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια προς την μέση μηνιαία ημερήσια ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας:

$$k_T = \frac{\langle H_T \rangle}{\langle H_{ext,T} \rangle} \quad (1.58)$$

Ο ημερήσιος δείκτης αιθριότητας, ορίζεται με βάση τις ημερήσιες ακτινοβολίες:

$$k_T = \frac{H_T}{H_{ext,T}} \quad (1.59)$$

Τέλος, ο ωριαίος δείκτης αιθριότητας, υπολογίζεται με βάση τις ωριαίες ακτινοβολίες:

$$k_T = \frac{I_T}{I_{ext,T}} \quad (1.60)$$

Όσο πιο αίθρια είναι η ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ένταση της ακτινοβολίας. Ο δείκτης  $k_T$  αποτελεί χαρακτηριστικό του τόπου εγκατάστασης, ενώ έχει αποδειχθεί στατιστικά ότι ανεξάρτητα από το γεωγραφικό πλάτος, το ποσοστό του χρόνου κατά τον οποίο η συνολική ημερήσια ακτινοβολία, είναι μικρότερη ή ίση από ορισμένη τιμή, εξαρτάται άμεσα από την τιμή του δείκτη αυτού.

#### Δείκτης διάχυσης $k_d$ :

Ο διαχωρισμός, της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια συλλέκτη, στις συνιστώσες της διάχυτης και της άμεσης, είναι απαραίτητος. Κάτι τέτοιο είναι αναγκαίο, καθώς οι υπολογισμοί της ακτινοβολίας σε επίπεδο αυθαίρετης κλίσης και προσανατολισμού, από δεδομένα στο οριζόντιο επίπεδο, απαιτούν διαφορετική αντιμετώπιση των δύο συνιστωσών. Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για τον διαχωρισμό της ολικής ακτινοβολίας. Εκείνη των Orgill and Hollands, χρησιμοποιεί τον ωριαίο δείκτη αιθριότητας, για υπολογισμούς σε ωριαίες τιμές της ακτινοβολίας. Ο δείκτης  $k_d$ , μεταβάλλεται ως εξής:

$$\frac{I_{T,d}}{I_T} = k_d \begin{cases} 1 - 0,249 * k_T & \text{if : } k_T < 0,35 \\ 1,557 - 1,84 * k_T & \text{if : } 0,35 < k_T < 0,55 \\ 0,177 * k_T & \text{if : } k_T > 0,75 \end{cases} \quad (1.61)$$

Για τον υπολογισμό της ημερήσιας διάχυτης ακτινοβολίας, προτείνεται από τους Collares-Pereira and Rabl, η χρήση του ημερήσιου δείκτη αιθριότητας για τους υπολογισμούς:

$$\frac{H_{T,d}}{H_T} = k_d \begin{cases} 0,99 & \text{if : } k_T < 0,17 \\ 1,188 - 2,272 * k_T + 9,473 * k_T^2 - 21,865 * k_T^3 + 14,648 * k_T^4 & \text{if : } 0,17 < k_T < 0,75 \\ -0,54 * k_T + 0,632 & \text{if : } 0,75 < k_T < 0,8 \\ 0,2 & \text{if : } k_T > 0,8 \end{cases} \quad (1.62)$$

Για τον υπολογισμό της μηνιαίας διάχυτης ακτινοβολίας, προτείνεται από τους Collares-Pereira and Rabl, η χρήση του μηνιαίου δείκτη αιθριότητας για τους υπολογισμούς:

$$\frac{\langle H_{T,d} \rangle}{\langle H_T \rangle} = 0,755 + 0,00653 * (\omega_s - 90) - [0,505 + 0,00455 * (\omega_s - 90)] * \cos(115 * \langle k_T \rangle - 103) \quad (1.63)$$

#### Μετατροπή χρονικής περιόδου :

Εάν χρειάζεται να υπολογιστεί η ολική ωριαία ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, όταν υπάρχουν ημερήσια δεδομένα, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ωριαία προς την ημερήσια, από την σχέση:

$$\frac{I_T}{H_T} = \frac{\pi}{24} * \frac{(a + b * \cos(\omega)) * (\cos(\omega) - \cos(\omega_s))}{\sin(\omega_s) - \left(\frac{2 * \pi * \omega_s}{360}\right) * \cos(\omega_s)} \quad (1.64)$$

όπου,  $\omega$  είναι η ωριαία γωνία, ενώ  $a$  και  $b$  γεωμετρικοί παράμετροι που υπολογίζονται βάσει της ωριαίας γωνίας δύσης στην υπό μελέτη περιοχή:

$$a = 0,409 + 0,5016 * \sin(\omega_s - 60) \quad (1.65)$$

$$b = 0,6609 + 0,4767 * \sin(\omega_s - 60) \quad (1.66)$$

Στην περίπτωση της διάχυτης ακτινοβολίας, η συσχέτιση της ωριαίας διάχυτης προς την ημερήσια διάχυτη, είναι δυνατόν να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{I_{T,d}}{H_{T,d}} = \frac{\pi}{24} * \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega_s) - \left(\frac{2 * \pi * \omega_s}{360}\right) * \cos(\omega_s)} \quad (1.67)$$

Στην περίπτωση όπου, χρειάζεται να υπολογιστεί η ολική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, όταν υπάρχουν μηνιαία δεδομένα, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ημερήσια ακτινοβολία διαιρώντας τις ημέρες  $d_m$ , του αντίστοιχου μήνα, από την ακόλουθη σχέση:

$$H_T = \frac{\langle H_T \rangle}{d_m} \quad (1.68)$$

Στην περίπτωση της διάχυτης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας, χρησιμοποιείται ο παραπάνω τύπος (1.68) με τις αντίστοιχες τιμές της μηνιαίας διάχυτης ακτινοβολίας.

**Διάχυτη  $I_{T,d}$  και άμεση  $I_{T,b}$  ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια συλλέκτη :**

Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία  $I_{T,d}$  σε οριζόντια επιφάνεια, δίνεται από την παρακάτω σχέση, μέσω της οποίας προκύπτει και η άμεση ηλιακή ακτινοβολία  $I_{T,b}$ :

$$I_{T,d} = I_T * k_d \quad (1.69)$$

Άρα, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, υπολογίζεται:

$$I_{T,b} = I_T - I_{T,d} \quad (1.70)$$

Οι παραπάνω σχέσεις (1.69) και (1.70) της ωριαίας διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας, ισχύουν και στην ημερήσια  $H$  ή μηνιαία  $\langle H \rangle$ , διάχυτη και άμεση ακτινοβολία.

## **II. Η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη συλλεκτική επιφάνεια στο επίπεδο της γης**

Το ηλιακό δυναμικό σε κεκλιμένη επιφάνεια συλλέκτη, περιγράφεται με το ισοτροπικό ή το ανισοτροπικό μοντέλο ανάλυσης, για διάφορες χρονικές περιόδους (μηνιαίο, ημερήσιο, ωριαίο) με τις σχετικές χρονικές μετατροπές. Αρχικά, υπολογίζονται από τα μοντέλα η άμεση, η διάχυτη και η διάχυτα ανακλώμενη συνιστώσα της πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας υπό γωνία κλίσης επιφάνειας και κατόπιν αυτών, υπολογίζεται η ολική υπό γωνία κλίσης, για τον καθορισμό του ηλιακού δυναμικού του τόπου σε κεκλιμένο επίπεδο. Οι διαφορές ανάμεσα σε ισοτροπικό και ανισοτροπικό μοντέλο, συνίστανται στον τρόπο με τον οποίο περιγράφουν, τις συνιστώσες της διάχυτης ακτινοβολίας. Καθοριστικός δείκτης για την μέγιστη εκμετάλλευση του ηλιακού δυναμικού σε κεκλιμένη επιφάνεια, αποτελεί η βέλτιστη γωνία κλίσης της, ως προς το οριζόντιο επίπεδο του τόπου.

Ο υπολογισμός του ηλιακού δυναμικού σε κεκλιμένη επιφάνεια, μπορεί να αποτελέσει ξεχωριστή ή συνδυαστική περιγραφή του υπολογισμού σε οριζόντια επιφάνεια. Έτσι, η ολική, η διάχυτη και άμεση συνιστώσα υπό οριζόντια επιφάνεια, που χρειάζονται το ισοτροπικό και ανισοτροπικό μοντέλο, υπολογίζονται με κοινό τρόπο που περιγράφεται για την κάθε συνιστώσα, στο μοντέλο κατάτμησης για οριζόντια επιφάνεια συλλέκτη, για την τον υπολογισμό στη συνέχεια, των αντίστοιχων συνιστωσών σε κεκλιμένη επιφάνεια συλλέκτη.

### **Βέλτιστη γωνία κλίσης επιφάνειας $\beta_{\betaελτ}$ :**

Η γωνία κλίσης  $\beta$  μιας επιφάνειας συλλέκτη, στα μοντέλα ανάλυσης των συνιστωσών του ηλιακού δυναμικού, περιγράφεται τις περισσότερες φορές από την βέλτιστη γωνία κλίσης  $\beta_{\betaελτ}$ , ο υπολογισμός της οποίας, προκύπτει από τον πίνακα μετρητικών τιμών της EMY. Στον πίνακα (1.7), δίνονται τιμές για την βέλτιστη γωνία κλίσης, για κάθε μήνα και όλο το έτος, για διάφορες περιοχές της Ελλάδος.

Αν είναι απαραίτητο να υπολογισθεί η βέλτιστη γωνία, για συνεχόμενους μήνες του έτους, σε συνδυασμό με τις τιμές του πίνακα (1.7), χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\beta_{\betaελτ} = \frac{\sum(\beta_{\betaελτ,month})}{\sum(N_{month})} \quad (1.71)$$

όπου,  $\beta_{\betaελτ,month}$  το άθροισμα των βέλτιστων γωνιών κλίσης, για συνεχόμενους μήνες και  $N_{month}$  ο αριθμός των συνεχόμενων μηνών.

### **Δείκτης άμεσης διάδοσης $k_b$ :**

Ο δείκτης άμεσης διάδοσης  $k_b$ , για την συνάρτηση της ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, στην άμεση ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, υπολογίζεται:

$$k_b = \frac{I_{T,b}}{I_{T,ext}} \quad (1.72)$$

Ο δείκτης αυτός για αίθριες συνθήκες παίρνει υψηλές τιμές, ενώ σε συνθήκες συννεφιάς, όπου απουσιάζει η άμεση συνιστώσα, παίρνει την τιμή μηδέν.

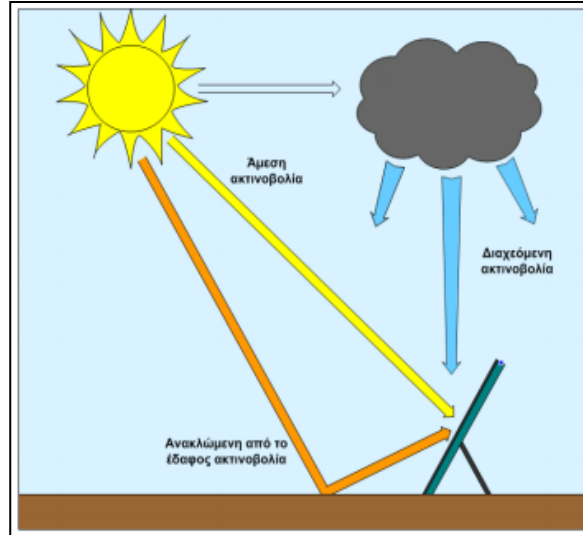
### **Συντελεστής άμεσης ακτίνας $R_b$ :**

Ο συντελεστής άμεσης ακτίνας  $R_b$ , ορίζεται όπως έχει αναφερθεί παραπάνω στη παράγραφο (1.3.3) και χρησιμοποιείται η σχέση:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) * \sin(\delta)}{\cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \sin(\varphi) * \sin(\delta)}$$

#### A. Το ισοτροπικό μοντέλο ανάλυσης της ηλιακής ακτινοβολίας :

Το ισοτροπικό μοντέλο ανάλυσης ηλιακού δυναμικού, αποτελεί την πιο απλή προσέγγιση, βάση του οποίου η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από την άμεση, την διάχυτη και την διάχυτα ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, ενώ θεωρεί μια συνολική συνιστώσα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 1.57: ισοτροπικό μοντέλο ανάλυσης ηλιακής ακτινοβολίας

Συγκεκριμένα, η προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία σε μία κεκλιμένη επιφάνεια στην γη  $I_{\beta}$ , αποτελείται από τους παράγοντες της παρακάτω εξίσωσης:

$$I_{\beta} = I_{\beta,b} + I_{\beta,d} + I_{\beta,gr} \quad (1.73)$$

Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, για τον υπολογισμό της ολικής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια. Για τον υπολογισμό της ωριαίας ολικής ακτινοβολίας, υπολογίζεται βάση του ισοτροπικού μοντέλου των Reindl et al. Η περιγραφή του ισοτροπικού μοντέλου (1.65), υπολογίζεται αναλυτικά από την σχέση:

$$I_{\beta} = R_b * (I_{T,b} + I_{T,d} * k_b) + \left[ I_{T,d} * (1 - k_b) * \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \right] + I_T * \rho_{gr} * \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (1.74)$$

Σύμφωνα με την σχέση αυτή, οι συνιστώσες της ολικής ακτινοβολίας, υπολογίζονται επιμέρους από τις παρακάτω σχέσεις:

$$I_{\beta,b} = R_b * (I_{T,b} + I_{T,d} * k_b) \quad (1.75)$$

$$I_{\beta,d} = I_{T,d} * (1 - k_b) * \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \quad (1.76)$$

$$I_{\beta,gr} = I_T * \rho_{gr} * \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (1.77)$$

όπου,  $\rho_{gr}$  ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους (albedo).

Ο ακριβής υπολογισμός της διάχυτα ανακλώμενης ακτινοβολίας, από όλα τα αντικείμενα που βρίσκονται γύρω από την υπό εξέταση επιφάνεια, είναι πολύ δύσκολος μιας και η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε αυτά, μεταβάλλεται συνεχώς. Θεωρείται τελικά, μόνο μια επιφάνεια στο οριζόντιο επίπεδο του τόπου που ευθύνεται για αυτό το θέμα. Στην εφαρμογή του μοντέλου, κατά την παρούσα εργασία ο δείκτης αυτός  $\rho_{gr}$ , θεωρήθηκε ίσος με 0,4.

Για τον υπολογισμό της μηνιαίας ολικής ακτινοβολίας, σε κεκλιμένη επιφάνεια  $H_\beta$ , υπολογίζεται βάση του ισοτροπικού μοντέλου των Liu, Jordan & Klein, από την ακόλουθη σχέση:

$$H_\beta = (H_{T,b} - H_{T,d}) * R_b + [H_{T,d} * 0,5 * (1 + \cos(\beta))] + H_T * \rho_{gr} * 0,5 * (1 - \cos(\beta)) \quad (1.78)$$

Σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση, οι συνιστώσες της ολικής ακτινοβολίας υπολογίζονται επιμέρους:

$$H_{\beta,b} = (H_{T,b} - H_{T,d}) * R_b \quad (1.79)$$

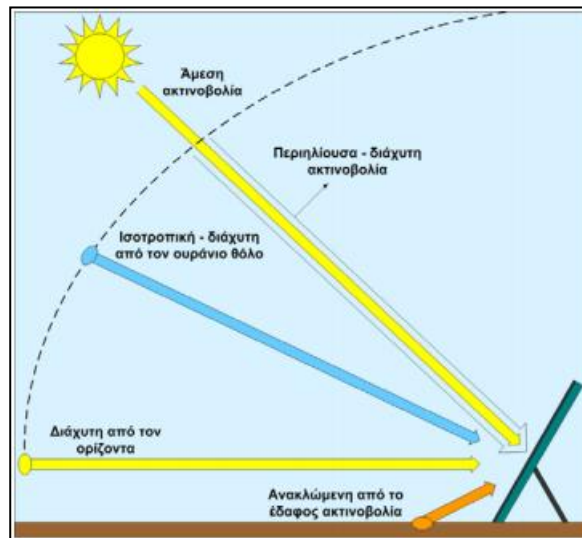
$$H_{\beta,d} = H_{T,d} * 0,5 * (1 + \cos(\beta)) \quad (1.80)$$

$$H_{\beta,gr} = H_T * \rho_{gr} * 0,5 * (1 - \cos(\beta)) \quad (1.81)$$

Για τη μετατροπή χρονικής περιόδου, δηλαδή να υπολογιστεί η ολική ωριαία ακτινοβολία, όταν υπάρχουν ημερήσια δεδομένα ή μηνιαία, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ωριαία ακτινοβολία χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (1.64), (1.67) και (1.68), με τις αντίστοιχες τιμές σε κεκλιμένη επιφάνεια.

### **B. Το ανισοτροπικό μοντέλο ανάλυσης της ηλιακής ακτινοβολίας :**

Το ανισοτροπικό μοντέλο ανάλυσης του ηλιακού δυναμικού, αποτελεί πιο σύνθετη προσέγγιση, καθώς θεωρεί ότι η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία προκύπτει από την σύνθεση τριών συνιστωσών, την ισοτροπική, που διαχέεται από την ατμόσφαιρα και λαμβάνεται ομοιόμορφα από όλο τον ουράνιο θόλο (isotropic diffuse), την οριζόντια, που προκύπτει από τη φωτεινότητα του ορίζοντα και είναι περισσότερο εμφανής σε συνθήκες καθαρού ουρανού (horizontal) και την περιηλιούσα, που δημιουργείται περιμετρικά της άμεσα προσπίπτουσας και άρα έχει την ίδια διεύθυνση (circumsolar).



Σχήμα 1.58: ανισοτροπικό μοντέλο ανάλυσης ηλιακής ακτινοβολίας

Συγκεκριμένα, η συνολική ακτινοβολία σε μία κεκλιμένη επιφάνεια  $I_{\beta}$  στην γη, αποτελείται από τους παράγοντες της παρακάτω εξίσωσης:

$$I_{\beta} = I_{\beta,b} + I_{\beta,d,cs} + I_{\beta,d,iso} + I_{\beta,d,hz} + I_{\beta,gr} \quad (1.82)$$

όπου οι δείκτες iso, cs, hz και gr, αναφέρονται στην ιστροπική (isotropic), περιγραμματική (circumsolar) και οριζόντια (horizontal) διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία αντίστοιχα.

Η περιγραφή του ανισοτροπικού μοντέλου (1.74), υπολογίζεται αναλυτικά από την σχέση:

$$I_{\beta} = I_{T,b} * R_b + I_{T,d} * \left[ (1 - k_b) * \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) * \left( 1 + f * \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right) + k_b * R_b \right] + I_T * p_{gr} * \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (1.83)$$

Σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση, οι συνιστώσες της ολικής ακτινοβολίας υπολογίζονται επιμέρους από τις παρακάτω σχέσεις:

$$I_{\beta,b} = I_{T,b} * R_b \quad (1.84)$$

$$I_{\beta,d,cs} = I_{T,d} * k_b * R_b \quad (1.85)$$

$$I_{\beta,d,iso} = I_{T,d} * \left[ (1 - k_b) * \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \right] \quad (1.86)$$

$$I_{\beta,gr} = I_T * p_{gr} * \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (1.87)$$

Η φωτεινότητα του οριζόντα  $I_{\beta,d,hz}$ , εφαρμόζεται για την καλύτερη προσέγγιση των υπολογισμών τις συννεφιασμένες μέρες, δίνετε από την σχέση:

$$I_{\beta,d,hz} = 1 + f * \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \quad (1.88)$$

όπου,  $f$  ο διορθωτικός παράγοντας:

$$f = \sqrt{\frac{I_{T,b}}{I_T}} \quad (1.89)$$

Στην περίπτωση που χρειάζεται η μετατροπή χρονικής περιόδου, δηλαδή να υπολογιστεί η ολική ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια, όταν υπάρχουν ημερήσια δεδομένα ή μηνιαία, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ωριαία ακτινοβολία χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (1.64), (1.67) και (1.68), με τις αντίστοιχες τιμές της ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια.

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Ελληνικό)	63,0	79,0	117,7	154,3	195,4	214,0	222,4	202,7	152,6	109,0	70,7	55,7
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	63,3	77,7	118,9	152,7	190,4	207,4	214,5	198,6	156,0	111,1	68,1	54,4
Αγρίνιο	63,5	78,3	119,4	148,4	189,9	214,1	224,2	200,3	151,3	109,8	69,8	55,1
Αγχιάλος	61,3	74,3	112,5	149,2	189,7	212,7	217,4	195,1	146,8	98,8	63,1	51,5
Αλεξανδρούπολη	50,7	68,9	107,3	141,8	182,8	205,8	211,6	192,3	144,2	99,4	57,8	43,7
Αλιάρτος	51,0	70,0	114,0	158,0	206,0	216,0	220,0	204,0	153,0	102,0	66,0	49,0
Ανδραβίδα	68,4	83,4	128,4	159,5	200,2	220,6	228,4	205,5	156,1	115,6	75,2	60,1
Άραξος	62,6	78,6	119,7	155,6	196,1	210,9	217,8	197,6	152,4	110,2	69,4	54,6
Άργος (Πυργέλα)	68,7	83,6	127,7	159,5	202,5	220,6	229,0	206,4	157,2	115,5	74,8	59,2
Αργασόλι	65,0	80,0	124,9	157,3	204,3	219,4	226,1	203,1	155,6	112,6	72,6	56,1
Ζάκυνθος	64,2	77,6	110,1	158,8	190,8	200,1	218,5	203,8	154,0	104,3	65,4	52,8
Άρτα	65,5	79,7	120,4	149,1	190,2	211,2	218,1	196,4	150,6	110,0	69,5	56,2
Ηράκλειο	65,6	81,6	125,0	166,5	207,3	222,4	227,1	207,0	163,0	117,3	78,6	61,2
Θεσσαλονίκη	52,6	67,5	103,2	140,7	179,1	198,6	209,5	184,7	136,7	91,4	56,6	45,5
Ιεράπετρα	73,0	89,0	137,0	174,0	210,0	220,0	224,0	205,0	165,0	125,0	89,0	69,0
Ιωάννινα	51,8	66,4	105,2	134,9	178,3	202,1	212,0	190,3	136,5	96,1	57,6	45,1
Καλαμάτα	68,2	82,3	126,1	156,2	198,7	216,0	222,0	200,9	154,9	114,5	75,2	59,3
Καστοριά	57,6	71,3	111,2	141,1	173,6	201,8	206,3	185,5	138,5	97,0	60,0	47,7
Κέρκυρα	57,7	73,5	116,7	149,9	195,4	213,6	221,0	197,8	148,2	103,1	64,4	50,7
Κομοτηνή	50,0	65,0	105,0	145,0	188,0	209,0	215,0	193,0	145,0	99,0	58,0	45,0
Κόνιτσα	53,0	65,0	112,0	138,0	190,0	200,0	216,0	194,0	141,0	99,0	63,0	50,0
Κόρινθος (Βέλο)	65,4	82,8	123,4	157,9	201,7	218,3	223,2	201,9	154,2	111,9	72,0	55,2
Κύθηρα	68,0	81,0	127,0	161,0	210,0	220,0	223,0	204,0	160,0	117,0	78,0	60,0
Λαμία	59,4	73,1	113,9	150,5	188,8	210,3	214,1	193,4	145,5	100,3	65,3	52,1
Λάρισα	55,1	71,4	112,1	151,1	190,9	210,8	215,8	194,3	145,9	97,8	61,2	47,8
Λήμνος	51,1	69,6	112,3	154,3	199,5	215,3	220,9	198,5	150,8	104,6	61,3	46,0
Μεθώνη	62,0	78,0	125,0	155,0	207,0	215,0	220,0	199,0	157,0	116,0	77,0	57,0
Μήλος	56,0	67,0	120,0	175,0	213,0	223,0	226,0	205,0	164,0	112,0	77,0	52,0
Μυτιλήνη	52,0	70,0	113,0	156,0	209,0	219,0	223,0	201,0	156,0	109,0	67,0	50,0
Νάξος	60,3	77,0	122,6	161,2	204,7	220,4	224,5	204,8	159,1	115,9	73,7	55,6
Πάρος	60,0	80,0	125,0	168,0	211,0	220,0	223,0	202,0	160,0	117,0	75,0	58,0
Πάτρα	55,0	72,0	124,0	147,0	200,0	215,0	218,0	197,0	153,0	107,0	66,0	53,0
Πύργος	68,4	83,1	127,5	157,9	200,4	215,6	223,8	202,1	155,0	115,9	75,5	59,3
Ρέθυμνο	62,0	81,0	119,0	164,0	211,0	218,0	223,0	204,0	160,0	106,0	81,0	58,0
Ρόδος	69,9	85,1	130,8	164,0	203,0	217,2	225,1	204,3	158,9	120,2	79,2	61,2
Σάμος	64,9	82,1	126,7	162,5	206,8	224,9	230,6	209,6	163,7	120,5	78,6	58,5
Σέρρες	50,8	68,0	105,7	141,0	180,5	202,8	209,7	187,7	140,8	94,7	56,5	43,7
Σητεία	66,5	83,0	128,4	165,2	207,4	223,2	227,1	207,5	163,7	119,3	80,4	61,9
Σκύρος	51,2	69,1	109,9	153,3	197,2	214,2	219,7	198,8	151,7	102,5	62,9	47,7
Σούδα	65,0	81,7	130,7	166,5	208,5	221,9	228,5	209,3	163,6	116,3	76,8	60,3
Σύρος	58,0	80,0	121,0	172,0	212,0	219,0	225,0	204,0	160,0	199,0	74,0	57,0
Τανάγρα	59,1	74,2	112,7	151,9	194,0	215,4	222,0	201,3	153,1	104,5	64,7	51,2
Τρίκαλα (Ημαθίας)	57,3	72,2	105,6	140,2	178,0	202,9	206,4	185,8	138,6	94,0	59,7	49,1
Τυμπάκιο	73,4	90,5	137,5	169,0	207,8	222,9	228,7	209,8	166,3	127,2	85,9	67,7
Χανιά	62,0	80,0	124,0	167,0	212,0	220,0	225,0	205,0	161,0	111,0	78,0	59,0
Χίος	55,0	72,0	119,0	161,0	210,0	220,0	225,0	203,0	159,0	116,0	71,0	53,0
Χρυσούπολη	57,5	78,0	111,3	137,6	189,9	204,0	208,8	187,6	141,8	97,7	62,1	43,3

Πίνακας 1.4: μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [ $kWh/m^2 \cdot mo$ ]



Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα, Ελληνικό	25,1	32,2	50,3	65,7	81,9	85,5	85,3	73,7	55,5	40,1	26,5	22,0
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	25,1	32,0	50,4	65,6	81,8	85,5	85,2	73,7	55,5	40,1	26,3	21,8
Αγρίνιο	24,6	31,7	50,0	65,2	81,9	85,8	85,5	73,6	55,1	39,5	25,9	21,4
Αγχιάλος	23,9	30,9	49,1	65,1	82,1	86,1	85,7	73,5	54,7	38,5	24,8	20,5
Αλεξανδρούπολη	21,4	29,1	47,5	64,2	82,2	86,8	86,2	73,2	53,6	37,1	23,0	18,3
Αλιάρτος	23,1	31,0	49,8	65,7	82,2	85,7	85,4	73,7	55,3	39,4	25,8	20,8
Ανδραβίδα	25,6	32,6	51,0	65,9	82,0	85,6	85,3	73,8	55,6	40,4	26,8	22,4
Άραξος	24,9	32,1	50,4	65,7	82,0	85,6	85,3	73,7	55,4	40,0	26,3	21,7
Άργος (Πυργέλα)	25,9	32,9	51,2	66,0	82,0	85,4	85,2	73,8	55,8	40,6	27,1	22,6
Αργαστόλι	25,1	32,1	50,6	65,8	82,1	85,7	85,4	73,7	55,4	40,0	26,4	21,8
Άρτα	24,3	31,4	49,7	65,1	82,1	86,1	85,6	73,5	54,8	39,1	25,4	21,0
Ζάκυνθος	25,4	32,2	49,8	65,9	81,8	85,3	85,2	73,8	55,7	40,1	26,3	21,8
Ηράκλειο	27,6	34,4	52,6	66,8	81,5	84,3	84,3	74,1	57,2	42,8	29,4	24,8
Θεσσαλονίκη	21,8	29,2	47,3	64,2	82,0	86,6	86,1	73,1	53,6	36,9	23,1	18,7
Ιεράπετρα	28,6	35,3	53,4	67,1	81,5	84,1	84,2	74,1	57,4	43,3	30,2	25,8
Ιωάννινα	22,4	29,6	48,1	64,0	81,8	86,2	85,8	73,4	54,1	38,0	23,9	19,3
Καλαμάτα	26,4	33,2	51,5	66,0	81,8	85,1	84,9	73,8	56,1	41,1	27,6	23,1
Καστοριά	22,5	29,7	48,1	64,3	81,7	86,6	86,0	73,2	53,7	37,4	23,5	19,1
Κέρκυρα	23,2	30,5	49,1	65,0	82,3	86,3	85,8	73,5	54,4	38,4	24,6	20,1
Κομοτηνή	21,1	28,5	47,1	64,3	82,4	87,0	86,3	73,2	53,4	36,8	22,8	18,2
Κόνιτσα	22,3	29,2	48,5	64,2	82,2	86,4	85,9	73,3	54,0	37,8	24,1	19,7
Κόρινθος (Βέλο)	25,4	32,5	50,7	65,9	82,0	85,5	85,3	73,7	55,6	40,2	26,6	22,0
Κύθηρα	27,1	33,7	52,1	66,4	81,8	84,7	84,6	73,9	56,7	41,9	28,5	23,9
Λαμία	24,0	31,0	49,4	65,3	82,0	85,9	85,5	73,5	54,8	38,9	25,3	20,8
Λάρισα	22,9	30,3	48,8	65,1	82,2	86,3	85,8	73,4	54,4	38,1	24,3	19,7
Λήμνος	22,1	29,9	48,6	65,1	82,4	86,5	85,9	73,4	54,3	38,2	24,1	19,3
Μεθώνη	23,4	30,7	49,4	65,2	82,5	86,4	85,9	73,4	54,4	38,5	25,0	20,5
Μήλος	25,1	31,6	51,3	66,6	81,9	85,0	84,9	73,9	56,4	41,3	28,0	22,5
Μυτιλήνη	22,8	30,5	49,2	65,4	82,3	86,1	85,7	73,6	54,9	39,1	25,3	20,4
Νάξος	25,5	32,7	51,3	66,2	81,9	85,2	85,0	73,9	56,1	41,1	27,5	22,7
Πάρος	25,5	33,0	51,4	66,4	82,0	85,1	84,9	73,8	56,2	41,2	27,6	23,0
Πάτρα	23,9	31,3	50,5	65,3	82,1	85,7	85,3	73,6	55,4	39,8	25,9	21,5
Πύργος	25,8	32,7	51,1	65,9	82,0	85,4	85,2	73,8	55,7	40,6	27,0	22,6
Ρέθυμνο	27,1	34,4	52,1	66,8	81,6	84,3	84,3	74,0	57,2	42,2	29,5	24,4
Ρόδος	27,1	33,9	52,2	66,5	81,7	84,8	84,7	73,9	56,6	41,9	28,5	23,9
Σάμος	25,5	32,6	51,0	66,1	82,0	85,5	85,3	73,9	55,8	40,6	27,1	22,5
Σέρρες	21,2	28,9	47,2	64,1	82,1	86,9	86,2	73,1	53,4	36,7	22,7	18,1
Σητεία	27,8	34,7	52,9	66,8	81,5	84,2	84,3	74,1	57,3	43,0	29,6	25,0
Σκύρος	22,8	30,5	49,1	65,4	82,1	86,0	85,6	73,6	54,9	39,0	25,1	20,3
Σούδα	27,4	34,3	52,8	66,8	81,6	84,4	84,4	74,1	57,1	42,6	29,1	24,5
Σύρος	24,9	32,7	50,9	66,3	82,0	85,3	85,1	73,8	55,9	51,9	27,2	22,6
Τανάγρα	24,4	31,5	49,7	65,5	82,0	85,7	85,4	73,7	55,3	39,6	25,7	21,2
Τρίκαλα Ημαθίας	22,3	29,6	47,5	64,2	81,9	86,7	86,0	73,2	53,6	37,1	23,4	19,1
Τρίπολη	25,8	32,5	50,8	65,7	81,6	85,3	85,0	73,7	55,8	40,6	27,0	22,7
Τυμπάκιο	28,7	35,4	53,4	67,0	81,5	84,1	84,2	74,1	57,5	43,3	30,1	25,7
Χανιά	27,0	34,2	52,4	66,8	81,6	84,4	84,4	74,0	57,1	42,4	29,2	24,4
Χίος	23,8	31,2	50,2	65,8	82,2	85,8	85,4	73,7	55,4	39,9	26,2	21,4
Χρυσούπολη	22,1	29,8	47,8	63,9	82,4	86,8	86,2	73,1	53,5	37,0	23,3	18,2

Πίνακας 1.5: μέση μηνιαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh/m<sup>2</sup>.mo]

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα, Ελληνικό	0,44	0,47	0,48	0,53	0,57	0,62	0,63	0,64	0,60	0,54	0,49	0,44
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	0,45	0,46	0,49	0,52	0,56	0,60	0,61	0,63	0,61	0,55	0,47	0,43
Αγρίνιο	0,46	0,47	0,49	0,51	0,55	0,62	0,64	0,63	0,59	0,55	0,49	0,44
Αγγιάλος	0,45	0,46	0,47	0,51	0,55	0,61	0,62	0,62	0,58	0,51	0,46	0,43
Αλεξανδρούπολη	0,40	0,44	0,46	0,49	0,54	0,59	0,60	0,61	0,58	0,53	0,44	0,39
Αλιάρτος	0,37	0,42	0,47	0,54	0,60	0,62	0,63	0,64	0,60	0,51	0,46	0,39
Ανδραβίδα	0,48	0,49	0,53	0,54	0,58	0,63	0,65	0,65	0,61	0,57	0,52	0,47
Άραξος	0,44	0,47	0,49	0,53	0,57	0,61	0,62	0,62	0,60	0,55	0,48	0,43
Άργος (Πυργέλα)	0,48	0,49	0,52	0,54	0,59	0,64	0,65	0,65	0,61	0,57	0,51	0,46
Αργαστόλι	0,46	0,48	0,51	0,54	0,60	0,63	0,65	0,64	0,61	0,56	0,51	0,44
Άρτα	0,48	0,49	0,50	0,51	0,56	0,61	0,62	0,62	0,60	0,56	0,50	0,46
Ζάκυνθος	0,45	0,46	0,45	0,54	0,56	0,58	0,62	0,64	0,60	0,52	0,45	0,41
Ηράκλειο	0,42	0,45	0,49	0,56	0,60	0,64	0,65	0,64	0,62	0,55	0,50	0,43
Θεσσαλονίκη	0,41	0,43	0,44	0,49	0,52	0,57	0,60	0,59	0,55	0,48	0,43	0,40
Ιεράπετρα	0,46	0,49	0,54	0,58	0,61	0,64	0,64	0,64	0,62	0,58	0,56	0,48
Ιωάννινα	0,39	0,41	0,44	0,47	0,52	0,58	0,61	0,60	0,54	0,50	0,42	0,38
Καλαμάτα	0,47	0,48	0,51	0,53	0,58	0,62	0,63	0,63	0,60	0,56	0,50	0,45
Καστοριά	0,45	0,45	0,47	0,49	0,51	0,58	0,59	0,59	0,56	0,51	0,45	0,42
Κέρκυρα	0,43	0,46	0,49	0,52	0,57	0,61	0,63	0,63	0,59	0,53	0,47	0,43
Κομοτηνή	0,40	0,42	0,45	0,51	0,55	0,60	0,61	0,62	0,59	0,53	0,45	0,41
Κόνιτσα	0,41	0,41	0,47	0,48	0,56	0,57	0,62	0,62	0,56	0,52	0,47	0,43
Κόρινθος (Βέλο)	0,46	0,49	0,51	0,54	0,59	0,63	0,64	0,64	0,60	0,56	0,50	0,43
Κύθηρα	0,45	0,46	0,51	0,54	0,61	0,63	0,64	0,64	0,61	0,56	0,51	0,44
Λαμία	0,43	0,44	0,47	0,52	0,55	0,60	0,61	0,61	0,57	0,51	0,47	0,43
Λάρισα	0,41	0,44	0,47	0,52	0,56	0,61	0,62	0,62	0,58	0,50	0,45	0,40
Λήμνος	0,39	0,43	0,47	0,53	0,58	0,62	0,63	0,63	0,60	0,54	0,45	0,39
Μεθώνη	0,47	0,49	0,53	0,54	0,61	0,62	0,63	0,63	0,63	0,60	0,57	0,49
Μήλος	0,38	0,39	0,48	0,59	0,62	0,64	0,64	0,64	0,63	0,54	0,51	0,39
Μυτιλήνη	0,38	0,43	0,47	0,54	0,61	0,63	0,64	0,64	0,62	0,56	0,48	0,41
Νάξος	0,41	0,45	0,50	0,55	0,60	0,63	0,64	0,64	0,61	0,56	0,49	0,42
Πάρος	0,41	0,46	0,51	0,57	0,61	0,63	0,64	0,63	0,62	0,57	0,50	0,44
Πάτρα	0,39	0,43	0,51	0,50	0,58	0,62	0,62	0,62	0,60	0,53	0,46	0,42
Πύργος	0,48	0,49	0,52	0,54	0,58	0,62	0,64	0,64	0,60	0,57	0,52	0,46
Ρέθυμνο	0,40	0,45	0,47	0,55	0,61	0,63	0,64	0,64	0,61	0,50	0,51	0,41
Ρόδος	0,47	0,48	0,52	0,55	0,59	0,63	0,64	0,64	0,61	0,58	0,52	0,45
Σάμος	0,45	0,48	0,52	0,55	0,60	0,65	0,66	0,66	0,64	0,60	0,54	0,45
Σέρρες	0,41	0,44	0,46	0,49	0,53	0,58	0,60	0,60	0,57	0,51	0,44	0,39
Σητεία	0,43	0,46	0,50	0,55	0,60	0,64	0,65	0,65	0,62	0,56	0,51	0,44
Σκύρος	0,37	0,42	0,46	0,53	0,58	0,62	0,63	0,63	0,60	0,52	0,45	0,39
Σούδα	0,42	0,46	0,52	0,56	0,61	0,64	0,65	0,65	0,62	0,55	0,49	0,43
Σύρος	0,40	0,47	0,49	0,59	0,62	0,63	0,64	0,64	0,62	0,98	0,50	0,44
Τανάγρα	0,42	0,44	0,46	0,52	0,57	0,62	0,63	0,63	0,60	0,52	0,45	0,41
Τρίκαλα Ημαθίας	0,45	0,46	0,45	0,49	0,52	0,58	0,59	0,59	0,56	0,50	0,45	0,43
Τρίπολη	0,46	0,46	0,49	0,52	0,55	0,60	0,61	0,61	0,60	0,54	0,49	0,45
Τυμπάκιο	0,47	0,50	0,54	0,57	0,60	0,64	0,65	0,65	0,63	0,59	0,54	0,47
Χανιά	0,40	0,45	0,49	0,56	0,62	0,63	0,64	0,64	0,61	0,52	0,50	0,42
Χίος	0,39	0,43	0,49	0,55	0,61	0,63	0,64	0,64	0,62	0,58	0,50	0,42
Χρυσούπολη	0,46	0,50	0,48	0,48	0,56	0,59	0,60	0,60	0,57	0,52	0,48	0,39

Πίνακας 1.6: μέσος μηνιαίος συντελεστής αιθριότητας

Α/Α	ΜΗΝΕΣ	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	ΕΤΗΣΙΑ ΒΕΛΤ. ΓΩΝΙΑ
	ΠΟΛΕΙΣ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	ΑΘΗΝΑ	66°	58°	44°	25°	7°	0°	0°	19°	39°	55°	65°	68°	37° 58'
2	ΑΛΙΑΡΤΟΣ	65°	58°	44°	26°	7°	0°	0°	19°	39°	55°	65°	68°	38° 23'
3	ΑΡΑΞΟΣ	67°	58°	45°	26°	7°	0°	0°	19°	39°	55°	65°	68°	38° 10'
4	ΑΡΓΟΣΤΟΛΙ	67°	58°	45°	26°	7°	0°	0°	19°	39°	55°	65°	68°	38° 10'
5	ΑΡΤΑ	68°	59°	46°	26°	8°	0°	1°	20°	40°	56°	66°	69°	39° 08'
6	ΗΡΑΚΛΕΙΟ	64°	56°	42°	23°	4°	0°	0°	16°	37°	53°	63°	66°	35° 29'
7	ΘΕΣ/ΝΙΚΗ	69°	61°	47°	29°	10°	0°	3°	22°	42°	57°	67°	70°	40° 33'
8	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	64°	56°	42°	22°	3°	0°	0°	15°	35°	52°	63°	66°	35° 00'
9	ΙΩΑΝΝΙΝΑ	67°	59°	46°	26°	9°	0°	2°	20°	40°	56°	66°	69°	39° 42'
10	ΚΑΛΑΜΑΤΑ	66°	58°	44°	24°	6°	0°	0°	17°	38°	54°	65°	67°	37° 04'
11	ΚΕΡΚΥΡΑ	68°	59°	46°	27°	9°	0°	2°	20°	40°	56°	66°	69°	39° 37'
12	ΚΟΜΟΤΗΝΗ	69°	61°	48°	29°	11°	0°	4°	22°	42°	58°	68°	71°	41° 07'
13	ΚΟΝΙΤΣΑ	69°	60°	47°	27°	9°	0°	2°	21°	41°	57°	67°	71°	40° 03'
14	ΚΟΡΙΝΘΟΣ	66°	58°	45°	25°	7°	0°	0°	19°	39°	55°	65°	69°	37° 56'
15	ΚΥΘΗΡΑ	65°	57°	43°	23°	5°	0°	0°	16°	37°	54°	64°	67°	36° 09'
16	ΛΑΜΙΑ	66°	58°	45°	26°	8°	0°	1°	19°	39°	55°	66°	69°	38° 54'
17	ΛΑΡΙΣΑ	67°	59°	47°	27°	9°	0°	2°	21°	41°	56°	67°	69°	39° 38'
18	ΛΗΜΝΟΣ	67°	60°	47°	28°	9°	0°	2°	21°	41°	57°	66°	69°	39° 55'
19	ΜΕΘΩΝΗ	65°	57°	44°	24°	6°	0°	0°	17°	38°	54°	64°	67°	36° 50'
20	ΜΗΛΟΣ	64°	55°	43°	25°	6°	0°	0°	18°	38°	54°	64°	66°	36° 44'
21	ΜΥΤΙΑΗΝΗ	67°	59°	46°	27°	8°	0°	1°	20°	40°	56°	66°	69°	39° 04'
22	ΝΑΞΟΣ	65°	57°	44°	24°	6°	0°	0°	17°	38°	54°	64°	67°	37° 06'
23	ΠΑΡΟΣ	64°	56°	43°	23°	5°	0°	0°	16°	37°	53°	63°	66°	36° 05'
24	ΠΑΤΡΑ	66°	58°	46°	25°	7°	0°	0°	19°	39°	55°	65°	69°	38° 15'
25	ΠΥΡΓΟΣ	67°	58°	45°	25°	7°	0°	0°	18°	39°	55°	65°	69°	37° 42'
26	ΡΕΘΥΜΝΟ	63°	55°	41°	22°	4°	0°	0°	15°	35°	51°	63°	65°	35° 22'
27	ΡΟΔΟΣ	65°	57°	44°	24°	5°	0°	0°	17°	38°	54°	64°	67°	36° 23'
28	ΣΑΜΟΣ	66°	58°	45°	25°	7°	0°	0°	18°	39°	56°	65°	68°	37° 44'
29	ΣΕΡΡΕΣ	69°	61°	48°	29°	11°	0°	4°	22°	42°	58°	68°	71°	41° 04'
30	ΣΗΤΕΙΑ	63°	55°	41°	22°	3°	0°	0°	15°	35°	51°	62°	65°	35° 12'
31	ΣΚΥΡΟΣ	65°	58°	45°	26°	8°	0°	1°	20°	40°	56°	65°	68°	38° 54'
32	ΣΟΥΔΑ	63°	55°	42°	23°	4°	0°	0°	16°	36°	52°	63°	66°	35° 43'
33	ΣΥΡΟΣ	66°	59°	45°	26°	7°	0°	0°	19°	39°	56°	65°	69°	37° 27'
34	ΤΥΜΠΑΚΙΟ	64°	55°	42°	22°	3°	0°	0°	15°	35°	52°	63°	66°	35° 00'
35	ΧΑΝΙΑ	64°	55°	42°	23°	4°	0°	0°	16°	36°	52°	63°	66°	35° 30'
36	ΧΙΟΣ	66°	58°	45°	26°	8°	0°	0°	19°	40°	56°	65°	69°	38° 22'

Πίνακας 1.7: βέλτιστη γωνία κλίσης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

### 2.1 Η φωτοβολταϊκή προέλευση

---

Το 1839, ο φυσικός Edmund Becquerel, κατά την διάρκεια πειραμάτων με ηλεκτρολυτικό στοιχείο, φτιαγμένο από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια σε αγωγίμο υγρό, ανακάλυψε την παραγωγή σπινθήρων ηλεκτρισμού κατά την έκθεση τους στο ηλιακό φως, γνωστό και ως φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το 1876, οι William Adams και Richard Evans, παρατήρησαν μια παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος κατά την έκθεση στο ηλιακό φως ενός στέρεου υλικού, του Σεληνίου. Την επόμενη χρονιά, από τον Willoughby Smith, επετεύχθη η κατασκευή του πρώτου φωτοβολταϊκού στοιχείου από Σελήνιο.

Το 1918, ο φυσικός Jan Czochralski, παρέθεσε την μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού Πυριτίου. Ένα σημαντικό βήμα στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εφαρμογών έγινε από τους Mott και Schottky, οι οποίοι το 1949 ανέπτυξαν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Το 1954, επιστήμονες στα Bell Labs (Gerald Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller), αναπροσάρμοσαν την τεχνολογία και χρησιμοποιώντας ως βάση το Πυρίτιο, κατασκεύασαν φωτοβολταϊκά στοιχεία τα οποία μετέτρεπαν ποσοστό περίπου 4% της ηλιακής ακτινοβολίας, απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια.

#### 2.1.1 Η φυσική της στερεάς κατάστασης της ύλης

---

Η κατάσταση της ύλης, περιγράφει το πόσο εύκολα μεταβάλλεται το σχήμα και το μέγεθός της. Υπάρχουν τρεις βασικές καταστάσεις, όπου μπορεί να βρεθεί, η στερεά, η υγρή και η αέρια. Η κατάσταση στην οποία θα βρεθεί η ύλη, καθορίζεται βασικά από τη χημική σύσταση της όμως, επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και την πίεση του περιβάλλοντός της. Κατά τη θέρμανση της σε στερεά κατάσταση, μεταβαίνει στην υγρή, ενώ με περαιτέρω θέρμανση, μεταβαίνει σε αέρια κατάσταση. Μεγάλο ενδιαφέρον στην τεχνολογία ηλεκτροτεχνικών-ηλεκτρονικών εφαρμογών, παρουσιάζει η στερεά κατάσταση της ύλης, η οποία οφείλεται στην συλλογή και ακινησία των δομικών λιθών της ύλης.

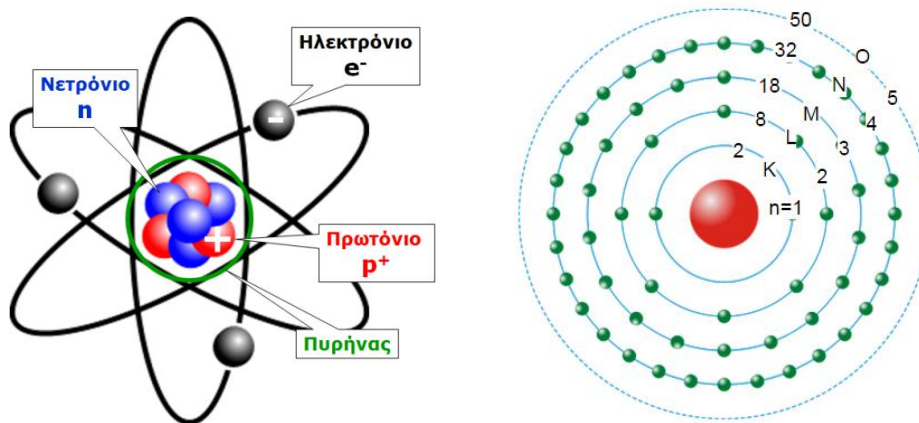
Διαιρώντας την ύλη με φυσικά μέσα, διατηρεί όλες τις βασικές ιδιότητες της χημικής ουσίας που αντιπροσωπεύει, ενώ από τη διαίρεση προκύπτει τα μόρια. Το μόριο είναι το ελάχιστο σωματίδιο της ύλης, το οποίο είναι ικανό να βρεθεί σε ελεύθερη κατάσταση αυτοτελώς και να διατηρεί τις ιδιότητες της ουσίας στην οποία ανήκει, αλλά δεν είναι δυνατόν να διαιρεθεί, χωρίς απώλεια των ιδιοτήτων της. Από περαιτέρω διάσπαση του μορίου με χημικό τρόπο, προκύπτει το άτομο, που αποτελεί το θεμελιώδη σωματίδιο της ύλης. Το άτομο δεν είναι δυνατό να βρεθεί σε ελεύθερη κατάσταση, αλλά μεταφέρεται αυτούσιο, κατά τη διάρκεια χημικών μεταβολών προς το σχηματισμό του μορίου της ύλης.

Η Φυσική Στερεάς Κατάστασης, ασχολείται με την μελέτη των ιδιοτήτων της ύλης στη στερεά φάση της, μέσω μεθόδων όπως, η κβαντομηχανική, η κρυσταλλογραφία και ο ηλεκτρομαγνητισμός, με αποτέλεσμα να αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο των διαφόρων στερεών υλικών που υπάρχουν διαθέσιμα, παρέχοντας τις ηλεκτρικές ιδιότητες τους, από τις οποίες αναπτύχθηκε η φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Ο τρόπος σύνδεσης και διάταξης των δομικών λιθών, αποτελεί την ηλεκτρονική δόμηση της ύλης, ενώ οι ηλεκτρικές ιδιότητες, καθορίζονται από τη χημική σύσταση και την θερμοκρασία της, προκαλώντας μεταβολές στην αγωγιμότητα και στην μεταφορά ενέργειας, διά μέσω των στερεών υλικών.

### 2.1.1.1 Η κβαντική μηχανική του ατόμου

Το άτομο, σύμφωνα με την σύγχρονη ατομική θεωρία, σχηματίζεται από ένα πυρήνα, ο οποίος αποτελείται από τα θετικά ηλεκτρικά φορτισμένα πρωτόνια ( $p^+$ ) και τα ηλεκτρικά ουδέτερα νετρόνια ( $n$ ), όπου γύρω από το πυρήνα αυτό, κινούνται σε κυκλικές τροχιές ή αλλιώς τροχιακά, τα αρνητικά ηλεκτρικά φορτισμένα ηλεκτρόνια ( $e^-$ ). Ο πυρήνας είναι θετικά ηλεκτρικά φορτισμένος, λόγω του θετικού φορτίου των πρωτονίων, συνολικά όμως, το άτομο αποτελεί ηλεκτρικά ουδέτερο, καθώς τα ηλεκτρόνια είναι ισάριθμα με τα πρωτόνια του πυρήνα του ( $p^+ = e^-$ ), ορίζοντας έτσι τον **ατομικό αριθμό  $Z$**  του.

Κάθε τροχιακό (spin) ή αλλιώς στιβάδα K, L, M, N, κτλ., όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα, είναι δυνατό να περιέχει ορισμένο αριθμό ηλεκτρονίων και χαρακτηρίζεται από ένα φυσικό αριθμό  $n$  (1, 2, 3 κτλ.), μέσο του οποίου υπολογίζεται ο μέγιστος αριθμός ηλεκτρονίων, που μπορεί να διαθέτει κάθε στιβάδα ( $e_{max} = 2 * n^2$ ). Έτσι, κάθε περιφερειακή στιβάδα θεωρείται συμπληρωμένη ή κβαντισμένη, όταν περιλαμβάνει τον μέγιστο αριθμό ηλεκτρονίων, ενώ έχει καθορισμένη τιμή ενέργειας  $E_n$ .



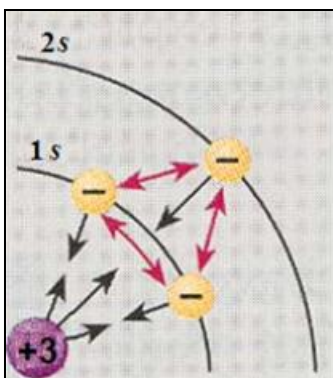
**Σχήμα 2.1:** α) δομή ατόμου  
β) κβαντισμένες στιβάδες ηλεκτρονίων γύρω από πυρήνα ατόμου

Η πρώτη στιβάδα K ή αλλιώς **στιβάδα καρδιάς** ( $n = 1$ ), συνθέτει μαζί με τον πυρήνα την **ιοντική καρδιά**, μπορεί να διαθέτει ως δύο ηλεκτρόνια ( $2e^-$ ) και συμβάλλει στην αποτροπή της κατάρρευσης του ατόμου, λόγω των ισχυρών ηλεκτροστατικών δυνάμεων (δυνάμεις Coulomb) που ασκούνται, μεταξύ του θετικά φορτισμένου πυρήνα και αρνητικών φορτισμένων ηλεκτρονίων. Η εξώτατη ηλεκτρονική στιβάδα, είναι η ασθενέστερη λόγω έλξης και καλείται **στιβάδα σθένους**. Η στιβάδα αυτή, δεν είναι δυνατό να περιλαμβάνει περισσότερα από οχτώ 8 ηλεκτρόνια ( $8e^-$ ), τα οποία ονομάζονται **ηλεκτρόνια σθένους**.

Η κάθε περιφερειακή στιβάδα (τροχιακά) του ατόμου, σύμφωνα με τον κβαντικό (φυσικό) αριθμό  $n$ , έχει καθορισμένη επιτρεπτή τιμή ενέργειας  $E_n$ , με την οποία κινούνται τα ηλεκτρόνια και θεωρείται κβαντισμένη. Καθοριστικός παράγοντας διαφοροποίησης, της ενέργειας των ηλεκτρονίων σε κάθε στιβάδα, αποτελεί το **δραστικό πυρηνικό φορτίο** του ατόμου, οι παράμετροι του οποίου, διαμορφώνουν τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις (δυνάμεις Coulomb), ελκτικές, μεταξύ των θετικών φορτισμένων πρωτονίων ( $p^+$ ) του πυρήνα και αρνητικών φορτισμένων ηλεκτρονίων ( $e^-$ ) και απωστικές, μεταξύ των ηλεκτρονίων ( $e^-$ ). Αποτελεί κατά προσέγγιση, το φορτίο πυρήνα, μειωμένο κατά το φορτίο ηλεκτρονίων των εσωτερικών στιβάδων, δηλαδή ισούται περίπου με το φορτίο ηλεκτρονίων της στιβάδας σθένους.

Οι παράμετροι του δραστικού πυρηνικού φορτίου του ατόμου, που παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των ηλεκτροστατικών δυνάμεων και κατ επέκταση, της ενέργειας των κβαντισμένων στιβάδων, είναι η ατομική ακτίνα  $r$  ή μέγεθος (όγκος) ατόμου και ο ατομικός αριθμός  $Z$  του:

- Η **ατομική ακτίνα  $r$** , καθορίζεται από τον αριθμό των στιβάδων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στιβάδων, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση της στιβάδας σθένους (με το μεγαλύτερο κβαντικό αριθμό) από τον πυρήνα, με συνέπεια οι ελκτικές δυνάμεις πυρήνα-ηλεκτρονίων σθένους να είναι ασθενής. Έτσι, οι απωστικές δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρονίων εσωτερικών στιβάδων καθορίζουν την απόσταση μεταξύ τους και κατ επέκταση του πυρήνα από την στιβάδα σθένους, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ενέργεια των κβαντισμένων στιβάδων, από τις εσωτερικές προς τις εξωτερικές στιβάδες.
- Ο **ατομικός αριθμός  $Z$** , αναφέρεται στον ισάριθμο των πρωτονίων-ηλεκτρονίων. Όσο μικρότερος είναι ο ισάριθμος των πρωτονίων-ηλεκτρονίων, τόσο μικρότερα είναι τα αντίθετα φορτία τους, με συνέπεια οι ελκτικές δυνάμεις πυρήνα-ηλεκτρονίων σθένους να είναι ασθενής. Έτσι, οι απωστικές δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρονίων εσωτερικών στιβάδων, τείνουν να απομακρύνουν τις στιβάδες μεταξύ τους και κατ επέκταση τον πυρήνα από την στιβάδα σθένους. Παρατηρείται δηλαδή, επιμήκυνση της ατομικής ακτίνας, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ενέργεια των κβαντισμένων στιβάδων.



Σχήμα 2.2: ελκτικές και απωστικές δυνάμεις στο άτομο

Σύμφωνα με τις παραμέτρους του δραστικού πυρηνικού φορτίου, οι ελκτικές δυνάμεις, καθορίζονται κυρίως από την ενέργεια της κύριας κβαντικής στιβάδας (ιοντική καρδιά), συμβάλλοντας στην αποτροπή της κατάρρευσης του ατόμου, ενώ οι απωστικές δυνάμεις, καθορίζονται από την ενέργεια των δευτερευόντων κβαντικών στιβάδων.

Στη κανονική ή **θεμελιώδη κατάσταση** του ατόμου, τα ηλεκτρόνια οφείλουν να κινούνται σε τροχιακά με μικρότερη κατά το δυνατόν ενέργεια, δηλαδή πλησιέστερα στο πυρήνα, στις χαμηλότερες κβαντισμένες στιβάδες, σε συνάρτηση με τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό ηλεκτρονίων που μπορεί να διαθέτει κάθε στιβάδα  $e_{max}$ . Επομένως, η επιτρεπόμενη τιμή ενέργειας  $E_n$ , την οποία θα πρέπει να έχει το ηλεκτρόνιο κινούμενο, για κάθε μία από τις κβαντισμένες στιβάδες, προκύπτει από την σχέση:

$$E_n = -\frac{2,18 * 10^{-18}}{n^2} \quad (2.1)$$

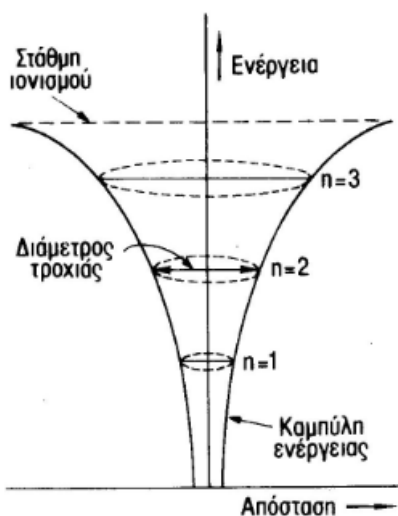
το αρνητικό πρόσημο της τιμής, έχει τη φυσική έννοια ότι, όσο μεγαλώνει η τιμή του κβαντικού αριθμού  $n$  της στιβάδας, τόσο μεγαλώνει η ενέργεια του ηλεκτρονίου. Με άλλα λόγια, όσο το ηλεκτρόνιο

απομακρύνεται από τον πυρήνα, τόσο μεγαλώνει η ενέργεια του. Αναμένεται μάλιστα να πάρει τη μέγιστη τιμή ( $E_n = 0$ ), όταν το ηλεκτρόνιο απομακρυνθεί αρκετά και η έλξη του πυρήνα μηδενιστεί. Έτσι, τα ηλεκτρόνια της στιβάδας σθένους, έχουν πάντα και τη μεγαλύτερη ενέργεια  $E_n$ .

Κάθε ηλεκτρόνιο ενός ατόμου, μπορεί να απομακρυνθεί από αυτό π.χ. υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου ή με την πρόσπτωση ΗΜ ακτινοβολίας (φωτός, θερμότητας) ή με κρούση με άλλο άτομο, όταν απορροφήσει κατάλληλη ενέργεια, τιμής ίσης ή μεγαλύτερης, από την ενέργεια της κβαντισμένης στιβάδας  $E_n$  και να αποτελέσει ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Η απορροφούμενη ενέργεια που απαιτείται για την πλήρη απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου από το άτομο, που βρίσκεται στη θεμελιώδη του κατάσταση, ονομάζεται **ενέργεια ιοντισμού  $E_i$** , ενώ αποτελεί ενδόθερμη αντίδραση, καθώς για να απομακρυνθεί το ηλεκτρόνιο, χρειάζεται να απορροφήσει ενέργεια από το περιβάλλον του, ώστε να εξουδετερώσει τις ελκτικές δυνάμεις του πυρήνα.

Επίσης, το άτομο έχει τη δυνατότητα να προσλάβει (έλξει) ηλεκτρόνια, όταν κάποια κβαντισμένη στιβάδα δεν είναι συμπληρωμένη, βάση του μέγιστου αριθμού ηλεκτρονίων στιβάδας  $e_{max}$  της εκάστοτε στιβάδας. Στη περίπτωση αυτή, το δραστικό πυρηνικό φορτίο του ατόμου, κατά την πρόσληψη του από το άτομο, απελευθερώνει (έκλυση) ενέργεια. Η εκλυόμενη ενέργεια που παρατηρείται, ονομάζεται **ενέργεια ηλεκτρονιοσυγγένειας  $E_{ea}$** , ενώ αποτελεί εξώθερμη αντίδραση, καθώς το ηλεκτρόνιο, αυτή τη φορά, διατάσσεται σε περιβάλλον όπου αναπτύσσονται οι ελκτικές δυνάμεις του πυρήνα, η ενέργεια των οποίων και το έλκουν.

Κατά την απομάκρυνση ή την πρόσληψη ηλεκτρονίων, έχει επέλθει ο **ιοντισμός** του ατόμου και θεωρείται **ιοντισμένο**. Καθώς το άτομο θεωρείται ηλεκτρικά ουδέτερο ( $p^+ = e^-$ ), μετά την απομάκρυνση ηλεκτρονίου, το άτομο παύει να αποτελεί ηλεκτρικά ουδέτερο, καθώς μειώνεται το αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο ( $e^-$ ) του ατομικού αριθμού  $Z$  του, αποκτώντας το θετικό ηλεκτρικό φορτίο των πρωτονίων ( $p^+$ ) και εμφανίζεται ιοντισμένο, όπου μετατρέπεται σε **θετικό ιόν (κατιόν)**. Στην περίπτωση της πρόσληψης ηλεκτρονίου, το άτομο παύει να αποτελεί ηλεκτρικά ουδέτερο, καθώς μειώνεται το θετικό ηλεκτρικό φορτίο ( $p^+$ ) του ατομικού αριθμού  $Z$  του, αποκτώντας το αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου ( $e^-$ ) και εμφανίζεται ιοντισμένο, όπου μετατρέπεται σε **αρνητικό ιόν (ανιόν)**.

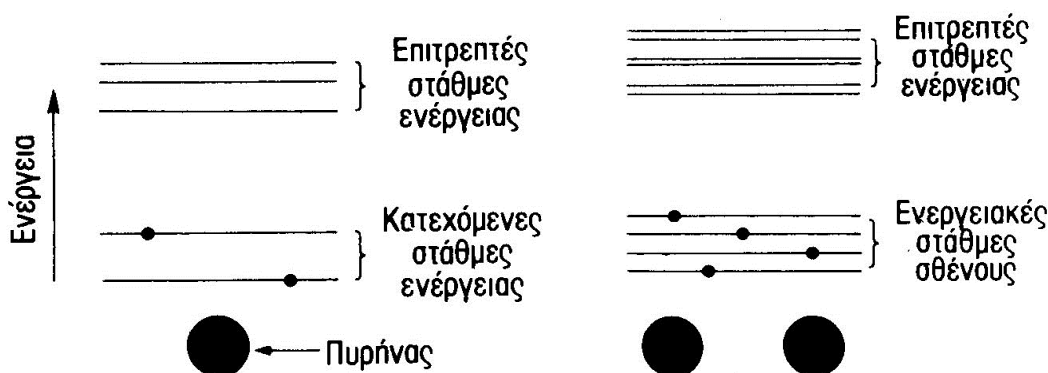


Σχήμα 2.3: μεταβολή ενέργειας ηλεκτρονίων συναρτήσει της απόστασης από τον πυρήνα

Τα εσωτερικά ηλεκτρόνια χαμηλότερων στιβάδων, δύσκολα μπορούν να απομακρυνθούν από τις θέσεις τους, καθώς σύμφωνα με το δραστικό πυρηνικό φορτίο, είναι πολύ στενά συνδεδεμένα με τον πυρήνα, με ισχυρές ελκτικές δυνάμεις μεταξύ τους. Τα εξωτερικά ηλεκτρόνια υψηλότερων στιβάδων, μπορούν να απομακρυνθούν ευκολότερα με μικρότερη ενέργεια, καθώς οι ελκτικές δυνάμεις είναι ασθενέστερες και υπό την επίδραση των απωστικών δυνάμεων μεταξύ των ηλεκτρονίων.

Αν η ενέργεια ιοντισμού, έχει μεγαλύτερη ή ίση τιμή από την, κατά απόλυτη τιμή, ενέργεια της θεμελιώδους κατάστασης, της εκάστοτε κβαντισμένης στιβάδας ( $E_i \geq E_n$ ), τότε το ηλεκτρόνιο απομακρύνεται από το άτομο, έχοντας κινητική ενέργεια ίση με τη διαφορά ( $\Delta E = E_i - |E_n|$ ). Η δεύτερη ενέργεια ιοντισμού  $E_{i,2}$ , έχει μεγαλύτερη τιμή από την πρώτη ( $E_{i,2} > E_i$ ), λόγω του ισχυρότερου δραστικού πυρηνικού φορτίου, καθώς το δεύτερο ηλεκτρόνιο, απομακρύνεται πιο δύσκολα από το θετικό ιόν ( $p^+ > e^-$ ), όπου έχει μετατραπεί το ουδέτερο άτομο ( $p^+ = e^-$ ) ύστερα από την απομάκρυνση του πρώτου ηλεκτρονίου, κατά τη πρώτη ενέργεια ιοντισμού  $E_i$ .

Στην περίπτωση όπου το ηλεκτρόνιο απορροφά ενέργεια, μικρότερης όμως τιμής, από την ενέργεια ιοντισμού  $E_i$ , έχει τη δυνατότητα να μεταβεί σε υψηλότερη κβαντισμένη στιβάδα, ενώ σε αυτήν την κατάσταση έχει επέλθει η **διέγερση** του ατόμου. Σε κάθε άλλη κατάσταση των ηλεκτρονίων, πέραν της θεμελιώδους και της ιοντισμένης, το άτομο θεωρείται **διεγερμένο**. Οι κβαντισμένες στιβάδες στις οποίες μπορεί να πάει ένα ηλεκτρόνιο, δεν είναι τυχαίες, αλλά απόλυτα καθορισμένες, σε συνάρτηση με τον μέγιστο επιτρεπτό αριθμό ηλεκτρονίων  $e_{max}$ , της κάθε κβαντισμένης στιβάδας, επομένως θα πρέπει να υπάρχει ακάλυπτη θέση (οπή) σε στιβάδα υψηλότερης ενέργειας.



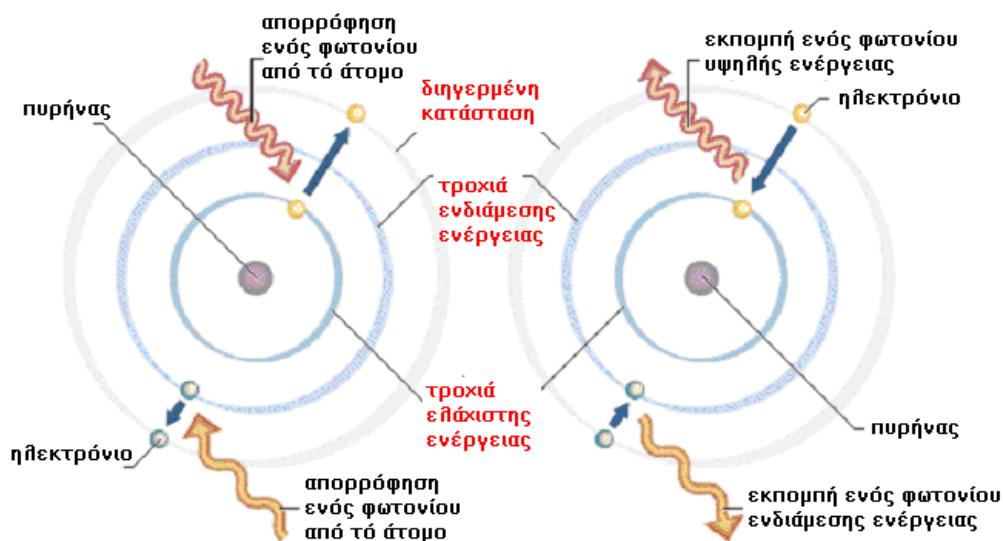
Σχήμα 2.4: α) ενεργειακές στάθμες ατόμου  
β) για συγκρότημα δύο ατόμων

Έτσι, οι διακεκριμένες τιμές ενέργειας των κβαντισμένων στιβάδων  $E_n$ , αποτελούν τις ενεργειακές στάθμες του ατόμου. Η προσέγγιση δύο ατόμων δημιουργεί την ενεργειακή εικόνα του παραπάνω σχήματος (2.4.β). Τα ηλεκτρόνια τώρα αρχίζουν να εκτελούν σύνθετη τροχιά που ανήκει και στα δύο άτομα. Οι κατεχόμενες στάθμες ενέργειας εδώ, αφορούν μόνο στιβάδες σθένους, γι αυτό και αποτελούν κατεχόμενες στάθμες σθένους.

Το διεγερμένο ηλεκτρόνιο δεν μένει στην υψηλότερη στάθμη για πολύ χρόνο. Ο χρόνος παραμονής του, είναι της τάξης των  $10^{-10}$  s έως  $10^{-8}$  s και αποτελεί το **χρόνο ζωής ηλεκτρονίου**. Κατόπιν, το ηλεκτρόνιο μεταπίπτει στη θεμελιώδη κατάσταση του, δηλαδή αποδιεγείρεται, είτε απευθείας με ένα βήμα στην αρχική στιβάδα απ όπου προήλθε, είτε με πολλά βήματα σε ενδιάμεσες χαμηλότερες στιβάδες, για να καταλήξει τελικά στην αρχική του.

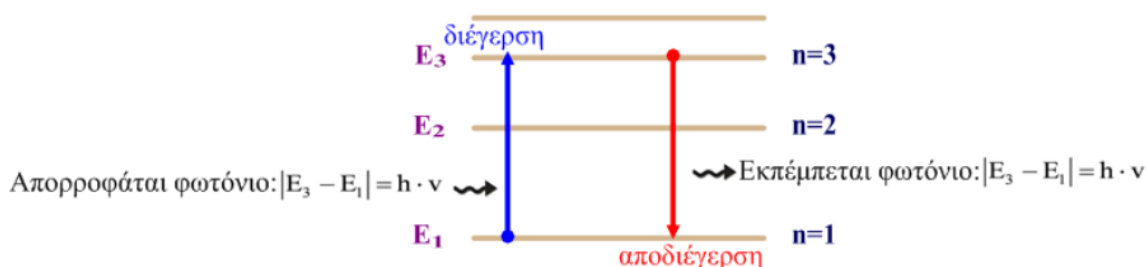


Σε κάθε περίπτωση, όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταβεί από στάθμη χαμηλότερης ενέργειας  $E_1$ , σε στάθμη υψηλότερης ενέργειας  $E_2$ , δηλαδή διεγείρεται, τότε το άτομο απορροφά ΗΜ ακτινοβολία, ενώ όταν μεταβεί από στιβάδα υψηλότερης ενέργειας, σε στιβάδα χαμηλότερης ενέργειας, εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή αλλιώς την **ακτινοβολία διεγερσης** (στην ουσία αποτελεί ακτινοβολία αποδιέγερσης). Παρόμοια διαδικασία παρουσιάζεται και κατά την ηλεκτρονιοσυγγένεια, όπου μετά τον χρόνο ζωής παραμονής ( $10^{-10}$  s έως  $10^{-8}$  s) του ηλεκτρονίου ως ελεύθερο, στις επιτρεπτές στάθμες ενέργειας, προσλαμβάνεται, ελκόμενο από κάποιο άτομο και μεταπίπτει στις χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες σθένους, εκπέμποντας με τη σειρά του, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία



Σχήμα 2.5: μηχανισμός διεγερσης και αποδιέγερσης ατόμου

Η ενέργεια της ακτινοβολίας αποδιέγερσης, είναι το μικρότερο ποσό ενέργειας (στοιχειώδες) που λέγεται **κβάντο ενέργειας**, γνωστό και σαν **φωτόνιο** ( $E_{\text{ph}} = h\nu$ ), ενώ η αποδιέγερση αυτή, συνοδεύεται από την εκπομπή ενός ή περισσότερων φωτονίων, ανάλογα με τα βήματα αποδιέγερσης του ηλεκτρονίου. Έτσι, το σύνολο των εκπεμπόμενων φωτονίων, όπως επιτάσσει η αρχή διατήρησης της ενέργειας, έχουν συνολική ενέργεια, ίση με την ενέργεια που απορροφήθηκε π.χ. της ενέργειας φωτονίου της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ενέργεια που απορροφάται ή εκπέμπεται από τα άτομα, είναι ίση με την διαφορά  $\Delta E = |E_2 - E_1|$  και συχνότητας  $\nu = (|E_2 - E_1|)/h$  (με  $h$  τη σταθερά του Planck).

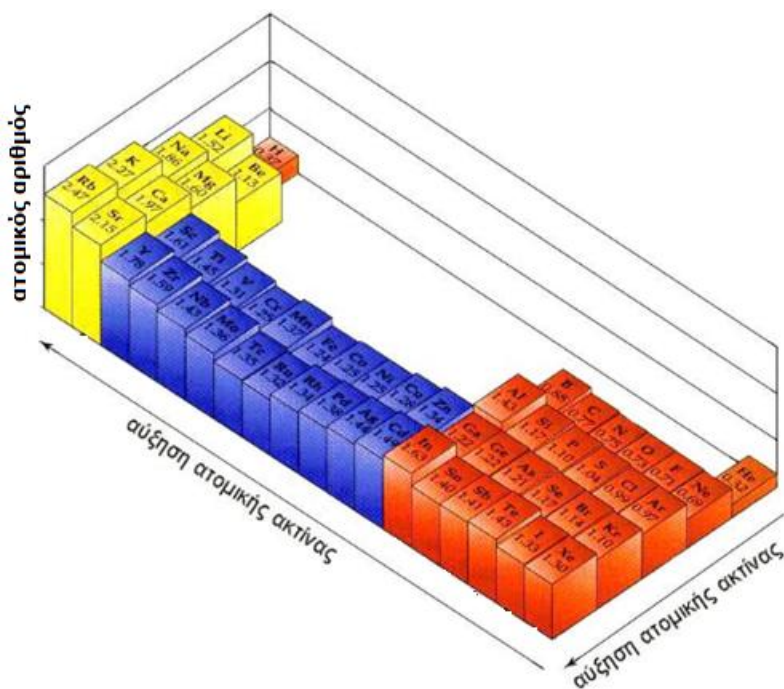


Σχήμα 2.6: τιμές ενέργειας ακτινοβολιών διεγερσης και αποδιέγερσης

### 2.1.1.2 Η περιοδική διάκριση της ύλης

Η ηλεκτρονιακή δόμηση του ατόμου, προσδίδει στο άτομο ιδιότητες, χαρακτηρίζοντας τη χημική συμπεριφορά του και κατ'επέκταση της ύλης. Η συμπεριφορά αυτή, οφείλεται στην περιοδικότητα της κατανομής των ηλεκτρονίων στις κβαντισμένες στιβάδες, γύρω από τον πυρήνα του ατόμου, σύμφωνα με την ατομική θεωρία που έχει περιγραφεί. Η ηλεκτρονιακή θεωρία του σθένους, έχει σκοπό, να ερμηνεύσει την συμπεριφορά του δραστικού πυρηνικού φορτίου, κυρίως προς τη στιβάδα σθένους, καθώς αυτή, είναι υπεύθυνη των ιδιοτήτων του ατόμου, γεγονός που επιτρέπει την διάκριση των περιοδικών ιδιοτήτων του ατόμου, ως **χημικά στοιχεία**, από τα οποία και διακρίνεται η ύλη.

Σύμφωνα με το δραστικό πυρηνικό φορτίο και συγκεκριμένα με τις παραμέτρους του, καθορίζονται οι ιδιότητες του ατόμου, χαρακτηρίζοντας και τις κατηγορίες των χημικών στοιχείων τα **μέταλλα**, τα **ημιμέταλλα (μεταλλοειδή)** και τα **αμέταλλα**, όπως ταξινομούνται στον περιοδικό πίνακα (Π.Π.) της ύλης, ο οποίος παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα (2.7). Το δραστικό πυρηνικό φορτίο του ατόμου, όπως έχει περιγραφεί, καθορίζεται από τις μεταβολές των παραμέτρων της ατομικής ακτίνας  $r$  και του ατομικού αριθμού  $Z$ , καθώς μεταξύ του θετικά φορτισμένου πυρήνα από τα πρωτόνια ( $p^+$ ) και των αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων ( $e^-$ ), ασκούνται ισχυρές ηλεκτροστατικές δυνάμεις.



Σχήμα 2.7: μεταβολή ατομικής ακτίνας και ατομικού αριθμού χημικών στοιχείων στο Π.Π.

Η ατομική ακτίνα  $r$  αυξάνεται από τα δεξιά προς τα αριστερά, κατά μήκος μιας περιόδου του Π.Π.. Αυτό συμβαίνει καθώς, μειώνεται ο ατομικός αριθμός  $Z$  από τα δεξιά προς τα αριστερά μιας ομάδας του Π.Π., χαλαρώνοντας το δραστικό φορτίο του πυρήνα, προς τα ηλεκτρόνια της στιβάδας σθένους, με αποτέλεσμα να επιμηκύνονται οι αποστάσεις των στιβάδων από τον πυρήνα. Επίσης, η ακτίνα ατόμου  $r$  αυξάνεται από πάνω προς τα κάτω, κατά μήκος μιας ομάδας του Π.Π.. Αυτό συμβαίνει καθώς, προστίθενται στιβάδες στο άτομο και μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ πυρήνα-ηλεκτρονίων σθένους, μειώνοντας το δραστικό φορτίο του πυρήνα. Έτσι, και στις δύο περιπτώσεις, λόγω μικρότερης έλξης των ηλεκτρονίων της στιβάδας σθένους από τον πυρήνα, μειώνεται το δραστικό πυρηνικό φορτίο του ατόμου.

Κάθε ηλεκτρόνιο ενός ατόμου, μπορεί να αποσπασθεί από αυτό, όταν λάβει την κατάλληλη ενέργεια ιοντισμού  $E_i$ , τιμής ίσης ή μεγαλύτερης, από την ενέργεια ηλεκτρονίου  $E_n$  για κάθε μία από τις κβαντισμένες στιβάδες. Καθώς θα πρέπει να ισχύει  $E_i \geq E_n$  για την απομάκρυνση ηλεκτρονίου, η ενέργεια ιοντισμού  $E_i$  καθορίζεται από την ενέργεια κβαντισμένης στιβάδας  $E_n$ , η οποία με τη σειρά της καθορίζεται από το δραστικό πυρηνικό φορτίο του ατόμου. Όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων σθένους και όσο πιο μακριά είναι η στιβάδα σθένους από τον πυρήνα του ατόμου, τόσο ασθενέστερο είναι το δραστικό πυρηνικό φορτίο του, οπότε η απορροφούμενη ενέργεια ιοντισμού  $E_i$  για την απομάκρυνση ηλεκτρονίου, μειώνεται.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η περιοδικότητα της ιδιότητας των χημικών στοιχείων στην απορρόφηση ενέργειας ιοντισμού  $E_i$ , από το ηλεκτρόνια των ατόμων τους, αυξάνεται από τα αριστερά προς τα δεξιά, κατά μήκος μιας γραμμής του Π.Π. και από κάτω προς τα πάνω, κατά μήκος μιας στήλης του. Χαμηλές τιμές απορροφούμενης ενέργειας ιοντισμού  $E_i$ , διαθέτουν τα χημικά στοιχεία των μετάλλων, ενώ υψηλές τιμές, διαθέτουν τα χημικά στοιχεία των αμέταλλων. Ενδιάμεσες τιμές απορροφούμενης ενέργειας ιοντισμού  $E_i$ , μεταξύ μετάλλων και ημιμετάλλων, διαθέτουν τα χημικά στοιχεία των ημιμετάλλων.



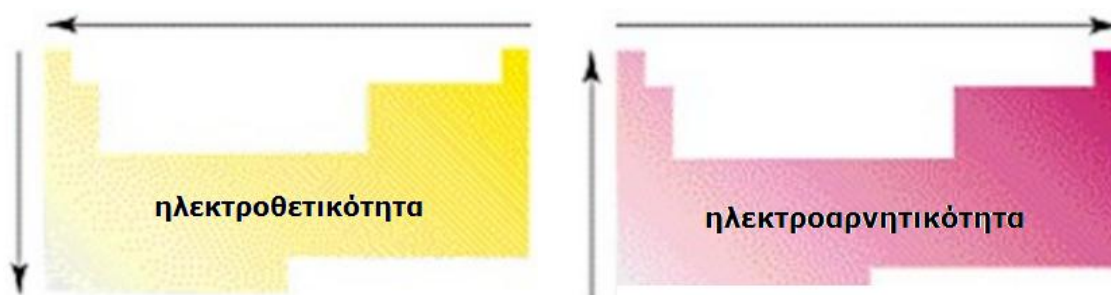
Σχήμα 2.8: μεταβολή ενέργειας ιοντισμού χημικών στοιχείων στο Π.Π.

Καθώς ένα άτομο, μπορεί να προσλάβει (έλξει) ηλεκτρόνιο, όταν κάποια κβαντισμένη στιβάδα δεν είναι συμπληρωμένη, βάση του μέγιστου αριθμού ηλεκτρονίων στιβάδας  $e_{max}$  της εκάστοτε στιβάδας, τότε από το δραστικό πυρηνικό φορτίο του ατόμου, ελκύεται ενέργεια ηλεκτρονιοσυγγένειας  $E_{ea}$ . Όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων σθένους και όσο πιο μακριά είναι η στιβάδα σθένους από τον πυρήνα του ατόμου, τόσο ασθενέστερο είναι το δραστικό πυρηνικό φορτίο του, οπότε η ελκυσόμενη ενέργεια ηλεκτρονιοσυγγένειας  $E_{ea}$  για την πρόσληψη ηλεκτρονίου, μειώνεται.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η περιοδικότητα της ιδιότητας των χημικών στοιχείων στην έλκυση ενέργειας ηλεκτρονιοσυγγένειας  $E_{ea}$ , από το δραστικό πυρηνικό φορτίο του ατόμου, αυξάνεται από τα αριστερά προς τα δεξιά, κατά μήκος μιας γραμμής του Π.Π. και από κάτω προς τα πάνω, κατά μήκος μιας στήλης του Π.Π.. Χαμηλές τιμές ελκυσόμενης ενέργειας ηλεκτρονιοσυγγένειας  $E_{ea}$ , διαθέτουν τα χημικά στοιχεία των μετάλλων, ενώ υψηλές τιμές, διαθέτουν τα χημικά στοιχεία των αμέταλλων. Ενδιάμεσες τιμές ελκυσόμενης ενέργειας ηλεκτρονιοσυγγένειας  $E_{ea}$ , μεταξύ των μετάλλων και των ημιμετάλλων, διαθέτουν τα χημικά στοιχεία των ημιμετάλλων.

Στα χημικά στοιχεία, που χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλές τιμές ενέργειας ιοντισμού και χαμηλές τιμές ενέργειας ηλεκτρονιοσυγγένειας, τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων τους, απομακρύνονται ευκολότερα, ενώ παράλληλα προσλαμβάνουν ηλεκτρόνια δυσκολότερα. Τα χημικά στοιχεία αυτά, ονομάζονται **ηλεκτροθετικά στοιχεία**, η δε τάση που έχουν στην εύκολη απομάκρυνση ηλεκτρονίων, καλείται **ηλεκτροθετικότητα**.

Η περιοδικότητα, της ιδιότητας των χημικών στοιχείων στην ηλεκτροθετικότητα, αυξάνεται από τα δεξιά προς τα αριστερά, κατά μήκος μιας γραμμής του Π.Π. και από πάνω προς τα κάτω, κατά μήκος μιας στήλης του Π.Π.. Θεωρούνται δηλαδή πιο ηλεκτροθετικά, όσο πιο ασθενέστερο είναι το δραστικό πυρηνικό φορτίο των ατόμων τους, δηλαδή όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων σθένους και όσο πιο μακριά είναι η στιβάδα σθένους, από τον πυρήνα του ατόμου. Στα ηλεκτροθετικά στοιχεία, ανήκουν όλα τα μέταλλα τα οποία έχουν μέχρι 3 ηλεκτρόνια σθένους και κάποια ημιμέταλλα με 4 ηλεκτρόνια σθένους.



Σχήμα 2.9: μεταβολή (α) ηλεκτροθετικότητας και (β) ηλεκτροαρνητικότητας χημικών στοιχείων στο Π.Π.

Στα χημικά στοιχεία, που χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλές τιμές ενέργειας ιοντισμού και υψηλές τιμές ενέργειας ηλεκτρονιοσυγγένειας, τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων τους, απομακρύνονται δυσκολότερα, ενώ παράλληλα προσλαμβάνουν ηλεκτρόνια ευκολότερα. Τα χημικά στοιχεία αυτά, ονομάζονται **ηλεκτροαρνητικά στοιχεία**, η δε τάση που έχουν στην εύκολη πρόσληψη ηλεκτρονίων, καλείται **ηλεκτροαρνητικότητα**.

Η περιοδικότητα, της ιδιότητας των χημικών στοιχείων στην ηλεκτροαρνητικότητα, αυξάνεται από τα αριστερά προς τα δεξιά, κατά μήκος μιας γραμμής του Π.Π. και από κάτω προς τα πάνω, κατά μήκος μιας στήλης του Π.Π.. Θεωρούνται δηλαδή πιο ηλεκτροαρνητικά, όσο πιο ισχυρότερο είναι το δραστικό πυρηνικό φορτίο των ατόμων τους, δηλαδή όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων σθένους και όσο πιο κοντά είναι η στιβάδα σθένους, στον πυρήνα του ατόμου. Στα ηλεκτροαρνητικά στοιχεία, ανήκουν δηλαδή κάποια ημιμέταλλα με 5 ηλεκτρόνια σθένους και τα αμέταλλα, εκτός από τα ευγενή αέρια, δηλαδή από 5 έως 7 ηλεκτρόνια σθένους.

### **2.1.1.3 Η ηλεκτρονιακή δόμηση της ύλης**

Τα χημικά στοιχεία, στην προσπάθεια τους να αποκτήσουν σταθερή ηλεκτρονιακή δομή (σταθερότητα ατόμου), τείνουν να συμπληρώσουν την στιβάδα σθένους τους με οχτώ ηλεκτρόνια ( $8e^-$ ), όπως διαθέτουν τα χημικά στοιχεία των ευγενών αερίων που ανήκουν στα αμέταλλα, όπως ταξινομούνται στο Π.Π.. Σύμφωνα με την αρχή ελάχιστης ενέργειας, τα άτομα των χημικών στοιχείων οφείλουν να βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση (τροχιακά με τη μικρότερη ενέργεια), ώστε να αποκτήσουν τη μέγιστη σταθερότητα και επιτυγχάνεται με την μεταβολή των ηλεκτρονίων σθένους τους, αποβάλλοντας, προσλαμβάνοντας ή συνεισφέροντας αυτά.

Τα ηλεκτροαρνητικά χημικά στοιχεία των αμετάλλων, προσλαμβάνουν (έλκουν) ηλεκτρόνια ώστε να συμπληρώνουν την στιβάδα σθένους και να αποκτήσουν σταθερή δομή, ενώ τα ηλεκτροθετικά χημικά στοιχεία των μετάλλων, αποβάλλουν ηλεκτρόνια από την στιβάδα σθένους τους, ώστε να αποκτήσουν σταθερή δομή από την αμέσως προηγούμενη κβαντισμένη στιβάδα, η οποία είναι συμπληρωμένη βάση του μέγιστου αριθμού ηλεκτρονίων στιβάδας  $e_{max}$  της. Τα χημικά στοιχεία που συνεισφέρουν ηλεκτρόνια, θεωρούνται πιο ηλεκτροαρνητικά από τα μέταλλα και πιο ηλεκτροθετικά από τα αμέταλλα, δηλαδή κάποια ημιμέταλλα και αμέταλλα, τα οποία έχουν από 4 έως 6 ηλεκτρόνια σθένους.

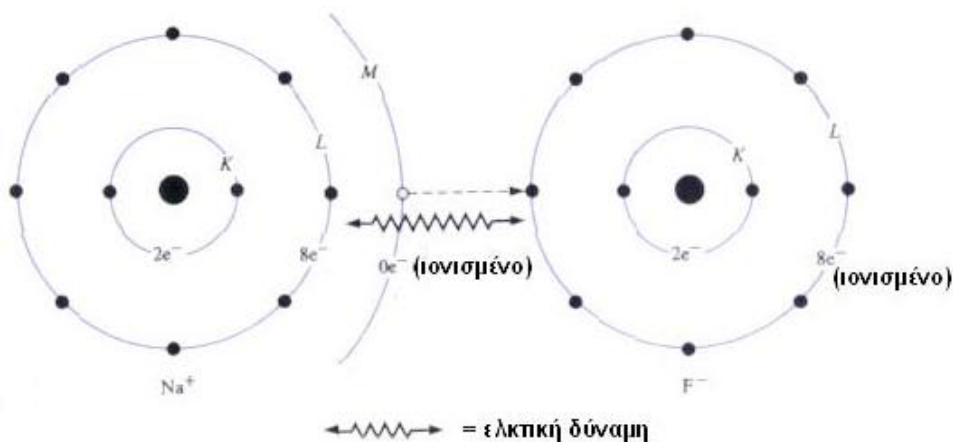
Καθώς το άτομο θεωρείται ηλεκτρικά ουδέτερο ( $p^+ = e^-$ ), εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι, κατά την αποβολή ή την πρόσληψη ηλεκτρονίων σθένους, όχι όμως στην συνεισφορά, ώστε να αποκτήσει σταθερή δομή το χημικό στοιχείο, προκαλείται ιοντισμός του ατόμου του. Αυτό συμβαίνει γιατί, είτε αποβάλλει ηλεκτρόνιο ( $e^-$ ) με την απορρόφηση ενέργειας ιοντισμού  $E_i$ , αποκτώντας θετικό φορτίο οπότε και μετατρέπεται σε θετικό ιόν, είτε προσλαμβάνει ηλεκτρόνιο ( $e^-$ ) αποκτώντας αρνητικό φορτίο, οπότε και μετατρέπεται σε αρνητικό ιόν.

Η μεταβολή ηλεκτρονίων σθένους, που συμβάλει στην σταθερότητα των χημικών στοιχείων, δημιουργείται με τον **χημικό δεσμό** και καθορίζει τη φύση και τη τιμή του ηλεκτρονιακού σθένους των χημικών στοιχείων. Συνεπώς, ο χημικός δεσμός που προκύπτει μεταξύ των χημικών στοιχείων, στην προσπάθεια τους να αποκτήσουν σταθερότητα, συμβάλλει στον σχηματισμό των μορίων της ύλης και κατ'επέκταση, της ύλης στη φυσική κατάσταση της. Σύμφωνα με τον τρόπο που πραγματοποιείται αποβολή, πρόσληψη ή συνεισφορά ηλεκτρονίων σθένους, διακρίνονται τρία ήδη χημικών δεσμών:

#### **Ετεροπολικός (ιοντικός) δεσμός :**

Ο δεσμός αυτός, δεν μπορεί να σχηματιστεί μεταξύ ατόμων του ίδιου χημικού στοιχείου. Συγκεκριμένα, σχηματίζεται μεταξύ ατόμων ενός ηλεκτροθετικού χημικού στοιχείου, που εμφανίζεται ως **δότης**, καθώς μεταβιβάζει ηλεκτρόνιο σθένους και ενός ηλεκτροαρνητικού χημικού στοιχείου, που συμπεριφέρεται ως **αποδέκτης (λήπτης)**, καθώς προσλαμβάνει ηλεκτρόνιο. Οφείλεται σε δυνάμεις συνοχής ηλεκτροστατικής φύσεως, με αποτέλεσμα του δεσμού αυτού, την δημιουργία δύο αντίθετων ηλεκτρικά φορτισμένων ιόντων.

Π.χ., το ηλεκτροθετικό χημικό στοιχείο με ένα ηλεκτρόνιο σθένους ( $1e^-$ ), καθώς μεταβιβάζει το ηλεκτρόνιο του, αποκτά θετικό φορτίο και αποτελεί πλέον κατιόν, ενώ το ηλεκτροαρνητικό άτομο με επτά ηλεκτρόνια σθένους ( $7e^-$ ), καθώς προσλαμβάνει το ένα ηλεκτρόνιο ( $1e^-$ ), αποκτά αρνητικό φορτίο και αποτελεί πλέον ανιόν.



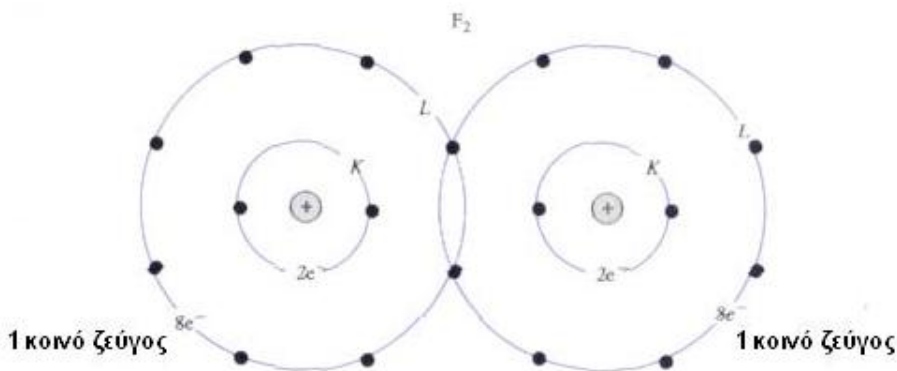
Σχήμα 2.10: ετεροπολικός δεσμός στο ιόν Φθοριούχο Νάτριο ( $\text{Na}^+\text{F}^-$ )

Ιοντικός δεσμός μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μεταξύ ατόμων των χημικών στοιχείων των μετάλλων με των ημιμετάλλων ή μεταξύ των μετάλλων με των αμέταλλων, μέσω του οποίου και σχηματίζονται τα **ίοντα χημικής ένωσης στοιχείων** της ύλης. Καθώς από τις ιοντικές ενώσεις προκύπτουν τα ιόντα της ύλης, δεν υπάρχει η έννοια του μορίου της ύλης.

**Ομοιοπολικός (μοριακός) δεσμός :**

Ο δεσμός αυτός, μπορεί να σχηματιστεί μεταξύ ατόμων του ίδιου ή διαφορετικών χημικών στοιχείων, όπου το κάθε ένα, συνεισφέρει αμοιβαία ηλεκτρόνια της στιβάδας σθένους του, για τη συμπλήρωση των στιβάδων και των δυο ατόμων, δημιουργώντας έτσι ένα ή περισσότερα κοινά ζεύγη ηλεκτρονίων. Αιτία της σύζευξης ηλεκτρονίων στον ομοιοπολικό δεσμό, αποτελεί η **ηλεκτρομαγνητικότητα** που εμφανίζει το άτομο. Κατά τη διάρκεια της τροχιακής κίνησης (spin), των ηλεκτρονίων του ατόμου, δημιουργούν στοιχειώδη μαγνητικά πεδία, που αντιστοιχούν σε ροπές, η φορά των οποίων εξαρτάται από την κατεύθυνση της περιφοράς στην τροχιά τους.

Επομένως, για να δημιουργεί σύζευξη δύο ηλεκτρονίων που ανήκουν σε διαφορετικά άτομα, θα πρέπει τα ηλεκτρόνια αυτά να έχουν διαφορετική τροχιακή κίνηση, δηλαδή να περιστρέφονται αντίθετα, το ένα σε σχέση με το άλλο, δημιουργώντας γύρω τους μαγνητικά πεδία με αντίθετη φορά, που είναι προϋπόθεση της έλξης, δημιουργώντας μια σύνθετη τροχιά. Άρα, ο ομοιοπολικός δεσμός οφείλεται και αυτός σε ελκτικές δυνάμεις, αλλά ηλεκτρομαγνητικής φύσεως.



Σχήμα 2.11: ομοιοπολικός δεσμός στο μόριο του Φθορίου ( $\text{F}_2$ )

Ομοιοπολικός δεσμός μπορεί να πραγματοποιηθεί, είτε μεταξύ ατόμων του ίδιου χημικού στοιχείου, των ημιμετάλλων ή των αμέταλλων, όπου και σχηματίζονται τα **μόρια χημικού στοιχείου** της ύλης, είτε μεταξύ ατόμων των χημικών στοιχείων, των μετάλλων, των ημιμετάλλων και των αμέταλλων, όπου και σχηματίζονται τα **μόρια χημικής ένωσης στοιχείων** της ύλης.

### Μεταλλικός δεσμός :

Ο δεσμός αυτός, συναντάται μεταξύ ατόμων του ίδιου ή διαφορετικών χημικών στοιχείων των μετάλλων. Καθώς τα μέταλλα είναι ηλεκτροθετικά χημικά στοιχεία και διαθέτουν ασθενή δομική σταθερότητα με ασθενέστερο δραστικό πυρηνικό φορτίο, τα ηλεκτρόνια σθένους μετακινούνται εύκολα, ελκυσόμενα από τους πυρήνες γειτονικών ατόμων. Αποτέλεσμα αυτού, τα ηλεκτρόνια σθένους αποτελούν κατά έναν τρόπο, κοινό κτήμα όλων των ατόμων, συνιστώντας το **ηλεκτρονιακό νέφος** το οποίο είναι αρνητικά φορτισμένο. Κατά την μετάβαση των ηλεκτρονίων σθένους, κάθε άτομο, αποκτά θετικό φορτίο και εμφανίζεται ως θετικό ιόν.

Οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ του αρνητικά φορτισμένου νέφους και των θετικών ιόντων, συγκρατούν τα άτομα των χημικών στοιχείων των μετάλλων σταθερά, με ισχυρούς μεταλλικούς δεσμούς μεταξύ τους, σχηματίζοντας τα **κατιόντα μετάλλου** της ύλης. Επίσης στις μεταλλικές ενώσεις δεν υπάρχει η έννοια του μορίου, αλλά θεωρείται το σύνολο της ύλης ως ένα ενιαίο μόριο, καθώς το ηλεκτρονιακό νέφος ανήκει στο σύνολο των ατόμων της.



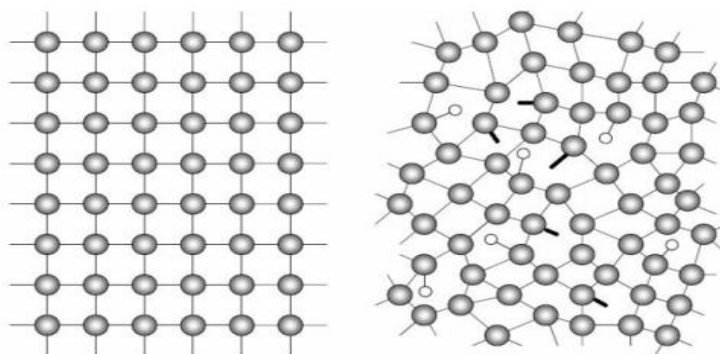
**Σχήμα 2.12:** μεταλλικός δεσμός στο Μαγνήσιο (Mg) - οι πυρήνες Μαγνησίου περιβάλλονται από νέφος ηλεκτρονίων

### 2.1.1.4 Η κρυσταλλογραφία της στερεάς ύλης

Στη στερεά κατάσταση οι δομικοί λίθοι της ύλης, βρίσκονται σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, είναι σχεδόν ακίνητοι, έχουν δηλαδή ορισμένη μάζα, ορισμένο όγκο και συγκεκριμένο σχήμα. Για την δημιουργία της στερεάς κατάστασης της ύλης, πρέπει οι δυνάμεις συνοχής (ηλεκτροστατικές ή ηλεκτρομαγνητικές) κατά τον σχηματισμό των χημικών δεσμών, μεταξύ των δομικών λιθών της (μόρια, άτομα, ιόντα), να είναι ικανές, ώστε να δημιουργήσουν μια σταθερή και καθορισμένη ηλεκτρονιακή δόμηση μεταξύ τους. Με τη σύνδεση ενός μεγάλου αριθμού ατόμων, της τάξης του  $10^{22}$ - $10^{23}$  cm<sup>-3</sup>, σε καθορισμένες θέσεις, η ύλη εμφανίζεται υπό μορφή κρυστάλλων, σχηματίζοντας το **στερεό υλικό**.

Οι δομικοί λίθοι μπορεί να είναι περιοδικά διατεταγμένα, σχηματίζοντας το **κρυσταλλικό στερεό** ή μη περιοδικά (τυχαία), οπότε σχηματίζουν το **άμορφο στερεό**. Υπάρχουν όμως, στερεό υλικό, που δεν είναι δυνατό να καταταχθεί σε καμία από τις δύο παραπάνω κατηγορίες, τα οποία σε δεδομένη περιοχή θερμοκρασιών και υπό την επίδραση συγκεκριμένης πίεσης, τα άτομα σχηματίζουν ηλεκτρονιακή δόμηση, όπως αυτή των κρυστάλλων, ενώ παραμένουν ρευστά. Το υλικό καλείται **μεσομορφικό στερεό** και αντιπροσωπεύεται από τον **υγρό κρύσταλλο**, που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρονική τεχνολογία.

Η κρυσταλλική κατάσταση της στερεάς ύλης, είναι η κύρια κανονική μορφή των στερεών υλικών, ενώ ο σχηματισμός της άμορφης κατάστασης, απαιτεί ειδικές συνθήκες δημιουργίας. Ο τρόπος διάταξης των δομικών λιθών των στερεών υλικών, στο εσωτερικό του κρυστάλλου, αποτελεί την εσωτερική δομή του. Ολόκληρο το κρυσταλλικό οικοδόμημα, έχει ασυνεχή χαρακτήρα, καθώς σχηματίζονται ξεχωριστά κέντρα μάζας. Αν τα κέντρα αυτά, είναι διατεταγμένα συμμετρικά, σε σταθερές αποστάσεις μεταξύ τους, ενθούν με ευθείες γραμμές, σχηματίζεται το **κρυσταλλικό πλέγμα** της στερεάς ύλης.



**Σχήμα 2.12:** δομή πλέγματος ατόμων του (α) κρυσταλλικού στερεού υλικού και (β) άμορφου στερεού υλικού

Η κρυστάλλωση των στερεών υλικών, είναι δυνατό, να διεξαχθεί σε ιδανικές συνθήκες, δηλαδή ο κρύσταλλος να αναπτυχθεί ομαλά σε όλο το όγκο της ύλης, σχηματίζοντας έτσι το **μονοκρυσταλλικό στερεό**, που έχει ενιαίο χαρακτήρα. Σε κανονικές συνθήκες όμως, διάφορες αιτίες προκαλούν τη διακοπή της συνεχούς κρυστάλλωσης, στα πλαίσια μικρών περιοχών (κόκκων), δίνοντας έναν ασυνεχή χαρακτήρα στην ηλεκτρονιακή δόμηση του, σχηματίζοντας το **πολυκρυσταλλικό στερεό**.

Τέλος, τα άμορφα στερεά σώματα, τα υγρά και τα αέρια, χαρακτηρίζονται ως **ισότροπα υλικά**, δηλαδή οι φυσικές τους ιδιότητες είναι ίδιες σε όλες τις διευθύνσεις εντός της μάζας τους. Τα σώματα αυτά δεν έχουν καθορισμένο σημείο τήξης. Ως **ανισότροπα υλικά**, θεωρούνται τα κρυσταλλικά στερεά σώματα, οι φυσικές ιδιότητες των οποίων, παρουσιάζουν διαφορές σε διάφορες κατευθύνσεις εντός της μάζας τους.



### 2.1.2 Η ενεργειακή ικανότητα της στερεάς ύλης

---

Όπως είναι γνωστό, από την κβαντομηχανική και ηλεκτρονιακή θεωρία, όσο χαμηλότερο δραστικό πυρηνικό φορτίο έχει το άτομο ενός χημικού στοιχείου (μικρότερη ατομική ακτίνα  $r$ , μικρότερος ατομικός αριθμός  $Z$ , ασθενέστερες ελκτικές δυνάμεις), δηλαδή όσο πιο ηλεκτροθετικό είναι το χημικό στοιχείο, τόσο πιο εύκολα μπορεί κάποιο ηλεκτρόνιο να αποδεσμευτεί από το άτομο, όταν λάβει την κατάλληλη ενέργεια ιοντισμού ( $E_i \geq E_n$ ), ώστε να αποτελέσει ελεύθερο ηλεκτρόνιο.

Κατά τον ιοντισμό των ατόμων της ύλης, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που είναι δυνατόν να προκύψουν, ύστερα από και την διάσπαση των χημικών δεσμών τους, κινούνται με τυχαία φορά σε όλη την έκταση της ύλης. Υπό την επίδραση όμως, εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια τίθενται σε κίνηση με προσανατολισμένη φορά, με αποτέλεσμα την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ύλης, δηλαδή την εμφάνιση ροής ηλεκτρικού ρεύματος δια μέσω της μάζας της.

Η ενεργειακή ικανότητα της ύλης, εξετάζεται στη στερεά κατάσταση της, καθώς οι δομικοί λίθοι της, είναι πιο σταθεροί ώστε να παρατηρηθεί η συμπεριφορά τους και εξηγείται, με βάση το **μοντέλο ενεργειακών ζωνών** των ηλεκτρονίων της στερεάς κατάστασης της ύλης, όπου μελετάται η ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων, δηλαδή η κίνηση τους, μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργούν οι πυρήνες της ύλης, οι οποίοι σχηματίζουν ένα ιδανικά επαναλαμβανόμενο πλέγμα.

Η ιδανική περιοδικότητα, χαρακτηρίζεται από απουσία θερμικής ταλάντωσης των δομικών λίθων της ύλης, όταν παράγουν, υπό μορφή θερμικής ενέργειας, την απορροφούμενη ενέργεια (θερμική αποδιέγερση ηλεκτρονίων), όπως περιγράφεται στη παράγραφο (1.1.2) για την εκπομπή σωμάτων, άρα η ύλη χαρακτηρίζεται από απουσία θερμοκρασίας. Αποτέλεσμα της ιδανικότητας, είναι η απουσία αντίστασης στην κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, δια μέσω της μάζας του στερεού υλικού.

Φυσικά, σε κανονικές συνθήκες του στερεού υλικού, χαρακτηρίζεται από παραμέτρους που οδηγούν σε απόκλιση από την ιδανικότητα της κατάστασης του, όπως οι θερμικές ταλαντώσεις των δομικών λίθων του κατά την απορρόφηση ενέργειας (θερμική διέγερση-αποδιέγερση), οι κατασκευαστικές ατέλειες του πλέγματος του (πολυκρυσταλλικό υλικό), αλλά και τυχόν παρουσία σε αυτό, ιόντων από προσμείξεις (χημικές ενώσεις στοιχείων).

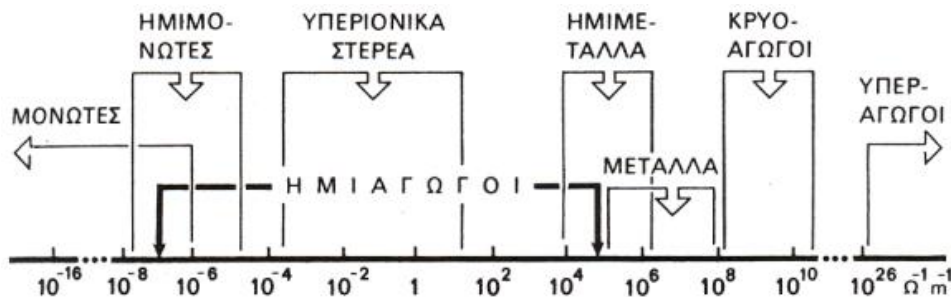
Οι παράμετροι αυτοί, εισάγουν την έννοια **ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$**  της ύλης, κατά την κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, δια μέσω της μάζας της, δηλαδή της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος.

Από ηλεκτρική άποψη, η διάκριση της στερεάς κατάστασης της ύλης, πραγματοποιείται σε τρεις βασικές κατηγορίες στερεών υλικών, τα **αγώγιμα (μέταλλα ή αγωγοί)**, **ημιαγώγιμα (ημιαγωγοί)** και **μη αγώγιμα (διηλεκτρικά ή μονωτές) υλικά**. Βασικό κριτήριο της κατάταξης αυτής, αποτελεί η ένταση της αγωγιμότητας του στερεού υλικού, δηλαδή η ένταση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος δια μέσω της μάζας του. Στη συνέχεια, γίνεται η διάκριση των στερεών υλικών, σύμφωνα με την ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$  της ύλης και το μοντέλο των ενεργειακών ζωνών των ηλεκτρονίων.

### 2.1.2.1 Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση της στερεάς ύλης

Ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι καθοριστικός για την αγωγιμότητα της ύλης, καθώς τα στερεά υλικά που μπορούν να διαθέσουν τα περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια, τα οποία υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου μπορούν να δεχτούν μια ορισμένη φορά κίνησης, δια μέσω της μάζας τους, αποτελούν τα αγώγιμα υλικά. Αντίθετα, με ελάχιστα ελεύθερα ηλεκτρόνια, αποτελούν τα μη αγώγιμα υλικά. Με σχεδόν ενδιάμεση ποσότητα ελεύθερων ηλεκτρονίων, από τις δύο προηγούμενες, αποτελούν τα ημιαγώγιμα υλικά.

Η ηλεκτρική ικανότητα των παραπάνω κατηγοριών, σε κανονικές συνθήκες με θερμοκρασία υλικού  $\sim 300$  K (θερμοκρασία περιβάλλοντος  $18-20^\circ\text{C}$ ), όπου γίνονται αποδεκτές οι ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών υλικών, μπορεί να εξεταστεί σύμφωνα με την ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$  της ύλης, που αναφέρεται στη στοιχειακή σύστασή (χημικό στοιχείο παρασκευής) τους και εκφράζει το ποσοστό διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος, διαμέσου της μάζας τους. Στο παρακάτω σχήμα, αποτυπώνεται η διάκριση της ηλεκτρικής ικανότητας της ύλης, βάση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho$  της, όπου παρουσιάζονται τεράστιες διαφορές στις τιμές των κύριων κατηγοριών στερεών υλικών.



Σχήμα 2.13: κατάταξη στερεών υλικών βάσει της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Βάση της διάκριση της ηλεκτρικής ικανότητας της ύλης, παρατηρείται μια διαφορά 23 τάξεων μεγέθους, της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho$  των στερεών υλικών. Η διάφορα εξηγείται από τη σωματιδιακή θεωρία της ηλεκτρονιακής δόμησης και συγκεκριμένα από την **ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma$**  της ύλης, που αποτελεί το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho$  της ( $\rho = 1/\sigma$ ) και τεκμηριώνει την παραπάνω διάκριση των τριών κύριων κατηγοριών στερεών υλικών, βάση τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων που διαθέτουν.

Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma$  του υλικού, αναφέρεται εξίσου, όπως είναι φυσικό, στη στοιχειακή σύστασή του και συγκεκριμένα στο ένα είδος φορέων αγωγιμότητας του, δηλαδή των ελεύθερων ηλεκτρονίων ή των θετικών ιόντων, στην πυκνότητα, στην ευκινησία και το ηλεκτρικό φορτίο, αυτών των φορέων ( $\sigma = n * q * \mu$ ).

Οι υψηλές τιμές της ειδικής αγωγιμότητας  $\sigma$  των αγωγών, δικαιολογείται από την πολύ μεγάλη συγκέντρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων ( $10^{23}$  ανά  $\text{cm}^3$ ) και οφείλεται στην ασθενή σταθερότητα των ηλεκτροθετικών στοιχείων των μετάλλων του Π.Π. (μεγαλύτερη ατομική ακτίνα, μικρότερος ατομικός αριθμός, ασθενέστερες ελκτικές δυνάμεις), όπου και προέρχονται.

Οι μικρές τιμές της ειδικής αγωγιμότητας  $\sigma$  των μονωτών, δικαιολογείται από την μικρή συγκέντρωση ελευθέρων ηλεκτρονίων ( $10^{13}$  ανά  $\text{cm}^3$ ) και οφείλεται στην ισχυρή σταθερότητα των

ηλεκτροαρνητικών στοιχείων των αμέταλλων του Π.Π. (μικτότερη ατομική ακτίνα, μεγαλύτερος ατομικός αριθμός, ισχυρότερες ελκτικές δυνάμεις), όπου και προέρχονται.

Η ειδική αγωγιμότητα  $\sigma$  των ημιαγωγών, παίρνει ενδιάμεσες τιμές, στις αντίστοιχες των μετάλλων και μονωτών, λόγω της συγκέντρωσης ελεύθερων ηλεκτρονίων και οφείλεται στην σταθερότητα των στοιχείων των ημιμετάλλων του Π.Π, όπου και προέρχονται, σε σχέση με τα ηλεκτροθετικότερα στοιχεία των μετάλλων και τα ηλεκτροαρνητικότερα στοιχεία των αμέταλλων.

Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma$  της ύλης, είναι η βασική παράμετρος διάκρισης της αγωγιμότητας ανάμεσα στα στερεά υλικά, καθώς αναφέρεται στη στοιχειακή σύστασή τους, αλλά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και άλλοι παράμετροι, οι οποίοι επιδρούν στη φύση της ύλης, μεταβάλλοντας τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών υλικών. Η αύξηση της θερμοκρασίας, οι προσμίξεις που εισάγονται στη μάζα τους, οι κατασκευαστικές ατέλειες, είναι παράμετροι που επιδρούν στα στερεά υλικά.

Η **αύξηση θερμοκρασίας** των στερεών υλικών, προκαλεί μεταβολή της αγωγιμότητας τους, καθώς σε κάποια, η θερμότητα προκαλεί αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho$  τους, ενώ σε άλλα, προκαλεί μείωση (θετικός  $\rho_{\theta}$  ή αρνητικός  $\rho_{\alpha}$  συντελεστής). Οι μεγάλες τιμές θερμότητας τους, υψηλότερες από αυτές που βρίσκονται σε κανονικές συνθήκες  $\sim 300$  K, δεν είναι αποδεκτές, καθώς τα στερεά υλικά υπερθερμαίνονται και προκαλείτε αστάθεια στην ηλεκτρονιακή δόμηση τους, με ανεπιθύμητα αποτελέσματα στις ηλεκτρικές ιδιότητες τους,

Η θερμότητα του στερεού υλικού, μπορεί να προέρχεται από το περιβάλλον, με απορρόφηση ΗΜ ακτινοβολίας (ηλιακή - γήινη ενέργεια) καθώς προκαλεί θερμική ταλάντωση των δομικών λιθών του ή με την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, καθώς η εσωτερική αντίσταση  $R$  του υλικού, σε όλο το μήκος και τη διατομή του ( $R = \rho * l/S$ ), προκαλεί θερμικές απώλειες. Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται ( $P = I^2 * R = V^2/R$ ), μετατρέπεται σε θερμική και αποτελεί τις απώλειες ισχύος (απώλειες Joule) του στερεού υλικού, αυξάνοντας την θερμοκρασία του, ενώ η υπερβολική αύξηση, μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στην καταστροφή του λόγω τήξης (θερμική διάσπαση).

Στους αγωγούς, η αύξηση της θερμοκρασίας τους, προκαλεί μείωση της αγωγιμότητας τους. Πρακτικά άγουν σε όλες τις συνθήκες θερμοκρασίας τους, καθώς ήδη με θερμοκρασία απόλυτου 0 K, διαθέτουν χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης  $\rho$ . Με θερμοκρασία των αγωγών, πάνω από τις κανονικές συνθήκες  $>300$  K, μειώνεται η αγωγιμότητα τους. Η συμπεριφορά αυτή, ορίζεται από τον θετικό συντελεστής ειδικής αντίστασης  $\rho_{\theta}$  των αγωγών, μέσω του οποίου, αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση  $R$  των αγωγών και υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, μειώνεται η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος δια μέσω της μάζας τους, ενώ αυξάνονται οι απώλειες ισχύος, με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση των αγωγών.

Στους μονωτές, η αύξηση της θερμοκρασίας τους, προκαλεί αύξηση της αγωγιμότητας τους. Πρακτικά δεν άγουν σε καμία από τις συνθήκες θερμοκρασίας τους, καθώς ήδη με θερμοκρασία στις κανονικές συνθήκες  $>300$  K, διαθέτουν υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης  $\rho$ . Με υψηλή θερμοκρασία των μονωτών, πάνω από τις κανονικές συνθήκες  $>300$  K, αυξάνεται η αγωγιμότητα τους. Η συμπεριφορά αυτή, ορίζεται από τον αρνητικό συντελεστής ειδικής αντίστασης  $\rho_{\alpha}$  των μονωτών, μέσω του οποίου, μειώνεται η εσωτερική αντίσταση  $R$  των μονωτών και υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, αυξάνεται ασθενές η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος δια μέσω της μάζας τους, ενώ αυξάνονται οι απώλειες ισχύος, με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση των μονωτών.

Λόγω της πολύ μεγάλης εσωτερικής αντίστασης  $R$  του μονωτή, όταν η διαφορά δυναμικού του εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, αυξάνει βαθμιαία και ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή, μεγαλύτερης τιμής από της θερμικής διάσπασης, τότε δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο, που οδηγεί στη διάτρηση του υλικού και τη καταστροφή της δομής του (ηλεκτρομηχανική διάσπαση), ενώ δεν συμπεριφέρεται ως μονωτής αλλά ως αγωγός. Έτσι, ορίζεται η διηλεκτρική αντοχή  $E_d$  του μονωτή, που δηλώνει τη ελάχιστη τιμή τάσης, ικανής για τη διάτρηση του, την τάση διάτρησης  $V_d$ , προς το πάχος  $d$  του μονωτή ( $E_d = V_d/d$ ).

Για μεγάλη χρονική περίοδο σε συνθήκες υπερθέρμανσης και υπό επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, προκαλούνται βλάβες στην ηλεκτρονιακή δομή του μονωτή, με αποτέλεσμα την μείωση της εσωτερικής αντίστασης  $R$  του υλικού, που οδηγεί και στη μείωση της απαιτούμενης τιμής, για να προκληθεί τάση διάτρησης (διάσπαση μερικών εκκενώσεων ή γήρανση μονωτή).

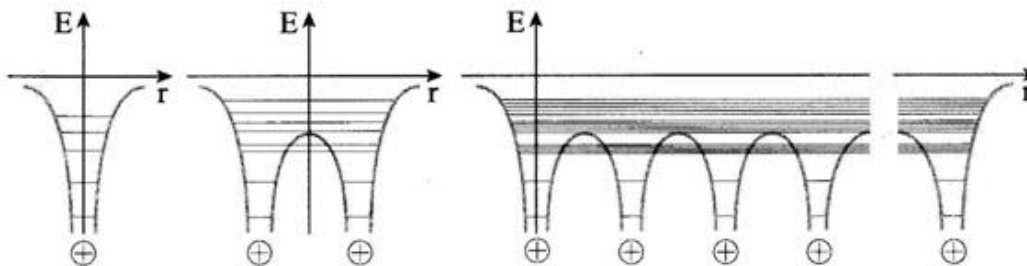
Στους ημιαγωγούς, η αύξηση της θερμοκρασίας τους, προκαλεί αύξηση της αγωγιμότητας τους. Πρακτικά, η αγωγιμότητα τους, σε σύγκριση με τους αγωγούς και τους μονωτές, εξαρτάται περισσότερο από την θερμοκρασία τους. Με συνθήκες θερμοκρασίας τους στο απόλυτο 0 K, δεν άγουν και συμπεριφέρονται ως μονωτές. Με αύξηση της θερμοκρασίας τους, άγουν ασθενές και με κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας τους ~300 K, συμπεριφέρονται ως αγωγοί καθώς άγουν, ασθενέστερα όμως, λόγω μεγαλύτερης ειδικής αντίστασης  $\rho$ , από τους αγωγούς. Η συμπεριφορά αυτή, ορίζεται από τον αρνητικό συντελεστή ειδικής αντίστασης  $\rho_\alpha$  των ημιμετάλλων, μέσω του οποίου, μειώνεται η εσωτερική αντίσταση  $R$  τους και υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, αυξάνεται η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος δια μέσω της μάζας τους, ενώ οι απώλειες ισχύος που εμφανίζονται είναι ασθενείς. Με θερμοκρασία πάνω από τις κανονικές συνθήκες >300 K, αυξάνεται η αγωγιμότητα τους, ως ένα σημείο κορεσμού, ενώ αυξάνονται οι απώλειες ισχύος, με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση των ημιαγωγών.

Η **εισαγωγή προσμείξεων**, στο κρυσταλλικό πλέγμα των στερεών υλικών (χημικές ενώσεις στοιχείων), συνοδεύεται με διάσπαση της κανονικής ηλεκτρονιακής δόμησης των ατόμων, δηλαδή των χημικών στοιχείων, από τα οποία έχουν προέλθει τα στερεά υλικά. Στους αγωγούς, δημιουργούνται διάφορα κράματα με ειδική αντίσταση  $\rho$ , μεγαλύτερη από αυτήν των χημικών στοιχείων απ όπου προήλθαν. Στους ημιαγωγούς όμως, παρατηρείται ότι η ειδική αντίσταση  $\rho$  των κραμάτων, είναι πολύ μικρότερη από την ειδική αντίσταση  $\rho$  των χημικών στοιχείων απ όπου προήλθαν. Κάτι αντίστοιχο με τους ημιαγωγούς συμβαίνει και τους μονωτές, προκαλώντας όμως μια μικρή μείωση της ειδικής αντίστασης  $\rho$  των κραμάτων τους, με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης ελεύθερων ηλεκτρονίων και την μείωση της διηλεκτρική αντοχή τους.

Τέλος, οι **κατασκευαστικές ατέλειες** μπορούν να θεωρηθούν ως περιοχές όπου το κρυσταλλικό πλέγμα του στερεού υλικού έχει υποστεί παραμόρφωση, αποκλίνει δηλαδή από την κανονική περιοδική δομή του. Σε τέτοιες περιοχές, οι δεσμοί μεταξύ των ηλεκτρονίων σθένους μπορεί να είναι ασθενέστεροι και τα ηλεκτρόνια που τους σχηματίζουν, μπορούν ευκολότερα να αποδεσμευθούν από αυτούς, υποβοηθούμενα π.χ. από τη θερμοκρασία ή υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Έτσι, οι κατασκευαστικές απώλειες, συνεπάγονται την μείωση της ειδικής αντίστασης  $\rho$  των στερεών υλικών, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων. Με κανονικές όμως, συνθήκες θερμοκρασίας τους και υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, συμβάλουν στην αύξηση των απωλειών ισχύος και της υπερθέρμανσης των στερεών υλικών.

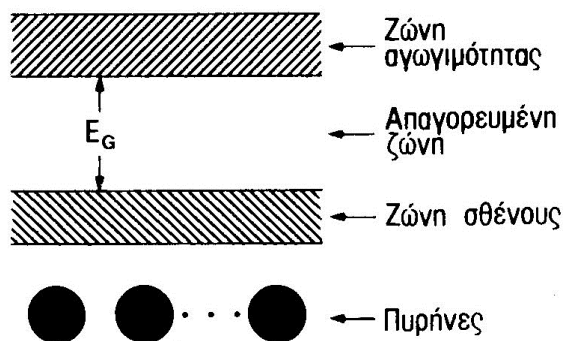
### 2.1.2.2 Οι ενεργειακές ζώνες ηλεκτρονίων της στερεάς ύλης

Σύμφωνα με τη κβαντομηχανική θεωρία και τις ενεργειακές στάθμες ηλεκτρονίων (κβαντισμένες στιβάδες), κάθε ηλεκτρόνιο μπορεί να βρίσκεται σε αυστηρά καθορισμένη στάθμη. Σε σύνολο  $N$  ατόμων, όπως τα στερεά υλικά, δεν υπάρχουν ξεχωριστές ενεργειακές στάθμες, αλλά **ενεργειακές ζώνες**, στις οποίες είναι δυνατό να βρίσκονται τα ηλεκτρόνια, σε περισσότερες από μία ενεργειακές θέσεις, εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με τα ηλεκτρόνια των γειτονικών ατόμων. Μέσα σε μια ενεργειακή ζώνη, οι ενεργειακές στάθμες εξακολουθούν να είναι διακεκριμένες, ο αριθμός τους όμως είναι τόσο μεγάλος, που δίνουν την έννοια της ζώνης, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 2.14:** ενεργειακές στάθμες (α) ενός ατόμου, (β) δύο ατόμων ενός μορίου και (γ)  $N$  ατόμων ενός στερεού υλικού

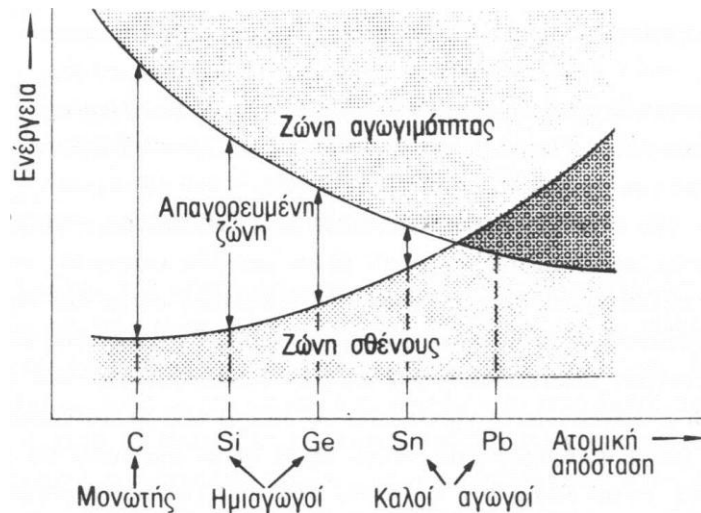
Για την κατανόηση της ηλεκτρικής ικανότητας των στερεών υλικών, χρησιμοποιείται το μοντέλο των ενεργειακών ζωνών ηλεκτρονίων, κατά την ιδανική κατάσταση τους. Από τη μελέτη των ενεργειακών ζωνών για  $N$  άτομα, προκύπτει το γενικό περίγραμμα των ενεργειακών ζωνών του στερεού υλικού, όπως αποτυπώνεται στο επόμενο σχήμα. Τα  $N$  άτομα του στερεού υλικού, θεωρούνται με συνθήκες θερμοκρασίας απόλυτου  $0\text{ K}$ , στην οποία τα άτομα, βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση, με τα ηλεκτρόνια να κινούνται σε μικρότερη, κατά το δυνατόν ενέργεια, καθώς δεν παρουσιάζονται θερμικές ταλάντωσης θετικών ιόντων και διεγέρσεις-αποδιεγέρσεις ηλεκτρονίων, απορροφώντας ενέργεια.



**Σχήμα 2.15:** γενικό περίγραμμα μοντέλου ενεργειακών ζωνών στερεού υλικού

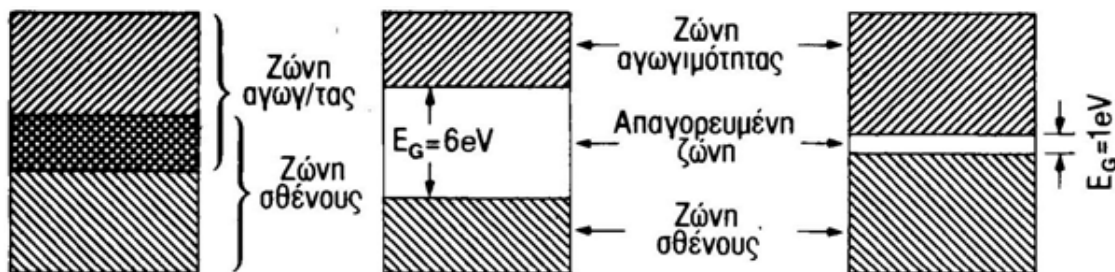
Η κάτω ζώνη, που περιλαμβάνει τα ηλεκτρόνια σθένους, καλείται **ζώνη σθένους** και μπορεί να είναι πλήρως ή μερικά συμπληρωμένη. Πιο πάνω από τη ζώνη σθένους, υπάρχει η απαγορευμένη ζώνη, που καλείται **ενεργειακό διάκενο  $E_g$** , το οποίο δεν έχει καμιά ενεργειακή στάθμη, άρα δεν μπορεί να υπάρξει κανένα ηλεκτρόνιο. Η πάνω ζώνη, καλείται **ζώνη αγωγιμότητας**, στην οποία μεταβαίνουν τα ηλεκτρόνια σθένους, όταν απορροφήσουν ικανή ενέργεια, τιμής ίση ή μεγαλύτερη του διακένου  $E_g$ , ώστε να το υπερπηδήσουν και να αποτελέσουν φορείς αγωγιμότητας, που υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, μπορούν να δεχτούν μια ορισμένη φορά κίνησης, συμβάλλοντας στην αγωγιμότητα του στερεού υλικού.

Η τιμή του ενεργειακού διακένου  $E_g$ , εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των ατόμων στο περιοδικό κρυσταλλικό πλέγμα και αυτή πάλι, από το μέγεθος των ατόμων, δηλαδή την ατομική ακτίνα  $r$ . Όσο πιο μικρή είναι η απόσταση μεταξύ των ατόμων, τόσο το εύρος του ενεργειακού διακένου μεγαλώνει.



Σχήμα 2.17: μεταβολή ενεργειακού διακένου υλικών συναρτήσει της απόστασης μεταξύ ατόμων

Από το γενικό περίγραμμα του μοντέλου των ενεργειακών ζωνών ηλεκτρονίων, προκύπτει, πως το εύρος του ενεργειακού διακένου  $E_g$ , αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του στερεού υλικού, καθώς αποτελεί βασική παράμετρο για την αγωγιμότητα του. Ανάλογα λοιπόν με το εύρος του διακένου, αποτυπώνονται στο παρακάτω σχήμα, τα περιγράμματα ενεργειακών ζωνών, των τριών κύριων κατηγοριών στερεών υλικών, μέταλλα ή αγωγοί, ημιαγωγοί και μονωτές ή διηλεκτρικά, που έχουν διαμορφωθεί και παραπάνω, σύμφωνα με την ειδική αντίσταση  $\rho$  των υλικών.



Σχήμα 2.16: ενεργειακές ζώνες στα (α) μέταλλα, (β) μονωτές και (γ) ημιαγωγούς

Σύμφωνα με τα όσα έχουν αναφερθεί, το ενεργειακό διάκενο  $E_g$  που αποτυπώνεται στο παραπάνω σχήμα, σε κανονικές συνθήκες, χαρακτηρίζει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$ , που παρουσιάζει το υλικό κατασκευής των στερεών υλικών, καθώς και στις δύο περιπτώσεις δηλώνουν την ευκολία ή δυσκολία, με την οποία τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μετακινούνται διαμέσου της μάζας τους, εξαρτώμενη, από την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma$  του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο (χημικά στοιχεία) και των παραμέτρων αποκλίσεων από τις ιδανικές συνθήκες (θερμική διέγερση ηλεκτρικών φορέων, κατασκευαστικές ατέλειες περιοδικής δομής, ιόντα προσμείξεων). Παρακάτω, περιγράφονται οι ηλεκτρικές ιδιότητες του κάθε στερεού υλικού.

### **Μέταλλα ή αγωγοί (conductors) :**

Τα υλικά αυτά, χαρακτηρίζονται από έλλειψη του ενεργειακού διακένου, καθώς η ζώνη σθένους επικαλύπτεται από τη ζώνη αγωγιμότητας. Ήδη, από τη θερμοκρασία απόλυτου 0 K, πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας, από την επικάλυψη των δύο ζωνών, και κινούνται ελεύθερα σε τυχαίες κατευθύνσεις. Έτσι, με την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας κινούνται προς την κατεύθυνση του πεδίου και δημιουργούν ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Επομένως, σε συνήθεις θερμοκρασίας ~300 K, δεν χρειάζεται να προστεθεί κανένα ποσό ενέργειας, στα ηλεκτρόνια σθένους, όπως την θερμική ενέργεια της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (θερμική διέγερση) ή απορρόφηση ενέργειας εξωτερικής ΗΜ ακτινοβολίας, για να μεταβούν στη ζώνη αγωγιμότητας.

Η επικάλυψη του ενεργειακού διακένου, που αποτυπώνεται στο σχήμα, σε κανονικές συνθήκες προκύπτει από τα χημικά στοιχεία των υλικών αυτών. Καθώς τα στοιχεία τους ανήκουν στην ομάδα των μετάλλων του Π.Π, η επικάλυψη οφείλεται στην ασθενή σταθερότητα των ηλεκτροθετικών στοιχείων (μεγαλύτερη ατομική ακτίνα, μικρότερος ατομικός αριθμός, ασθενέστερες ελκτικές δυνάμεις), με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να χρειάζονται μόνο την ενέργεια των ελκτικών δυνάμεων από γειτονικά άτομα, ώστε να μεταβαίνουν εύκολα, από άτομο σε άτομο, δημιουργώντας έτσι ένα σύννεφο ελευθέρων ηλεκτρονίων (μεταλλικοί δεσμοί θετικών ιόντων), χωρίς την απορρόφηση πρόσθετης ενέργειας.

Η υψηλή αύξηση της θερμοκρασίας πέραν τις συνήθεις >300 K (υπερθέρμανση), δε προκαλεί αύξηση ελευθέρων ηλεκτρονίων (θερμική διέγερση), αλλά έχει ως συνέπεια την αύξηση της εσωτερικής αντίστασης  $R$  των υλικών και όχι της αγωγιμότητας. Αυτή η αύξηση της εσωτερικής αντίστασης  $R$ , προκύπτει καθώς αυξάνεται η ταλάντωση των ατόμων, από την αύξηση της θερμικής ενέργειας, προκαλώντας ελάττωση της μετατόπισης των ελευθέρων ηλεκτρονίων (σύννεφο ηλεκτρονίων), μεταξύ των θετικών ιόντων, με αποτέλεσμα τη μείωση της αγωγιμότητας των μετάλλων και την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος, δια μέσω της μάζας τους.

### **Μονωτές ή διηλεκτρικά (insulators) :**

Το μεγάλο σχετικά εύρος του ενεργειακού διακένου ~6 eV, αποτελεί κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα των υλικών αυτών. Ήδη από τη θερμοκρασία απόλυτου 0 K, είναι πολύ δύσκολο τα ηλεκτρόνια σθένους να υπερπηδήσουν το ενεργειακό διάκενο και να μεταβούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Επίσης, σε συνήθεις θερμοκρασίες ~300 K, δεν αποδίδεται στο υλικό ικανή θερμική ενέργεια της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στα ηλεκτρόνια σθένους, ώστε να υπερπηδήσουν το ενεργειακό διάκενο και να μεταβούν στη ζώνη αγωγιμότητας, για να συμβάλλουν στην αγωγιμότητα του υλικού. Έτσι, θα πρέπει τα ηλεκτρόνια σθένους, να απορροφήσουν ενέργεια ΗΜ ακτινοβολίας, αρκετά μεγαλύτερης τιμής από του διακένου, όμως αποτελεί μη αποδεκτή ενέργεια, καθώς προκαλεί τη καταστροφή του υλικού (διάτρηση).

Το μεγάλο εύρος του ενεργειακού διακένου, που αποτυπώνεται στο σχήμα, σε κανονικές συνθήκες προκύπτει από τα χημικά στοιχεία των υλικών αυτών. Καθώς τα στοιχεία των υλικών αυτών ανήκουν στην ομάδα των αμέταλλων του Π.Π, το μεγάλο εύρος, οφείλεται στην ισχυρή σταθερότητα των ηλεκτροαρνητικών στοιχείων (μικτότερη ατομική ακτίνα, μεγαλύτερος ατομικός αριθμός, ισχυρότερες ελκτικές δυνάμεις), με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια σθένους, να χρειάζονται μεγάλο ποσό πρόσθετης ενέργειας, ώστε να σπάσουν τους ομοιοπολικούς δεσμούς τους και να μεταβούν, σε οπή (κενή θέση) άλλου ατόμου.

Σε υψηλές θερμοκρασίες πέραν τις συνήθεις  $>300$  K (υπερθέρμανση), ένας αριθμός ηλεκτρονίων σθένους, απορροφούν την απαιτούμενη θερμική ενέργεια, μεταβαίνουν στη ζώνη αγωγιμότητας και υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, δημιουργούν ένα ασθενές ηλεκτρικό ρεύμα. Όταν η τάση, από το ηλεκτρικό πεδίο, αυξάνει βαθμιαία και ξεπεράσει κάποια τιμή (τάση διάτρησης), τότε δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο, που οδηγεί στη διάτρηση του υλικού και τη καταστροφή της δομής του υλικού. Για μεγάλη χρονική περίοδο υπό επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, προκαλούνται βλάβες στην ηλεκτρονική δομή του υλικού, προκαλώντας την γήρανση του, με αποτέλεσμα την μείωση της εσωτερικής αντίστασης  $R$  του υλικού, που οδηγεί και στη μείωση της απαιτούμενης τιμής, για να προκληθεί τάση διάτρησης.

### **Ημιαγωγοί (semiconductors) :**

Η διάκριση των υλικών αυτών, είναι το μικρό εύρος του ενεργειακού διάκενου που έχουν  $\sim 0,5-2$  eV, σε αντίθεση από τους μονωτές. Στη θερμοκρασία απόλυτου 0 K, τα ηλεκτρόνια σθένους δεν απορροφούν ικανή ενέργεια, ώστε να μεταβούν στη ζώνη αγωγιμότητας και να συμβάλλουν στην αγωγιμότητα των υλικών, οπότε συμπεριφέρονται εν μέρη ως μονωτές. Σε συνήθεις θερμοκρασίες  $\sim 300$  K, αντίθετα με τους μονωτές, λόγω του μικρού εύρους του ενεργειακού διακενου που έχουν οι ημιαγωγοί, μερικά ηλεκτρόνια σθένους, απορροφούν ικανή θερμική ενέργεια της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (θερμική διέγερση) ή ενέργεια εξωτερικής ΗΜ ακτινοβολίας και μεταβαίνουν, από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, συμβάλλοντας στην αγωγιμότητα του υλικού, οπότε συμπεριφέρονται εν μέρη ως αγωγοί.

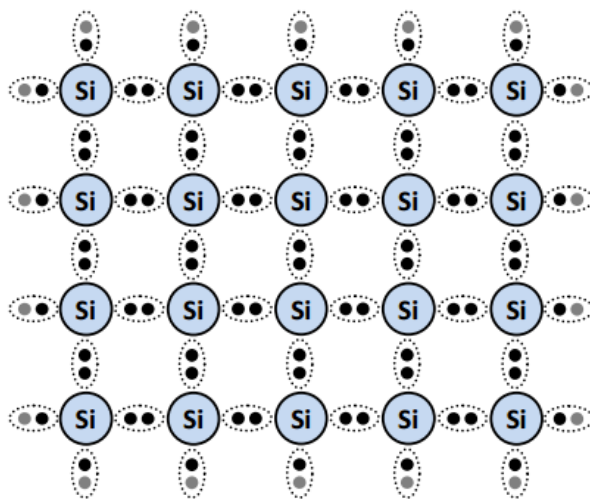
Το μικρό εύρος του ενεργειακού διακενου, που αποτυπώνεται στο σχήμα, σε κανονικές συνθήκες προκύπτει από τα χημικά στοιχεία των υλικών αυτών. Καθώς τα στοιχεία των υλικών αυτών ανήκουν στην ομάδα των ημιμετάλλων του Π.Π, το μικρό εύρος, οφείλεται στην λιγότερη ισχυρή σταθερότητα των στοιχείων (ηλεκτροθετικότερα), σε σχέση με τα ηλεκτροαρνητικά στοιχεία των αμέταλλων στους μονωτές, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια σθένους, να χρειάζονται μικρότερο ποσό πρόσθετης ενέργειας, ώστε να σπάσουν τους ομοιοπολικούς δεσμούς τους και να μεταβούν, σε οπή (κενή θέση) άλλου ατόμου.

Σε αύξηση της θερμοκρασίας πέραν τις συνήθεις  $>300$  K, σε αντίθεση με τους αγωγούς, στους ημιαγωγούς προκαλείται περαιτέρω θερμική διέγερση ηλεκτρικών φορέων και εμφανίζεται μια σχετικά μεγαλύτερη αγωγιμότητα. Η αντίθεση αυτή, προκύπτει καθώς η αγωγιμότητα στους ημιαγωγούς, οφείλεται στη περιοδική διάσπαση των ομοιοπολικών δεσμών των ηλεκτρονίων και στις οπές που εμφανίζονται, ενώ στους αγωγούς, συμμετέχουν όλα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια (σύννεφο ηλεκτρονίων), που προκύπτουν από την συνεχή διάσπαση των μεταλλικών δεσμών, με αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται η κίνηση τους, από την μεγάλη ταλάντωση των ατόμων λόγω της θερμικής ενέργειας, άρα και τη μείωση της αγωγιμότητας τους.



### 2.1.3 Η τεχνολογική ανάπτυξη του κρυσταλλικού ημιαγωγού

Στην κατηγορία των ημιαγωγικών χημικών στοιχείων, ανήκουν τα τετρασθενή ( $4e^-$ ) στοιχεία, της  $4^{η}$  ομάδας του Π.Π.. Τα τετρασθενή άτομα του στοιχείου, για να αποκτήσουν σταθερή δόμηση, συνδέονται μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς, που δημιουργούνται από ελκτικές δυνάμεις ηλεκτρομαγνητικής φύσεως, των ζευγών ηλεκτρονίων που ανήκουν ταυτόχρονα σε δύο γειτονικά άτομα. Έτσι, το κάθε άτομο του τετρασθενούς στοιχείου ( $4e^-$ ), παίρνει από τα τέσσερα γειτονικά του άτομα, από ένα ηλεκτρόνιο σθένους τους και συμπληρώνει την στιβάδα σθένους του, με 8 ηλεκτρόνια. Ταυτόχρονα όμως, δίνει και από ένα δικό του ηλεκτρόνιο σθένους, στα 4 γειτονικά του άτομα. Έτσι, παρατηρείται η συνεισφορά ηλεκτρονίων σθένους μεταξύ των ατόμων, για να αποκτήσουν σταθερή ηλεκτρονιακή δόμηση.



Σχήμα 2.18: ομοιοπολικοί δεσμοί ατόμων στο κρυσταλλικό ημιαγωγικό υλικό Πυριτίου

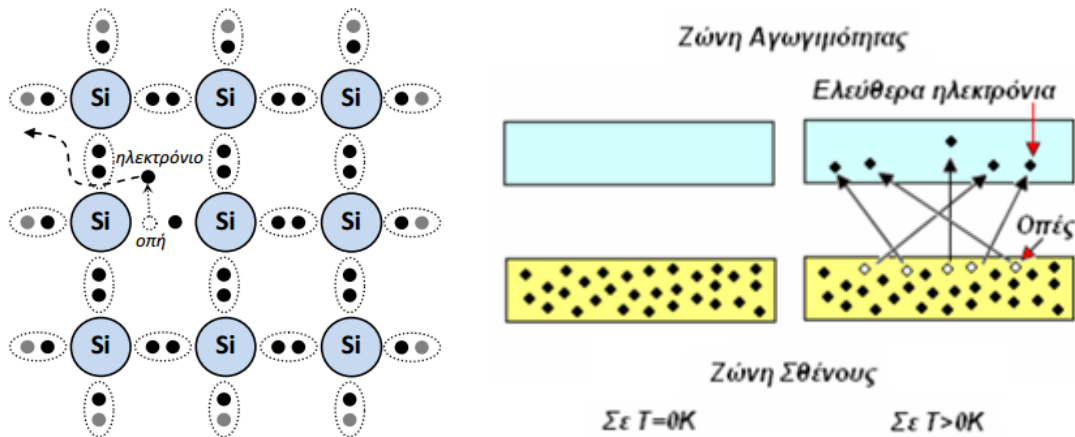
Στο παραπάνω σχήμα, απεικονίζεται το περιοδικό κρυσταλλικό πλέγμα, ενός κρυσταλλικού στερεού ημιαγωγού (Πυριτίου). Η ενέργεια που απαιτείται, για τη διάσπαση των ομοιοπολικών δεσμών των ηλεκτρονίων, ώστε να συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα του κρυσταλλικού στερεού ημιαγωγού, είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η ηλεκτροαρνητικότητα των ατόμων, του χημικού στοιχείου κατασκευής του υλικού, επειδή τότε ασκείται η ισχυρότερη ελκτική δύναμη στα ηλεκτρόνια σθένους, από τους πυρήνες. Καθώς ημιαγωγικά στοιχεία αποτελούν μόνο της  $4^{η}$  ομάδας του Π.Π. με 4 ηλεκτρόνια σθένους, η ηλεκτροαρνητικότητα τους οφείλεται στην ατομική ακτίνα των ατόμων, οπότε η ηλεκτροαρνητικότητα τους μειώνεται από πάνω προς τα κάτω, κατά μήκος της στήλης τους στο Π.Π..

Η παραπάνω κατάσταση της ηλεκτρονιακής δόμησης του κρυσταλλικού πλέγματος ενός ημιαγωγικού υλικού, θεωρείται στις ιδανικές συνθήκες του (θερμοκρασία 0 K, απουσία προσμίξεων-κατασκευαστικών ατελειών). Στις κανονικές συνθήκες, το υλικό διακρίνεται σε **ενδογενή ημιαγωγό** (αυτοτελή), ο οποίος χαρακτηρίζεται από την ίδια στοιχειακή σύνθεση, σε όλη την έκτασή του, σε όσο μικρό όγκο και αν εξεταστεί και σε **ημιαγωγό πρόσμειξης**. Ο τελευταίος δημιουργείται όταν ένας ενδογενής ημιαγωγός, εμπλουτιστεί (νοθευτεί) με κατάλληλο τρόπο, με άτομα άλλου χημικού στοιχείου, ενώ αποδεικνύεται εξαιρετικά σημαντικός, για τη σύγχρονη τεχνολογία των ηλεκτροτεχνικών και ηλεκτρονικών, όπως ο **ημιαγωγός επαφής P-N**, στον οποίο βασίζεται η φωτοβολταϊκή τεχνολογία.

### 2.1.3.1 Ο ενδογενής ή αυτοτελής κρυσταλλικός ημιαγωγός

Σε ιδανικές συνθήκες ενός κρυσταλλικού ημιαγωγού, δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια και γι αυτό είναι αδύνατη η μετακίνησή τους, άρα και η εκδήλωση ηλεκτρικής αγωγιμότητας, καθιστώντας τον ημιαγωγό ηλεκτρικά ουδέτερο, καθώς συμπεριφέρονται ως μονωτής. Σε κανονικές συνθήκες, υπό την επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος  $\sim 300$  K, είτε επίσης λόγω κατασκευαστικών ατελειών στη δομή του, παρουσιάζονται διασπάσεις των ομοιοπολικών δεσμών των ηλεκτρονίων, μεταξύ των ατόμων του ίδιου τετρασθενούς ( $4e^-$ ) χημικού στοιχείου. Έτσι, υπάρχουν οι προϋποθέσεις αγωγιμότητας, της **ενδογενής αγωγιμότητας**, ωστόσο θα είναι πολύ μικρή, καθώς προκύπτει από το πολύ μικρό αριθμό ηλεκτρονίων, που έχουν την απαιτούμενη ενέργεια  $E_g$ , ώστε να μεταβούν στην ζώνη αγωγιμότητας. Στην περίπτωση αυτή, προκύπτει ο καθαρός **ενδογενής ημιαγωγός** (intrinsic semiconductors).

Κατά τη μετακίνηση ηλεκτρονίου προς τη ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργείται μια ελεύθερη οπή (θέση) στη ζώνη σθένους και είναι θετικά φορτισμένη ( $h^+$ ), λόγω αφαίρεσης ενός αρνητικού ηλεκτρονίου ( $e^-$ ). Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, μετά το πέρας του χρόνου ζωής τους, χάνουν διαδοχικά ενέργεια και μεταπίπτουν, σε άτομα με κενή θέση ηλεκτρονίου, δηλαδή έλκονται και παγιδεύονται ξανά από τις οπές στη ζώνη σθένους. Αυτή η μετάπτωση, περιγράφεται πιο παραστατικά με κίνηση οπών, αλλά μέσα στη ζώνη σθένους, με αποτέλεσμα οι οπές να συμμετέχουν μαζί με τα ηλεκτρόνια, ως φορείς μεταφοράς ενέργειας, στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Η έλξη ελεύθερων ηλεκτρονίων, από αντίστοιχο αριθμό οπών, ονομάζεται **επανασύνδεση φορέων**, αποκαθιστώντας πάλι το κάθε άτομο ενεργειακά ουδέτερο.

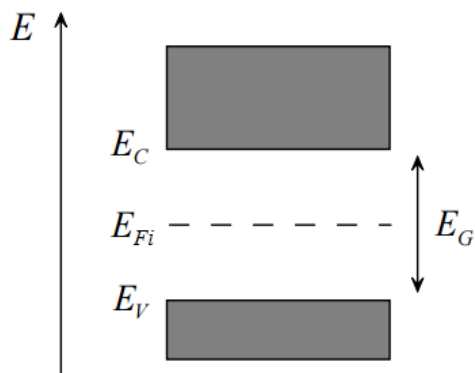


**Σχήμα 2.19:** α) διάσπαση ομοιοπολικών δεσμών σε ενδογενή ημιαγωγό Πυριτίου  
β) ρυθμός ανάπτυξης ελεύθερων ηλεκτρονίων-οπών στον ενδογενή ημιαγωγό

Στο σχεδιάγραμμα των ενεργειακών ζωνών ηλεκτρονίων των ημιαγωγών, διακρίνονται η χαμηλότερη στάθμη ενέργειας στη ζώνη αγωγιμότητα  $E_C$ , η υψηλότερη στάθμη ενέργειας στη ζώνη σθένους  $E_V$ . Επίσης, η στάθμη Fermi  $E_F$ , η οποία αποτελεί ένα δείκτη για το κατά πόσο υπάρχουν συγκεντρώσεις ελεύθερων ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας και οπών στη ζώνη σθένους, θέτοντας μια ανώτατη τιμή ενέργειας, που αποκτά το περισσότερο ευκίνητο ηλεκτρόνιο προς την ζώνη αγωγιμότητας, εντός του ημιαγωγού, υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Η ενέργεια Fermi  $E_{Fi}$ , δίνεται από την έκφραση:

$$E_{Fi} = \frac{E_C - E_V}{2} + \frac{k_B * T}{2} = \frac{1}{2} + \frac{k_B * T}{2} * E_g \quad (2.4)$$

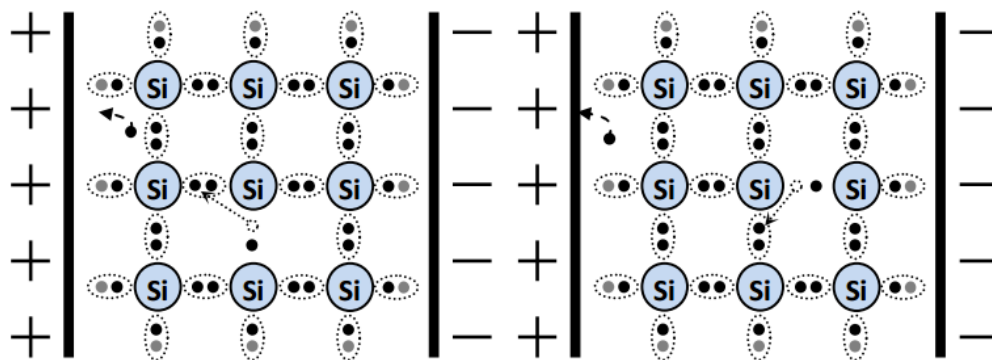
όπου,  $k_B = 1,38 * 10^{-23}$  (J/K) η σταθερά του Boltzmann και T η θερμοκρασία του σώματος.



Σχήμα 2.20: ενεργειακές στάθμες δότη ενδογενή ημιαγωγού

Έτσι, προκύπτει ότι η στάθμη Fermi  $E_{Fi}$  βρίσκεται στο μέσο του διακένου  $E_g$  και αντανακλά μια προφανή συμμετρία ανάμεσα στα ελεύθερα ηλεκτρόνια και τις οπές, ενώ μαθηματικά, η συμμετρία εκφράζεται με το νόμο δράσεων των μαζών (σχέση 2.3). Δηλαδή, η στάθμη Fermi  $E_{Fi}$  κρατάει ίσες αποστάσεις από τις δύο ενεργειακές ζώνες στις οποίες βρίσκονται αντίστοιχα, οι δύο φορείς αγωγιμότητας του ημιαγωγού.

Για καλύτερη κατανόηση της κίνησης των οπών, θεωρείται πως στο τμήμα του ενδογενούς ημιαγωγού στο σχήμα (2.19.α), στο οποίο έχει δημιουργηθεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου αγωγιμότητας-οπής εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το επόμενο σχήμα. Εξαιτίας της παρουσίας ηλεκτρικού πεδίου, όλα τα ηλεκτρόνια θα έχουν την τάση να κινηθούν, αντίθετα προς τη φορά της έντασης του πεδίου, δηλαδή προς το θετικό (+) πόλο. Ευκολότερη, θα είναι η κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, τα οποία έχουν ήδη σπάσει τους δεσμούς τους (θερμική διέγερση - ατέλειες δομής) και έχουν μεγαλύτερη ενέργεια. Αντίθετα, τα ηλεκτρόνια σθένους θα είναι πιο δυσκίνητα, μιας και τείνουν να συγκρατηθούν από τους δεσμούς που σχηματίζουν. Παρόλα αυτά, ηλεκτρόνια σθένους που γειτνιάζουν με οπές, έχουν ενέργειες ελαφρά μεγαλύτερες, σε σχέση με τα υπόλοιπα του σθένους.



Σχήμα 2.21: κίνηση οπής εντός ημιαγωγικού υλικού παρουσία ηλεκτρικού πεδίου

Ένα ηλεκτρόνιο σθένους, υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, μπορεί να μεταπηδήσει σε γειτονικό του άτομο, προκειμένου να καλύψει το ενεργειακό κενό της οπής που υπάρχει σε αυτό, όπως φαίνεται στο αριστερό σχήμα. Προφανώς, η κίνηση αυτή θα αφήσει ένα αντίστοιχο κενό (μια νέα οπή), στο άτομο από το οποίο μεταπήδησε το ηλεκτρόνιο. Η αρχική οπή, αν και δεν είναι η ίδια με τη νέα, φαίνεται να μετακινήθηκε κατά τη φορά της έντασης του πεδίου. Το φαινόμενο μπορεί να συνεχισθεί,

όπως δείχνει το δεξί σχήμα, μέχρι οπή και ηλεκτρόνιο, να καταλήξουν στους αντίθετους πόλους του πεδίου. Επειδή, όπως ήδη αναφέρθηκε, η ενέργεια των ηλεκτρονίων σθένους που μεταπηδούν από άτομο σε άτομο και προκαλούν τη κίνηση των αντίστοιχων οπών, είναι αρκετά μικρότερη της ενέργειας των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας, η ευκινησία των οπών, θα είναι μικρότερη εκείνης των ηλεκτρονίων.

Επομένως, η γένεση ηλεκτρονίων και οπών γίνεται κατά ζευγάρια, με αποτέλεσμα η **συγκέντρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων  $n_i$** , δηλαδή ο αριθμός τους ανά μονάδα όγκου, να είναι ίση με τη **συγκέντρωση οπών  $p_i$**  ( $n_i = p_i$ ). Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων και των οπών, εξαρτάται από τη θερμοκρασία του ενδογενή ημιαγωγού και δίνεται από τη σχέση:

$$n_i = p_i = A * T^{3/2} * \exp\left(\frac{-E_g}{2 * k_B * T}\right) \quad (2.2)$$

όπου,  $A$  η σταθερά που εξαρτάται από το υλικό,  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία του υλικού και  $k_B$  η σταθερά του Boltzmann.

Ο χρόνος κατά τον οποίο παραμένουν ελεύθεροι οι φορείς αγωγιμότητας (ελεύθερα ηλεκτρόνια-οπές) δεν είναι ο ίδιος για όλους, αλλά ορίζεται ένας **μέσος χρόνος ζωής ηλεκτρονίων  $\tau_e$**  και **οπών  $\tau_h$** . Ο αριθμός των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών που επανασυνδέεται, στη μονάδα του όγκου ανά μονάδα χρόνου, λέγεται **ρυθμός επανασύνδεσης φορέων  $R$**  και είναι ανάλογος, προς το γινόμενο ελεύθερων ηλεκτρονίων  $n_i$  και οπών  $p_i$ , δηλαδή την ενδογενή συγκέντρωση φορέων αγωγιμότητας στον ημιαγωγό, αποτελώντας τον **νόμο δράσεων των μαζών**:

$$R = n_i * p_i = n_i^2 \quad (2.3)$$

Επειδή ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων ή των οπών, είναι σταθερός για ορισμένη θερμοκρασία, είναι προφανές ότι ο ρυθμός επανασύνδεσης, θα είναι ίσος με τον **ρυθμό γένεσης φορέων  $G$**  (ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών), μέσα στον ενδογενή ημιαγωγό.

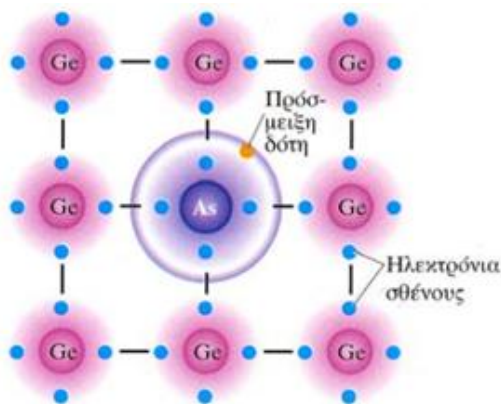
### 2.1.3.2 Ο εξωγενής ή πρόσμειξης κρυσταλλικός ημιαγωγός

Επειδή η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ενδογενή ημιαγωγού, με την αύξηση της θερμοκρασίας είναι πολύ μικρή, ο έλεγχος και η βελτίωση της αγωγιμότητας του, μπορεί να επιτευχθεί με τη εισαγωγή (νόθευση) πρόσθετων ηλεκτρικών φορέων, εντός του ενδογενούς υλικού. Η προσθήκη, επιτυγχάνεται με τις προσμίξεις χημικών στοιχείων, καθώς κάποια άτομα του τετρασθενούς ( $4e^-$ ) χημικού στοιχείου του ενδογενή ημιαγωγού, αντικαθιστούνται με άτομα ξένου χημικού στοιχείου, δημιουργώντας χημικές ενώσεις. Μετά την διαδικασία αυτή, ο ημιαγωγός έχει την ικανότητα για μεγαλύτερη αποδέσμευση ελεύθερων φορέων αγωγιμότητας και κατ'επέκταση, εμφάνιση μεγαλύτερης αγωγιμότητας.

Είναι φανερό πως όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός (συγκέντρωσή) των επιπρόσθετων φορέων, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η αγωγιμότητα του ημιαγωγού, όπου για πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις, θα έχει συμπεριφορά ισοδύναμη με του αγωγού. Για μεσαίες ή μικρές τιμές συγκέντρωσης, προκύπτει ο **εξωγενής ή πρόσμειξης ημιαγωγός** (extinsic/doped semiconductor), καθώς η **εξωγενή αγωγιμότητα** που εμφανίζει, δεν εξαρτάται από τα άτομα του τετρασθενούς ( $4e^-$ ) στοιχείου του ενδογενή ημιαγωγού, αλλά από τα άτομα των ξένων χημικών στοιχείων πρόσμειξης, των οποίων η αγωγιμότητα, εξαρτάται από το σθένος τους. Συγκεκριμένα, εάν είναι τρισθενή ( $3e^-$ ) ή πεντασθενή ( $5e^-$ ) χημικά στοιχεία.

## I. Ο κρυσταλλικός ημιαγωγός τύπου N

Με τη προσθήκη ατόμων πεντασθενούς ( $5e^-$ ) χημικού στοιχείου, που ανήκει στα αμέταλλα χημικά στοιχεία του Π.Π., π.χ. Αρσενικό (As), Φώσφορο (P) ή Αντιμόνιο (Sb), κάποιο από τα ηλεκτρόνια σθένους τους, θα είναι αδύνατο να συνάψει ομοιοπολικό δεσμό, με γειτονικό άτομο του ενδογενή ημιαγωγού, καθώς αυτός αποτελείται από άτομα τετρασθενούς ( $4e^-$ ) χημικού στοιχείου. Καθώς το πρόσθετο άτομο (πρόσμειξης), θα δώσει από ένα παραπάνω αδέσμευτο ηλεκτρόνιο, μετά την δέσμευση του με τα τετρασθενή άτομα του ενδογενή ημιαγωγού, το πεντασθενές άτομο πρόσμειξης ονομάζεται **δότης** (donor). Κατά συνέπεια, το επιπλέον αδέσμευτο ηλεκτρόνιο σθένους που δεν συμμετέχει σε δεσμό, θα έχει πολύ μεγαλύτερη ενέργεια, σε σχέση με τα υπόλοιπα της στιβάδας του.



Σχήμα 2.22: κρυσταλλικό πλέγμα Γερμανίου με πρόσμειξη Αρσενίου προς δημιουργία ημιαγωγού τύπου N

Τα αδέσμευτα ηλεκτρόνια, καθώς έχουν μεγαλύτερη ενέργεια, πολύ εύκολα μπορούν, με μικρή ενέργεια εξαιτίας θερμικής διέγερσης ή άλλης απορρόφησης ΗΜ ακτινοβολίας, να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Ακριβέστερα, η τιμή της ενέργειας των αδέσμευτων ηλεκτρονίων, των ατόμων-δοτών, στο γενικό διάγραμμα ενεργειακών ζωνών ηλεκτρονίων των ημιαγωγών, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας νέας ενεργειακής στάθμης (κβαντισμένη), η οποία ονομάζεται **στάθμη δοτών  $E_D$**  και βρίσκεται μέσα στο ενεργειακό διάκενο  $E_g$  του ημιαγωγού και πολύ κοντά, στη ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι, προκύπτει ο **ημιαγωγός τύπου N** (negative), επειδή **φορείς πλειονότητας** μεταφοράς ενέργειας (αγωγιμότητας) αποτελούν τα ηλεκτρόνια  $n_n$ , ενώ **φορείς μειονότητας** αποτελούν οι οπές  $n_p$ .

Για παράδειγμα, για ενδογενή ημιαγωγό Γερμανίου (Ge), που έχει συγκέντρωση  $4,4 \cdot 10^{28}$  άτομα/ $m^3$  και σε κανονικές συνθήκες, η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι  $n_i = 2,4 \cdot 10^{19}$  ηλεκτρόνια/ $m^3$ . Εάν προστεθεί ένα άτομο-δότης Φωσφόρου (P), ανά  $10^6$  άτομα, μέσα στα άτομα του ενδογενή ημιαγωγού Ge, τότε η **συγκέντρωση ατόμων-δότη  $N_D$**  θα είναι  $4,4 \cdot 10^{22}$  άτομα/ $m^3$ . Έτσι, φαίνεται ότι ο αριθμός των ελευθέρων ηλεκτρονίων που θα δώσει ο δότης, παρόλα τη μικρή του ποσότητα, είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων ενδογενή ημιαγωγού.

Όταν ο ημιαγωγός τύπου N βρεθεί υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, τότε θα σχηματιστεί ένα ρεύμα, που θα οφείλεται εξολοκλήρου στα ηλεκτρόνια. Γενικά, η συγκέντρωση φορέων πλειονότητας  $n_n$  μέσα σε έναν ημιαγωγό τύπου N, θα είναι:

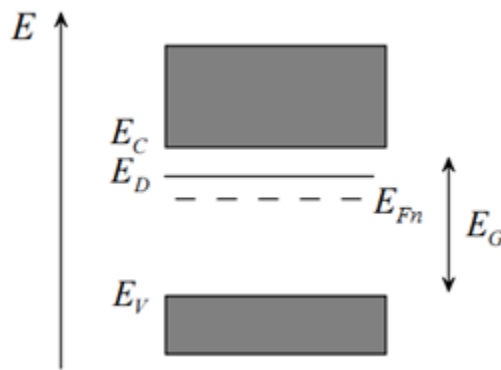
$$n_n = N_D + n_i \cong N_D \quad (2.5)$$

ενώ από το νόμο δράσεως των μαζών της σχέσης (2.3), η συγκέντρωση φορέων μειονότητας  $n_p$ , θα είναι:

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (2.6)$$

Καθώς το αποτέλεσμα μιας πρόσμειξης, είναι η ανατροπή της ισορροπίας ηλεκτρονίων-οπών που εκφράζει ο νόμος δράσεως των μαζών, η στάθμη Fermi  $E_F$  μετατοπίζεται προς τη ζώνη όπου βρίσκονται οι φορείς πλειονότητας. Στον ημιαγωγό τύπου N η ενέργεια Fermi  $E_{Fn}$ , είναι μετατοπισμένη προς τη ζώνη αγωγιμότητας, μιας και η στάθμη  $E_D$  των ηλεκτρονίων από τα άτομα-δότη, βρίσκεται πλησίον της ζώνης αυτής, ενώ δίνεται από την έκφραση:

$$E_{Fn} = E_{Fi} + k_B * T * \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) \quad (2.7)$$

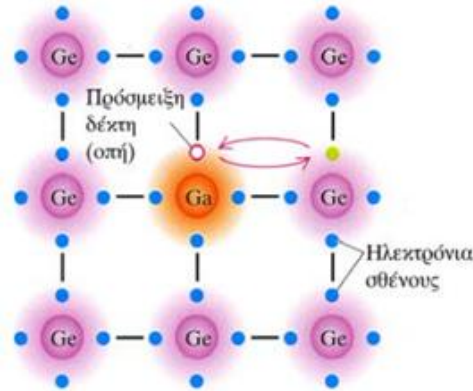


Σχήμα 2.23: ενεργειακές ζώνες ημιαγωγού τύπου N

## II. Ο κρυσταλλικός ημιαγωγός τύπου P

Με τη προσθήκη ατόμων τρισθενούς ( $3e^-$ ) χημικού στοιχείου, που ανήκει στα χημικά στοιχεία των μετάλλων του Π.Π., π.χ. Βόριο (B), Γάλλιο (Ga) ή Ίνδιο (In), κάποιο από τα ηλεκτρόνια σθένους του γειτονικού ατόμου του ενδογενή ημιαγωγού που αποτελεί τετρασθενές ( $4e^-$ ) χημικό στοιχείο, θα είναι αδύνατο να συνάψει ομοιοπολικό δεσμό, καθώς το τρισθενές ( $3e^-$ ) άτομο πρόσμειξης, διαθέτει ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο σθένους. Καθώς τα πρόσθετο άτομο (πρόσμειξης), θα δώσει ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο, μετά την δέσμευση του με τα τετρασθενή άτομα του ενδογενή ημιαγωγού, εμφανίζεται μια αδέσμευτη κενή οπή στη στιβάδα σθένους του. Άρα, το άτομο πρόσμειξης μπορεί να (από-)δεχθεί ηλεκτρόνιο και για το λόγο αυτό, ονομάζεται **αποδέκτης** (acceptor).

Κατά συνέπεια, η αδέσμευτη οπή μπορεί να έλξει και να καταλειφθεί από ηλεκτρόνιο σθένους διαφορετικού ατόμου, σύμφωνα με τους τρόπους που ήδη έχουν αναφερθεί. Επειδή, όπως ήδη έχει αναφερθεί, η ενέργεια των ηλεκτρονίων σθένους που μεταπηδούν από άτομο σε άτομο και προκαλούν τη φαινομενική κίνηση των αντίστοιχων οπών, είναι αρκετά μικρότερη της ενέργειας των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας, στο γενικό διάγραμμα ενεργειακών ζωνών ηλεκτρονίων των ημιαγωγών, η προσθήκη του ατόμου-αποδέκτη ακριβέστερα, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας νέας ενεργειακής στάθμης (κβαντισμένη), η οποία ονομάζεται **στάθμη αποδεκτών**  $E_A$  και βρίσκεται μέσα στο ενεργειακό διάκενο  $E_g$  του ημιαγωγού και πολύ κοντά, σε αυτή τη περίπτωση, στη ζώνη σθένους.



Σχήμα 2.24: κρυσταλλικό πλέγμα Γερμανίου με πρόσμιξη Γαλλίου προς δημιουργία ημιαγωγού τύπου P

Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει ο **ημιαγωγός τύπου P** (positive), επειδή φορείς πλειονότητας (φορείς αγωγιμότητας) αποτελούν οι σπές  $p_p$ , ενώ φορείς μειονότητας τα ηλεκτρόνια  $p_n$  για τον ημιαγωγό αυτό. Όπως στην περίπτωση των ελευθέρων ηλεκτρονίων που θα δώσει ο δότης στον ημιαγωγό τύπου N, έτσι και στον ημιαγωγό τύπου P, ο αριθμός των οπών που θα δώσει η μικρή **συγκέντρωση ατόμων-αποδέκτη  $N_D$** , είναι πολύ μεγαλύτερος, από τον αριθμό των οπών του ενδογενή ημιαγωγού.

Όταν ο ημιαγωγός τύπου P βρεθεί υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, τότε θα σχηματιστεί ένα ρεύμα, που θα οφείλεται σχεδόν εξολοκλήρου στις οπές. Γενικά, η συγκέντρωση φορέων πλειονότητας  $p_p$  μέσα σε έναν ημιαγωγό τύπου P, θα είναι:

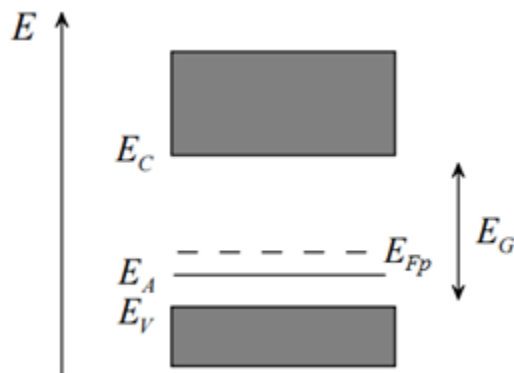
$$p_p = N_A + p_i \cong N_A \quad (2.8)$$

ενώ από το νόμο δράσεως των μαζών της σχέσης (2.3), η συγκέντρωση φορέων μειονότητας  $p_n$ , θα είναι:

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (2.9)$$

Στον ημιαγωγό τύπου P, η ενέργεια Fermi  $E_{Fp}$ , είναι μετατοπισμένη προς τη ζώνη σθένους, μιας και η στάθμη  $E_D$  των οπών από τα άτομα-αποδέκτη, βρίσκεται πλησίον της ζώνης αυτής και δίνεται:

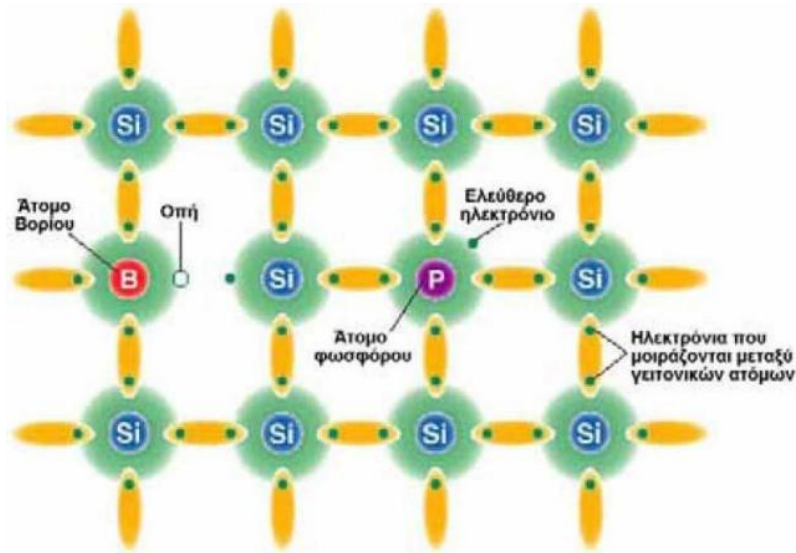
$$E_{Fp} = E_{Fi} + k_B * T * \ln\left(\frac{N_A}{p_i}\right) \quad (2.10)$$



Σχήμα 2.25: ενεργειακές ζώνες ημιαγωγού τύπου P

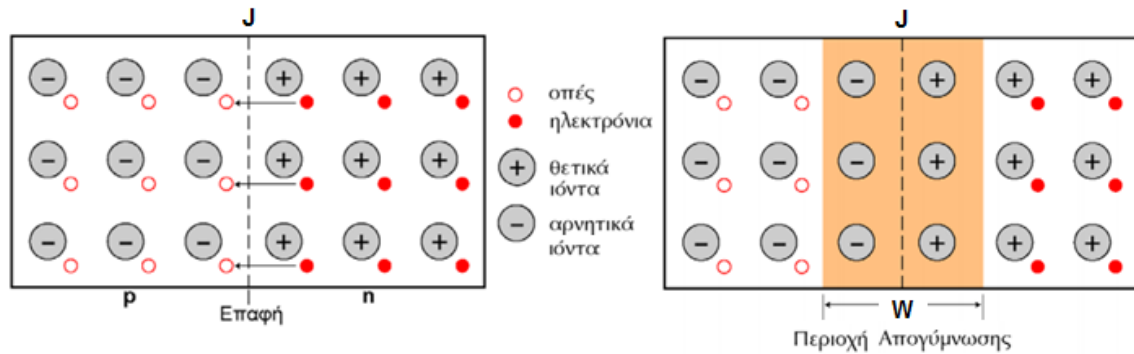
### III. Ο κρυσταλλικός ημιαγωγός επαφής P-N

Αν σε καθαρό κρυσταλλικό ενδογενή ημιαγωγό π.χ. Πυριτίου (Si), δημιουργηθούν δύο τμήματα με αντίθετες προσμείξεις σε επαφή, ένα τμήμα τύπου P και ένα τμήμα τύπου N, σχηματίζεται εξωγενής ημιαγωγός που ονομάζεται **επαφή P-N** ή αλλιώς **δίοδος** και σπανιότερα **κρυσταλλοδίοδος**. Όταν δημιουργηθεί επαφή μεταξύ δύο ημιαγωγών, τύπου P και N αντίστοιχα, τότε η ισορροπία που υπήρχε στους ξεχωριστούς ημιαγωγούς παραβιάζεται, επειδή τα κινητά φορτία που βρίσκονται στις δύο πλευρές και κοντά στην επαφή των ημιαγωγών, κινούνται προς αυτή λόγω της αμοιβαίας έλξης.



Σχήμα 2.26: κρυσταλλικό πλέγμα Πυριτίου με προσμίξεις Βορίου και Φωσφόρου προς δημιουργία επαφής P-N

Στο σημείο ένωσης των δύο τμημάτων του ημιαγωγού επαφής P-N, σχηματίζεται η **μεταλλουργική επαφή J** (junction) και λαμβάνει χώρα το **φαινόμενο διάχυσης** φορέων πλειονότητας των δύο τμημάτων, συγκεκριμένα εκείνων που βρίσκονται πιο κοντά στην επαφή J, προς το απέναντι τμήμα τους, καθώς διεισδύουν και τείνουν να καταλάβουν ολόκληρο τον όγκο του τμήματος, όπου η συγκέντρωσή τους είναι μικρότερη. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μια περιοχή διάχυσης εκατέρωθεν της επαφής J, που θα περιέχει ηλεκτρικούς φορείς πλειονότητας και των δύο τύπων (ηλεκτρόνια και οπές).



Σχήμα 2.27: α) δημιουργία επαφής P-N και διάχυση φορέων πλειονότητας, β) σχηματισμός περιοχής απογύμνωσης και φορτίων χώρου



Εξαιτίας της διάχυσης, η οποία δημιουργείται λόγω των ελκτικών δυνάμεων μεταξύ των φορέων πλειονότητας, στην περιοχή διάχυσης, η πυκνότητα των φορέων πλειονότητας ελαττώνεται, λόγω της επανασύνδεση των ηλεκτρονίων με τις οπές, δηλαδή αλληλοεξουδετερώνονται μεταξύ τους. Έτσι, καταστρέφεται τοπικά η ηλεκτρική ουδετερότητα του υλικού, δημιουργώντας εκατέρωθεν της επαφής, δύο περιοχές απογυμνωμένες από ευκίνητους φορείς, στις οποίες παραμένουν μόνο τα ακάλυπτα ιόντα (ενδογενής ιονισμός). Στο τμήμα N, τα άτομα-δότες απ όπου φεύγουν τα ηλεκτρόνια, παραμένουν ως θετικά ιόντα (κατιόντα), δημιουργώντας θετικά φορτισμένα φορτία. Ομοίως, στο τμήμα P, τα άτομα-αποδέκτες απ όπου φεύγουν οι οπές, ως αρνητικά ιόντα (ανιόντα), δημιουργώντας αρνητικά φορτία.

Όσο αυξάνεται η διάχυση των φορέων πλειονότητας, τόσο δυσκολότερη γίνεται η περαιτέρω διάχυση τους, καθώς αυξάνονται οι απωστικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των ακίνητων ιόντων που συσσωρεύονται εκατέρωθεν της επαφής  $J$  και τον ευκίνητων φορέων πλειονότητας. Είναι φανερό πως το φαινόμενο διάχυσης θα σταματήσει, όταν εξισορροπηθούν τα αντίθετα ακίνητα φορτία, ανά τύπο φορέα, δημιουργώντας μια κατάσταση ισορροπίας, που καλείται **θερμοδυναμική ισορροπία** ή **μόνιμη κατάσταση**. Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία μιας μόνιμης περιοχής ακίνητων αρνητικών φορτίων  $w_p$ , απογυμνωμένη από ευκίνητες οπές πλειονότητας στο τμήμα P και μιας αντίστοιχης, μόνιμης περιοχής ακίνητων θετικών φορτίων  $w_n$ , απογυμνωμένη από ευκίνητα ηλεκτρόνια πλειονότητας στο τμήμα N.

Καθώς στις απογυμνωμένες περιοχές  $w_p$  και  $w_n$ , δεν υπάρχουν ευκίνητοι φορείς πλειονότητας, στη περιοχή του τμήματος P και από την περιοχή  $w_p$  προς την άκρη του, η συγκέντρωση οπών πλειονότητας είναι  $p_p \cong N_A$ . Ενώ στη περιοχή του τμήματος N και από την περιοχή  $w_n$  προς την άκρη του, η συγκέντρωση ηλεκτρονίων πλειονότητας είναι  $n_n \cong N_D$ . Το συνολικό φορτίο των αρνητικών ιόντων στο μήκος της περιοχής  $w_p$  και το αντίστοιχο των θετικών ιόντων στο μήκος της περιοχής  $w_n$  είναι:

$$Q_p = -q * S * w_p * N_A \quad \text{και} \quad Q_n = q * S * w_n * N_D \quad (2.11)$$

Επειδή τα δύο φορτία  $Q_p$  και  $Q_n$  είναι κατ' απόλυτη τιμή ίσα, προκύπτει ότι  $w_p/N_D = w_n/N_A$ , που δηλώνει ότι τα μήκη των περιοχών των ακίνητων φορτίων είναι αντιστρόφως ανάλογα των συγκεντρώσεων των προσμειξιών των αντίστοιχων τμημάτων P και N. Έτσι στην περιοχή που έχει ασθενή πρόσμειξη, θα αναπτυχθεί περιοχή φορτίων χώρου με μεγάλο μήκος.

Οι δύο μόνιμες περιοχές ακίνητων θετικών  $Q_n$  και αρνητικών  $Q_p$  φορτίων, συνιστούν μαζί τη **περιοχή φορτίων χώρου** (space charge region) ή **περιοχή απογύμνωσης W** (depletion region), δημιουργώντας το **εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο  $E_o$**  του ημιαγωγού επαφής P-N και αποτελεί, την αιτία της κατάστασης θερμοδυναμικής ισορροπίας, που περιγράφηκε παραπάνω, δημιουργώντας φραγμό που εμποδίζει τη περαιτέρω διάχυση φορέων πλειονότητας. Έτσι, στο εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο  $E_o$  μεταξύ των αντίθετων φορτίων χώρου, δημιουργείται διαφορά δυναμικού που ονομάζεται **εσωτερικό δυναμικό  $V_{bi}$**  (built-in potential) ή **φράγμα δυναμικού** και αποτελεί, μια εσωτερική ηλεκτρική τάση, που διακόπτει το φαινόμενο της διάχυσης, από το ένα τμήμα της επαφής P-N, στο άλλο:

$$V_{bi} = V_T * \ln \left( \frac{N_A * N_D}{n_i^2} \right) \quad (2.12)$$

όπου,  $N_D$  ή  $N_A$ , οι συγκεντρώσεις δοτών ή αποδεκτών αντίστοιχα,  $n_i^2$  η ενδογενής συγκέντρωση φορέων ρεύματος και  $V_T$  η θερμική διέγερση του ημιαγωγού σε θερμοκρασία δωματίου ( $\approx 23,7$  mV):

$$V_T = \frac{k_B * T}{q} \quad (2.13)$$

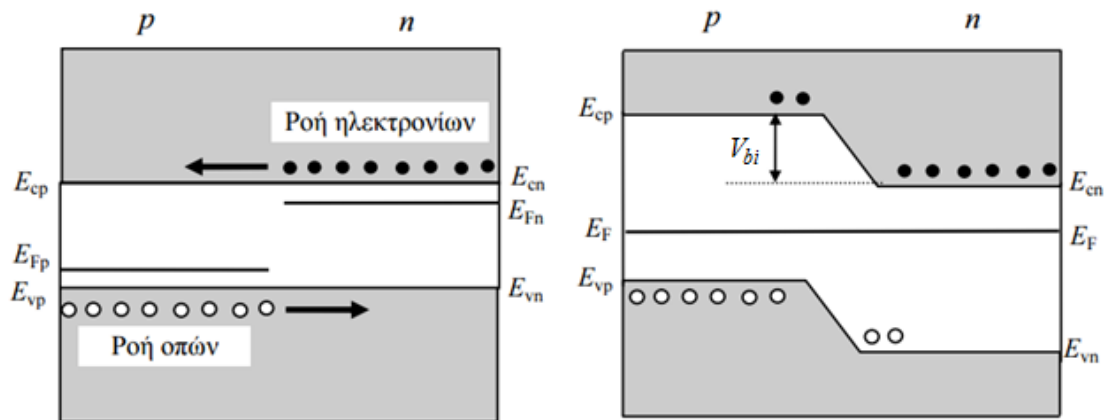
με  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  (cb) η απόλυτη τιμή του φορτίου του ηλεκτρονίου.

Το συνολικό μήκος της περιοχής απογύμνωσης  $W$  ( $w_p + w_n$ ), έχει έκταση από κλάσμα του μm μέχρι αρκετές δεκάδες μm, π.χ. 0,1-10 μm για το Πυρίτιο (Si), εξαρτώμενη από τον ενδογενή ημιαγωγό και τις πυκνότητες των ημιαγωγών προσμείξεων:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q} * \left(\frac{N_A + N_D}{N_A * N_D}\right) * V_{bi}} \quad (2.14)$$

όπου,  $\epsilon$  η διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού και  $\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του αέρα.

Η περιγραφή της διάχυσης των φορέων πλειονότητας, που συμβάλει στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού επαφής P-N, της κατάστασης θερμοδυναμικής ισορροπίας εντός αυτού, που συμβάλει στην διακοπή της αγωγιμότητας του, όπως και η συνολική ενεργειακή κατάσταση του ημιαγωγού επαφής P-N, μπορεί να αποτυπωθεί και αναλυθεί με το γενικό διάγραμμα ενεργειακών ζωνών ηλεκτρονίων των ημιαγωγών. Σύμφωνα με τα ξεχωριστά διαγράμματα ενεργειακών ζωνών των ημιαγωγών, τύπου N και τύπου P, μπορεί να θεωρηθεί και να σχεδιαστεί ένας ημιαγωγός P-N, τη χρονική στιγμή που αποκαθίσταται η επαφή των δύο τμημάτων του και ύστερα, στην κατάσταση ισορροπίας του, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



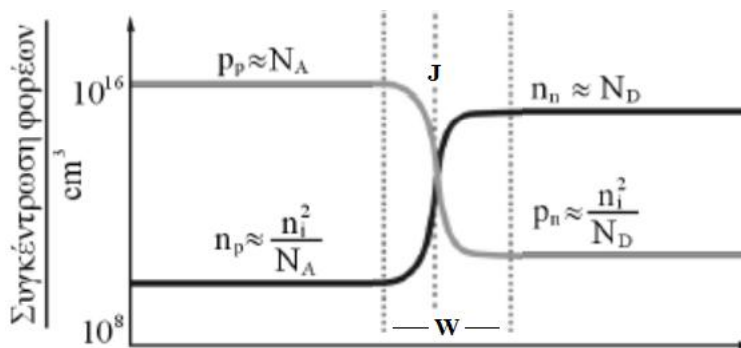
**Σχήμα 2.28:** ενεργειακές ζώνες κατά τη διάχυση (α) και κατά τη θερμοδυναμική ισορροπία (β) στην επαφή P-N

Μετά την αποκατάσταση επαφής, η διαφορά της συγκέντρωσης των φορέων πλειονότητας, γύρω από την επαφή  $J$ , οδηγεί σε διάχυση τους, που θα τείνει να καταργήσει την ανισοκατανομή αυτή. Έτσι, οπές διαχέονται από το τμήμα P στο τμήμα N, ενώ ηλεκτρόνια από το τμήμα N στο τμήμα P. Τα πρόσθετα ηλεκτρόνια στο τμήμα P, προκαλούν την ανύψωση όλων των ενεργειακών σταθμών, ενώ οι πρόσθετες οπές μέσα στο τμήμα N, προκαλούν την πτώση όλων των σταθμών. Με την μεταβολή των ενεργειακών σταθμών, δημιουργείται ένας αυξανόμενος, με τον χρόνο, ενεργειακός φραγμός μεταξύ των δύο τμημάτων, ο οποίος αντιστοιχεί, στη διαφορά ενέργειας μεταξύ των ομόλογων σταθμών  $E_{cn}$  και  $E_{cp}$  στα τμήματα P και N, ο οποίος φραγμός, παίρνει τη μέγιστη τιμή, όταν το σύστημα θα έρθει σε ισορροπία.

Η ροή (διάχυση) αυτή των ηλεκτρονίων και των οπών, θα συνεχιστεί έως ότου οι στάθμες Fermi των ημιαγωγών πρόσμειξης  $E_{Fn}$  και  $E_{Fp}$ , φτάσουν στο ίδιο επίπεδο (εξισωθούν), όπου θα αποκατασταθεί ισορροπία ανάμεσα στο τμήμα P και το τμήμα N. Δηλαδή, η ροή θα σταματήσει μόνον όταν η διαφορά δυναμικού  $V_{bi}$ , που θα αναπτυχθεί μεταξύ των δύο τμημάτων, γίνει αρκετή ώστε ο αντίστοιχος φραγμός, να εμποδίσει την περαιτέρω διάχυση. Επομένως, τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας του τμήματος N, θα πρέπει να διαθέτουν ενέργεια μεγαλύτερη εκείνης του φραγμού, προκειμένου να διαχυθούν προς το τμήμα P. Το αντίστοιχο ισχύει και για τις οπές, δηλαδή οι οπές του τμήματος P, θα πρέπει να διαθέτουν ενέργεια μεγαλύτερη εκείνης του φραγμού, προκειμένου να διαχυθούν προς το τμήμα N.

Παράλληλα όμως, μαζί με την διάχυση των φορέων πλειονότητας ( $N_A, N_D$ ), λόγω της θερμικής διέγερσης, δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών (διάσπαση ομοιοπολικών δεσμών), που αποτελούν φορείς μειονότητας ( $p_n, n_p$ ). Έτσι, κατά την διαδικασία θερμοδυναμικής ισορροπίας εκατέρωθεν της επαφής  $J$ , το ισχυρό ενδογενές ηλεκτρικό πεδίο  $E_0$  της, επιδρά στους φορείς μειονότητας διαχωρίζοντας και ωθώντας τους, στους χώρους όπου υπερτερούν, οι όμοιοι τους φορείς πλειονότητας, πέραν της περιοχής απογύμνωσης  $W$ , προς τις άκρες του υλικού. Έτσι, οι φορείς μειονότητας τίθενται σε κίνηση, όμως αντίθετης φοράς, αυτής των φορέων πλειονότητας. Πολλοί από τους φορείς μειονότητας, έχουν μεγάλες πιθανότητες να φτάσουν στις περιοχές, όπου υπερτερούν οι όμοιοι προς αυτούς φορείς πλειονότητας, οι υπόλοιποι θα επανασυνδεθούν σύντομα με αντίθετο φορέα μειονότητας.

Οι φορείς μειονότητας που συσσωρεύονται προς τις δυο άκρες του ημιαγωγού επαφής P-N, σε συνδυασμό με τους φορείς πλειονότητας που δεν συμμετέχουν στο φαινόμενο της διάχυσης, δημιουργούν ευκίνητα ηλεκτρικά φορτία. Επειδή όμως τα φορτία αυτά, είναι αντίθετα προς τα ακίνητα φορτία χώρου της περιοχής απογύμνωσης  $W$ , δημιουργούν αντίθετο ηλεκτρικό πεδίο, η διαφορά δυναμικού του οποίου επιφέρει εξασθένηση στο φραγμό εσωτερικού δυναμικού του ημιαγωγού. Η εξασθένηση, έχει σαν συνέπεια τη διάχυση νέων φορέων πλειονότητας, που τώρα μπορούν και περνάνε την επαφή  $J$  και να συμβάλλουν εκ νέου, στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Στην μόνιμη κατάσταση του ημιαγωγού, οι φορείς πλειονότητας αντισταθμίζουν πλήρως τους φορείς μειονότητας (επανασύνδεση φορέων), με αποτέλεσμα να αποκαθίσταται ισορροπία δυναμικού και ο ημιαγωγός επαφής P-N να μην άγει.



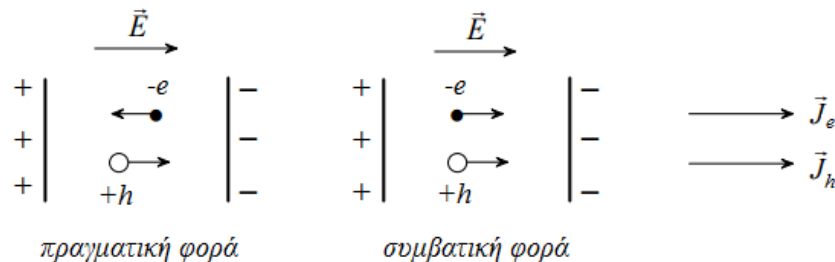
Σχήμα 2.29: συγκέντρωση φορέων πλειονότητας και μειονότητας σε όλο το μήκος ημιαγωγού επαφής P-N

### 2.1.4 Η ηλεκτρική ικανότητα του ημιαγωγού επαφής P-N

Η ενεργειακή κατάσταση του ημιαγωγού, είτε αυτός είναι ενδογενής είτε είναι προσμειξέων, όπως έχει παρουσιαστεί, οφείλεται στην κίνηση των δύο φορέων αγωγιμότητας (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) εντός του υλικού του. Στον ημιαγωγό επαφής P-N, μόλις σχηματιστεί η επαφή των δύο τμημάτων του, εμφανίζεται το φαινόμενο της διάχυσης με τη ροή των φορέων αγωγιμότητας. Λόγω των φορτίων χώρου που σχηματίζονται κατά τη διάχυση, δημιουργείται το εσωτερικό δυναμικό, με αποτέλεσμα να σταματάει η ροή των φορέων και να επέρχεται η μόνιμη κατάσταση του υλικού, το οποίο εμφανίζεται ηλεκτρικά ουδέτερο. Η μόνιμη κατάσταση αυτή, μπορεί να ανατραπεί υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου ή με την πρόσπτωση ΗΜ ακτινοβολίας (φωτός), δίνοντας στον ημιαγωγό επαφής P-N ικανότητες διαχείρισης του ηλεκτρικού ρεύματος.

#### 2.1.4.1 Η ανορθωτική ικανότητα του ημιαγωγού επαφής P-N

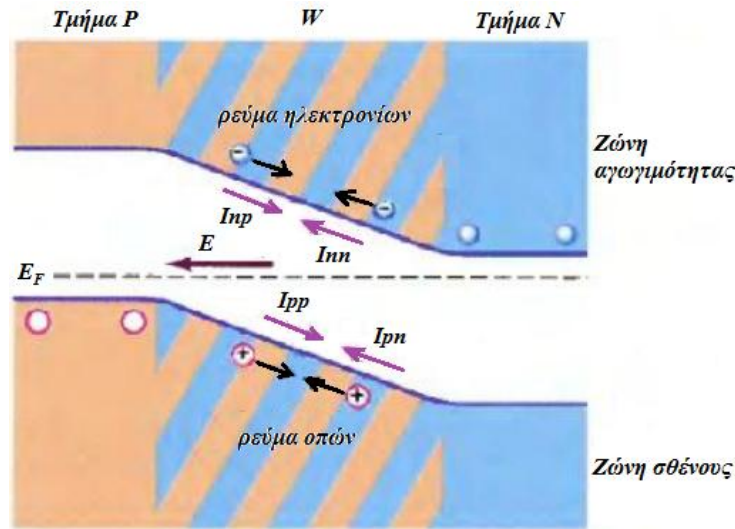
Γενικά, όταν μέσα σε ένα κρύσταλλο υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο  $E$ , οι κινήσεις τόσο των ηλεκτρονίων όσο και των οπών προσανατολίζονται σύμφωνα με αυτό, δημιουργώντας δύο παράλληλες πυκνότητες ρεύματος των ηλεκτρονίων  $J_e$  και των οπών  $J_h$ . Τα διανύσματα αυτά, είναι ομόρροπα μεταξύ τους και έχουν την κατεύθυνση του πεδίου  $E$ . Στην πραγματικότητα, η οπή κινείται σύμφωνα με το πεδίο ενώ το ηλεκτρόνιο αντίθετα με αυτό. Συμβατικά όμως, η κίνηση του ηλεκτρονίου ισοδυναμεί με κίνηση θετικού φορτίου στην αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή ομόρροπα προς την οπή και προς το πεδίο  $E$ . Έτσι, και τα δύο ρεύματα που προκύπτουν από την κίνηση των φορτίων είναι στην κατεύθυνση του πεδίου, προστίθενται και το ολικό ρεύμα είναι  $J = J_e + J_h$ . Για να γίνει κατανοητό, θεωρείται π.χ. η κίνηση τους μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο  $E$ , στο χώρο ανάμεσα στις πλάκες ενός πυκνωτή, του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 2.30: κίνηση ηλεκτρονίου εντός ηλεκτρικού πεδίου

Στον ημιαγωγό επαφής P-N ή δίοδο P-N και συγκεκριμένα, μόλις σχηματιστεί η επαφή  $J$  των δύο τμημάτων της, εμφανίζεται ροή των φορέων πλειονότητας λόγω του φαινομένου διάχυσης, καθώς τα αδέσμευτα ηλεκτρόνια του τμήματος N, έλκονται από τις οπές του τμήματος P. Η ροή αυτή, αποτελεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα ηλεκτρονίων  $I_e$  πλειονότητας από το τμήμα N προς το τμήμα P ( $I_{nn}$ ) και ένα ηλεκτρικό ρεύμα οπών  $I_h$  πλειονότητας, από το τμήμα P προς το τμήμα N ( $I_{pp}$ ). Τα δύο αυτά ρεύματα, είναι ομόρροπα και συνιστούν το **ρεύμα διάχυσης  $I_d$**  (diffuse current), με φορά συμβατικού ρεύματος από το τμήμα P προς το τμήμα N. Το εσωτερικό δυναμικό  $V_{bi}$  που αναπτύσσεται λόγω της διάχυσης, ελαττώνει σταδιακά μέχρι να διακόψει το ρεύμα διάχυσης  $I_d$ , καθώς είναι αντίθετης φοράς από τη φορά του ηλεκτρικού πεδίου  $E$ , της περιοχής απογύμνωσης  $W$ .

Συγχρόνως, καθώς η θερμική διέγερση της διόδου P-N προκαλεί νέα ζεύγη φορέων αγωγιμότητας, εμφανίζεται η ροή αυτών ως φορείς μειονότητας, λόγω της ώθησης ή αλλιώς ολίσθησης τους, υπό την επίδραση του ενδογενές πεδίου  $E$ . Η ροή αυτή, αποτελεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα ηλεκτρονίων  $I_e$  μειονότητας, από το τμήμα P προς το τμήμα N ( $I_{np}$ ) και ένα ηλεκτρικό ρεύμα οπών  $I_h$  μειονότητας, από το τμήμα N προς το τμήμα P ( $I_{pn}$ ). Τα δύο αυτά ρεύματα, επίσης είναι ομόρροπα και συνιστούν το **ρεύμα ολίσθησης**  $I_S$  (drift current), το οποίο όμως αποτελεί ανάστροφο του ρεύματος διάχυσης  $I_d$ , με φορά από το τμήμα N προς το τμήμα P. Επομένως, η ηλεκτρική κατάσταση της διόδου P-N, καθορίζεται από τη διέλευση των δύο αυτών αντίθετων ρευμάτων, διάχυσης  $I_d$  και ολίσθησης  $I_S$ , δια μέσω της μάζας της.



Σχήμα 2.31: ροή ρευμάτων φορέων πλειονότητας (διάχυσης) και μειονότητας (ολίσθησης)

Έτσι, οι δύο αυτές συνιστώσες ρευμάτων  $I_d$  και  $I_S$ , που είναι υπεύθυνες της αγωγιμότητας της διόδου P-N, είναι αποτέλεσμα της κίνησης και του βαθμού συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων και των οπών, πλειονότητας ( $N_A, N_D$ ) και μειονότητας ( $p_n, n_p$ ), σε όλη την έκταση της μάζας της διόδου P-N, άρα αποτέλεσμα της κίνησης του ρεύματος ηλεκτρονίων  $I_e$  και οπών  $I_h$  και παρέχονται από την κοινή σχέση:

$$\left. \begin{array}{l} I_d \\ -I_S \end{array} \right\} = I_h + I_e = q * S * \left( \frac{D_h * p_n}{L_h * N_D} + \frac{D_e * n_p}{L_e * N_A} \right) \quad (2.15)$$

όπου,  $S$  η διατομή της διόδου P-N,  $n_p$  ή  $p_n$ , οι συγκεντρώσεις των αντίστοιχων φορέων μειονότητας,  $N_D$  ή  $N_A$ , οι συγκεντρώσεις των αντίστοιχων φορέων πλειονότητας,  $L_h$  ή  $L_e$ , οι αποστάσεις στις οποίες μπορούν να κινηθούν οι αντίστοιχοι φορείς μειονότητας:

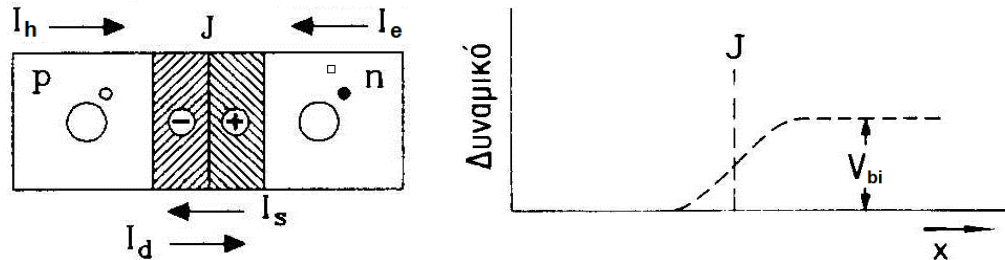
$$L_h = \sqrt{D_h * \tau_h} \quad \text{και} \quad L_e = \sqrt{D_e * \tau_e} \quad (2.16)$$

με  $\tau_h$  ή  $\tau_e$  οι χρόνοι επανασύνδεσης ή χρόνοι ζωής για κάθε φορέα, στον αντίστοιχο χώρο και  $D_h$  ή  $D_e$ , οι συντελεστές διάχυσης των αντίστοιχων φορέων μειονότητας:

$$D_h = V_T * \mu_h \quad \text{και} \quad D_e = V_T * \mu_e \quad (2.17)$$

με  $\mu_h$  ή  $\mu_e$  η ευκινησία των αντίστοιχων φορέων, μέσα στο συγκεκριμένο υλικό.

Η ολίσθηση των φορέων μειονότητας, δηλαδή η ροή ρεύματος ολίσθησης  $I_s$ , συσσωρεύει στις δύο άκρες της διόδου P-N, αντίθετα ηλεκτρικά φορτία, από τα φορτία χώρου εκατέρωθεν της επαφής  $J$ , προκαλώντας αντίθετη διαφορά δυναμικού, που μειώνει το εσωτερικό δυναμικό  $V_{bi}$ . Έτσι, προκαλείται περαιτέρω διάχυση φορέων πλειονότητας, αλλά πολύ μικρής έντασης, καθώς τα δύο αντίθετα ηλεκτρικά ρεύματα, ολίσθησης  $I_s$  και διάχυσης  $I_d$ , αντισταθμίζονται πλήρως ( $I_d = -I_s$ ), με αποτέλεσμα να αποκαθίσταται ισορροπία δυναμικού (ηλεκτρική ισορροπία), εντός της μάζας της διόδου, καθιστώντας την ηλεκτρικά ουδέτερη, καθώς δεν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, προσδιορίζοντας την μόνιμη κατάσταση της διόδου P-N.



Σχήμα 2.32: μόνιμη κατάσταση διόδου (α) ροή - ένταση ρευμάτων και (β) ένταση εσωτερικού δυναμικού

Για να παραβιαστεί η ισορροπία δυναμικού και να παρουσιαστεί ξανά ροή ρεύματος διάχυσης  $I_d$ , πρέπει το εσωτερικό δυναμικό  $V_{bi}$ , που προκαλούν τα ακίνητα φορτία χώρου, να μειωθεί. Η μείωση του, επιτυγχάνεται με παρόμοια διαδικασία, όπως της πτώσης τάσης από το αντίθετο συσσωρευόμενο δυναμικό στις άκρες του υλικού, που σχηματίζουν τα ευκίνητα φορτία φορέων μειονότητας, αλλά μεγαλύτερης τιμής. Αυτό μπορεί να γίνει εφαρμόζοντας εξωτερική τάση ορθής πόλωσης  $V_F$  (forward bias), όπου η θετική πολικότητα επιβάλλεται στο τμήμα P και η αρνητική στο τμήμα N.

Το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται στη δίοδο P-N, από την εξωτερική πηγή τάσης, είναι αντίθετης φοράς, από το συνιστάμενο ενδογενές ηλεκτρικό πεδίο εκατέρωθεν της επαφής  $J$  και κατά συνέπεια, η ένταση του ενδογενούς πεδίου  $E_0$  στη δίοδο P-N μειώνεται. Άρα, το εύρος της περιοχής απογύμνωσης  $W$  (περιοχής φορτίων χώρου) στενεύει, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο φραγμός δυναμικού της περιοχής αυτής, καθώς δημιουργείται πτώση τάσης κατά  $V_{bi} - V_F$ . Συνέπεια της πτώσης τάσης (μείωση φραγμού δυναμικού), είναι ότι ο αριθμός των φορέων πλειονότητας που διαχέονται, να αυξάνει, ενώ η δίοδος P-N, διαρρέεται από ρεύμα διάχυσης  $I_d$  μεγαλύτερης όμως έντασης, δηλαδή **ανορθωμένο ρεύμα**, το οποίο καλείται **ρεύμα διόδου  $I_D$** , ενώ το ρεύμα ολίσθησης  $I_s$  παραμένει ανεπηρέαστο.

Η εξωτερική τάση (ορθής πόλωσης), που απαιτείται για την εμφάνιση του ρεύματος διόδου  $I_D$ , καλείται **τάση διόδου  $V_D$**  και είναι αντίθετης φοράς, του εσωτερικού δυναμικού  $V_{bi}$  του ημιαγωγικού υλικού. Όταν η τάση διόδου  $V_D$  που εφαρμόζεται είναι μηδενική, όπως και για μικρές τιμές αυτής, τότε η δίοδος P-N δεν άγει, δηλαδή το ρεύμα διόδου  $I_D$  είναι μηδενικό. Η μεγαλύτερη τιμή της τάσης διόδου  $V_D$ , στην οποία θεωρείται ότι εξίσου το ρεύμα διόδου  $I_D$  είναι μηδενικό, ονομάζεται **τάση κατωφλίου** ή **γόνυ**  $V_\gamma$ . Για αύξηση της τάσης διόδου  $V_D$ , μεγαλύτερης της τάσης κατωφλίου  $V_\gamma$  (μεταβολή σε mV), τελικώς, προκαλείται εκθετική αύξηση στο ολικό ρεύμα της διόδου  $I_D$  (αρκετά mA):

$$I_D = I_s * \left( e^{V_D/n_i s * V_T} \right) - I_s \quad (2.18)$$

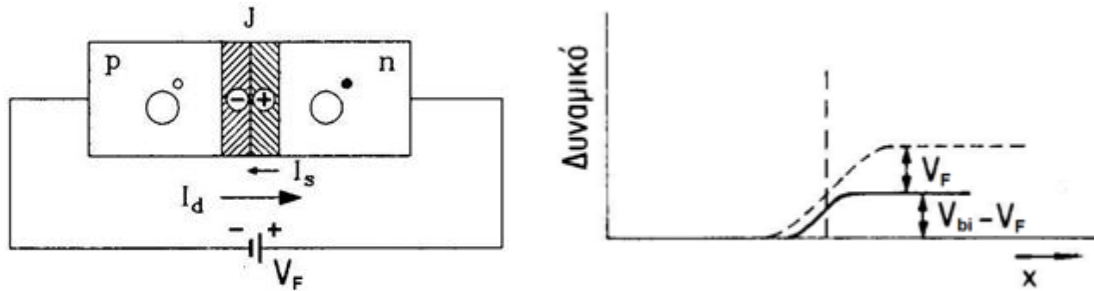
όπου,  $V_T$  η θερμική διέγερση της διόδου σε θερμοκρασία δωματίου ( $\approx 23,7$  mV) και  $n_{i\delta}$ , ο ιδανικός παράγοντας που εκφράζει πόσο πλησιάζει η πραγματική συμπεριφορά της διόδου την θεωρητική, όπου η επαφή P-N είναι ιδανική και δεν υπάρχει επανασύνδεση φορέων, μέσα στην περιοχή ανταλλαγής φορτίου ( $n = 1$ , για την ιδανική διόδο, ενώ  $n = 2$ , όταν υπάρχει επανασύνδεση φορέων).

Σύμφωνα με την σχέση (2.15), οι τιμές των ρευμάτων διάχυσης  $I_d$  και ολίσθησης  $I_s$ , προκύπτουν από κοινούς όρους, οπότε η παραπάνω σχέση (2.18) του ρεύματος της διόδου  $I_D$ , γράφεται ως εξής:

$$I_D = I_o * \left( e^{V_D/n_{i\delta} * V_T} - 1 \right) \quad \text{εξίσωση Shockley} \quad (2.19)$$

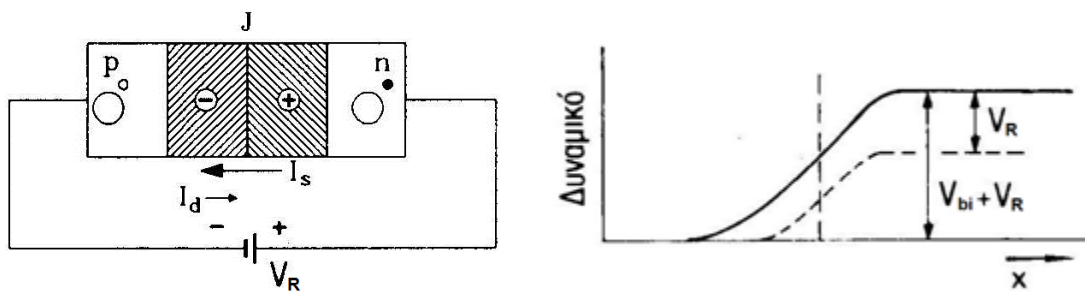
όπου,  $I_o$  η κοινή μαθηματική έκφραση των ρευμάτων  $I_d$  και  $I_s$ , που προκύπτει στην σχέση (2.18).

Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι, ότι η επαφή P-N έχει την ιδιότητα να ανορθώνει το ηλεκτρικό ρεύμα. Η τάση κατωφλίου  $V_\gamma$  για διόδους Πυριτίου (Si) και Γερμανίου (Ge), είναι 0,6 V και 0,2 V αντίστοιχα, ενώ όταν οι διόδοι αυτοί βρίσκονται σε αγωγιμότητα, οι τιμές οι οποίες συνήθως θεωρούνται στους υπολογισμούς, ως τάση διόδου  $V_D$ , είναι 0,7 V και 0,3 V αντίστοιχα.

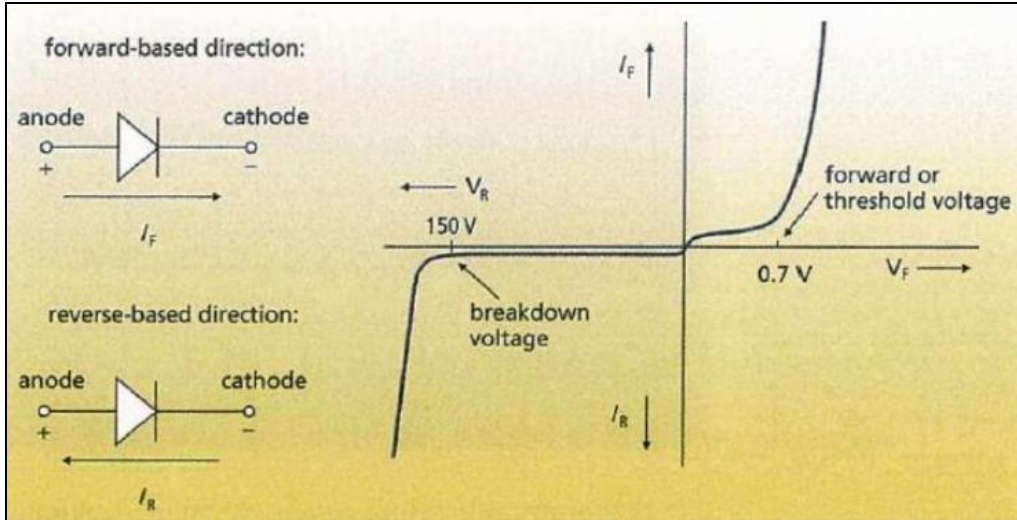


Σχήμα 2.33: ορθή πόλωση διόδου (α) ροή - ένταση ρευμάτων και (β) ένταση εσωτερικού δυναμικού

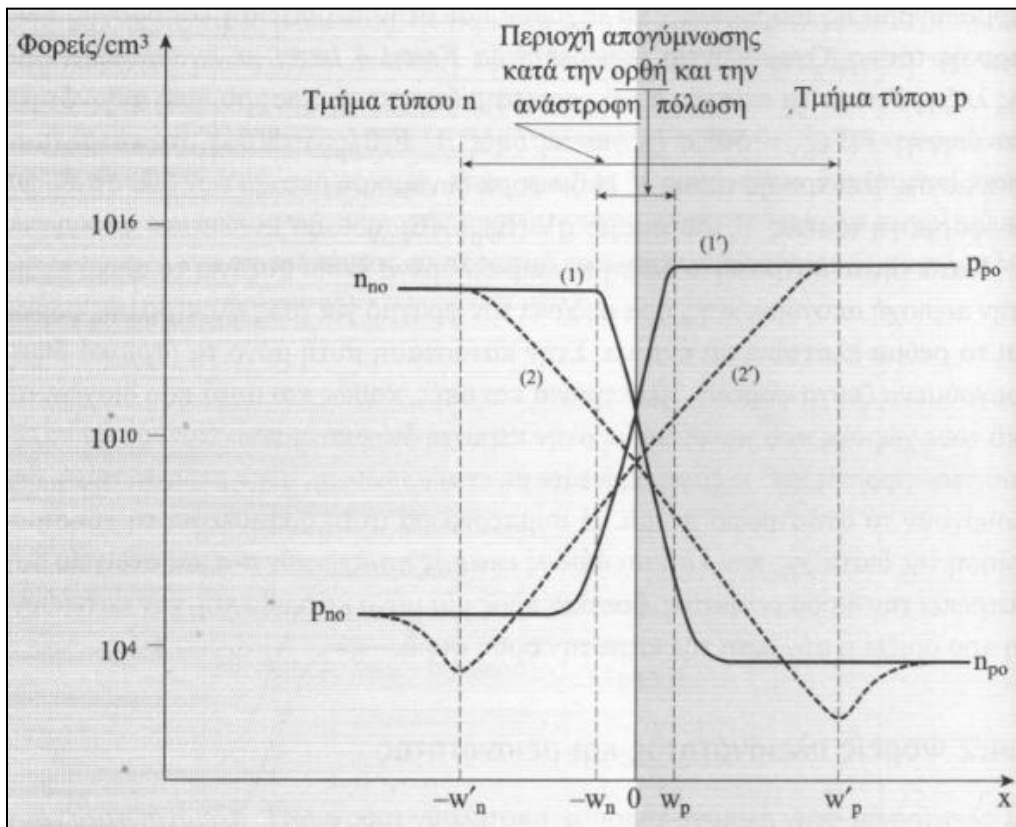
Το αντίθετο συμβαίνει κατά την ανάστροφη πόλωση  $V_R$  (reverse bias), όπου η αρνητική πολικότητα επιβάλλεται στο τμήμα P και η θετική στο τμήμα N, καθώς ο φραγμός δυναμικού αυξάνεται κατά  $V_{bi} + V_R$ , με συνέπεια την αύξηση του εύρους της περιοχής απογύμνωσης  $W$  και του ενδογενούς πεδίου  $E_o$ , το οποίο αντιτίθεται στη διάχυση φορέων πλειονότητας. Έτσι, το ρεύμα διάχυσης  $I_d$ , είναι σχεδόν μηδενικό, ενώ το ρεύμα της διόδου  $I_D$ , ισούται με το ανάστροφο ρεύμα ολίσθησης  $I_s$  ( $I_D = -I_s$ ). Αυξανόμενης της ανάστροφης τάσης  $V_R$ , πέραν ορισμένης τιμής, το ανάστροφο ρεύμα ολίσθησης  $I_s$  αυξάνεται έντονα, ενώ η διόδος P-N φτάνει στα όρια της και καταστρέφεται (φαινόμενο χιονοστιβάδας). Η μεγαλύτερη αυτή, αρνητική τιμή της τάσης διόδου  $V_D$ , ονομάζεται **τάση κατάρρευσης** ή **τάση Zener**  $V_Z$ .



Σχήμα 2.34: αντίστροφη πόλωση διόδου (α) ροή - ένταση ρευμάτων και (β) ένταση εσωτερικού δυναμικού



Σχήμα 2.35: α) συμβολισμός διόδου P-N στα ηλεκτρικά κυκλώματα και β) χαρακτηριστική καμπύλη V-I διόδου P-N



Σχήμα 2.36: μεταβολή πυκνότητας φορέων σε ορθή (1,1') και ανάστροφη (2,2') πόλωση στην επαφή P-N



### 2.1.4.2 Η οπτικό-ηλεκτρική ικανότητα του ημιαγωγού επαφής P-N

Όταν το φως προσπίπτει στην επιφάνεια ενός υλικού, τότε ένα μέρος αυτού ανακλάται, ένα άλλο τη διαπερνά και το υπόλοιπο απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας. Η απορρόφηση του φωτός, ουσιαστικά σημαίνει τη μετατροπή του σε άλλη μορφή ενέργειας, η οποία συνήθως είναι σε θερμότητα. Υπάρχουν όμως και υλικά, όπως οι ημιαγωγοί, τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνειά τους, σε ηλεκτρική ενέργεια.

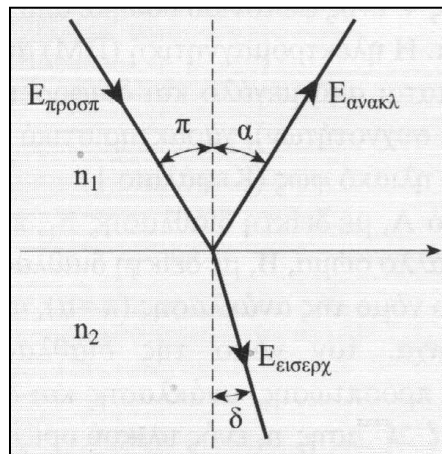
#### I. Η απορρόφηση ηλιακής ενέργειας από το ημιαγωγικό υλικό

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από μια πηγή φωτός, γενικά, συνίσταται από μεγάλο και διαφορετικό πλήθος φωτονίων, σε κάθε συχνότητα ή μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ηλεκτρομαγνητικό φάσμα), χαρακτηριστικό της πηγής και της θερμοκρασίας της, όπως το ηλιακό φως. Η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλιακού φωτός, έχει περισσότερη ενέργεια, σε αντίθεση με την υπέρυθη ακτινοβολία του. Η σχέση μεταξύ, της πυκνότητας ισχύος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας  $E$  και της συχνότητας  $\nu$  ή του μήκους κύματος  $\lambda$ , ενός φωτονίου, είναι:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.20)$$

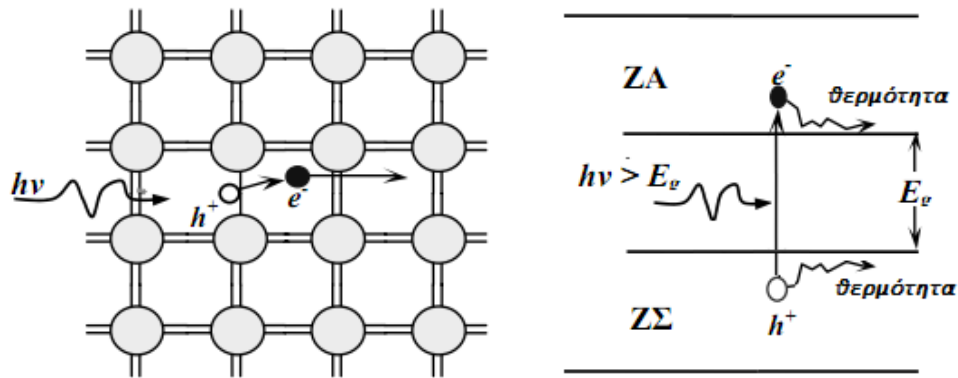
όπου,  $h = 6,67 \cdot 10^{-34}$  (J\*s) η σταθερά του Planck και  $c = 3 \cdot 10^8$  (m/s) η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Έστω, ενέργεια (πυκνότητα ισχύος) ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας  $E$ , προσπίπτει στην επιφάνεια ενός σώματος, σε ορισμένο χρόνο. Μέρος της ενέργειας ανακλάται ( $E_{ανακ}$ ) από την επιφάνεια πρόσπτωσης, ενώ άλλο μέρος της, διαπερνά την επιφάνεια πρόσπτωσης και εισέρχεται ( $E_{εισ}$ ) στο εσωτερικό του σώματος. Από την εισερχόμενη ενέργεια, ένα μέρος της απορροφάται ( $E_{απορ}$ ) σταδιακά από το υλικό του σώματος και το υπόλοιπο, εξαρτώμενο από το πάχος του σώματος, εξέρχεται. Γενικά, η απορρόφηση ΗΜ ακτινοβολίας από την ύλη, οφείλεται στη διέγερση των ταλαντευόμενων ηλεκτρικών φορτίων της (ηλεκτρόνια-οπές), σε ανώτερες ενεργειακές καταστάσεις.



Σχήμα 2.37: ανάκλαση - διάθλαση ακτίνας που προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων

Στην περίπτωση των ημιαγωγών υλικών, μια σημαντική απορρόφηση φωτός, μπορεί να γίνει από τα ηλεκτρόνια σθένους του υλικού. Η απορρόφηση αυτή, καθορίζεται από το μέγεθος της ενέργειας των φωτονίων  $h\nu$ , σε σχέση με το ενεργειακό διάκενο  $E_g$  του ημιαγωγού. Αν η ενέργεια του φωτονίου  $h\nu$ , είναι μικρότερη του διακένου  $E_g$  ( $h\nu = hc/\lambda < E_g$ ), το φωτόνιο δεν απορροφάται και κατά συνέπεια το υλικό είναι διαφανές, σε αυτό το μήκος κύματος  $\lambda$ . Στην περίπτωση που η ενέργεια του φωτονίου, είναι μεγαλύτερη ή ίση αυτής του ενεργειακού διακένου ( $h\nu \geq E_g$ ), το φωτόνιο απορροφάται από ηλεκτρόνιο σθένους, το οποίο καθίσταται ως ελεύθερο μέσα στον ημιαγωγό.

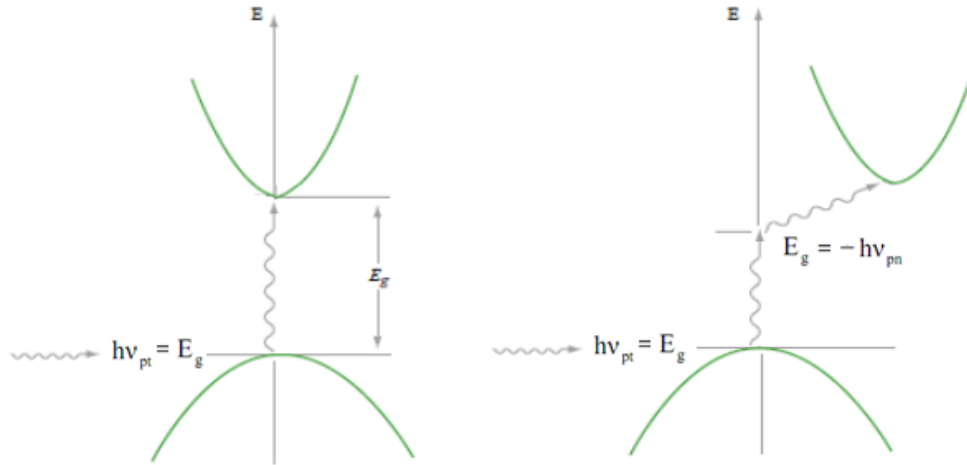


**Σχήμα 2.38:** α) απορρόφηση φωτονίου και διάσπαση δεσμού προς δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής, β) διέγερση ηλεκτρονίου από τη ΖΣ στη ΖΑ και ελάττωση της ενέργειας του ως θερμότητα

Καθώς το φωτόνιο απορροφάται, σπάει το δεσμό μεταξύ ατόμων του υλικού και το ηλεκτρόνιο σθένους καθίσταται ως ελεύθερο, αφήνοντας ακάλυπτο δεσμό στο κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού, την οπή, ενώ το ίδιο ανεβαίνει ενεργειακά, από τη ζώνη σθένους (ΖΘ) στη ζώνη αγωγιμότητας (ΖΑ). Στην περίπτωση, μάλιστα, που η ενέργεια των φωτονίων είναι μεγαλύτερη της ενέργειας διακένου  $E_g$ , η γένεση του ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής, συνοδεύεται από θέρμανση του υλικού. Το επιπλέον ποσό ενέργειας ( $h\nu - E_g$ ), αποδίδεται από τα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας και τις αντίστοιχες οπές της ζώνης σθένους, στο πλέγμα του υλικού, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του (θερμική ταλάντωση).

Η απορρόφηση όμως, κατάλληλης ενέργειας φωτονίου δεν είναι πάντα η μοναδική προϋπόθεση για τη δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής καθώς εξαρτάται και από το απορροφούμενο ή ακόμα και δημιουργούμενο **φωνόνιο**, το οποίο αποτελεί ενεργειακό κβάντο της θερμικής ταλάντωσης του κρυσταλλικού πλέγματος του υλικού, ώστε να διατηρηθεί η ορμή του συστήματος. Οι ενεργειακές ζώνες εμφανίζουν μέγιστα και ελάχιστα ακρότατα, σε συνάρτηση με την ορμή των φωνονίων του κρυστάλλου. Σε ορισμένα ημιαγωγικά υλικά, το ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας βρίσκεται στην ίδια ορμή φωνονίου με το μέγιστο της ζώνης σθένους. Τότε το ενεργειακό διάκενο χαρακτηρίζεται ως **άμεσο**.

Αν τα δύο ακρότατα βρίσκονται σε διαφορετικές ορμές φωνονίων, τότε το ενεργειακό διάκενο χαρακτηρίζεται ως **έμμεσο**. Κατά την απορρόφηση σε έμμεσο διάκενο, την ενέργεια μετάβασης του ηλεκτρονίου, από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, τη δίδει κατ' ουσία, το απορροφούμενο φωτόνιο ( $E_g = h\nu_{pt}$ ), τη δε ορμή, το φωνόνιο ( $E_g = h\nu_{pt} - h\nu_{pn}$ ). Η οπτική απορρόφηση, είναι ισχυρότερη σε ημιαγωγικά υλικά με άμεσο ενεργειακό διάκενο και ασθενέστερη, σε εκείνα με έμμεσο ενεργειακό διάκενο.



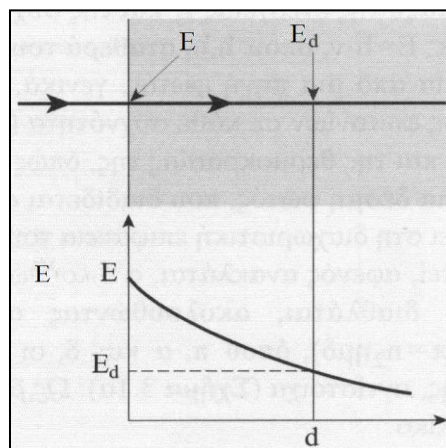
Σχήμα 2.39: υλικό με (α) άμεσο και (β) έμμεσο ενεργειακό διάκενο

Η ευκολία με την οποία πραγματοποιείται η οπτική απορρόφηση, χαρακτηρίζεται από το ρυθμό μεταβολής της αρχικής προσπίπτουσας ενέργειας  $E$ , σε σχέση με την απόσταση που διανύει η ΗΜ ακτινοβολία, εντός του υλικού. Γενικά, η διαδιδόμενη πυκνότητα ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας σε ένα υλικό, απορροφάται σταδιακά, καθώς εισχωρεί όλο και πιο βαθιά σε αυτό. Το ποσοστό αυτής δίδεται από τον νόμο εξασθένησης, της έντασης ΗΜ ακτινοβολίας, του Beer:

$$E_{απορ} = E * e^{-αλ*d} \quad (2.21)$$

όπου,  $E$  η αρχική προσπίπτουσα ενέργεια ΗΜ ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ),  $αλ$  ο συντελεστής απορρόφησης υλικού στο μήκος κύματος  $λ$  ( $cm^{-1}$ ) και  $d$  το βάθος διείσδυσης ΗΜ ακτινοβολίας εντός του υλικού ( $μm$ ).

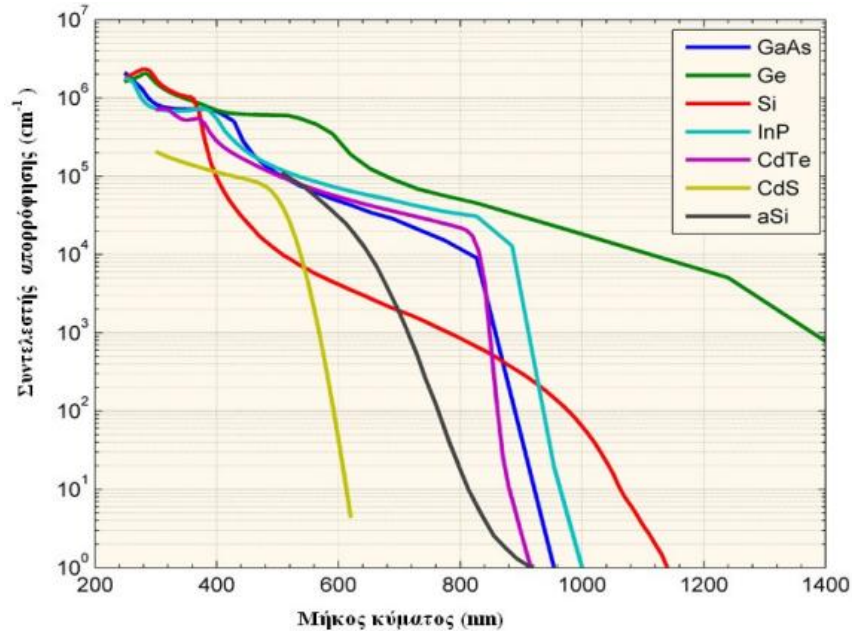
Ο ρυθμός αυτός, της απορροφούμενης ενέργειας  $E_{απορ}$  έχει αρνητική τιμή, καθώς η αρχική προσπίπτουσα ενέργεια  $E$  μειώνεται με την αύξηση του βάθους διείσδυσης της, εντός του υλικού. Αυτό υποδεικνύει ότι, ο ρυθμός της απορρόφησης φωτονίων και επομένως της δημιουργίας φορέων (ηλεκτρονίων-οπών) λόγω οπτικής διέγερσης, είναι μεγαλύτερος κοντά στην επιφάνεια του υλικού και εξασθενεί εκθετικά σε απόσταση από την επιφάνεια.



Σχήμα 2.40: γραφική παράσταση του νόμου εξασθένησης της έντασης ακτινοβολίας μέσα σε υλικό

Ο συντελεστής απορρόφησης  $\alpha_\lambda$ , εξαρτάται χαρακτηριστικά από το ενεργειακό διάκενο  $E_g$  του υλικού, από το οποίο είναι κατασκευασμένο το σώμα και από το κρίσιμο μήκος κύματος  $\lambda_g$  της ΗΜ ακτινοβολίας, στο οποίο το σώμα γίνεται διαπερατό. Η μονάδα του συντελεστή απορρόφησης  $\alpha_\lambda$ , εκφράζεται συνήθως σε  $\text{cm}^{-1}$  και η αντίστροφη τιμή του προσδιορίζει το πάχος του υλικού  $d = 1/\alpha_\lambda$  σε  $\text{cm}$ , μέσα στο οποίο η ποσοστιαία ελάττωση της ενέργειας είναι 63,2%.

Στο παρακάτω σχήμα, δίδονται οι γραφικές παραστάσεις συντελεστών απορρόφησης  $\alpha_\lambda$  διαφόρων ημιαγωγικών υλικών και παρουσιάζεται, η αντιστρόφως ανάλογα μεταβολή του συντελεστή  $\alpha_\lambda$  σε συνάρτηση με το κρίσιμο μήκος κύματος  $\lambda_g$  της ΗΜ ακτινοβολίας.



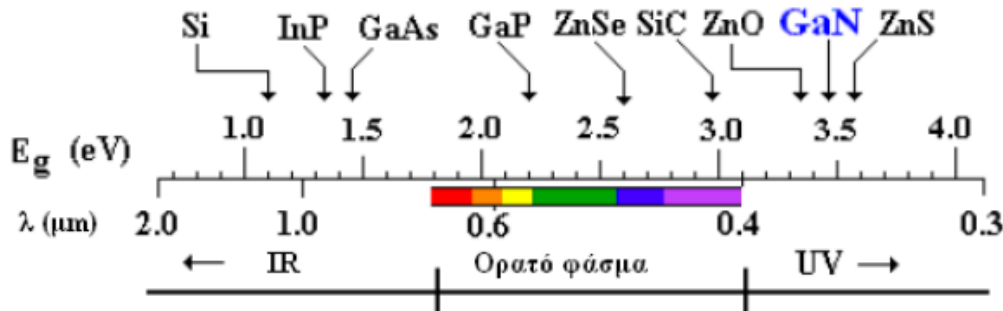
**Σχήμα 2.41:** συντελεστής απορρόφησης ημιαγωγικών υλικών συναρτήσει του μήκους κύματος ΗΜ ακτινοβολίας

Συγκεκριμένα, ο συντελεστής απορρόφησης  $\alpha_\lambda$  παρουσιάζει μηδενική τιμή πρακτικά, όταν το μήκος κύματος της ΗΜ ακτινοβολίας υπερβαίνει το κρίσιμο μήκος  $\lambda_g$  ( $\lambda > \lambda_g$ ), όπου το υλικό παρουσιάζεται διαφανές, αφού τότε δεν πραγματοποιείται καμία απορρόφηση φωτονίων. Αντίθετα, εμφανίζει τη μέγιστη τιμή όταν το μήκος κύματος είναι το ελάχιστο, που σημαίνει πρακτικά ότι η απορρόφηση γίνεται στην επιφάνεια του υλικού. Επίσης, διαπιστώνεται πως το κρίσιμο μήκος κύματος  $\lambda_g$ , από το οποίο και κάτω αρχίζει η απορρόφηση, αντιστοιχεί στο ενεργειακό διάκενο  $E_g$ , του αντίστοιχου ημιαγωγικού υλικού.

Αντικαθιστώντας στη σχέση (2.20), τη σταθερά του Planck  $h$ , την ταχύτητα του φωτός  $c$  και θέτοντας το κρίσιμο μήκος κύματος  $\lambda_g$  της ΗΜ ακτινοβολίας για το αντίστοιχο ημιαγωγικό υλικό, τότε δίδεται το ενεργειακό διάκενο  $E_g$  του υλικού:

$$E_g(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda_g(\text{nm})} \quad (2.22)$$

Π.χ., από το μηδενισμό του συντελεστή  $\alpha_l$  στο μήκος κύματος  $\lambda_g$ , για το Πυρίτιο, προκύπτει ότι το ενεργειακό διάκενο του είναι  $E_g \approx 1,12$  eV. Στο παρακάτω σχήμα, δίδονται οι τυπικές τιμές για το ενεργειακό διάκενο  $E_g$  διαφόρων ημιαγωγικών υλικών σε συνάρτηση με το κρίσιμο μήκος κύματος  $\lambda_g$  της ΗΜ ακτινοβολίας, από το οποίο ξεκινάει η απορρόφηση φωτονίων του κάθε υλικού.



Σχήμα 2.42: ενεργειακό διάκενο ημιαγωγικών υλικών συναρτήσει του κρίσιμου μήκος κύματος ΗΜ ακτινοβολίας

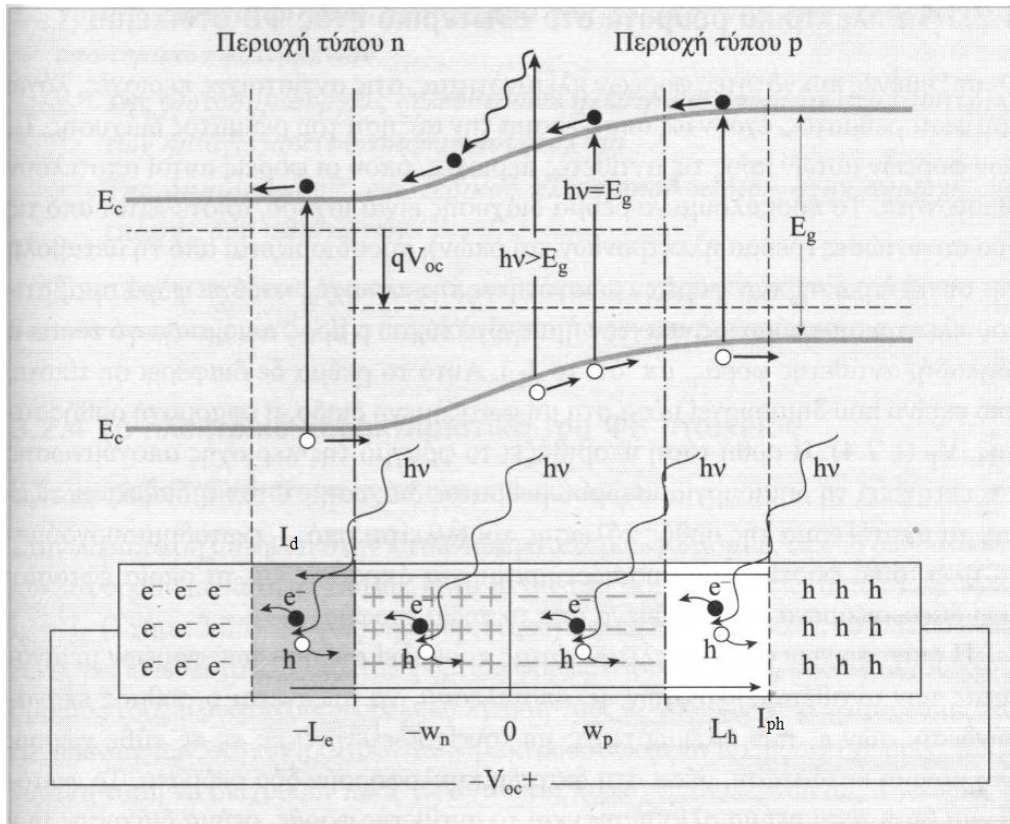
## II. Η απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας από το ημιαγωγικό υλικό

Όταν ο ημιαγωγός φωτιστεί, τότε λόγω της απορρόφησης των ενεργητικών φωτονίων, οι φωτοδημιουργούμενοι φορείς αγωγιμότητας, δηλαδή, τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας και οι οπές στη ζώνη σθένους, αυξάνονται και συνεπώς, αυξάνεται και η αγωγιμότητα του. Η αυξημένη αγωγιμότητα του ημιαγωγού, με την επίδραση του φωτός, ονομάζεται **φωτοαγωγιμότητα**. Όταν διακοπεί ο φωτισμός του ημιαγωγού, η αγωγιμότητα του επανέρχεται στα αρχικά επίπεδα, με επανασυνδέσεις των φορέων μειονότητας με φορείς πλειονότητας, δηλαδή απευθείας πτώση από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους. Όταν ένας ημιαγωγός φωτίζεται, άγει με πολλές τάξεις ισχυρότερο ρεύμα, απ ότι στο σκοτάδι.

Η υψηλή φωτοαγωγιμότητα ενός ημιαγωγικού υλικού (φωτοπαραγόμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών), αποτελεί βασική διαδικασία, αλλά δεν είναι σε θέση να δώσει από μόνη της ηλεκτρικό ρεύμα, καθώς οι φορείς ρεύματος που παράγονται στο εσωτερικό του, πρέπει να τεθούν σε κίνηση. Αυτούς τους φωτοδημιουργημένους φορείς, μπορεί να κινήσει προς μία κατεύθυνση μόνο, το ενδογενές ηλεκτρικό πεδίο  $E_D$ , που δημιουργείται από τον ενδογενή ιονισμό λόγω του φαινομένου διάχυσης των φορέων πλειονότητας, μεταξύ δύο διαφορετικών ημιαγωγικών υλικών σε επαφή (περιοχή απογύμνωσης), όπως είναι ο ημιαγωγός επαφής P-N ή αλλιώς δίοδος P-N.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, στην περιοχή των ημιαγωγών P-N που είναι σε επαφή, δημιουργούνται σε όλο το χώρο φορείς μειονότητας (ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών) με δύο τρόπους, με θερμική διέγερση, καθώς η διάταξη βρίσκεται σε ορισμένη θερμοκρασία και με οπτική διέγερση, δηλαδή με φωτοαγωγιμότητα, λόγω της δράση εξωτερικού φωτισμού (φωτονίων) κατάλληλου μήκους κύματος. Μεταξύ αυτών, διακρίνονται τα ζεύγη που δημιουργούνται, μέσα στην περιοχή απογύμνωσης  $W$  ( $-Wn, +Wp$ ), αλλά και έξω από αυτήν, πολύ κοντά όμως στα σύνορα των περιοχών τύπου N ( $-Le$ ) και τύπου P ( $Lh$ ). Το μήκος απογύμνωσης που εκτείνεται στην περιοχή P, συμβολίζεται με  $Wp$ , ενώ το αντίστοιχο στην περιοχή N, με  $Wh$ . Τα μήκη διάχυσης  $Lh$  και  $Le$ , που ονομάζονται Debye, είναι οι περιοχές στις οποίες μπορούν να κινηθούν οι αντίστοιχοι φορείς μειονότητας, χωρίς να επανασυνδεθούν.

Οι φωτοδημιουργούμενοι φορείς μειονότητας, μέσα και κοντά στην περιοχή απογύμνωσης, υπό την επίδραση του ενδογενούς πεδίου  $E_0$ , ωθούνται στα απέναντι τμήματα, όπου υπερτερούν οι όμοιοι τους φορείς πλειονότητας. Τα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται στις περιοχές  $Wp + Lh$ , διαχέονται μέχρι την περιοχή απογύμνωσης και από εκεί, λόγω του πεδίου  $E_0$ , ολισθαίνουν στην περιοχή N, φορτίζοντας την με επιπλέον αρνητικά φορτία. Οι οπές που παραμένουν στην περιοχή P, δημιουργούν συνολικό θετικό φορτίο. Οι ίδιες αρχές, ισχύουν και για τα τους φωτοδημιουργημένους φορείς, στην περιοχή N. Οι οπές στη περιοχή  $-Wn - Lh$ , ολισθαίνουν στην περιοχή P, φορτίζοντας την με επιπλέον θετικά φορτία και τα ηλεκτρόνια παραμένουν στην περιοχή N, δημιουργώντας συνολικό αρνητικό φορτίο. Οι φορείς μειονότητας που δημιουργούνται, πέρα των περιοχών  $-Le$  ή  $Lh$ , χάνονται λόγω επανασύνδεσης.



Σχήμα 2.43: απορρόφηση φωτονίων προς δημιουργία φωτορεύματος και εμφάνιση φωτοβολταϊκού δυναμικού

Το πλήθος και η συνεχής κίνηση των φωτοδημιουργούμενων φορέων, κάτω από την επίδραση του ισχυρού πεδίου  $E_0$ , που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή μήκους  $-Le - Wn + Wp + Lh$ , της ημιαγωγικής διάταξης, αποτελεί ηλεκτρικό ρεύμα με φορά αυτή του ενδογενούς πεδίου, δηλαδή από τον ημιαγωγό τύπου N στον ημιαγωγό τύπου P. Το φωτοδημιουργούμενο ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται **φωτόρεύμα  $I_{ph}$**  και αποτελεί αναστροφο ρεύμα ολίσθησης. Η τιμή του, είναι ευθέως ανάλογη του εμβαδού της επαφής των δύο ημιαγωγών και της ενέργειας των απορροφούμενων φωτονίων  $E_{απορ}$ , η οποία είναι επίσης, ευθέως ανάλογη της προσπίπτουσας πυκνότητα ισχύος  $E$ , της ηλιακής ακτινοβολίας:

$$I_{ph} = q * E * (-Le - Wn + Wp + Lh) \quad (2.22)$$

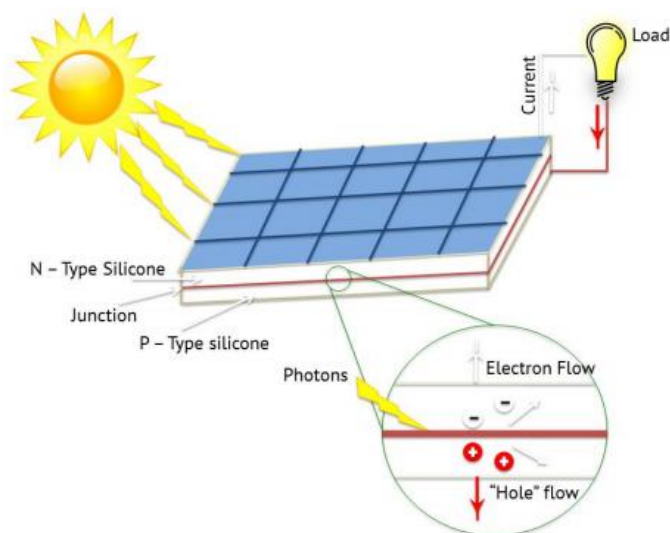
όπου,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  με μονάδα μέτρησης στο SI το 1 cb, η απόλυτη τιμή του φορτίου ηλεκτρονίου.

Επομένως, οι φωτοδημιουργούμενοι φορείς μειονότητας, που συσσωρεύονται στα άκρα της επαφής P-N και οι οποίοι, φτάνουν εκεί διαχωριζόμενοι και ωθούμενοι από το ενδογενές ηλεκτρικό πεδίο, διατηρούν τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις των όμοιων φορέων πλειονότητας σε κάθε πλευρά, σε αρκετά υψηλότερα επίπεδα, καθώς στα άκρα της επαφής P-N, η πολύ μικρή συγκέντρωση φορέων αντίθετου προσήμου, ευνοεί την παραμονή τους ως ελεύθερων φορέων, με αποτέλεσμα να εμφανιστεί το **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**. Τα ενισχυμένα πλέον αντίθετα ηλεκτρικά φορτία των φορέων πλειονότητας στα άκρα, δημιουργούν μια διαφορά δυναμικού ή αλλιώς **φωτοβολταϊκό δυναμικό  $V_{ph}$** , και είναι προς εκμετάλλευση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, από το ηλιακό φως, με την σύνδεση εξωτερικού φορτίου στους ακροδέκτες της επαφής P-N.

Οι αυξημένες τώρα, πυκνότητες φορέων πλειονότητας, στις αντίστοιχες περιοχές, λόγω του φωτορεύματος, έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος διάχυσης  $I_d$ . Το προκαλούμενο ρεύμα είναι ισχυρό και έχει φορά συμβατικού ηλεκτρικού ρεύματος, από τον ημιαγωγό τύπου P στον ημιαγωγό τύπου N. Αυτό το ρεύμα δε διαφέρει σε τίποτα, από εκείνο που δημιουργεί στη μη φωτιζόμενη δίοδο, η εφαρμογή εξωτερικής τάσης ορθής πόλωσης  $V_F$ . Η ορθή τάση  $V_F$  υποβιβάζει το φραγμό δυναμικού  $V_{bi}$  της περιοχής απογύμνωσης και με τιμή στην τάση διόδου  $V_D$ , στην οποία θεωρείται ότι άγει η μη φωτιζόμενη δίοδος, επιτρέπει τη δημιουργία ισχυρού ρεύματος διάχυσης, το ρεύμα διόδου  $I_D$ .

Σε μια φωτιζόμενη επαφή P-N, το αποτέλεσμα της ορθής τάσης, προκαλεί το φωτοβολταϊκό δυναμικό  $V_{ph}$ , όπου η ροή ισχυρού ρεύματος διάχυσης  $I_d$ , μπορεί να γίνει μερικώς μέσα από το χαμηλωμένο φραγμό δυναμικού και μερικώς, μέσα από το εξωτερικό κύκλωμα που περιλαμβάνει το φορτίο, αποδίδοντας σε αυτό ηλεκτρική ενέργεια. Εκτενέστερη περιγραφή στην ενεργειακή ικανότητα μιας φωτιζόμενης επαφής P-N, παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο (2.2.2).

Στην περίπτωση αυτή, το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι, η δίοδος επαφής P-N έχει την ιδιότητα να παράγει το ηλεκτρικό ρεύμα, καθώς αποκτά χαρακτηριστικά οπτικό-ηλεκτρικής γεννήτριας. Γενικά, δομικό στοιχείο για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, στην φωτοβολταϊκή τεχνολογία, αποτελεί η επαφή P-N γνωστή ως **φωτοβολταϊκό στοιχείο** (photovoltaic cell).



Σχήμα 2.44: οπτικό-ηλεκτρική ικανότητα επαφής P-N στηριζόμενη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο

## 2.2 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο

---

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι μια επαφή υλικών, συνήθως ημιαγωγικών στοιχείων, στην οποία η απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική. Σε όλο το εύρος του ημιαγωγικού υλικού, λόγω της φωτοαγωγιμότητας του παράγει φορείς μειονότητας (ηλεκτρόνια-οπές). Όσοι δημιουργούνται κοντά στην επαφή, διαχωρίζονται από το ενδογενές ηλεκτρικό πεδίο της, που προκαλεί ο ενδογενής ιονισμός, προς τα δύο άκρα, όπου επικρατούν οι όμοιοι τους φορείς πλειονότητας, με αποτέλεσμα, τη δημιουργία του φωτοβολταϊκού φαινομένου και την ισχυρότερη διάχυση των φορέων αυτών. Ο ρυθμός παραγωγής των φορέων μειονότητας, εξαρτάται κατά γενικό τρόπο από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ενέργειας, από την έκταση, την φύση της επαφής και από τη θερμοκρασία των σωμάτων που την αποτελούν, ενώ ο ρυθμός απόδοσης τους, τέτοιος, ώστε το φωτοβολταϊκό στοιχείο να εμφανίζει χαρακτηριστικά πηγής ενέργειας, κατάλληλα για τροφοδοσία ηλεκτρικών εφαρμογών.

### 2.2.1 Η τεχνολογική ανάπτυξη του φωτοβολταϊκού στοιχείου

---

Καθώς η τιμή του ενεργειακού διακένου των ημιαγωγών, είναι από τα κυριότερα κριτήρια που καθορίζουν την καταλληλότητά τους, ως υλικά κατασκευής ΦΒ στοιχείων, η ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, ποικίλει ως προς το βασικό ημιαγωγικό υλικό, τα οποία, διαφέρουν τόσο ως προς τον βαθμό απόδοσης φωτοβολταϊκής μετατροπής, όσο και ως προς το κόστος παρασκευής τους, προσφέροντας τα δικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σημαντικό χαρακτηριστικό του ενεργειακού διακένου που συμβάλει στην κατασκευή ενός ΦΒ στοιχείου, είναι το είδος του (άμεσο ή έμμεσο), καθώς η απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται ευκολότερη για ημιαγωγούς με άμεσο διάκενο και επομένως, απαιτείται μικρότερο πάχος υλικού, που συνεπάγεται εξοικονόμηση υλικού.

#### 2.2.1.1 Η τεχνική παρασκευής του φωτοβολταϊκού ημιαγωγού επαφής

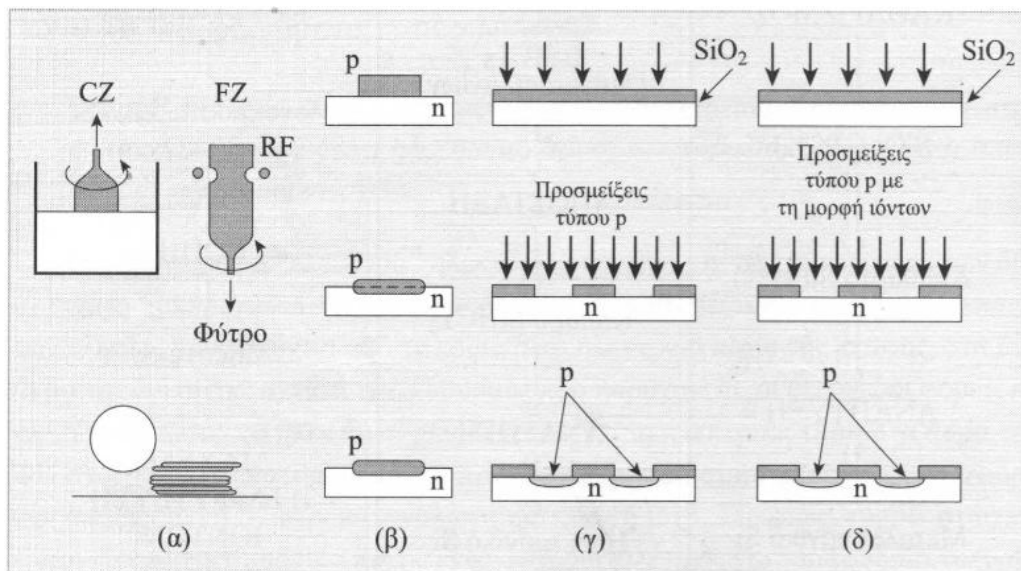
Η διαδικασία της παρασκευής ενός ημιαγωγού επαφής P-N, για τη χρήση του ως φωτοβολταϊκό υλικό, θα μπορούσε να συνοψιστεί με την παρακάτω παραστατική ακολουθία σε σειρά διεργασιών:

- προετοιμασία του βασικού υλικού (δηλαδή του ενδογενούς ημιαγωγού),
- παρασκευή των δυο τμημάτων ημιαγωγού με προσμίξεις τύπου P και τύπου N και
- συνένωση των δυο τμημάτων.

Στην πράξη παρασκευάζεται αρχικά ο ένας εκ των δυο ημιαγωγών πρόσμειξης, π.χ. ο ημιαγωγός τύπου P. Προκύπτει από τον ενδογενή ημιαγωγό, π.χ. το Πυρίτιο (Si), το Γερμάνιο (Ge) κ.α. στον οποίο προστίθεται πρόσμειξη χημικού στοιχείου από την ομάδα των αποδεκτών. Ως αποδέκτες χρησιμοποιούνται συνήθως το Βόριο (B), το Αλουμίνιο (Al), το Γάλλιο (Ga), το Ίνδιο (In) κ.α.. Στο επόμενο στάδιο, δημιουργείται με κάποιες από τις μεθόδους που περιγράφονται παρακάτω, η περιοχή τύπου N, με προσθήκη χημικού στοιχείου από την ομάδα των δοτών. Ως δότες χρησιμοποιούνται συνήθως το Λίθιο (Li), ο Φώσφορος (P), το Αρσενικό (As), το Αντιμόνιο (Sb), το Βισμούθιο (Bi) κ.α..



Γενικά, για την παρασκευή ενός καθαρού ενδογενή ημιαγωγού και την εισαγωγή των διάφορων προσμίξεων, χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι, οι οποίοι είναι:



**Σχήμα 2.45:** τεχνικές παρασκευής επαφών P-N

(α) ανάπτυξης μονοκρυστάλλου, (β) κράματος, (γ) τεχνική διάχυσης και (δ) εμφύτευσης ιόντων

#### A. Μέθοδος ανάπτυξης μονοκρυστάλλου ή μέθοδος Czochralski (CZ) :

Κατά τη μέθοδο Czochralski, μικρό τμήμα του κρυσταλλικού υλικού χρησιμοποιείται ως φύτρο κρυστάλλωσης, तिθέμενο σε επαφή με την επιφάνεια τήγματος του ίδιου κρυσταλλικού υλικού και στη συνέχεια ανασύρεται περιστρεφόμενο πολύ αργά, με ταχύτητα μερικών mm ανά λεπτό. Κρύσταλλοι από τήγμα προσκολλώνται προσανατολιζόμενοι στο φύτρο και έτσι, πίσω του σταδιακά σχηματίζεται ένας μονοκρυστάλλος, κυλινδρικής μορφή, μεγάλης σχετικά διαμέτρου ~6 in και μήκους περίπου 1 m. Μετά το πέρας της διεργασίας, ο κύλινδρος κόβεται σε φέτες κατάλληλου πάχους (wafers), ανάλογα με την προοριζόμενη χρήση. Στην περίπτωση παρασκευής ΦΒ στοιχείων κρυσταλλικού Πυριτίου, οι φέτες αυτές έχουν πάχος συνήθως 300 μm.

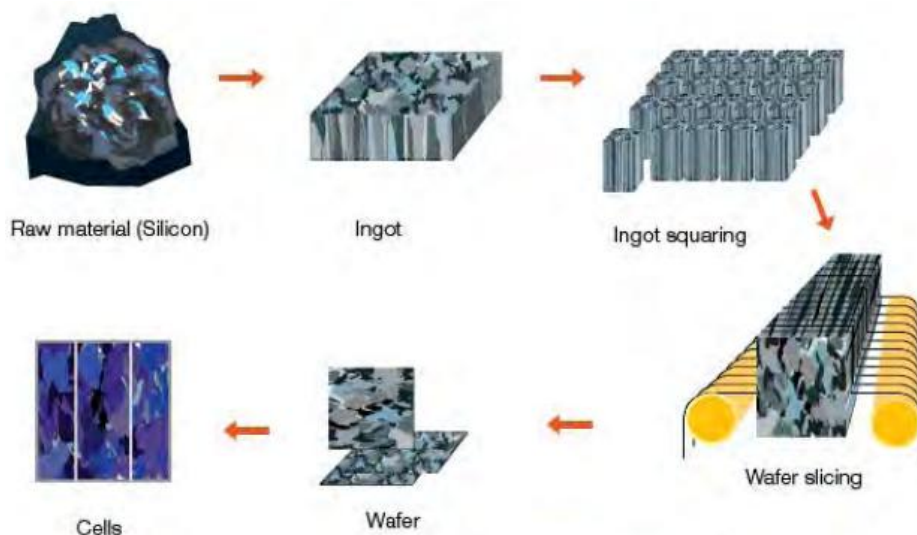
Για τη δημιουργία κρυσταλλικών ημιαγωγών τύπου P και N, ακολουθείται η ίδια εργασία σε τήγμα ημιαγωγού, στο οποίο έχουν προστεθεί οι κατάλληλες για κάθε περίπτωση, προσμίξεις. Δημιουργείται ο κρύσταλλος τύπου N, από τήγμα πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (p-Si), στο οποίο προστίθεται συνήθως Φώσφορος (P). Αφού στερεοποιηθεί πλήρως, κόβεται σε λεπτές φέτες και με τη μορφή αυτή έπειτα, υποβάλλεται σε ειδική κατεργασία εισαγωγής των προσμίξεων αποδεκτών, που για το Πυρίτιο (Si) είναι, συνήθως το Βόριο (B).

#### B. Μέθοδος επιπλέουσας ζώνης (Float Zone method, FZ) :

Η διεργασία αυτή, είναι παρόμοια με αυτή της μεθόδου Czochralski, αλλά εξελίσσεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση (κίνηση από πάνω προς τα κάτω), χωρίς δοχείο τήξεως του πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (p-Si). Το p-Si σε μορφή ράβδου (ingot), τοποθετείται με τον άξονά του κατακόρυφο, σε σύστημα που του επιτρέπει την αργή κατακόρυφη κίνηση. Ένα φύτρο από καθαρό κρυσταλλικό Πυρίτιο, προσαρμόζεται κάτω από τον κύλινδρο p-Si, ο οποίος κατερχόμενος, διέρχεται από το χώρο θέρμανσης,

με συσκευή υψηλής συχνότητας (RF). Το αντίστοιχο τμήμα του (ζώνη) λιώνει, ανακρυσταλλούμενο στο κρυσταλλικό φίλτρο, το οποίο κατέρχεται ομοίως, περιστρεφόμενο. Το λιωμένο Πυρίτιο, που ακολουθεί, στερεοποιείται αμέσως μετά, δημιουργούμενου ενός κατακόρυφου κυλίνδρου καθαρού κρυσταλλικού Πυριτίου, διαμέτρου λίγων cm (~10 cm).

Το τελικό προϊόν, είναι υψηλότερης καθαρότητας σε σχέση με αυτό της μεθόδου CZ, ενώ τα παραγόμενα ΦΒ στοιχεία κρυσταλλικού Πυριτίου, με τη μέθοδο FZ, χαρακτηρίζονται από υψηλότερη απόδοση 17-18%, έναντι 13-14%, των ΦΒ στοιχείων της μεθόδου CZ. Ωστόσο, η μέθοδος CZ αποδεικνύεται οικονομικότερη και δίδει μεγαλύτερης διαμέτρου κυλίνδρους, άρα και μεγαλύτερης διαμέτρου φέτες (wafers).



Σχήμα 2.45: διαδικασία παρασκευής ΦΒ στοιχείου Πυριτίου

#### Γ. Μέθοδος κράματος (alloying technique) :

Στην επιφάνεια λεπτού πλακιδίου ημιαγωγού τύπου N, τοποθετείται ποσότητα άλλης ουσίας, που συμπεριφέρεται ως αποδέκτης, για τον ημιαγωγό του πλακιδίου. Π.χ. πάνω σε λεπτό πλακίδιο Γερμανίου (Ge) τύπου N, τοποθετείται ποσότητα Ινδίου (In), το οποίο είναι εξαιρετικά εύτηκτο. Το σύστημα θερμαίνεται, μέχρι να λιώσει το Ίνδιο. Η διείσδυσή του στο Γερμάνιο, δημιουργεί περιοχή εύτηκτου κράματος, όπου οι προσμίξεις τύπου P, υπερτερούν έναντι των προσμείξεων τύπου N, δημιουργώντας ημιαγωγό Γερμανίου τύπου P. Το απομένον τμήμα του Ινδίου, αποτελεί τη μεταλλική επαφή της πλευράς αυτής. Η τεχνική αυτή, παρουσιάζει το μειονέκτημα της αδυναμίας ακριβούς καθορισμού των διαφόρων στρωμάτων και μάλιστα με επαναλήψιμο τρόπο.

#### Δ. Τεχνική διάχυσης (diffusion technique) :

Το υπόστρωμα, δηλαδή ο ημιαγωγός ορισμένου τύπου πρόσμειξης, τοποθετείται σε κατάλληλο θάλαμο, στον οποίον εισάγεται νέα πρόσμειξη, με τη μορφή ατμών σε υψηλή θερμοκρασία, αντιθέτου τύπου, από την υπάρχουσα στο υπόστρωμα. Τα άτομα της νέας πρόσμειξης διαχέονται σε μέρος του υποστρώματος, υπερκαλύπτοντας τη συγκέντρωση της αρχικής πρόσμειξης. Το τμήμα αυτό, με τη νέα πρόσμειξη, σε στενή επαφή με το υπόλοιπο τμήμα, που περιέχει την αρχική πρόσμειξη, αποτελούν την ημιαγωγική επαφή P-N.

### ***E. Τεχνική εμφύτευσης ιόντων (ion implementation technique) :***

Τα άτομα του ενός είδους προσμείξεων (έστω τύπου N), ιονίζονται και στη συνέχεια αφού επιταχυνθούν σε ηλεκτρικό πεδίο υψηλής τάσης (50-100 kV), εμφυτεύονται σε υπόστρωμα ημιαγωγού προσμείξεων αντίθετου τύπου (τύπου P). Εξέλιξη που αφορά ιδιαίτερα τις δύο τελευταίες μεθόδους, αποτελεί η χρήση λεπτών στρωμάτων οξειδίου του Πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ , πάχους  $\sim 1 \mu\text{m}$ ), πάνω σε υπόστρωμα από ενδογενή ημιαγωγό ή ημιαγωγό πρόσμειξης.

Με χημική μέθοδο το οξείδιο απομακρύνεται από ορισμένα τμήματα του καλυμμένου υποστρώματος, και αποκαλύπτονται τα τμήματά του, εκείνα στα οποία επιθυμείται η εισαγωγή αντίθετου είδους προσμείξεως. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε νέα επίστρωση ημιαγωγικού υλικού ή μεταλλικής επαφής. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται λιθογραφία (φωτολιθογραφία, ακτινών  $\chi$ , δέσμης ηλεκτρονίων, laser κ.α., ανάλογα με τον τρόπο που επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του οξειδίου) και χαρακτηρίζεται από αποτελέσματα εξαιρετικής γεωμετρικής ακριβείας.

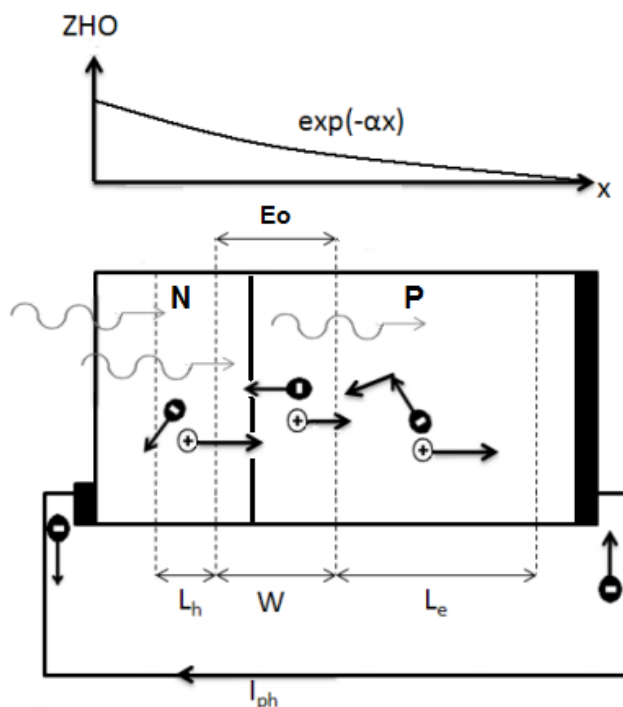
#### **2.2.1.2 Η κατασκευαστική διαμόρφωση του φωτοβολταϊκού στοιχείου**

Η ανάλυση της κατασκευαστικής διαμόρφωσης ενός τυπικού ΦΒ στοιχείου, αφορά την ενδογενή δομή του ημιαγωγικού υλικού της επαφής P-N, που συμβάλει στην ανάπτυξη των φωτοδημιουργούμενων φορέων ρεύματος και την εμφάνιση του φωτοβολταϊκού δυναμικού, στα άκρα της επαφής P-N. Επίσης, αφορά και στην συνολική κατασκευαστική δομή, της τελικής μορφής του ΦΒ στοιχείου, το οποίο συναντάται στο εμπόριο ως προς χρήση, όπου παρατηρούνται τα κατασκευαστικά υλικά τα οποία συμβάλουν στην συλλογή, μεταφορά των φορέων και απόδοση του ως ηλεκτρικό φορτίο, υλικά για αποδοτικότερη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και προστασίας του ΦΒ στοιχείου.

#### **I. Η ενδογενής διαμόρφωση του ημιαγωγικού υλικού**

Το ημιαγωγικό υλικό, κατασκευαστικά, αναπτύσσεται με τέτοιο τρόπο ώστε, επιφάνεια ακτινοβολίας ενός ΦΒ στοιχείου, να αποτελεί η περιοχή τύπου N. Σύμφωνα με τον συντελεστή απορρόφησης ενός ημιαγωγού, ο ρυθμός της απορρόφησης φωτονίων και επομένως των φωτοδημιουργούμενων φορέων (ZHO), είναι μεγαλύτερος κοντά στην επιφάνεια του υλικού και εξασθενεί σε απόσταση από αυτήν (σχέση 2.9). Άρα, στη περιοχή N του ΦΒ στοιχείου, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα οι οπές που δημιουργούνται από το φως, να συναντήσουν αμέσως ελεύθερα ηλεκτρόνια (τα οποία αφθονούν ως φορείς πλειονότητας) και να επανασυνδεθούν, πριν προλάβουν να ολισθήσουν στη ζώνη απογύμνωσης της επαφής και να συμβάλουν, στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Για να αποφευχθεί η πρόωρη επανασύνδεση, το εμπρός τμήμα των ΦΒ στοιχείων κατασκευάζεται σε πολύ λεπτό πάχος (της τάξης του  $\mu\text{m}$ ) ώστε περισσότεροι φωτοδημιουργημένοι φορείς (ZHO), εντός της περιοχής απογύμνωσης και της περιοχής P, να έχουν τον χρόνο να ολισθήσουν υπό την επίδραση του πεδίου της ζώνης απογύμνωσης. Έτσι, καθώς οι οπές οδηγούνται προς τη περιοχή τύπου P και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια προς τη περιοχή τύπου N, όπου και οι μεν και οι δε είναι φορείς πλειονότητας, η πιθανότητα να μην συναντήσουν αντίθετους φορείς και να μην επανασυνδεθούν είναι μεγάλη. Όσο καθαρότερος είναι ένας ημιαγωγός, τόσο μεγαλύτερο μήκος διάχυσης έχουν οι φορείς του και τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα έχουν, ως φορείς μειονότητας, να φτάσουν στη ζώνη απογύμνωσης της επαφής.



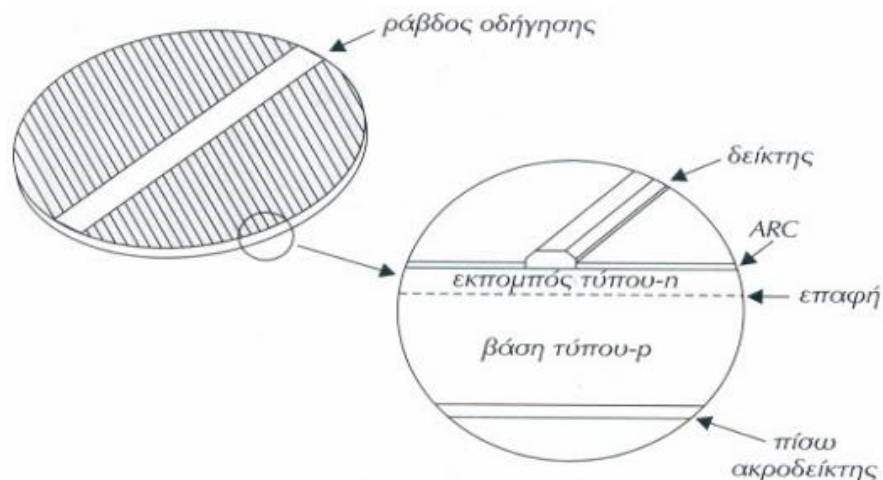
**Σχήμα 2.46:** διαμόρφωση ημιαγωγικού υλικού ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και διακύμανση συγκέντρωσης φορέων

Παράλληλα, για την αύξηση της παραπάνω πιθανότητας, επιδιώκεται να αποκτήσει μεγάλο πάχος η ζώνη απογύμνωσης, που πετυχαίνεται με τη διαμόρφωση της άνω περιοχής σε τύπου N<sup>+</sup>, δηλαδή με μεγάλη συγκέντρωση δοτών, ενώ στη περιοχή τύπου P, η συγκέντρωση αποδεκτών είναι σχετικά μικρή. Συνηθισμένες τιμές για τα ΦΒ στοιχεία του εμπορίου είναι,  $N_D = 5 \cdot 10^{16} / \text{cm}^3$  και  $N_A = 10^{16} / \text{cm}^3$ , περίπου. Έχοντας σαν δεδομένο ότι, η συγκέντρωση των δοτών είναι μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση των αποδεκτών, για να ισχύει η αρχική ηλεκτρική ουδετερότητα της περιοχής απογύμνωσης, θα πρέπει το φορτίο στη περιοχή τύπου P να ισούται με αυτό της περιοχής τύπου N, οπότε η περιοχή απογύμνωσης εκτίνεται περισσότερο στην περιοχή τύπου P.

## II. Η κατασκευαστική δόμηση της μονάδας ΦΒ στοιχείου

Ένα τυπικό ΦΒ στοιχείο έχει συνήθως τετράγωνο σχήμα, πλευράς περίπου 10 cm, επίσης κυκλικό ή σχεδόν κυκλικό και αποτελείται από δύο πλάκες ημιαγωγών που βρίσκονται σε επαφή (επαφή P-N). Στις άνω και κάτω πλευρές του ημιαγωγικού υλικού, είναι συγκολλημένα μεταλλικά ηλεκτρόδια, για την συλλογή των φωτοδημιουργούμενων φορέων ρεύματος.

Η δομή του ηλεκτροδίου της άνω όψης, είναι τέτοια ώστε να αφήνει ελεύθερη τη μεγαλύτερη επιφάνεια της άνω πλάκας, να δέχεται το φως, οπότε κατασκευάζεται από ένα αραιό μεταλλικό πλέγμα σε σχήμα σχάρας. Η σχάρα αυτή, αποτελείται από περισσότερα οριζόντια λεπτά ελάσματα (δείκτες - fingers), τα οποία μαζεύουν τα ηλεκτρόνια που διεγείρονται και μέσω αυτών, διοχετεύονται στα λιγότερα κάθετα και παχιά ελάσματα (ράβδοι οδήγησης - busbars) ή διαφορετικά ζυγοί, προς τον ακροδέκτη. Το ηλεκτρόδιο της κάτω όψης του ΦΒ στοιχείου, κατασκευάζεται από ένα λεπτό και σχετικά πυκνό μεταλλικό πλέγμα, που καλύπτει όλη την επιφάνεια της κάτω πλάκας, του ημιαγωγικού υλικού.

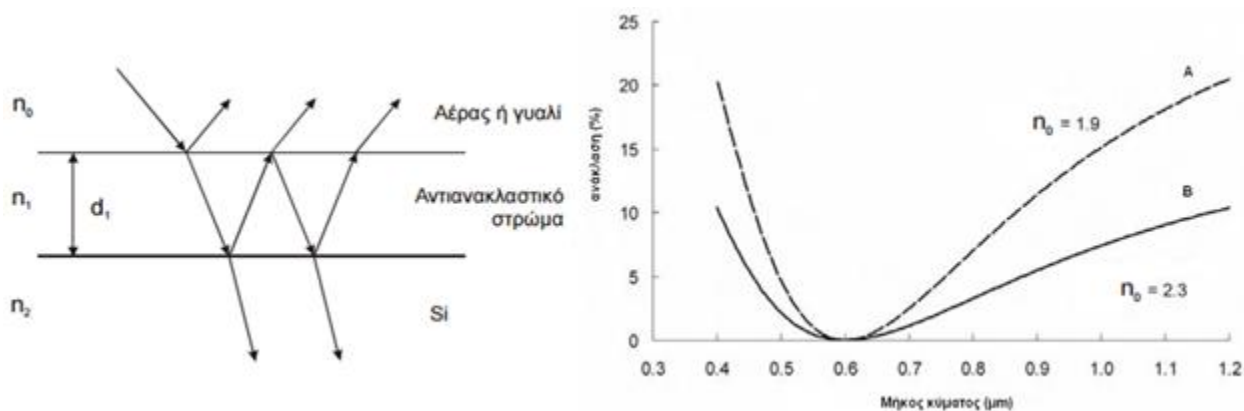


**Σχήμα 2.47:** κατασκευαστική δομή και εσωτερική δομή ενός τυπικού φωτοβολταϊκού στοιχείου

Επιπλέον, για την αντιμετώπιση της ανάκλασης, καθώς μεγάλο μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας χάνεται, χρησιμοποιούνται διαδικασίες βελτίωσης της, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

➤ **Αντιανακλαστική επίστρωση (ARC) :**

Ένα ποσοστό της ανάκλασης προσπιπτόντων φωτονίων, μπορεί να αντιμετωπιστεί καλύπτοντας την ακτινοβολούμενη επιφάνεια του ΦΒ στοιχείου (άνω πλάκα), με λεπτή διαφανή αντιανακλαστική επίστρωση ARC (Anti Reflecting Coating) πχ.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , ορισμένου πάχους, το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ του αέρα και του ημιαγωγικού υλικού. Η αντιανακλαστική επίστρωση ARC, χαρακτηρίζεται από δείκτη διάθλασης  $n$  τέτοιο ώστε, για μια περιοχή μηκών κύματος, συνήθως γύρω από τα 600 nm, κοντά στο μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας τα 480 nm.



**Σχήμα 2.48:** α) ανάκλαση - διάθλαση ακτίνας στην αντιανακλαστική επίστρωση  
β) ανάκλαση επίστρωσης συναρτήσει του μήκους ακτινοβολίας μεταξύ (Α) ημιαγωγού-αέρα, (Β) ημιαγωγού-γυαλιού

Σύμφωνα με τους νόμους της οπτικής, όταν ένα ΗΜ κύμα εισέρχεται σε ένα πυκνότερο μέσο, η φάση του μετατοπίζεται κατά  $\pi/2$ . Αν λοιπόν το πάχος της επίστρωσης  $d_i$ , έχει επιλεγεί έτσι ώστε η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή το γινόμενο συντελεστή διάθλασης και πάχους επίστρωσης ( $n_1 * d_i$ ), είναι ίσο με το 1/4 του μήκους κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας, τότε η ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια ενός ΦΒ στοιχείου, εκμηδενίζεται:

$$d_i = \frac{\lambda}{4 * n_1} \quad (2.23)$$

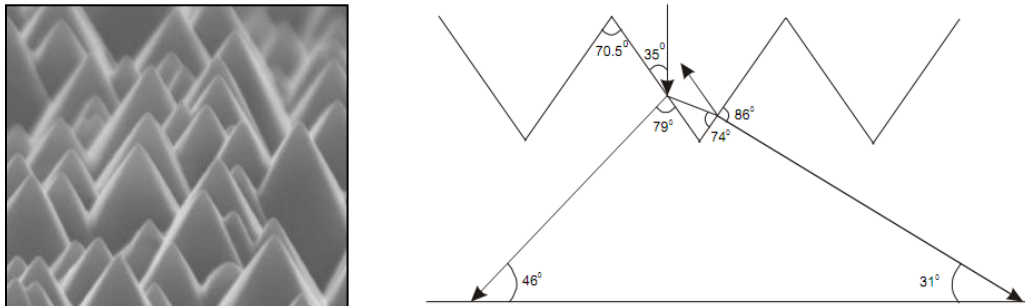
όπου,  $\lambda$  το μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας και  $n_1$  ο συντελεστής διάθλασης της αντανακλαστικής επίστρωσης,

$$n_1 = \sqrt{n_0 * n_2} \quad (2.24)$$

με  $n_0$  ο συντελεστής διάθλασης του ανώτερου στρώματος (αέρας ή γυαλί) που δίνεται στο σχήμα (2.48.β) και  $n_2$  ο συντελεστής διάθλασης του ημιαγωγικού υλικού.

### ➤ *Ανισοτροπική επιφάνεια :*

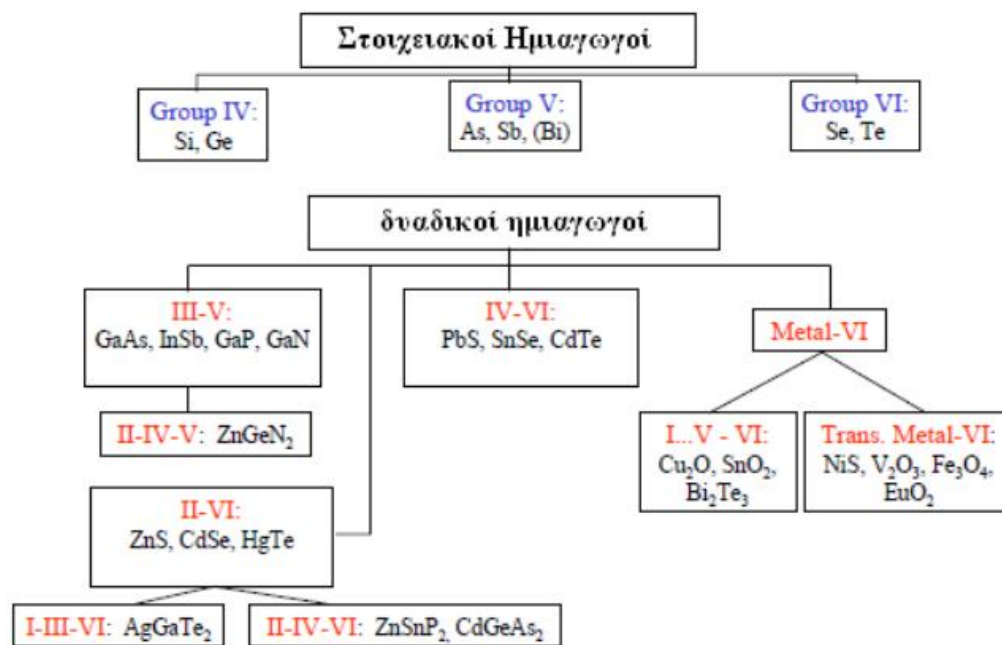
Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης της ανάκλασης, συνίσταται στην μετατροπή της ακτινοβολουμένης επιφάνειας, με τη διαδικασία ανισοτροπικής εγχάραξης. Η επιφάνεια, αποκτά δομή πολλών πυραμίδων με γωνία  $70,5^\circ$  στην κορυφή τους, μειώνοντας έτσι σημαντικά την ανάκλαση, καθώς αυξάνεται η πιθανότητα τα προσπίπτοντα φωτόνια να ανακλαστούν προς το εσωτερικό ενός ΦΒ στοιχείου. Έχει υπολογιστεί ότι με τη συγκεκριμένη τεχνική, η ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται στο 10%. Επιπλέον, με τη διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται βελτίωση της απορρόφησης φωτονίων, καθώς όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα, συναντά την επιφάνεια του ΦΒ στοιχείου με γωνία  $35,25^\circ$ , αναγκάζοντάς την έτσι, να διανύσει μεγαλύτερη διαδρομή εντός του ημιαγωγικού υλικού.



**Σχήμα 2.49:** α) πυραμιδοειδή ακτινοβολουμένη επιφάνεια ΦΒ στοιχείου  
β) διαδρομή ηλιακής ακτινοβολίας σε πυραμιδοειδή επιφάνεια

### **2.2.1.3 Η παραγωγική εξέλιξη του φωτοβολταϊκού στοιχείου**

Για την παραγωγή του ΦΒ στοιχείου, εκτός από τα ήδη υπάρχοντα ημιαγωγικά στοιχεία της 4<sup>ης</sup> ομάδας του περιοδικού πίνακα, Πυρίτιο (P), Γερμάνιο (Ge) ή Σελήνιο (Se), που βρίσκονται στην φύση, για την παρασκευή του ημιαγωγικού υλικού του, χρησιμοποιούνται και χημικές ενώσεις στοιχείων μεταξύ της 3<sup>ης</sup> και 5<sup>ης</sup> ομάδας του περιοδικού πίνακα, όπως του Αρσενικού-Γάλλιου (GaAs) ή της 2<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> ομάδας, όπως του Καδμίου-Τελλουρίου (CdTe). Για παράδειγμα, το Αρσενικό-Γάλλιο (GaAs) που είναι ημιαγωγός άμεσου διάκενου, για να απορροφήσει το 80% των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας, που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του 1,43 eV και την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, αρκεί στρώμα ημιαγωγικού υλικού πάχους 1μm.



Σχήμα 2.50: στοιχειώδεις ημιαγωγοί και ενώσεις ημιαγωγών

Σε αντίθεση, το Πυρίτιο (Si) που έχει έμμεσο ενεργειακό διάκενο με σχετικά μικρή τιμή μόλις 1,1 eV, για την απορρόφηση και την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, χρειάζεται στρώμα πάχους περίπου 100 μm. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά του Πυριτίου, δεν το καθιστούν ως τον ιδανικότερο ημιαγωγό για μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, ωστόσο αποτελεί την πρώτη ύλη κατασκευής, για το 90% της ΦΒ τεχνολογίας, για τους εξής λόγους:

- Μπορεί να βρεθεί πολύ εύκολα στη φύση, καθώς είναι το δεύτερο σε αφθονία υλικό που υπάρχει στον πλανήτη μετά το Οξυγόνο. Εντοπίζεται σχεδόν σε όλα τα είδη πετρωμάτων, αλλά υπό μορφή Χαλαζία, ο οποίος είναι ορυκτό του Πυριτίου, συγκεκριμένα διοξειδίου του Πυριτίου (SiO<sub>2</sub>) και αποτελεί το κύριο συστατικό της άμμου. Σπανίως το Πυρίτιο βρίσκεται σε χημικά καθαρή στοιχειακή μορφή στη φύση.



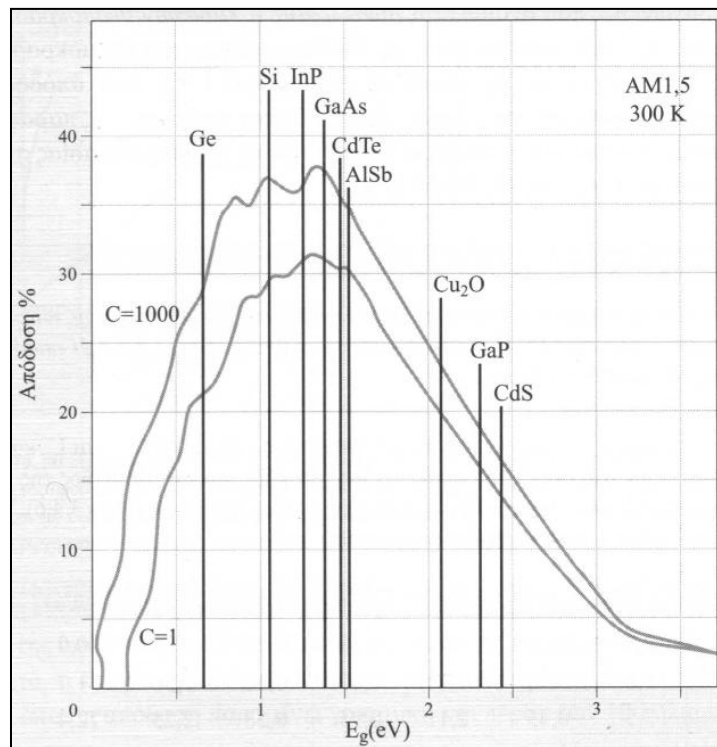
Σχήμα 2.51: α) μορφή είδους ορυκτού Χαλαζία  
β) χημικά καθαρή στοιχειακή μορφή Πυριτίου

- Έπειτα από απαιτούμενη επεξεργασία για την αξιοποίησή του, το Πυρίτιο έχει ικανοποιητική καθαρότητα και τελειότητα κρυσταλλικής δομής. Δηλαδή, μπορεί εύκολα να λιώσει και να μορφοποιηθεί, ώστε να μετατραπεί στην μονοκρυσταλλική του μορφή.

- Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του Πυριτίου, μπορούν να διατηρηθούν μέχρι και στους 125 °C, γεγονός που επιτρέπει την χρήση του σε ιδιαίτερα δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτός είναι και ο λόγος, που τα ΦΒ στοιχεία Πυριτίου λειτουργούν ικανοποιητικά, σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, σημαντικό κριτήριο για την αξιολόγηση του ημιαγωγικού υλικού, αποτελεί η απορρόφηση και η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, που συνιστά την απόδοση μετατροπής φωτοβολταϊκής ενέργειας  $\eta$  του ΦΒ στοιχείου. Στο παρακάτω σχήμα, δίδεται η ιδανική απόδοση φωτοβολταϊκής μετατροπής  $\eta$ , των διαφόρων ΦΒ στοιχείων, που αντιστοιχούν στο σύνολο σχεδόν των ημιαγωγικών υλικών παραγωγής τους, σε συνάρτηση με το ενεργειακό διάκενο  $E_g$  του αντίστοιχου ημιαγωγικού υλικού.

Άλλα σημαντικά κριτήρια για την αξιολόγηση των ημιαγωγικών υλικών αλλά και των υπολοίπων υλικών κατασκευής των ΦΒ στοιχείων, είναι το κόστος της παραγωγής τους, η σταθερότητα τους στην επίδραση των εξωτερικών συνθηκών και κυρίως της υγρασίας και της θερμότητας, η τοξικότητα των διαφόρων συστατικών και το ειδικό τους βάρος. Έτσι, ως κύριοι στόχοι εξέλιξης και βελτίωσης της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, είναι η κατασκευή ΦΒ στοιχείων, με υψηλότερο κατά το δυνατό βαθμό απόδοσης μετατροπής φωτοβολταϊκής ενέργειας και χαμηλότερο κόστος κατασκευής.



**Σχήμα 2.52:** μέγιστη απόδοση φωτοβολταϊκής μετατροπής συναρτήσει του ενεργειακού διακένου ημιαγωγικών υλικών

Μία συνοπτική αναφορά της λειτουργίας και των κυριότερων χαρακτηριστικών κατασκευής των ΦΒ στοιχείων, που είτε αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια, είτε νέων φωτοβολταϊκών τεχνολογιών που βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο, παρατίθενται στη συνέχεια, ενώ στον επόμενο πίνακα, παρουσιάζονται μερικές τυπικές αποδόσεις φωτοβολταϊκής μετατροπής των ΦΒ στοιχείων, ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους, παλαιών και νέων τεχνολογιών.



## I. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού Πυριτίου (crystalline Silicon)

### **Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (s-Si) :**

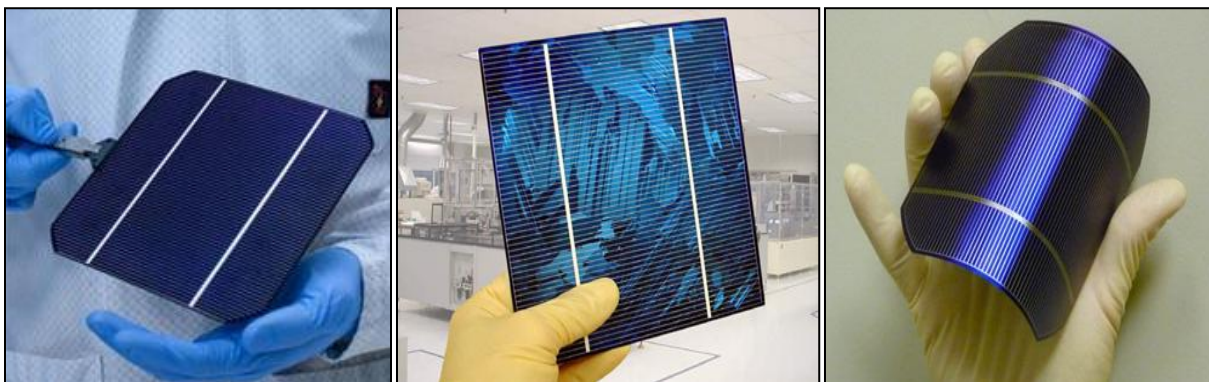
Κατασκευάζεται από ένα μονό επίστρωμα (wafer) κρυσταλλικού Πυριτίου (single-crystal Silicon), σε σχήμα κύκλου ή σχεδόν κύκλου, καθώς και τετράγωνα, πάχους περίπου 300  $\mu\text{m}$ . Έχει υψηλή απόδοση, της τάξης του 15-18%, αλλά και υψηλό κόστος κατασκευής, καθώς προέρχεται από Πυρίτιο υψηλής καθαρότητας. Χαρακτηρίζεται από το πλεονέκτημα της καλύτερης ενεργειακής πυκνότητας δηλαδή της σχέσης απόδοσης-επιφάνειας, ενώ η απόδοση του επηρεάζεται αρνητικά σε σημαντικό βαθμό όταν πρόκειται για χαμηλές και υψηλές τιμές θερμοκρασίας ή πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, όμως, η κατασκευή του είναι αρκετά ανθεκτική ώστε η απόδοση να μην επηρεάζεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου.

### **Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (mc-Si) :**

Κατασκευάζεται από αρκετά επιστρώματα (wafers) κρυσταλλικού Πυριτίου (multicrystalline Silicon), τετραγωνικής μορφής και πάχους 10 έως 50  $\mu\text{m}$  το καθένα. Ενώ διατηρείται η κρυσταλλική δομή, πλέον εμφανίζονται διαφορετικοί κρύσταλλοι Πυριτίου, διακριτοί από γυμνό οφθαλμό, στους οποίους, τα σημεία της μεταξύ τους ένωσης, λειτουργούν ως κέντρα επανασύνδεσης φορέων (κατασκευαστικές ατέλειες), με αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης του. Η απόδοση του κυμαίνεται από 13-16%, η οποία όπως και στα s-Si, ελαττώνεται κατά πολύ για ακραίες τιμές θερμοκρασίας ή πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον, η πάροδος του χρόνου επιδρά αρνητικά στη διάρκειας ζωής του, που σημαίνει την μείωση της απόδοσης του, ενώ έχει χαμηλότερο κόστος από τα s-Si, επειδή απαιτεί πολύ μικρότερη ακρίβεια κατασκευής.

### **Ταινίας Πυριτίου (ribbon-Si) :**

Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία. Κατασκευάζεται από λεπτή ταινία (τηγμένο υλικό) πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (ribbon Silicon), πάχους περίπου 300  $\mu\text{m}$ . Η απόδοση για αυτό το ΦΒ στοιχείο, έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13%, ενώ έχει υψηλό κόστος κατασκευής, καθώς προσφέρει έως και 50% μείωση στη χρήση Πυριτίου, σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής ΦΒ στοιχείων κρυσταλλικού Πυριτίου.



**Σχήμα 2.53:** τελικό προϊόν ΦΒ στοιχείου

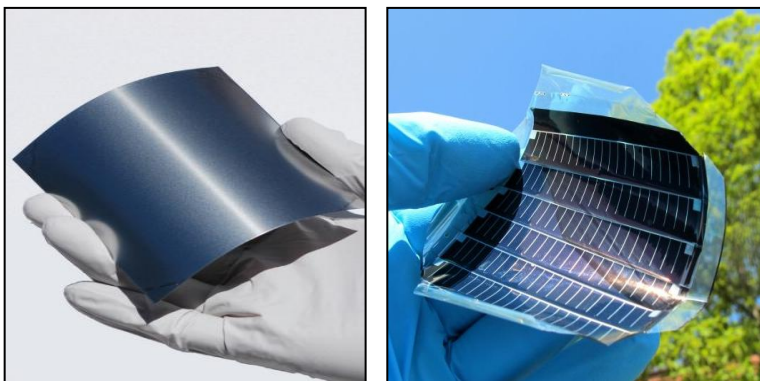
(α) μονοκρυσταλλικού Πυριτίου, (β) πολυκρυσταλλικού Πυριτίου και (γ) ταινίας Πυριτίου

## II. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμένων (thin films)

### **Άμορφου Πυριτίου (a-Si) :**

Αποτελείται από λεπτούς υμένες άμορφου Πυριτίου (amorphous Silicon), πάχους 0,1  $\mu\text{m}$  ο κάθε υμένας, ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 100-300  $\mu\text{m}$ , με αποδοτική περιοχή ενεργειακού διακένου μεταξύ 1,2-1,6 eV. Η απόδοση του είναι μικρότερη σε σχέση με άλλες τεχνολογίες, καθώς κυμαίνεται από 6-8%. Το άμορφο Πυρίτιο (μη κρυσταλλική δομή πλέγματος ατόμων Πυριτίου) είναι ένας ημιαγωγός που διαφέρει ουσιαστικά από το κρυσταλλικό Πυρίτιο, καθώς ο συντελεστής απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας ξεπερνά το  $10^4 \text{ cm}^{-1}$ , δηλαδή είναι πολύ μεγαλύτερος από του κρυσταλλικού Πυριτίου, ιδιότητα που καθιστά το a-Si σχεδόν ημιαγωγό άμεσου διακένου και αρκεί ένα λεπτό στρώμα, πάχους λίγων  $\mu\text{m}$ , για την κατασκευή ΦΒ στοιχείων

Σημαντικό πλεονέκτημα του, είναι ότι δεν επηρεάζεται πολύ από ακραίες θερμοκρασίες, βεβαίως, κατά την διάρκεια του χειμώνα η απόδοση του πέφτει, αλλά το καλοκαίρι επανέρχεται (φαινόμενο θερμικής αναγέννηση). Επίσης, πλεονεκτεί σημαντικά στην απορρόφηση διάχυτης ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια συννεφιασμένων ημερών, γι αυτό και προτείνονται για περιοχές περιορισμένης ηλιοφάνειας. Το κύριο μειονέκτημα του, έγκειται στην χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα καθώς, για την παραγωγή ενός συγκεκριμένου ποσού ενέργειας, απαιτείται σχεδόν διπλάσια επιφάνεια. Επίσης, υπάρχουν αμφιβολίες στη διάρκεια ζωής τους, αφού δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις. Σημαντική βελτίωση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του a-Si, γίνεται με τη προσθήκη ατόμων υδρογόνου (a-Si:H).



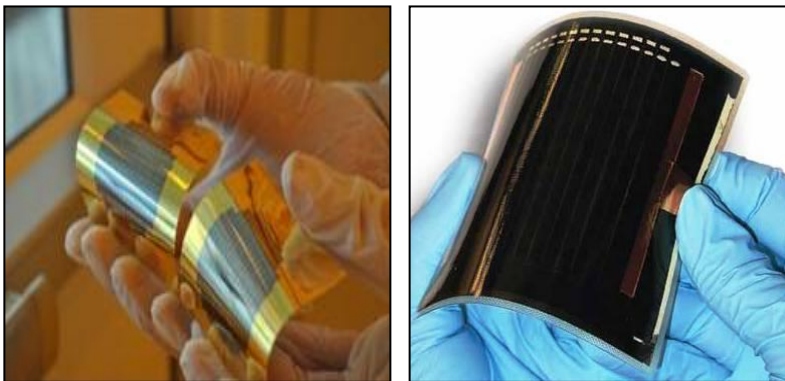
**Σχήμα 2.54:** τελικό προϊόν ΦΒ στοιχείου λεπτών υμένων (α) άμορφου Πυριτίου και (β) Καδμίου-Τελλουρίου

### **Καδμίου - Τελλουρίου (CdTe) :**

Η κρυσταλλική ένωση Καδμίου Τελλουρίου, είναι ένα αποτελεσματικό υλικό κατασκευής ΦΒ στοιχείου. Το CdTe, έχει ενεργειακό διάκενο  $\approx 1,5 \text{ eV}$ , το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα, κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα, όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως, μας προσφέρουν αποδόσεις μεταξύ 6-8%. Μειονέκτημα για την χρήση του, αποτελεί το γεγονός ότι το Κάδμιο σύμφωνα με έρευνες είναι καρκινογόνο, με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του και επιπλέον, η χρήση του Καδμίου, επιβάλλει την αναγκαστική ανακύκλωση τους, μετά το πέρας της ζωής τους. Επίσης, μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός της χρήσης του σπάνιου μετάλλου Τελλουρίου.

### **Αρσενικού - Γαλλίου (GaAs) :**

Η κρυσταλλική ένωση Αρσενικού Γαλλίου, έχει ενεργειακό διάκενο  $\approx 1,43$  eV και είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς τα ΦΒ στοιχείο έχει επιδείξει αποδόσεις  $\approx 19,9\%$ , που αποτελεί την υψηλότερη στα λεπτού υμενίου. Έχει το πλεονέκτημα, ότι αντέχει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του, ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων, όπως το Αλουμίνιο και ο Ψευδάργυρος, αλλά είναι πιο σπάνιο και από το Χρυσό. Το Αρσενικό έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας, είναι το υπερβολικό κόστος παρασκευής του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.



*Σχήμα 2.55: τελικό προϊόν ΦΒ στοιχείου λεπτών υμένων (α) Αρσενικού-Γαλλίου και (β) Δισεληνίου-Ινδίου-Χαλκού*

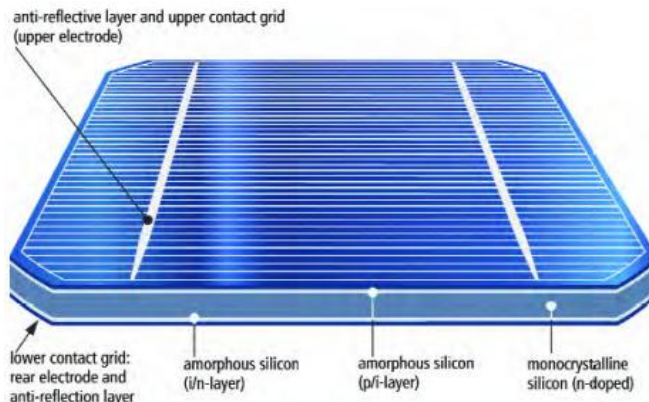
### **Δισεληνίου - Ινδίου - Χαλκού (CuInSe<sub>2</sub>, CIS) :**

Η κρυσταλλική ένωση Δισεληνίου Ινδίου Χαλκού, έχει ενεργειακό διάκενο  $\approx 1$  eV και τον υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης προσπίπτουσας ακτινοβολίας, που έχει μετρηθεί μέχρι σήμερα, Παρ όλα αυτά, η απόδοση του ΦΒ στοιχείου κυμαίνεται στο 11%. Με την πρόσμειξη Γαλλίου (CIGS), η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί περισσότερο. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των CIS εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον λόγο Χαλκού-Ινδίου. Πλεονεκτούν, καθώς δεν εμφανίζουν μείωση στην απόδοσή τους λόγω της ακτινοβολίας. Μειονέκτημα της τεχνολογίας, είναι οι περιορισμένες ποσότητες Ινδίου που είναι διαθέσιμες στη φύση, καθώς επίσης και τα αυξημένα μέτρα ασφαλείας κατά την κατασκευή τους, εξαιτίας της παραγωγής Σεληνίου-Υδρογόνου, ενός εξαιρετικά τοξικού αερίου.

### **III. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία νέας τεχνολογίας**

#### **Υβριδικό ΦΒ στοιχείο :**

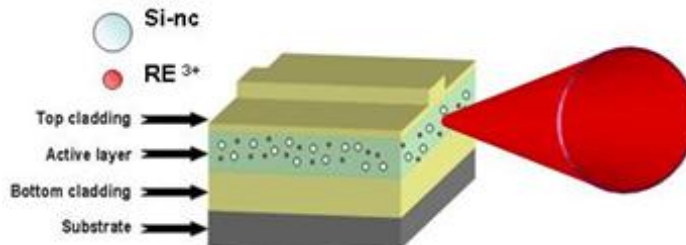
Αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών (HIT, heterojunction with intrinsic thin layer - ετεροενώσεις με ενδογενή λεπτά στρώματα). Συνήθως, αποτελείται από δύο στρώσεις a-Si, στην άνω και κάτω επιφάνεια του υλικού, ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μία στρώση s-Si. Πλεονεκτήματα του, είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και στην διάχυτη ακτινοβολία. Χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση  $\approx 19,7\%$ , το οποίο σημαίνει ότι χρειάζεται μικρότερη επιφάνεια, για να έχει την απόδοση. Μειονέκτημα του είναι το υψηλό κόστος σε σχέση με τα συμβατικά κρυσταλλικά Πυριτίου και λόγω του ότι η τεχνολογία είναι καινούργια, δεν υπάρχουν ικανοποιητικά στοιχεία για την διάρκεια ζωής τους και την επίπτωση στην απόδοσή τους



Σχήμα 2.56: κατασκευαστική δομή υβριδικού ΦΒ στοιχείου Πυριτίου (HIT)

**ΦΒ στοιχείο κβαντικών τελείων :**

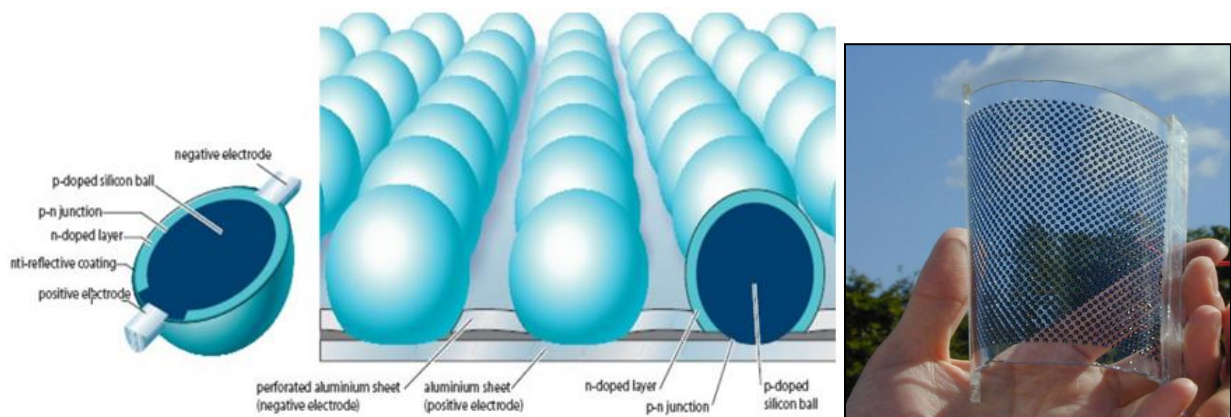
Αποτελεί ΦΒ στοιχείο νανοκρυσταλλικού Πυριτίου (nc-Si, nanocrystalline Silicon) και βασίζεται σε υπόστρωμα με νανοκρυστάλλους, δηλαδή σε νανοδιάστατο κρυσταλλικό ημιαγωγό Πυριτίου. Η βασική του πρώτη ύλη είναι το Πυρίτιο, το CdTe ή το CIGS και τα υποστρώματα είναι γενικά Πυριτίου ή διάφοροι οργανικοί αγωγοί. Η τεχνολογία αυτή, εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια, πειραματίζονται σε αυτήν με πολύ υποσχόμενα αποτελέσματα. Είναι πιθανό στο μέλλον, τα ΦΒ στοιχείο αυτό, να προσφέρει πλεονεκτήματα όπως ευκαμψία, χαμηλό κόστος, καθαρή πηγή ενέργειας και απόδοση που φτάνει έως και 65%.



Σχήμα 2.57: κατασκευαστική δομή ΦΒ στοιχείου νανοκρυσταλλικού Πυριτίου (nc-Si)

**ΦΒ στοιχείο σφαιριδίων :**

Αντίθετα με τα συμβατικά ΦΒ στοιχεία Πυριτίου, που αποτελούνται από φέτες (wafers) ή λεπτούς υμένες (thin films) Πυριτίου, αυτό το ΦΒ στοιχείο αποτελείται από σφαιρικού τύπου Πυριτίου. Αποτελείται από χιλιάδες σφαιρίδια Πυριτίου, διαμέτρου 0,7-1,2 mm, συνδεδεμένα ανάμεσα σε δύο φύλλα Αλουμινίου. Κάθε σφαιρίδιο λειτουργεί ως ανεξάρτητο μικροσκοπικό ΦΒ στοιχείο, απορροφώντας την ηλιακή ακτινοβολία και μετατρέποντάς την σε ηλεκτρισμό. Τα φύλλα Αλουμινίου, προσδίδουν στο υλικό τη φυσική αντοχή που χρειάζεται, του επιτρέπουν να είναι εύκαμπτο αλλά και ελαφρύ, ενώ ταυτόχρονα παίζουν το ρόλο της ηλεκτρικής επαφής. Η γεμάτη φυσαλίδες επιφάνεια που δημιουργούν τα σφαιρίδια Πυριτίου, επιτρέπει μεγαλύτερη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας, δίνοντας στο ΦΒ στοιχείο, αποδοτικότητα της τάξης ≈11%.

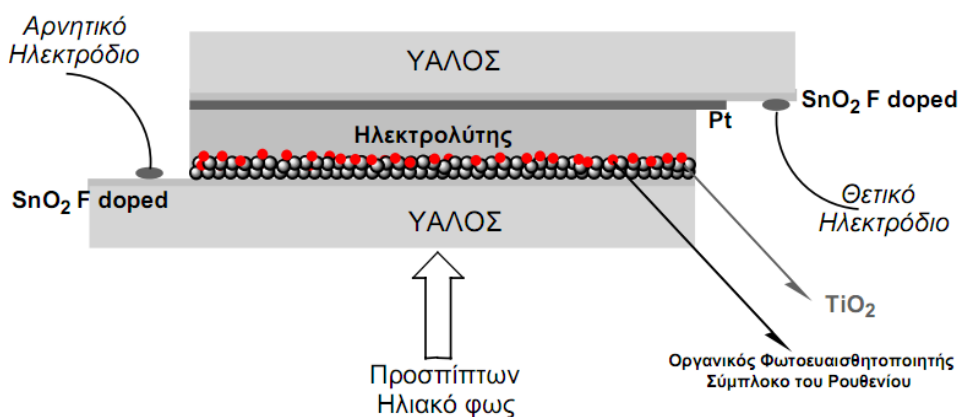


Σχήμα 2.58: ΦΒ στοιχείο σφαιρικού Πυριτίου (α) κατασκευαστική δομή και (β) τελικό προϊόν

**Οργανικό-πολυμερές ΦΒ στοιχείο :**

Το οργανικό ή ηλεκτροχημικό στοιχεία, βασίζει την λειτουργία του στο φωτοηλεκτροχημικό φαινόμενο, για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Αποτελείται από ηλεκτρολύτη (οργανικό διάλυμα), που περιέχει έγχρωμη οργανική ουσία (χλωροφύλλη) ως φωτοευαίσθητοποιητή, σε επαφή με νανοδιάστατο ημιαγωγό από διοξείδιο του Τιτανίου ( $TiO_2$ ). Η αρχική μορφή ήταν υγρή και στην πορεία εξελίχθηκε σε παχύρρευστη. Λόγω της ρευστότητας της πρώτης ύλης, παρουσιάζουν ευκαμψία και επιπλέον, χαρακτηρίζονται από πολυχρωμία, λόγω των χρωστικών ουσιών στο διάλυμα.

Τα οργανικό ΦΒ στοιχείο, είναι ιδιαίτερα ευπαθές στο φως, λόγω των έγχρωμων ουσιών και ακολούθως παρουσιάζει ταχεία γήρανση. Για να παρακαμφθεί αυτό το μειονέκτημα, προτάθηκαν λύσεις όπως τα πολυμερή υλικά (πλαστικά), τα οποία ανήκουν στην κατηγορία των οργανικών υλικών. Σήμερα, η απόδοση των πολυμερών οργανικών ΦΒ στοιχείων, έχει φτάσει περίπου το 5%. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας, είναι το εξαιρετικά χαμηλό κόστος παρασκευής τους, το οποίο αντισταθμίζει τον πολύ μικρό χρόνο ζωής τους, σε σχέση με τα συμβατικά ΦΒ στοιχεία.



Σχήμα 2.59: κατασκευαστική δομή οργανικού-πολυμερές ΦΒ στοιχείου

## 2.2.2 Η ενεργειακή ικανότητα του φωτοβολταϊκού στοιχείου

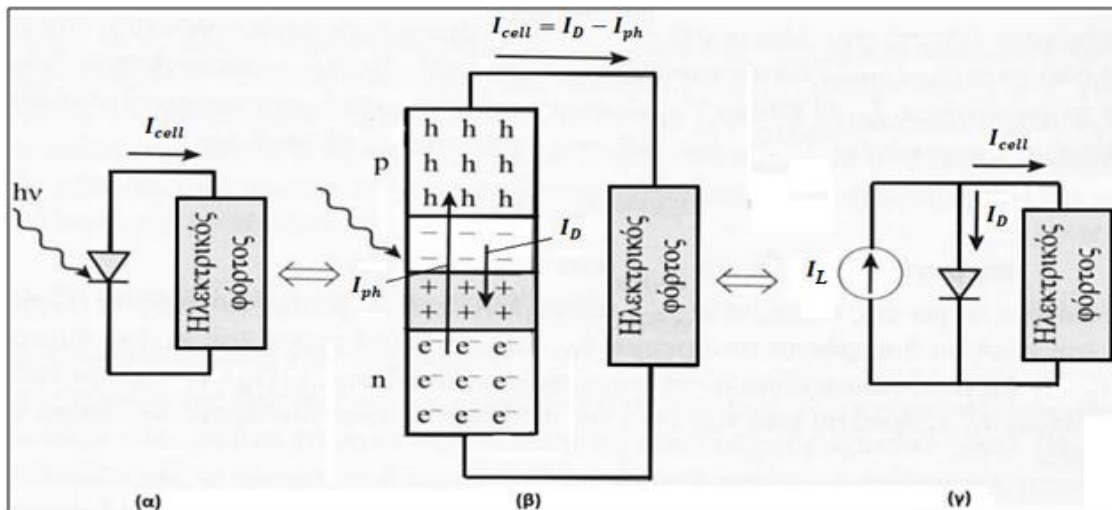
Υπό συνθήκες σταθερού φωτισμού, μέσα στο ΦΒ στοιχείο κυκλοφορούν δύο ρεύματα, το αντίθετης φοράς φωτόρευμα και το ρεύμα διάχυσης των φορέων. Η διάχυση, μπορεί να γίνει μερικώς μέσα από το χαμηλωμένο ενεργειακό φραγμό της επαφής P-N και μερικώς μέσα από έναν καταναλωτή. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός ΦΒ στοιχείου ή συνδυασμός μερικών εξ αυτών, κάτω από συνθήκη ηλιακό φωτισμό, έχουν τιμές κατάλληλες, για την αξιοποίηση της διάταξης αυτής, ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, όσον αφορά την ηλεκτρική ισχύ που προσφέρεται στον καταναλωτή. Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας όμως, το ΦΒ στοιχείο εξαρτάται σημαντικά, όπως είναι φυσικό, από εξωγενείς παράγοντες και ενδογενείς, οι οποίοι προκαλούν άμεση μεταβολή στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ΦΒ στοιχείου.

### 2.2.2.1 Η ηλεκτρική κατάσταση του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το φωτόρευμα αποτελεί αντίθετο ρεύμα ολίσθησης, που οφείλεται στη κίνηση των φωτοδημιουργούμενων φορέων μειονότητας, υπό την επίδραση του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου. Λόγω της αύξησης των πυκνοτήτων των φορέων πλειονότητας, από τους φορείς μειονότητας, που συσσωρεύονται στις άκρες του ΦΒ στοιχείου, δημιουργείται φωτοβολταϊκό δυναμικό (τάση ορθής φοράς), που μειώνει το φράγμα δυναμικού του ενδογενούς πεδίου, προκαλώντας ισχυρό ρεύμα διάχυσης, των φορέων πλειονότητας. Η παρουσία όμως ηλεκτρικών απωλειών, λειτουργεί αρνητικά, μειώνοντας τη παραγωγή και το χρόνο ζωής των φορέων (επανασύνδεση φορέων). Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, δημιουργείται το ηλεκτρικό ισοδύναμο του ΦΒ στοιχείου, για την αποτύπωση της λειτουργίας του.

#### I. Η ιδανική λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Για να κατανοηθεί η ηλεκτρική συμπεριφορά του ΦΒ στοιχείου, προχωρώντας σε μία πρώτη εκτίμηση, μπορεί να προσομοιωθεί με ένα απλοποιημένο ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα, που περιγράφει την **ιδανική λειτουργία** του ΦΒ στοιχείου, χωρίς επανασυνδέσεις φορέων (απώλειες ενέργειας) στην δομή του. Το σχήμα (2.60.α) αποτελεί μια τυπική μορφή ηλεκτρικού κυκλώματος ενός φωτιζόμενου ΦΒ στοιχείου, ενώ στο σχήμα (2.60.β), παρίσταται η πραγματική κατάσταση ρευμάτων μέσα σ αυτό, εξαιτίας του φωτός. Η ιδανική λειτουργία ενός ΦΒ στοιχείου, είναι ισοδύναμη με εκείνη που δημιουργεί μια πηγή σταθερής έντασης, η οποία ελέγχεται από μια παράλληλα συνδεδεμένη δίοδο, όπως στο σχήμα (2.60.γ).

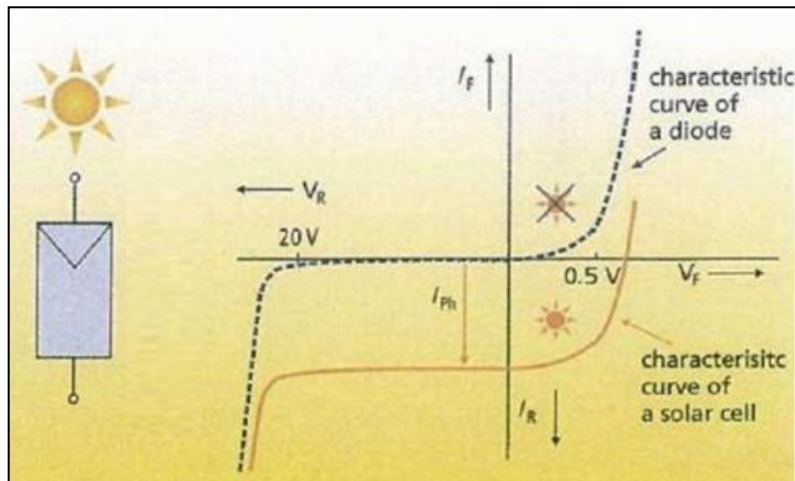


Σχήμα 2.60: ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικής λειτουργίας ΦΒ στοιχείου

Όταν στα άκρα του ισοδύναμου συνδεθεί ηλεκτρικό φορτίο, το κύκλωμα θα διαρρέεται από το ρεύμα διόδου  $I_D$  και το αντίθετης φοράς ρεύμα  $I_L$  της πηγής σταθερής έντασης. Το ρεύμα  $I_L$ , ισοδυναμεί με το φωτόρευμα  $I_{ph}$ , που δημιουργείται κατά τη ροή των φωτοδημιουργούμενων φορέων. Το ρεύμα  $I_D$ , το οποίο εμφανίζεται όταν η διόδος άγει με την ορθή τάση διόδου  $V_D$ , ισοδυναμεί με το ισχυρό ρεύμα διάχυσης  $I_d$ , το οποίο δημιουργείται κατά την εμφάνιση του φωτοβολταϊκού δυναμικού  $V_{ph}$ , στα άκρα του ΦΒ στοιχείου. Το δυναμικό αυτό, εμφανίζεται και κατ επέκταση στα άκρα του φορτίου ενώ αποτελεί την αποδιδόμενη **ηλεκτρική τάση ΦΒ στοιχείου  $V_{cell}$** . Έτσι, στα άκρα του φορτίου, από το άθροισμα των δύο συνιστωσών ρεύματος, προκύπτει το αποδιδόμενο **ηλεκτρικό ρεύμα ΦΒ στοιχείου  $I_{cell}$** , ενώ εξαρτάται αφενός από την ηλιακή ακτινοβολία, αφετέρου από την τιμή του φορτίου:

$$I_{cell} = I_D - I_L = I_o * \left[ \exp\left(\frac{V_D}{n_{i\delta} * V_T}\right) - 1 \right] - I_L \quad (2.25)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω μαθηματική ανάλυση, προκύπτει η χαρακτηριστική καμπύλη μεταξύ του ρεύματος ΦΒ στοιχείου  $I_{cell}$  και της τάσης ΦΒ στοιχείου  $V_{cell}$ . Έτσι, για να κατασκευαστεί η χαρακτηριστική I-V, χρησιμοποιούνται δύο καμπύλες, αντίστοιχες, για τα ρεύματα που κυκλοφορούν μέσα στο ΦΒ στοιχείο. Η τιμή του ρεύματος διάχυσης ή διόδου, ακολουθεί την χαρακτηριστική καμπύλη της μη φωτιζόμενης διόδου (σχήμα 2.35), καθώς προέρχεται από ορθή πόλωση βάση του ΦΒ δυναμικού, ενώ η χαρακτηριστική του φωτορεύματος, μετατοπίζεται στο 4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο κατά  $-I_{ph}$ , καθώς αποτελεί συνιστώσα αντίθετου πρόσημου (φοράς) και αφαιρείται από το ρεύμα διόδου  $I_D$ .

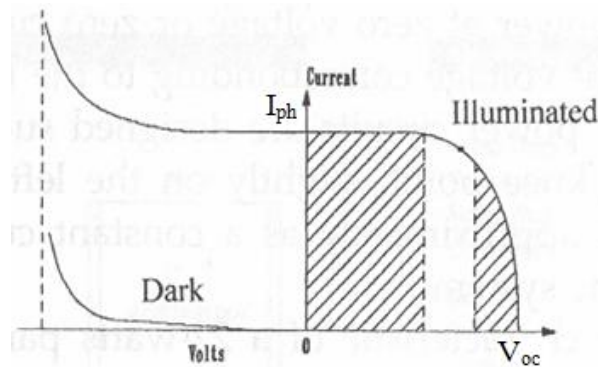


**Σχήμα 2.61:** συμβολισμός στα ηλεκτρικά κυκλώματα και χαρακτηριστική καμπύλη V-I ΦΒ στοιχείου

Σε μία πρώτη εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός φωτιζόμενου ΦΒ στοιχείου, η σημαντική περιοχή για την χαρακτηριστική I-V, προκύπτει στο 4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο, όπου το ΦΒ στοιχείο συμπεριφέρεται ως πηγή ενέργειας. Για λόγους κυκλωματικής ανάλυσης (Kirchhoff), η σχέση ρεύματος ΦΒ στοιχείου  $I_{cell}$  επιτυγχάνεται, αλλάζοντας πρόσημο στις συνιστώσες της ιδανικής σχέσης (2.25). Με την αναστροφή, η χαρακτηριστική φόρτισης ενός ιδανικού ΦΒ στοιχείου που προκύπτει από τα σημεία λειτουργίας, στο 4<sup>ο</sup> τεταρτημορίου της χαρακτηριστικής I-V, αναστρέφεται και αναπαρίσταται στο 1<sup>ο</sup>.

Παρατηρώντας τη χαρακτηριστική I-V, στο επόμενο σχήμα, στην αριστερή ευρεία γραμμοσκιασμένη περιοχή, το παρεχόμενο ηλεκτρικό ρεύμα είναι περίπου σταθερό για μεγάλες διακυμάνσεις της τάσεως, καθώς το ΦΒ στοιχείο συμπεριφέρεται ως πηγή ιδανικής έντασης, παράγοντας τάση για την αντίστοιχη

τιμή. Στη συνέχεια, στη δεξιά γραμμοσκιασμένη περιοχή, το παρεχόμενο ηλεκτρικό ρεύμα μειώνεται ραγδαία με μια μικρή άνοδο της τάσης, σε μια στενή περιοχή τάσεων, προσεγγίζοντας το ΦΒ στοιχείο, τη συμπεριφορά πηγής ιδανικής τάσης, παράγοντας ρεύμα για την αντίστοιχη τιμή φορτίου.

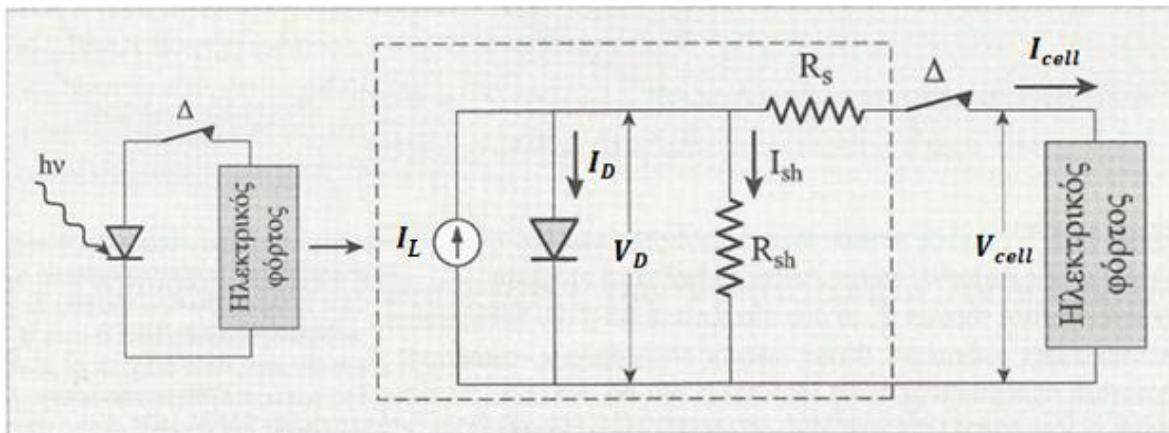


Σχήμα 2.62: χαρακτηριστική φόρτισης ΦΒ στοιχείου ως πηγή ενέργειας

Συμπερασματικά, το ΦΒ στοιχείο αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία στην ιδανική της συμπεριφορά, έχει την ιδιότητα, για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας, στην επιφάνεια του, να διατηρεί σταθερή τιμή ρεύματος σ ένα ηλεκτρικό φορτίο. Σε κάθε περίπτωση, το ΦΒ στοιχείο προσαρμόζει την ηλεκτρική τάση  $V_{cell}$  του, στην τιμή του ηλεκτρικού φορτίου, π.χ. στη τιμή αντίστασης ενός ωμικού καταναλωτή, ώστε η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος  $I_{cell}$  στην έξοδο του, να μένει πρακτικά σταθερό και η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς  $P_{cell}$  ( $V_{cell} * I_{cell}$ ), να μπορεί να αξιοποιηθεί αποδοτικά σε πρακτικές εφαρμογές.

## II. Η πραγματική λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα ενός ιδανικού ΦΒ στοιχείου, όπως προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση, δεν αντικατοπτρίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια σε πρακτικούς σκοπούς. Πειραματικές παρατηρήσεις, έχουν οδηγήσει στη χρήση ακριβέστερου μοντέλου ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος, που περιγράφει τη **πραγματική λειτουργία** του ΦΒ στοιχείου, βελτιωμένη ως προς την ιδανική λειτουργία, εισάγοντας πρόσθετες παραμέτρους δηλώνοντας την επανασύνδεση φορέων στη δομή του. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ιδανικού ΦΒ στοιχείου, τροποποιείται όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 2.63: ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικής λειτουργίας ΦΒ στοιχείου



Το ηλεκτρικό ισοδύναμο αυτό, κύκλωμα, καλείται **πλήρες μοντέλο μίας διόδου** ή **μοντέλο πέντε παραμέτρων** και είναι αυτό, που χρησιμοποιείται τυπικά για τη μελέτη των ΦΒ στοιχείων. Περιλαμβάνει την πηγή έντασης και την δίοδο, σε συνδυασμό με το μη ιδανικό τους τμήμα, δηλαδή τις ωμικές αντιστάσεις  $R_s$  και  $R_{sh}$  αντίστοιχα, οι οποίες προσδιορίζουν τις επανασυνδέσεις φορέων του ημιαγωγικού υλικού του ΦΒ στοιχείου και αποτελούν ηλεκτρικές απώλειες. Εισάγοντας αυτές τις νέες παραμέτρους,  $R_s$  και  $R_{sh}$ , στη σχέση ρεύματος (2.25) της ιδανικής λειτουργίας ΦΒ στοιχείου, προκύπτει η σχέση ρεύματος της πραγματικής λειτουργίας ΦΒ στοιχείου:

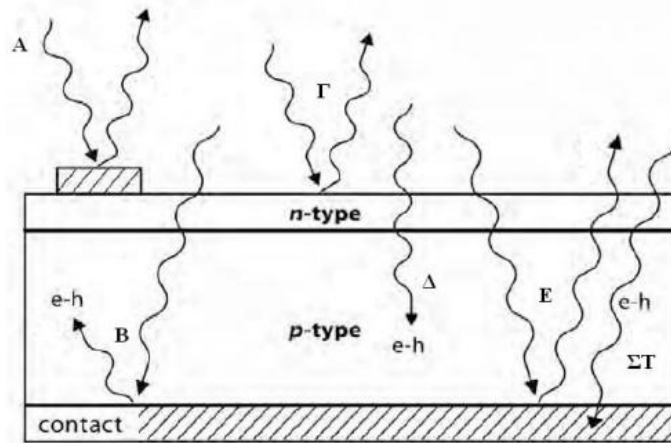
$$I_{cell} = I_L - I_o * \left[ \exp \left( \frac{V_D + (I_{cell} * R_s)}{n_{i\delta} * V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_D + (I_{cell} * R_{sh})}{R_{sh}} \quad (2.26)$$

Η παραπάνω σχέση ρεύματος πραγματικής λειτουργίας (2.26), με  $R_s = 0$  και  $R_{sh} = \infty$ , προσεγγίζει τη σχέση ρεύματος (2.25) της ιδανικής λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, κατά την πραγματική λειτουργία ενός ΦΒ στοιχείου, σε αντίθεση με την ιδανική, εμφανίζονται ηλεκτρικές απώλειες. Οι απώλειες αυτές, οφείλονται στις ηλεκτρικές ιδιότητες του κάθε διαφορετικού ημιαγωγικού υλικού, αλλά και στην ενδογενή και συνολική κατασκευαστική δομή του ΦΒ στοιχείου. Κατά συνέπεια, το ΦΒ στοιχείο παρουσιάζει απώλειες ενέργειας στη διαδικασία της φωτοβολταϊκής μετατροπής. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι απώλειες ενέργειας του ΦΒ στοιχείου.

➤ **Οπτικές απώλειες ενέργειας :**

Ένας ημιαγωγός, όπως έχει αναφερθεί, μπορεί να απορροφήσει μόνο τα φωτόνια που έχουν ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του. Επομένως, στα ΦΒ στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του ΦΒ στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον. Στη συνέχεια, από την ακτινοβολία που διεισδύει, για τα φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο, το ημιαγωγικό υλικό συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα και η αντίστοιχη ακτινοβολία διαπερνά άθικτη αυτό, ενώ τελικά, απορροφάται στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την κάτω όψη του ΦΒ στοιχείου, με αποτέλεσμα να το θερμάνει.



**Σχήμα 2.64:** ανάκλαση και απορρόφηση φωτονίων

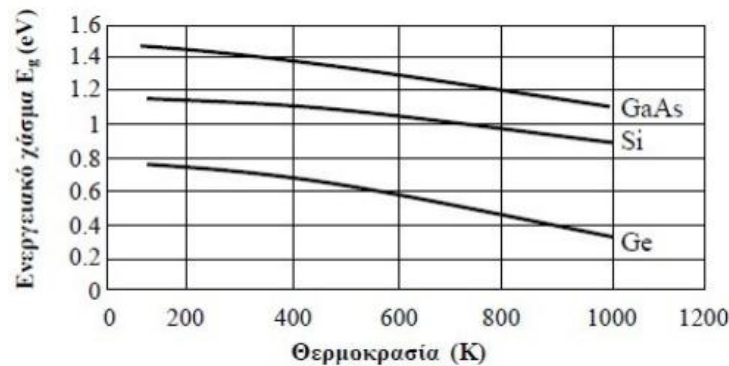
A-E) ανάκλαση στους ακροδέκτες, B) ανάκλαση στον ακροδέκτη και μετέπειτα απορρόφηση, Γ) ανάκλαση στην επιφάνεια N, Δ) απ ευθείας απορρόφηση και ΣΤ) απορρόφηση στον ακροδέκτη

Αλλά και από τα φωτόνια που απορροφά, μόνο το μέρος εκείνο της ενέργειάς τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο, συμβάλλει στη φωτοβολταϊκή μετατροπή. Το υπόλοιπο μέρος της, μεταφέρεται σαν κινητική ενέργεια στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε και τελικά, μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα, η οποία όμως επιδρά αρνητικά στην απόδοση της φωτοβολταϊκής μετατροπής του ΦΒ στοιχείου, καθώς μειώνεται το ενεργειακό διάκενο  $E_g$  του ημιαγωγικού υλικού. Η μεταβολή του ονομαστικού ενεργειακού διακένου  $E_g(0)$  του κάθε ημιαγωγικού υλικού, από τη θερμοκρασία, δίνεται από την πειραματική σχέση:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{a * T^2}{T + b} \quad (2.27)$$

όπου,  $a$  και  $b$ , οι εμπειρικοί συντελεστές που εξαρτώνται από το ημιαγωγικό υλικό.

Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα αν σημειωθεί ότι, λόγω της θερμικής ενέργειας, αυξάνει το πλάτος των ατομικών ταλαντώσεων και ως εκ τούτου, αυξάνει η απόσταση μεταξύ των ατόμων. Μια αύξηση των διατομικών αποστάσεων, ελαττώνει το δυναμικό που βλέπουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού και αυτό με τη σειρά του μικραίνει το ενεργειακό διάκενο  $E_g$ . Καθώς το διάκενο μικραίνει, αυξάνονται οι φορείς μειονότητας, που συνεπάγεται την αύξηση επανασύνδεσης με φορείς πλειονότητας, άρα τη μείωση του χρόνου ζωής αυτών ως ελεύθεροι φορείς αγωγιμότητας.



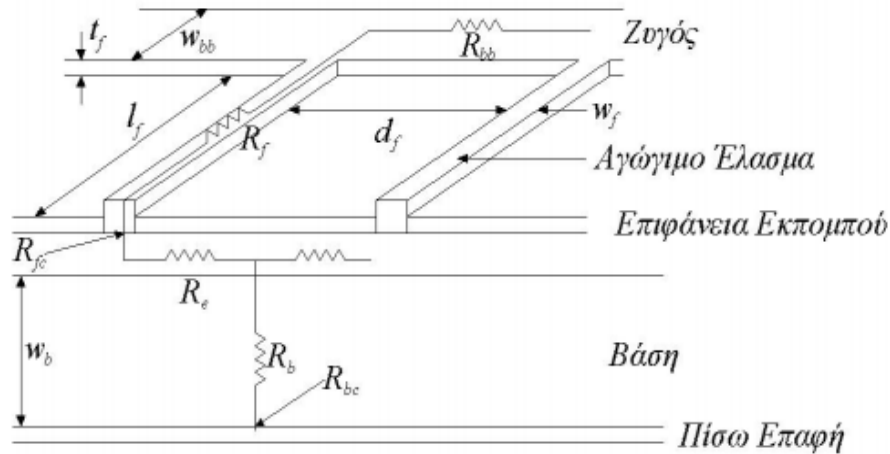
Σχήμα 2.65: μεταβολή ενεργειακού διακένου ημιαγωγικών υλικών συναρτήσει της θερμοκρασίας

Έτσι, η **ανάκλαση** μέρους της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και η **θερμοκρασία** που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του ΦΒ στοιχείου, αποτελούν οπτικές απώλειες ενέργειας, κατά την διαδικασία της φωτοβολταϊκής μετατροπής. Για την αντιμετώπιση μέρους των απωλειών αυτών χρησιμοποιούνται διαδικασίες βελτίωσης τους, όπως η τοποθέτηση αντιανακλαστικής επίστρωσης (ARC) και η ανιστροπική εγχάραξη, στην ακτινοβολούμενη επιφάνεια του ΦΒ στοιχείου.

#### ➤ Ωμικές απώλειες ενέργειας :

Στο ΦΒ στοιχείο, λόγω των κατασκευαστικών ατελειών του που υπάρχουν στην συνολική δομή του, εμφανίζονται παρασιτικές αντιστάσεις στη ροή του ρεύματος, που αποτελούν τις **ωμικές απώλειες**. Κατά τη μετακίνηση των φορέων αγωγιμότητας, παρατηρείται μία πτώση τάσης από το ημιαγωγικό υλικό προς τα μεταλλικά ηλεκτρόδια. Η **αντίσταση σειράς  $R_s$** , αντιπροσωπεύει την αντίσταση που οφείλεται στην κίνηση αυτή. Επίσης, η αντίσταση διαμέσου του ημιαγωγικού υλικού δεν είναι άπειρη, αφού λόγω αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων (πλεγματικών ατελειών) γίνονται διαρροές ρεύματος (επανασυνδέσεις φορέων), αντιπροσωπεύοντας τη **παράλληλη αντίσταση  $R_{sh}$** .

Είναι προφανές, ότι οι παρασιτικές αντιστάσεις και κυρίως η αντίσταση σειράς  $R_s$  ενός ΦΒ στοιχείου, μειώνει σημαντικά τη δυνατότητά του για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Παρά το γεγονός ότι δεν μπορεί να μηδενιστεί, η γνώση των παραμέτρων από τις οποίες εξαρτάται, δίνει τη δυνατότητα περιορισμού της μέσω κατάλληλης σχεδίασης της διάταξης. Η αντίσταση σειράς σε ένα ΦΒ στοιχείο, μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα διαφόρων συνιστωσών, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, της κατασκευαστικής δομής του, ενώ οι μαθηματικές εκφράσεις για τις συνιστώσες αυτές, αναλύονται στον πίνακα (2.2).



Σχήμα 2.66: συνιστώσες αντίστασης σειράς ενός ΦΒ στοιχείου

αντίσταση εκπομπού	$R_e$	$\frac{R_{sp} * d_f}{7 * l_f}$ όπου $R_{sp}$ , αντίσταση επιφάνειας εκπομπού
αντίσταση βάσης	$R_b$	$A * W_b * \rho_b$ όπου $\rho_b$ , ειδική αντίσταση βάσης
αντίσταση ηλεκτροδίου άνω όψης	$R_{fc}$	$\sqrt{\frac{R_{sp} * \rho_{cf}}{l_f}} \coth \left( W_f \sqrt{\frac{R_{sp}}{\rho_{cf}}} \right)$ όπου $\rho_{cf}$ , ειδική αντίσταση ηλεκτροδίου άνω όψης
αντίσταση ηλεκτροδίου κάτω όψης	$R_{bc}$	$A * \rho_{cr}$ όπου $\rho_{cr}$ , ειδική αντίσταση ηλεκτροδίου κάτω όψης
αντίσταση δεικτών (fingers)	$R_f$	$\frac{l_f * \rho_m}{3 * t_f * W_f}$ όπου $\rho_m$ , ειδική αντίσταση δεικτών
αντίσταση ράβδων οδήγησης (busbars)	$R_{bb}$	$\frac{\rho_m}{3 * t_f * W_{bb}}$

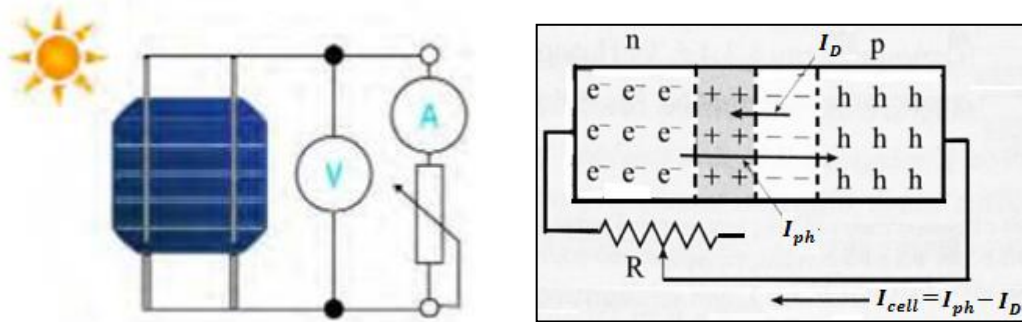
Πίνακας 2.2: μαθηματικές εκφράσεις συνιστωσών αντίστασης σειράς ΦΒ στοιχείου

### 2.2.2.2 Η ενεργειακή απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Σε αντίθεση με τις περισσότερες ηλεκτρικές πηγές (συσσωρευτές, ξηρά στοιχεία, Η/Ζ, δίκτυα διανομής), οι οποίες διατηρούν σταθερή τάση στην περιοχή κανονικής λειτουργίας, το ΦΒ στοιχείο ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, έχει αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά, καθώς έχει την ιδιότητα να διατηρεί σταθερή τιμή ρεύματος, προσαρμόζοντας την τάση της στα άκρα του φορτίου.

#### I. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Για καλύτερη προσέγγιση της λειτουργίας ενός ΦΒ στοιχείου, στην απόδοση ενεργειακής φωτοβολταϊκής μετατροπής του, παρίσταται το ισοδύναμο κύκλωμα καταγραφής των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του ΦΒ στοιχείου, τα οποία εφαρμόζονται σε μεταβλητή ωμική αντίσταση.



Σχήμα 2.67: α) ισοδύναμο κύκλωμα καταγραφής ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ΦΒ στοιχείου  
β) κατάσταση ρευμάτων εντός του ΦΒ στοιχείου υπό φορτίο

#### Τάση ανοιχτού κυκλώματος $V_{oc}$ :

Κατά τη λειτουργία ΦΒ στοιχείου σε κατάσταση σταθερού φωτισμού και υπό συνθήκη ανοικτού κυκλώματος (μόνιμη κατάσταση), όπου δεν συνδέεται φορτίο στα άκρα του (η τιμή της μεταβλητής αντίστασης στο κύκλωμα, τείνει στο άπειρο), η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του (φωτοβολταϊκό δυναμικό  $V_{ph}$ ), προκαλεί ισχυρό ρεύμα διάχυσης  $I_d$  ή αλλιώς ρεύμα διόδου  $I_D$ . Στην ιδανική λειτουργία, το ρεύμα διάχυσης αντισταθμίζει πλήρως το φωτόρευμα, καθώς είναι αντίθετα, με ίσες απολύτως τιμές και έτσι αποκαθίσταται μία ισορροπία.

Αυτή η ισότητα ρευμάτων, έχει ως αποτέλεσμα την αλληλεξουδετέρωση τους, δηλαδή την μηδενική ένταση ρεύματος ΦΒ στοιχείου  $I_{cell}$  στην έξοδο του, ενώ η τάση ΦΒ στοιχείου  $V_{cell}$  στα άκρα του, προσεγγίζει το ύψος εσωτερικού δυναμικού  $V_{bi}$  του ενδογενούς υλικού, αλλά είναι αντίθετης φοράς, όπως και στην περίπτωση της τάσης κατωφλίου  $V_\gamma$  στην δίοδο και ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  (open circuit). Μηδενίζοντας το ρεύμα  $I_{cell}$  στη σχέση ρεύματος (2.25) του ιδανικού ΦΒ στοιχείου, προκύπτει η μαθηματική έκφραση της:

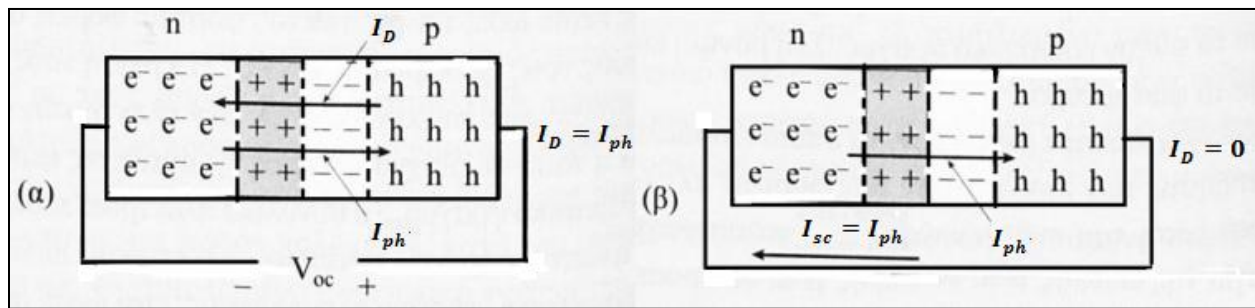
$$V_{oc} = n_{i\delta} * V_T * \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_o} + 1 \right) \quad (2.28)$$

Η τιμή της καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της ημιαγωγικής επαφής P-N, όπως το βασικό υλικό παρασκευής της και τη συγκέντρωση προσμείξεων. Π.χ. στο ΦΒ στοιχείο Πυριτίου (Si) και Γερμανίου (Ge), η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  είναι 0,6 V και 0,2 V, αντίστοιχα.

**Ρεύμα βραχυκυκλώσεως  $I_{sc}$  :**

Κατά τη λειτουργία ΦΒ στοιχείου σε κατάσταση σταθερού φωτισμού και υπό συνθήκη βραχυκυκλώσεως, όπου το φορτίο στα άκρα του ΦΒ στοιχείου συμπεριφέρεται ως αγωγός (η τιμή της μεταβλητής αντίστασης στο κύκλωμα είναι μηδενική), τότε η τάση εξόδου του είναι μηδενική, καθώς οι φωτοδημιουργούμενοι φορείς διέρχονται εξολοκλήρου από τον αγωγό (φορτίο) και κατά συνέπεια, δεν διαχωρίζονται από το ενδογενές υλικό, για τον σχηματισμό φορτίων και την εμφάνιση φωτοβολταϊκού δυναμικού  $V_{ph}$ . Έτσι, το φωτόρευμα  $I_{ph}$  διέρχεται εξολοκλήρου από τον αγωγό βραχυκύκλωσης και κατά συνέπεια, προσεγγίζοντας το ιδανικό, ονομάζεται ρεύμα βραχυκυκλώσεως  $I_{sc}$  (short circuit), ενώ εξαρτάται από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, καθώς αποτελεί εξολοκλήρου φωτόρευμα.

$$I_{sc} = I_{ph} \tag{2.29}$$



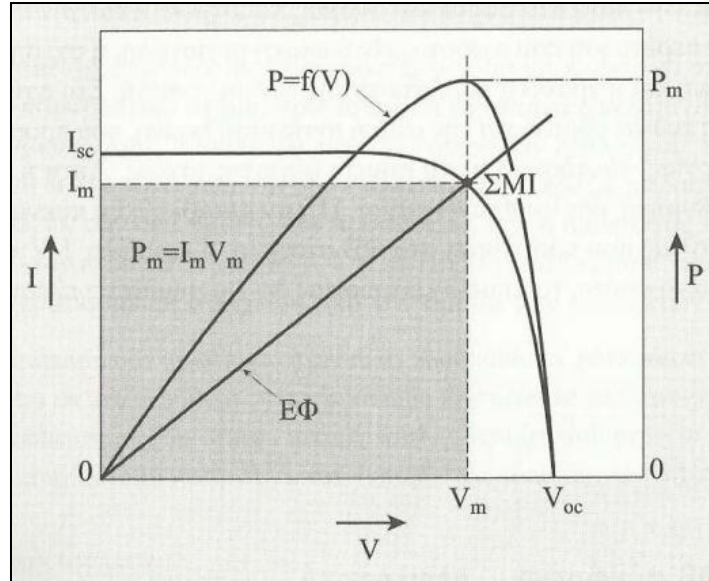
Σχήμα 2.68: κατάσταση ρευμάτων ΦΒ στοιχείου στην (α) ανοιχτοκυκλωμένη και (β) βραχυκυκλωμένη κατάσταση

**Μέγιστη ηλεκτρική ισχύ  $P_m$  :**

Στη βραχυκυκλωμένη και στην ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση, η ηλεκτρική ισχύς  $P_{cell}$  που παράγει το ΦΒ στοιχείο ( $P_{cell} = V_{cell} * I_{cell}$ ) είναι μηδενική, καθώς μηδενική είναι η τάση και η ένταση αντίστοιχα. Για σταθερές συνθήκες φωτισμού αλλά μεταβαλλόμενες τιμές της αντίστασης, ανάμεσα στις παραπάνω ακραίες καταστάσεις, η τάση  $V_{cell}$  και το ρεύμα  $I_{cell}$  στα άκρα του ΦΒ στοιχείου, παίρνουν ενδιάμεσες τιμές. Παράλληλα, μεταβάλλεται και η ηλεκτρική ισχύς  $P_{cell}$  που παράγει το ΦΒ στοιχείο, ενώ ένα ορισμένο παραγόμενο ζεύγος τιμών μέγιστης τάσης  $V_m$  και μέγιστου ρεύματος  $I_m$ , παρέχει το **σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΠ** (Maximum Power Point, MPP), για το οποίο, το ΦΒ στοιχείο παράγει την μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ  $P_m$ :

$$P_m = V_m * I_m \tag{2.30}$$

Είναι προφανές ότι, για αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων ενός ΦΒ στοιχείου, πρέπει να συνδεθεί στα άκρα του, φορτίο η τιμή του οποίου, θα αντιστοιχεί στο ΣΜΠ και αποτελεί, τη μέγιστη τιμή φορτίου, που μπορεί να εξυπηρετήσει το ΦΒ στοιχείο. Π.χ. στην περίπτωση ωμικού καταναλωτή, η μέγιστη τιμή αντίστασης  $R_m$ , προσαρμόζεται στην μέγιστη τάση  $V_m$  και στο μέγιστο ρεύμα  $I_m$ , που μπορεί να αποδώσει το ΦΒ στοιχείο στον καταναλωτή ( $R_m = V_m/I_m$ ).



Σχήμα 2.69: χαρακτηριστική φόρτισης ΦΒ στοιχείου και ευθεία φόρτου

Μια χρήσιμη γραφική παράσταση, ενσωματώνεται και συνδυάζεται με τη χαρακτηριστική φόρτισης ΦΒ στοιχείου που τροφοδοτεί έναν φόρτο (κατανάλωση) και καλείται **καμπύλη φόρτου** του καταναλωτή. Η καμπύλη αυτή προκύπτει ως γραφική του ρεύματος  $I_{cell}$  σε συνάρτηση με την τάση  $V_{cell}$ , που αποδίδεται στον καταναλωτή. Στην περίπτωση ωμικού καταναλωτή, η γραφική είναι ευθεία γραμμή, καθώς η εξίσωση της  $I=f(V)$  είναι αναλογική, καλείται **ευθεία φόρτου (ΕΦ)** και τέμνει τη χαρακτηριστική φόρτισης σε ένα σημείο, που αποτελεί κοινή λύση για τις εξισώσεις που αντιστοιχούν στις δύο γραφικές. Το σημείο αυτό, καθορίζει το ρεύμα  $I_{cell}$  και τη τάση  $V_{cell}$  που αποδίδει στην τιμή π.χ. του ωμικού καταναλωτή ( $R = V_{cell}/I_{cell}$ ) και ονομάζεται **σημείο λειτουργίας (ΣΛ)** του συστήματος. Στο παραπάνω σχήμα, η ευθεία φόρτου προσδιορίζει ΣΛ ταυτόσημο με το ΣΜΙ, προσεγγίζοντας την μέγιστη λειτουργία του συστήματος ΦΒ στοιχείο-φόρτος, καθώς η μέγιστη τάση  $V_m$  και το μέγιστο ρεύμα  $I_m$  του ΦΒ στοιχείου, αποδίδεται στην μέγιστη τιμή του καταναλωτή  $R_m$ , ( $R_m = V_m/I_m$ ).

### Παράγων πλήρωσης $FF$ :

Παρατηρώντας την χαρακτηριστική I-V στο σχήμα (2.69), το εμβαδό του σκιαγραφημένου ορθογωνίου μέσα στην χαρακτηριστική με πλευρές τα σημεία λειτουργίας  $I_m$  και  $V_m$ , εκφράζει τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ  $P_m$  ενός ΦΒ στοιχείου. Το πηλίκο του εμβαδού αυτού, προς το πηλίκο του εμβαδού του διαγραμμισμένου ορθογωνίου, με πλευρές τα σημεία λειτουργίας  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$ , που περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του ΦΒ στοιχείου, ως πηγή ρεύματος, δίνει το μέτρο προσέγγισης της ιδανικής λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου και ονομάζεται **παράγων πλήρωσης  $FF$**  (Fill Factor), περιγράφοντας την ποιότητα των ΦΒ στοιχείων:

$$FF = \frac{I_m * V_m}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (2.31)$$

Πρόκειται για ένα συντελεστή, που παίρνει τυπικές τιμές από 0,7-0,85. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές του, τόσο η λειτουργία του ΦΒ στοιχείου, πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά του.

### Βαθμός απόδοσης $n_c$ :

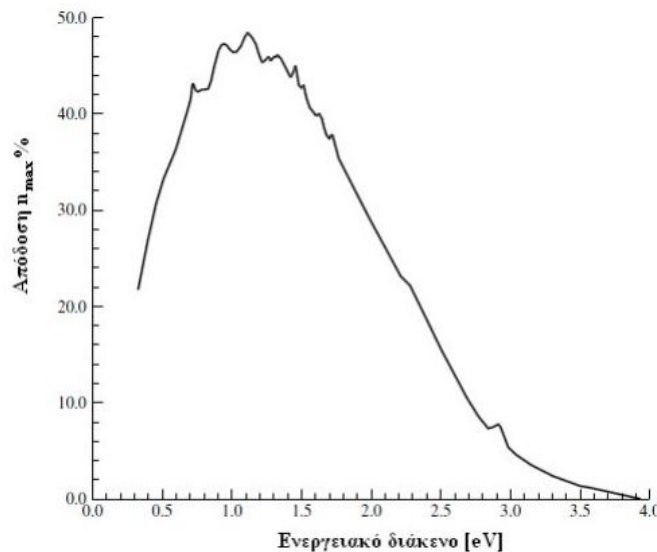
Από τις παραπάνω παραμέτρους, δηλαδή τα σημεία λειτουργίας ρεύματος  $I_{sc}$ , τάσεως  $V_{oc}$  και ο συντελεστής  $FF$ , αποτελούν κύρια μεγέθη για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας ενός ΦΒ στοιχείου, ενώ καθορίζουν την απόδοση του στην φωτοβολταϊκή μετατροπή ενέργειας. Ο βαθμός απόδοσης ενεργειακής μετατροπής  $n_{cell}$  (energy conversion efficiency) ενός ΦΒ στοιχείου, ισούται με το λόγο της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος  $P_m$  ΦΒ στοιχείου, προς την προσπίπτουσα ισχύ ακτινοβολίας  $P_{in}$  της ηλιακής ακτινοβολίας (incident), στην επιφάνεια του ΦΒ στοιχείου:

$$n_{cell} = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m * V_m}{E * S} = \frac{FF * I_{sc} * V_{oc}}{E * S} \quad (2.32)$$

όπου,  $E$  η πυκνότητα ισχύος (ένταση) ηλιακής ακτινοβολίας και  $S$  το εμβαδό επιφάνειας ΦΒ στοιχείου.

Προφανώς, όσο υψηλότερος είναι ο βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκής μετατροπής  $n_c$ , τόσο μεγαλύτερη είναι η αποδιδόμενη ισχύ  $P_m$ , στην έξοδο ενός ΦΒ στοιχείου.

Η τιμή όμως του βαθμού απόδοσης  $n_c$  δεν είναι σταθερή, καθώς σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, εξαρτάται σημαντικά, όπως είναι φυσικό, από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία (θερμοκρασία περιβάλλοντος ή θερμοκρασία λόγω ωμικών απωλειών), που προκαλούν άμεση μεταβολή στις παραμέτρους του βαθμού απόδοσης. Η αύξηση της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, προκαλεί αύξηση του βαθμού απόδοσης, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας, προκαλεί μείωση. Αυτή η μείωση, προέρχεται από την μεταβολή του ενεργειακού διακένου  $E_g$  του ημιαγωγικού υλικού, που προκαλείται από την θερμοκρασία, όπως έχει περιγραφεί στη παράγραφο (2.2.2.1).

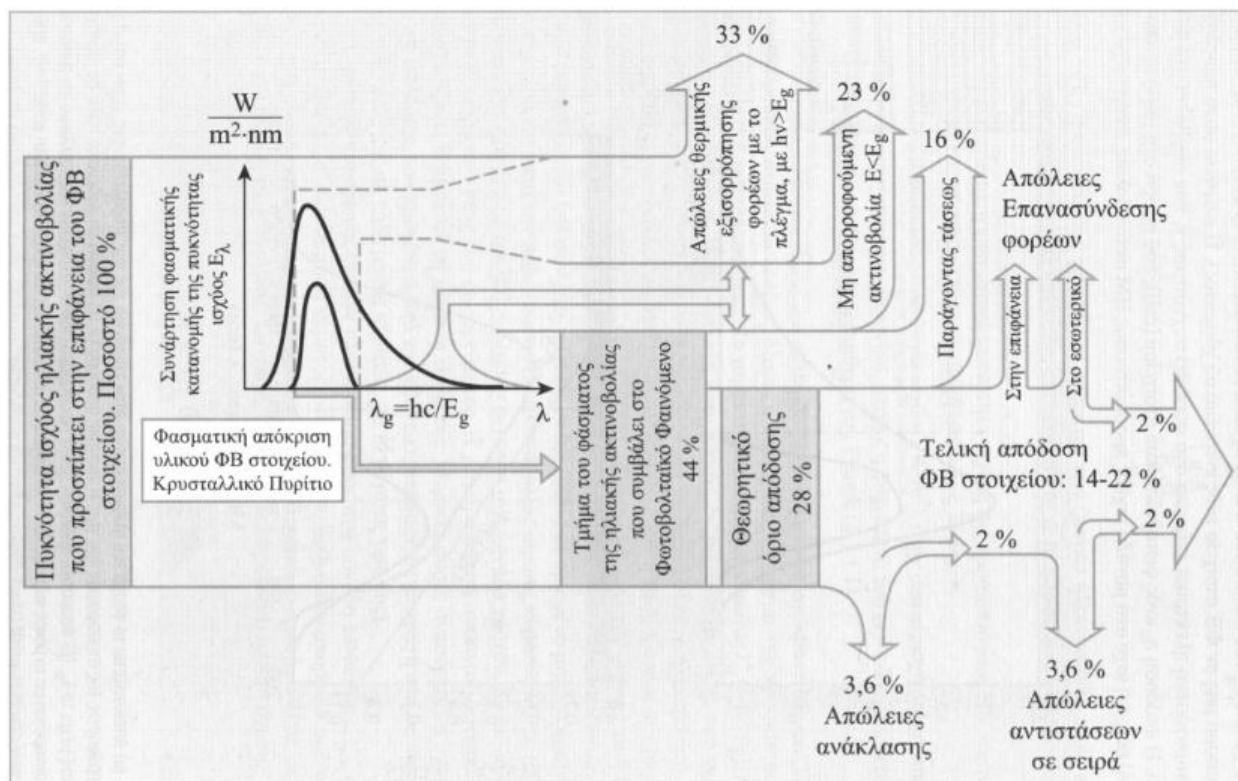


**Σχήμα 2.70:** μεταβολή απόδοσης ΦΒ στοιχείου Πυριτίου συναρτήσει της μεταβολής ενεργειακού διακένου Πυριτίου

Σύμφωνα με θεωρητικό υπολογισμό, η ιδανική απόδοση των ΦΒ στοιχείων Πυριτίου μπορεί να φθάσει μέχρι 23,92% για συνθήκες AM1. Ο υπολογισμός έχει γίνει για υλικό πάχους 100  $\mu\text{m}$ , με εμπρός τμήμα τύπου N πάχους 0,2 $\mu\text{m}$  και ζώνη απογύμνωσης πάχους 0,15  $\mu\text{m}$ . Το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας θεωρείται 150  $\mu\text{m}$  και ο μέσος χρόνος ζωής τους 20  $\mu\text{s}$ , περίπου. Ένα τέτοιο ΦΒ στοιχείο

δίνει τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc} \approx 0,7 \text{ V}$  και ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc} \approx 40 \text{ mA}$ . Πειραματικά, η μεγαλύτερη απόδοση  $\eta_c$  που έχει μετρηθεί είναι  $\approx 19\%$ , ενώ σε πρακτικές εφαρμογές  $\approx 10\text{-}12\%$ .

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται το διάγραμμα Sankey, που περιγράφει την ροή ενέργειας κατά την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και προσδιορίζει, την τελική απόδοση του ΦΒ στοιχείου, βάση των ηλεκτρικών απωλειών (οπτικών και ωμικών απωλειών ενέργειας). Το συγκεκριμένο διάγραμμα αναφέρεται σε τυπικό ΦΒ στοιχείο κρυσταλλικού Πυριτίου, περιγράφει όμως και την γενικότερη συμπεριφορά των ΦΒ στοιχείων, ανεξάρτητα από το υλικό παρασκευής και τον τύπο του.



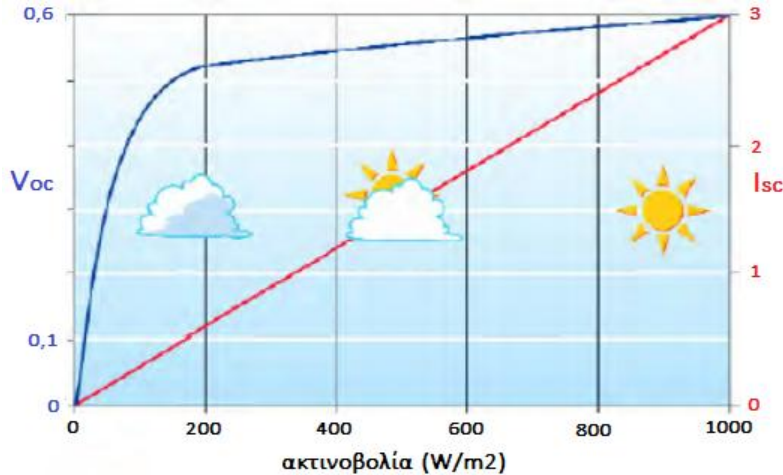
Σχήμα 2.71: διάγραμμα Sankey ροής ενέργειας κατά την μετατροπή ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται στην χαρακτηριστική φόρτισης του ΦΒ στοιχείου, η διακύμανση των εξωγενών και ενδογενών παραγόντων, βάση των οποίων μεταβάλλονται οι παράμετροι από τους οποίους εξαρτάται ο βαθμός απόδοσης, ενώ παρουσιάζεται και η διαδικασία για την διατήρηση του μέγιστου, όσο δυνατόν γίνεται, βαθμού απόδοσης φωτοβολταϊκής μετατροπής ενός ΦΒ στοιχείου.

## II. Η εξάρτηση της μέγιστης απόδοσης φωτοβολταϊκού στοιχείου

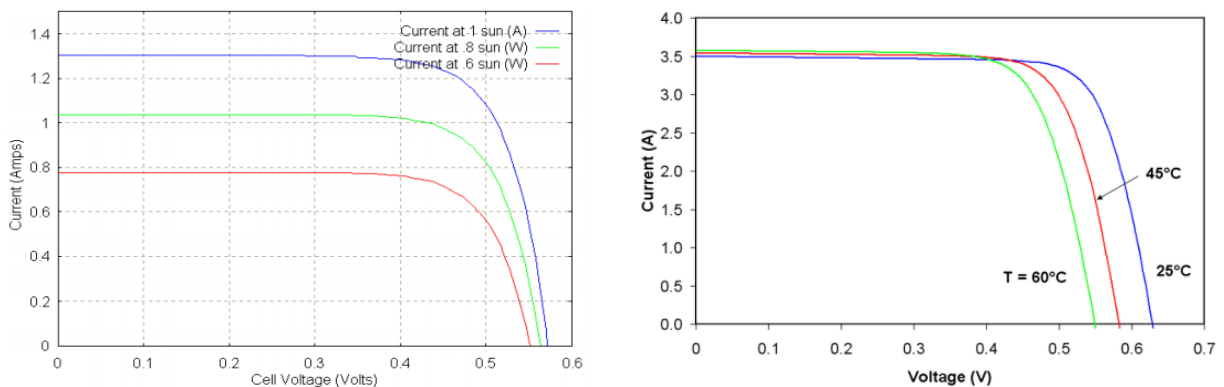
Στο παρακάτω σχήμα, εμφανίζεται η μεταβολή των σημείων ιδανικής λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου, συναρτήσει της πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του. Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως  $I_{sc}$  μεταβάλλεται γραμμικά με την ακτινοβολία, ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  σύμφωνα και με τη σχέση (2.28), μεταβάλλεται λογαριθμικά, συναρτήσει του φωτορεύματος  $I_{ph}$ , δηλαδή την ακτινοβολία που δέχεται το ΦΒ στοιχείο, καθώς η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$ , μένει σχεδόν σταθερή στις μεταβολές της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, για μεγάλες σχετικά τιμές.





Σχήμα 2.72: ρεύμα βραχυκυκλώσεως και τάση ανοικτού κυκλώματος συναρτήσει της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας

Αποτέλεσμα των παραπάνω, είναι η σχεδόν αναλογική σχέση ανάμεσα στο γινόμενο  $I \cdot V$  και την πυκνότητα ισχύος  $E$ . Συνολικά, η μέγιστη ηλεκτρικής ισχύς  $P_m$  που αποδίδεται από το ΦΒ στοιχείο, αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας ισχύος  $E$  της ηλιακής ακτινοβολίας, που συνεπάγεται και την αύξηση του βαθμού απόδοσης φωτοβολταϊκής μετατροπής  $n_{cell}$  του ΦΒ στοιχείου (σχήμα 2.73.α).

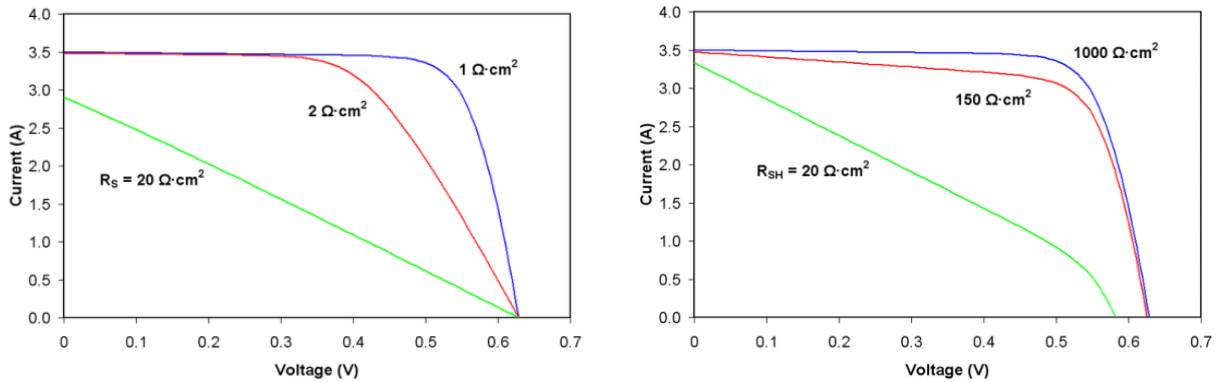


Σχήμα 2.73: επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας (α) και θερμοκρασίας (β) στην χαρακτηριστική φόρτισης

Εξαιτίας της μετατροπής μέρους της ηλιακής ενέργειας σε θερμική (αύξηση της εσωτερικής ενέργειας υλικού), αυξάνεται η θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου. Η θερμοκρασία επιδρά κυρίως στην τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  καθώς μειώνεται σημαντικά, άμεσα, μέσω του  $T$  που βρίσκεται στον εκθετικό όρο της σχέσης (2.28) και έμμεσα, μέσω της επίδρασης του ρεύματος  $I_o$ . Ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το μέγεθος του εκθέτη, το μέγεθος του ρεύματος  $I_o$  αυξάνεται εκθετικά. Συνολικά, η μέγιστη ηλεκτρικής ισχύς  $P_m$  που αποδίδεται από το ΦΒ στοιχείο, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, που συνεπάγεται και την μείωση του βαθμού απόδοσης φωτοβολταϊκής μετατροπής  $n_{cell}$  του ΦΒ στοιχείου (σχήμα 2.73.β).

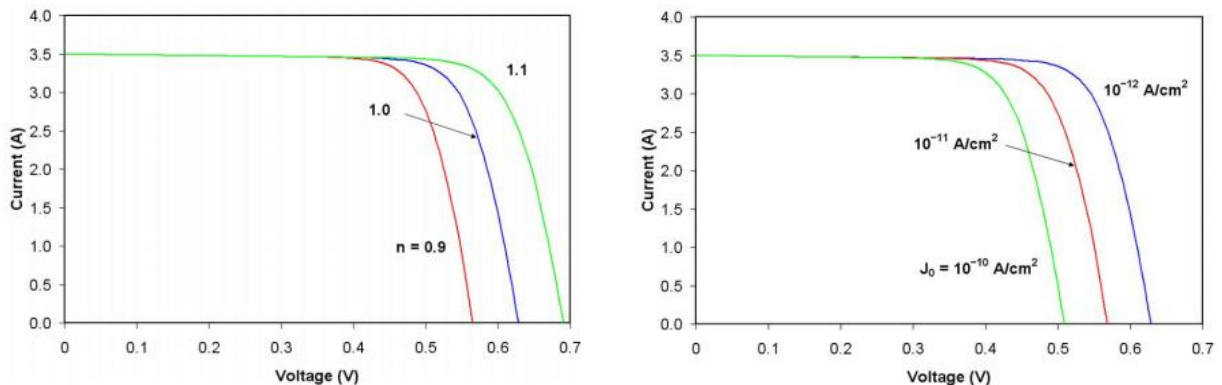
Κατά την πραγματική λειτουργία ενός ΦΒ στοιχείου, εμφανίζονται παρασιτικές αντιστάσεις στο ρεύμα. Ιδανική τιμή για την  $R_s$  αποτελεί η μηδενική, ενώ για την  $R_{sh}$  η άπειρη. Μεγάλες τιμές της  $R_s$ , προκαλούν μείωση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως, με αποτέλεσμα να μειώνεται η αποδιδόμενη ισχύς  $P_m$  του ΦΒ στοιχείου, άρα και ο βαθμός απόδοσης  $n_{cell}$  (σχήμα 2.74.α). Αντίθετα, μικρές τιμές της  $R_{sh}$ ,

μειώνουν την τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ , με αποτέλεσμα να μειώνεται η αποδιδόμενη ισχύς  $P_m$  του ΦΒ στοιχείου, επομένως και ο βαθμός απόδοσης  $n_{cell}$  (σχήμα 2.74.β). Συνήθως, στα ΦΒ στοιχεία του εμπορίου, η  $R_S$  είναι μικρότερη των 5  $\Omega$  και η  $R_{SH}$ , είναι μεγαλύτερη από 500  $\Omega$ .



Σχήμα 2.74: επίδραση αντίστασης σειράς (α) και παράλληλης αντίστασης (β) στην χαρακτηριστική φόρτισης

Τα περισσότερα ΦΒ στοιχεία, παρουσιάζουν μία συμπεριφορά κοντά στην ιδανική. Κάτω όμως από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, η διάταξη μπορεί να κυριαρχείται από φαινόμενα επανασύνδεσης στην περιοχή επαφής. Αυτό χαρακτηρίζεται από μία αύξηση του ρεύματος κόρου  $I_o$  και μία αύξηση της σταθεράς  $n_{i\delta}$ . Από την σχέση (2.28), διαπιστώνεται ότι μια αύξηση του  $n_{i\delta}$ , τείνει να προκαλέσει αύξηση της τάσης ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  (σχήμα 2.75.α), ενώ η αύξηση του ρεύματος  $I_o$  τείνει να την μειώσει (σχήμα 2.75.β). Τελικά το ρεύμα  $I_o$  είναι πιο ισχυρός παράγοντας και το τελικό αποτέλεσμα είναι μείωση της  $V_{oc}$ , συνεπώς μείωση της αποδιδόμενης ισχύς  $P_m$  του ΦΒ στοιχείου και του βαθμού απόδοσης  $n_{cell}$ .

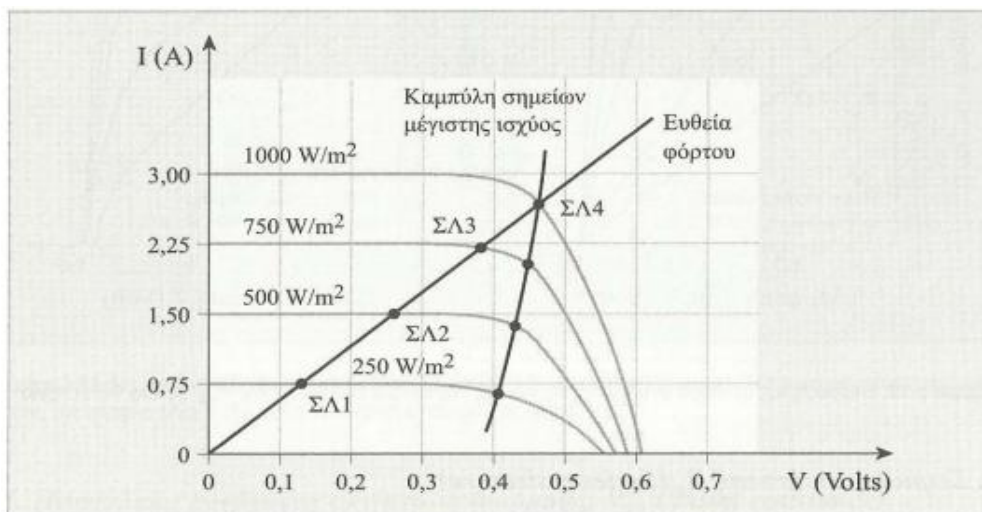


Σχήμα 2.75: επίδραση σταθεράς ιδανικής λειτουργίας (α) και ρεύματος κόρου (β) στην χαρακτηριστική φόρτισης

### III. Η διατήρηση της μέγιστης απόδοσης φωτοβολταϊκού στοιχείου

Όπως γίνεται αντιληπτό, υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ενός ΦΒ στοιχείου, λόγω των εξωγενών και ενδογενών παραγόντων, δημιουργείται πρόβλημα στη διατήρηση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύς  $P_m$ , καθώς μεταβάλλονται τα σημεία μέγιστης τάσης  $V_m$  και μέγιστου ρεύματος  $I_m$ , δηλαδή το ΣΜΙ ( $V_m, I_m$ ) ΦΒ στοιχείου, που αποδίδει στον καταναλωτή. Άρα, για την καλύτερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων ενός ΦΒ στοιχείου, πρέπει να αναπροσαρμοστεί η τιμή του καταναλωτή που συνδέεται στα άκρα του, ώστε να αντιστοιχίσει εκ νέου στο ΣΜΙ ( $V_m, I_m$ ) του ΦΒ στοιχείου.

Η περιγραφή της διατήρησης μέγιστης απόδοσης, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, όπου έχει σχεδιαστεί η ιδανική χαρακτηριστική φόρτισης ΦΒ στοιχείου, που αντιστοιχεί σε πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας  $E = 1000 \text{ W/m}^2$  και αναφέρεται σε ωμικό καταναλωτή, με δεδομένη μέγιστη τιμή αντίστασης  $R_m$ , η οποία προκύπτει από το ΣΜΙ ( $V_m, I_m$ ), στην χαρακτηριστική φόρτισης του ΦΒ στοιχείου. Επίσης, έχει σχεδιαστεί η ευθεία φόρτου του καταναλωτή, που προσδιορίζει ΣΛ, ταυτόσημο με το ΣΜΙ του ΦΒ στοιχείου, στην μέγιστη λειτουργία του συστήματος ΦΒ στοιχείο-φόρτος.



Σχήμα 2.76: μετατόπιση του ΣΛ από το ΣΜΙ στη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας

Οπότε, κατά τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και λόγω π.χ. μεταβολής της πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει στο ΦΒ στοιχείο, η χαρακτηριστική φόρτισης, όπως φαίνεται και στο σχήμα, μεταβάλλεται με αποτέλεσμα την μετατόπιση του ΣΜΙ ( $V_m, I_m$ ) ως προς την αρχική τιμή του, επομένως, το ΣΛ της μέγιστης λειτουργίας του συστήματος, δεν ταυτίζεται πλέον με το ΣΜΙ, στις μεταβληθείσες χαρακτηριστικές φόρτισης που προκύπτουν από τις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου (ΣΜ1, ΣΜ2, ΣΜ3). Αυτό συνεπάγεται και τη μη δυνατή διατήρηση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος  $P_m$ , για τη δεδομένη μέγιστη τιμή αντίστασης  $R_m$ .

Για να ταυτιστούν τώρα, εκ νέου τα δύο αυτά σημεία στις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου και να υπάρξει η διατήρηση της μέγιστης απόδοσης, θα πρέπει να προσαρμοστεί η μέγιστη τιμή αντίστασης  $R_m$  του καταναλωτή, ώστε, στη νέα τιμή αντίστασης  $R$ , να αποδίδονται οι μεταβληθείσες τιμές μέγιστης τάσης  $V_m$  και μέγιστου ρεύμα  $I_m$  του ΦΒ στοιχείου, που αντιστοιχούν στις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Σε κάθε περίπτωση, επιδιώκεται η συνεχή σύμπτωση του ΣΛ της μέγιστης λειτουργίας του συστήματος, με το εκάστοτε ΣΜΙ του ΦΒ στοιχείου, ώστε να αποδίδεται στο φόρτο η μέγιστη δυνατή ισχύς.

Στις πρακτικές εφαρμογές, η διατήρηση της μέγιστης απόδοσης αντιμετωπίζεται με τη χρησιμοποίηση ηλεκτρονικής ρυθμιστικής διάταξης παρακολούθησης του ΣΜΙ (MPPT, Maximum Power Point Tracking), όταν οι συνθήκες λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου αλλάζουν. Καθώς όμως στις εφαρμογές δεν είναι δυνατό να προσαρμόζεται η μέγιστη τιμή του φορτίου, π.χ. η τιμή αντίστασης  $R_m$  σε ωμικές καταναλώσεις, ο ελεγκτής ΣΜΙ φέρνει συνεχώς την τάση και το ρεύμα ενός ΦΒ στοιχείου ( $V_{cell}, I_{cell}$ ), στο ζεύγος τιμών μέγιστης λειτουργίας ( $V_m, I_m$ ) για τις διαφορετικές, κάθε στιγμή, συνθήκες λειτουργίας, μεταβάλλοντας την τιμή τους.

## 2.3 Ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης

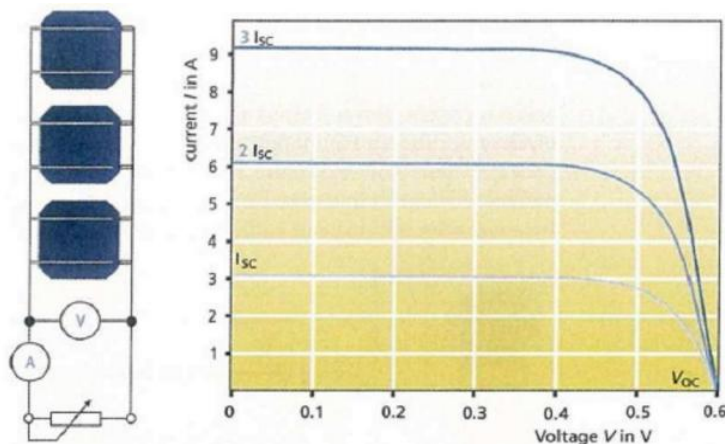
Τα ΦΒ στοιχεία μπορούν να χαρακτηρισθούν σαν το "στοιχειώδες μέσον" μετατροπής, άμεσα της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η πραγματική ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει κάθε ΦΒ στοιχείο, εκτιθέμενο πλήρως στην ηλιακή ακτινοβολία, είναι της τάξεως μερικών εκατοντάδων mW, καθώς η αναπτυσσόμενη συνεχής ηλεκτρική τάση βρίσκεται στην περιοχή  $V_{oc} = 0,5-0,7$  V και το αντίστοιχο ηλεκτρικό ρεύμα στην περιοχή των  $I_{sc} = 10-40$  mA, για τυπικά ΦΒ στοιχεία Πυριτίου. Καθώς η αποδιδόμενη ισχύς είναι πάρα πολύ μικρή για οποιαδήποτε πρακτική χρήση, το ΦΒ στοιχείο μικρών διαστάσεων αποτελεί αντικείμενο έρευνας σε εργαστηριακό επίπεδο.

Σε βιομηχανικό επίπεδο, για την επίτευξη πρακτικού αποτελέσματος και την απόκτηση επιθυμητών τιμών ισχύος, χρησιμοποιείται μια ομάδα ΦΒ στοιχείων, κατάλληλα συνδεδεμένων μεταξύ τους και με κοινή ηλεκτρική έξοδο, για τη παρασκευή ενός ενιαίου ΦΒ στοιχείου μεγαλύτερων διαστάσεων που να ικανοποιεί τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Η βασική διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτει, ονομάζεται **φωτοβολταϊκός συλλέκτης** ή **πλαίσιο** (photovoltaic module - panel), έχει την ικανότητα να αποδίδει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ, άμεσα αξιοποιήσιμη, ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία πρόκειται να αξιοποιηθεί και αποτελεί, ένα ενιαίο μηχανικό σύνολο.

### 2.3.1 Η κατασκευαστική διαμόρφωση του φωτοβολταϊκού συλλέκτη

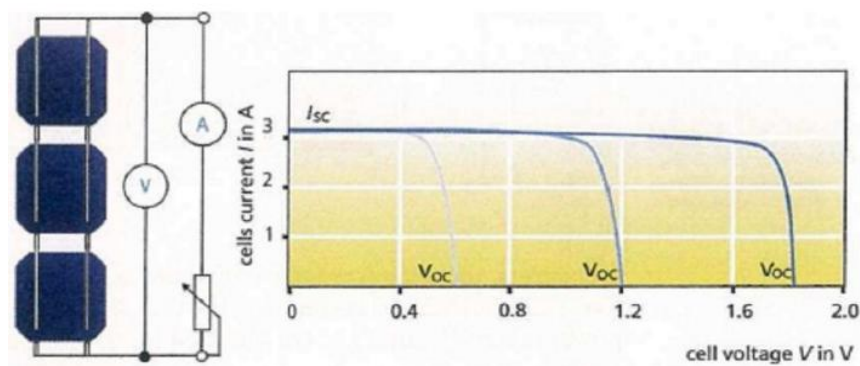
Ο ΦΒ συλλέκτης διαμορφώνεται από μικτή σύνδεση ΦΒ στοιχείων, σε ομάδες κατάλληλου πλήθους, για την απόκτηση επιθυμητής τάσης. Αρχικά, ένα σύνολο ΦΒ στοιχείων συνδέονται σε σειρά σχηματίζοντας κλάδους (strings) και στη συνέχεια, οι διάφοροι κλάδοι συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους. Επομένως, δεν υπάρχει λόγος περαιτέρω αναφοράς στα ΦΒ στοιχεία, αλλά στον ΦΒ συλλέκτη.

Η παράλληλη σύνδεση  $N$  όμοιων ΦΒ στοιχείων (σύνδεση των θετικών ηλεκτροδίων των ΦΒ στοιχείων όλων μαζί και ομοίως για τα αρνητικά ηλεκτρόδια) δίδει ένα σύνολο με την ίδια τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{Noc} = V_{oc}$ ), ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσής του ισούται με  $N$  φορές το ρεύμα βραχυκύκλωσης εκάστου ( $I_{Nsc} = N * I_{sc}$ ). Στο παρακάτω σχήμα, παρατηρείται η αλλαγή που προκύπτει στις ηλεκτρικές παραμέτρους και την χαρακτηριστική I-V, όταν συνδέονται τρία όμοια ΦΒ στοιχεία παράλληλα. Σε αντίθεση με τη τάση εξόδου που παραμένει σταθερή, το ρεύμα αυξάνεται, καθώς προκύπτει από το άθροισμα των τριών τιμών ρεύματος.



Σχήμα 2.77: χαρακτηριστική I-V τριών ΦΒ στοιχείων παράλληλα συνδεδεμένων

Η σύνδεση σε σειρά  $N$ , καθόλα όμοιων ΦΒ στοιχείων (σύνδεση του θετικού ηλεκτροδίου του ενός ΦΒ στοιχείου με το αρνητικό του επόμενου), οδηγεί σε σύστημα με ανάλογα πολλαπλάσια τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{Noc} = N * V_{oc}$ ). Το ρεύμα βραχυκύκλωσης ισούται με το αντίστοιχο του ενός ( $I_{Nsc} = I_{sc}$ ). Στο παρακάτω σχήμα, παρατηρείται η αλλαγή που προκύπτει στις ηλεκτρικές παραμέτρους και την χαρακτηριστική I-V, όταν συνδέονται τρία όμοια ΦΒ στοιχεία σε σειρά προς επίτευξη μεγαλύτερης τάσης. Σε αυτήν την περίπτωση, το ρεύμα παραμένει σταθερό και η τάση εξόδου αυξάνεται, καθώς προκύπτει από το άθροισμα των τριών τιμών τάσης.



**Σχήμα 2.78:** χαρακτηριστική I-V τριών ΦΒ στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά

Αν τα συνδεδεμένα ΦΒ στοιχεία, εκ κατασκευής, δεν χαρακτηρίζονται από τα ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ( $I_{sc}$  και  $V_{oc}$ ), ιδιαίτερα αν κάποιο από αυτά υστερεί ως προς το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , τότε η συνολική διάταξη των  $N$  στοιχείων παρουσιάζει σημαντική απόκλιση από τις προηγούμενες τιμές. Στην περίπτωση της εν σειρά σύνδεσης, το ΦΒ στοιχείο με το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης επιβάλλει στο κύκλωμα, το δικό του πρακτικά, ρεύμα. Αυτή η ανομοιογένεια χαρακτηριστικών, έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη ενεργειακή απόδοση του ΦΒ συλλέκτη, σε σχέση με αυτή που θα είχε αν όλα τα ΦΒ στοιχεία είχαν τα ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.

Η παράλληλη σύνδεση ΦΒ στοιχείων δεν χρησιμοποιείται συνήθως, καθώς η μεγαλύτερη ένταση ρεύματος απαιτεί και μεγαλύτερες διατομές αγωγών, ενώ και οι απώλειες αυξάνονται με τη μείωση της τάσης. Για τους παραπάνω λόγους, η σύνδεση των ΦΒ στοιχείων γίνεται συνήθως εν σειρά.

Ένας ΦΒ συλλέκτης, διαμορφώνεται κατάλληλα ώστε να αποτελεί εύχρηστη σε μέγεθος μονάδα, με τα επιθυμητά ηλεκτρικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά, για να χρησιμοποιηθεί αργότερα στις ΦΒ εφαρμογές. Τα κύρια κριτήρια των χαρακτηριστικών αυτών είναι:

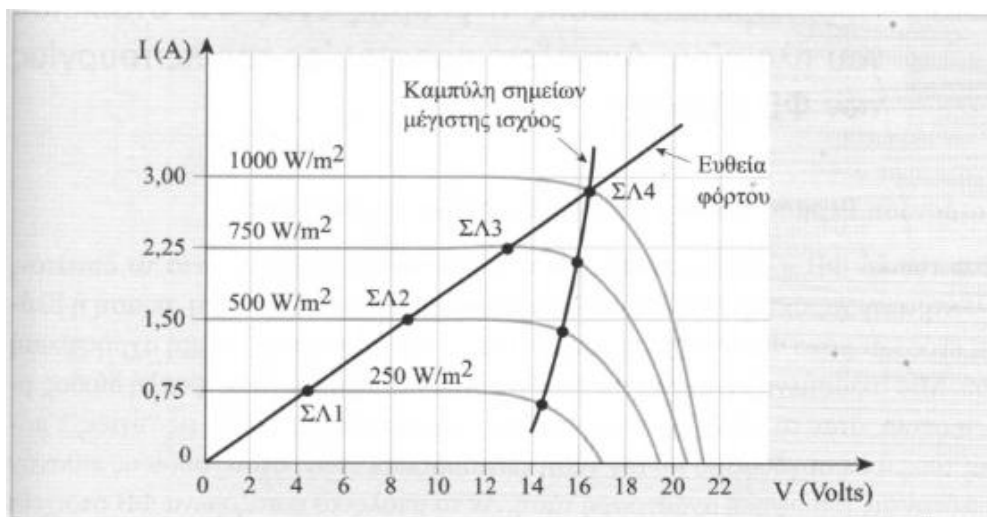
1. Για μεν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, η δυνατότητα συνδυασμού του ΦΒ συλλέκτη με ηλεκτρικό συσσωρευτή τυπικής ονομαστικής τάσης 12 V, για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται.
2. Για δε τις διαστάσεις της μονάδας, η ευκολία κατασκευής, μεταφοράς και ενσωμάτωσής τους σε σύνολα, δηλαδή συστοιχίες ΦΒ συλλεκτών, καθώς και το μικρό κόστος αντικατάστασής της, στην περίπτωση βλάβης ή καταστροφής της.

### 2.3.1.1 Η ενδογενής διαμόρφωση της μήτρας ΦΒ στοιχείων

Η διαμόρφωση του βασικού υλικού από τα οποία κατασκευάζεται ο ΦΒ συλλέκτης, συγκεκριμένα ο αριθμός των συνδεδεμένων ΦΒ στοιχείων, αναφέρεται ως μήτρα ΦΒ στοιχείων και έχει επικρατήσει να έχει άμεση σχέση με την ονομαστική ηλεκτρική τάση των ηλεκτρικών συσσωρευτών. Επομένως, το σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ), όπου ο ΦΒ συλλέκτης αποδίδει ενέργεια μέγιστης ισχύος όταν φωτίζεται με ένα ήλιο ( $1\text{ SUN} \rightarrow E = 1\text{ kW/m}^2$ ), πρέπει να αντιστοιχεί, στη τάση που θα καλύπτει τη φόρτιση ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή. Παραδείγματος χάριν, για τη φόρτιση συσσωρευτή ονομαστικής τάσης 12 V, απαιτείται τάση εξόδου του ΦΒ συλλέκτη περίπου 14,2-14,4 V, τάση μεγαλύτερη από αυτή του συσσωρευτή, ώστε να εξασφαλιστεί η βέλτιστη φόρτιση του.

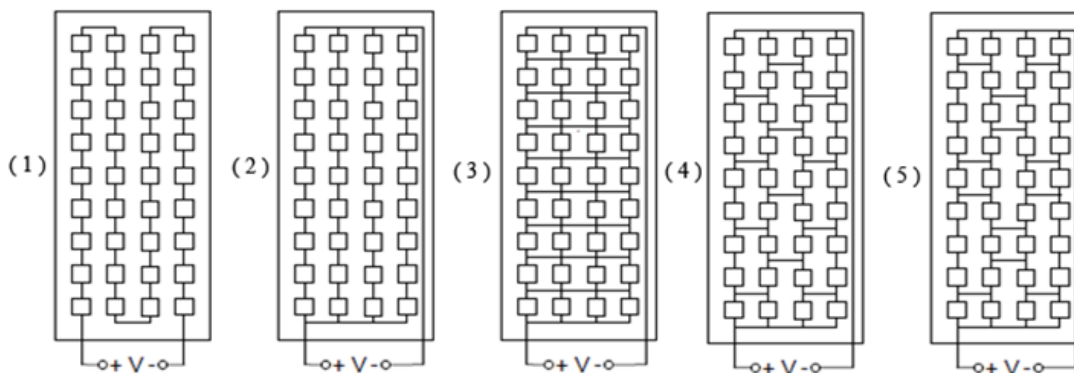
Στην λειτουργία αυτή, είναι αναγκαία η παρεμβολή του ελεγκτής φόρτισης (charge controller), για τον έλεγχο των ορίων τάσης φόρτισης και εκφόρτισης του ηλεκτρικού συσσωρευτή (εκτενέστερη περιγραφή στο κεφάλαιο 3.2.3.3), καθώς και μιας διόδου αντεπιστροφής-απομόνωσης ΔΑ (blocking, isolation diode), προκειμένου να αποτρέπεται το ρεύμα αντιστροφής κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή διαμέσου του ΦΒ συλλέκτη, όταν αυτός δεν φωτίζεται. Αυτά τα πρόσθετα ηλεκτρονικά και οι γραμμές μεταφοράς, απαιτούν μια επιπλέον τάση 1-2 V. Οπότε, το ΣΜΙ ενός ΦΒ συλλέκτη όταν φωτίζεται με  $1\text{ SUN}$ , πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον τάση εξόδου 15-17 V. Η απαίτηση αυτή, σε συνδυασμό με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ΦΒ στοιχείων, οδηγεί στην επιλογή των συγκεκριμένων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των ΦΒ συλλεκτών.

Στην πράξη, σε ένα σύνολο ΦΒ στοιχείων κρυσταλλικού Πυριτίου, για να επιτευχθεί τάση ανοικτού κυκλώματος περίπου 19-22 V, θα πρέπει να συνδεθούν σε σειρά 36 ΦΒ στοιχεία ( $V_{oc} = 36 * 0,6\text{ V} = 21,6\text{ V}$ ). Όπως διαπιστώνεται στο παρακάτω σχήμα, η μέγιστη τάση της χαρακτηριστικής I-V, όπου αντιστοιχεί το ΣΜΙ του ΦΒ συλλέκτη και άρα η τάση εξόδου όπου επιθυμείται να λειτουργεί αυτός, σε διάφορες τιμές της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, βρίσκεται στην περιοχή 14-17 V. Η αντίστοιχη τάση ανοικτού κυκλώματος είναι 19-22 V. Αυτό δικαιολογεί το πλήθος των ΦΒ στοιχείων, που χρησιμοποιούνται σε έναν ΦΒ συλλέκτη.



Σχήμα 2.79: χαρακτηριστική I-V για δεδομένο ωμικό φορτίο, σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού

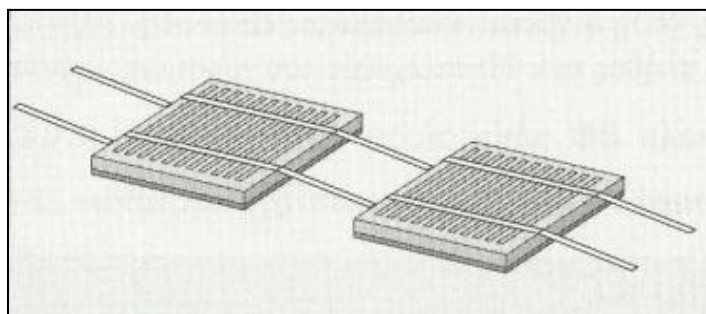
Ο ΦΒ συλλέκτης διατίθεται με ΦΒ στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά, δηλαδή με σειριακή διάταξη ΦΒ στοιχείων, όπως περιγράφηκε παραπάνω, αλλά και με τη μορφή σύνθετων διατάξεων, που προκύπτουν από συνδυασμό παράλληλης και σειριακής εσωτερικής σύνδεσης. Επίσης διατίθεται σε μεγαλύτερες διαστάσεις, με περισσότερα ΦΒ στοιχεία (π.χ. 72 ΦΒ στοιχεία), που χαρακτηρίζονται ωστόσο από υψηλή τάση ανοικτού κυκλώματος, κατάλληλες για ειδικές εφαρμογές.



**Σχήμα 2.80:** διασύνδεσης ΦΒ στοιχείων προς σχηματισμό ΦΒ συλλέκτη  
 1) σειριακή διάταξη, 2) διάταξη σειριακής-παράλληλης σύνδεσης, 3) διάταξη σταυρωτού δεσμού,  
 4) διάταξη γέφυρας και 5) διάταξη κυψέλης

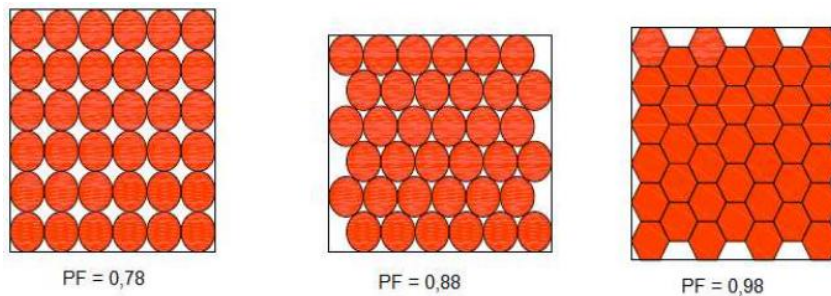
Για την διασύνδεση των ΦΒ στοιχείων, ώστε να σχηματιστεί η μήτρα, χρησιμοποιείται επικασιτερωμένη λωρίδα χαλκού (conducting strip). Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο λωρίδες χαλκού, οι οποίες συγκολλούνται στις κύριες ράβδους οδήγησης (busbars), του μεταλλικού ηλεκτροδίου της άνω όψης του ΦΒ στοιχείου. Από την μία πλευρά του ΦΒ στοιχείου, προεξέχουν με χαρακτηριστικό μήκος, οι άκρες των δύο λωριδών, ώστε να συγκολλούνται στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο της κάτω όψης, του επόμενου ΦΒ στοιχείου και να πραγματοποιηθεί με αυτόν τον τρόπο, η σύνδεση μεταξύ των δύο ΦΒ στοιχείων. Η διαδικασία αυτή, ακολουθείται για την διασύνδεση μεταξύ όλων των ΦΒ στοιχείων.

Να σημειωθεί ότι, η χρήση δύο λωριδών χαλκού, προσφέρει ασφάλεια σε περίπτωση που η συνέχεια κάποιας από τις δύο καταστραφεί, λόγω κάποιας φθοράς, ενώ πρέπει να επικαλύπτονται σε μια μεγάλη απόσταση κατά μήκος ράβδων οδήγησης, καθώς η αγωγιμότητα των αποτυπωμένων ράβδων είναι πολύ μικρή. Επίσης, προσφέρουν μια μη συμπαγή σύνδεση μεταξύ των ΦΒ στοιχείων, που επιτρέπουν τη λήψη θερμικών διαστολών χωρίς προβλήματα. Αν τα εν σειρά ΦΒ στοιχεία, δεν είναι εσωτερικά παράλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους, οι άκρες των λωριδών τους, μεταφέρονται εκτός του ΦΒ συλλέκτη ώστε να είναι δυνατή μια πιο ευέλικτη συνδεσιμότητα.



**Σχήμα 2.81:** ηλεκτρική σύνδεση ΦΒ στοιχείων στον ΦΒ συλλέκτη

Όσον αφορά την τελική διαμόρφωση της μήτρας, η αρχική μορφή της, ήταν τα κυκλικά επιστρώματα ΦΒ στοιχείων, με αποτέλεσμα να μένει αρκετή μη ενεργός επιφάνεια του ΦΒ συλλέκτη. Σήμερα, χρησιμοποιούνται τετραγωνικού σχήματος (mc-Si) ή τετραγωνικά με κομμένες γωνίες (c-Si), ώστε να ελαχιστοποιείται η μη αξιοποιήσιμη επιφάνεια του. Ως **συντελεστής κάλυψης PF** (Packing Factor), ορίζεται ο λόγος της συνολικής ενεργούς επιφάνειας ΦΒ στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας ημιαγωγού όπου γίνεται απορρόφηση και μετατροπή ηλιακής ακτινοβολίας, προς τη συνολική επιφάνεια ΦΒ συλλέκτη. Η τιμή του *PF* κυμαίνεται από 0,78 για κυκλικά ΦΒ στοιχεία σε παράλληλα στοιχισμένες σειρές, 0,88 για κυκλικά συγχωνευμένα μεταξύ τους και φτάνει μέχρι 0,98 για τετραγωνικά ή εξαγωνικά.



**Σχήμα 2.82:** παραδείγματα διαφορετικής διάταξης ΦΒ στοιχείων με τον αντίστοιχο συντελεστή κάλυψης

### **2.3.1.2 Η κατασκευαστική διαμόρφωση της τελικής μονάδας**

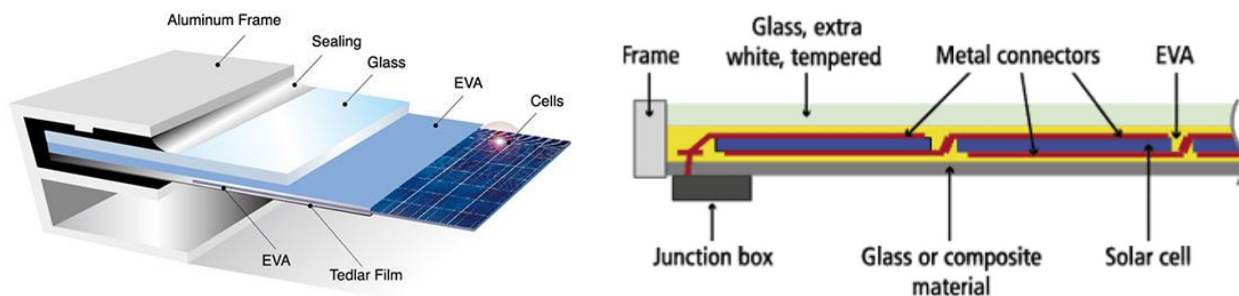
Η ολοκληρωμένη κατασκευαστική δόμηση του ΦΒ συλλέκτη, πρέπει να πληροί ειδικές προδιαγραφές, ώστε να εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, την απαραίτητη μηχανική αντοχή από κρούσεις, την αυξημένη στεγανότητα για προστασία από τις καιρικές συνθήκες όπως ο άνεμος, η υγρασία κ.τ.λ. ώστε ο ΦΒ συλλέκτης να έχει μια αξιόπιστη λειτουργία για περισσότερα από 20 έτη και επιπλέον, να παρέχει μόνωση για την ασφάλεια των ανθρώπων.

Η κάτω, μη ακτινοβολούμενη πλευρά, που αποτελεί και την πλάτη του ΦΒ συλλέκτη, αποτελείται από ανθεκτικό φύλλο μετάλλου, συνήθως ανοδιωμένου Αλουμινίου ή από σύνθετο πλαστικό, το οποίο λειτουργεί ως ασπίδα για την υγρασία και τους διαβρωτικούς παράγοντες. Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ακόμα γυαλί, κάτι το οποίο αυξάνει την προστασία.

Η επάνω, ακτινοβολούμενη πλευρά που αποτελεί και την όψη του ΦΒ συλλέκτη, αποτελείται από προστατευτικό επίστρωμα γυαλιού, πάχους 2-3 mm, υψηλής διαφάνειας και αντοχής. Τέτοιου είδους γυαλί, πρέπει να έχει μικρή περιεκτικότητα σιδήρου, αλλιώς η διέλευση του φωτός θα είναι μικρή και να έχει περάσει από θερμοσκληρυνση, προκειμένου να αναπτύξει αντοχή στις κρούσεις. Συνήθως, χρησιμοποιείται γυαλί Νατρασβέστου (soda lime glass, ένωση Ανθρακικό Νάτριο με Ανθρακικό Ασβέστιο), ενώ σύγχρονοι ΦΒ συλλέκτες, χρησιμοποιούν γυαλί με Δημήτριο (Ce), είδος μεταλλικού γυαλιού, το οποίο απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία, προς αύξηση της αξιοπιστίας τους.

Η μήτρα ΦΒ στοιχείων, ενθυλακώνεται και στερεώνεται ανάμεσα στις δύο πλευρές του ΦΒ συλλέκτη, με τον ενθυλακωτή, που είναι το συμπυκνωμένο πολυμερές υλικό EVA (Ethylene Vinyl Acetate - Αιθυλενίου και οξικού Βινυλίου) και χρησιμοποιείται μια λεπτή στρώση του υλικού αυτού, πάχους περίπου 0,5 mm. Το EVA, είναι ο πιο δημοφιλής ενθυλακωτής, ανήκει στην οικογένεια των θερμοπλαστικών, με αποτέλεσμα όσες μεταβολές πραγματοποιούνται μετά από θέρμανση, είναι αντιστρεπτές.



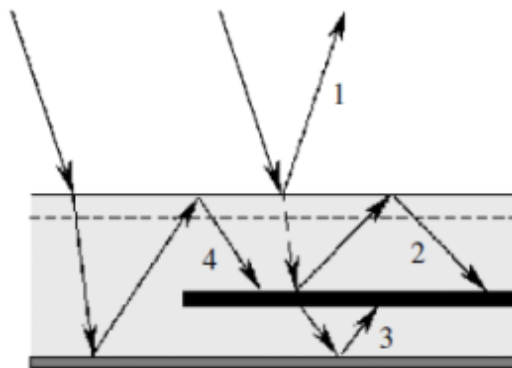


Σχήμα 2.83: κατασκευαστική δομή ΦΒ συλλέκτη

Όλες οι παραπάνω στρώσεις της δόμησης του ΦΒ συλλέκτη, συγκρατούνται μεταξύ τους, στεγανά και μόνιμα, με τη βοήθεια μιας ταινίας από φυσικό ή συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται με ένα περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα. Το περίβλημα είναι συνήθως ανοδιωμένου Αλουμινίου, καθώς θα πρέπει να είναι ηλεκτρικά μονωμένο από το ενεργό κύκλωμα των ΦΒ στοιχείων, ώστε οι υψηλές διαφορές δυναμικού, να μπορούν να περιοριστούν μεταξύ των ηλεκτρικών ακροδεκτών και του περιβλήματος, χωρίς ροή ρεύματος.

Γενικά, η ενθυλάκωση, ανάμεσα στις δύο πλευρές του ΦΒ συλλέκτη, επηρεάζει τις οπτικές ικανότητες των ΦΒ στοιχείων και κατ'επέκταση των οπτικών απωλειών του ΦΒ συλλέκτη, ανάκλασης και θερμοκρασίας, γι αυτό και η σημασία της κατασκευαστικής δομής, αλλά και των υπολοίπων υλικών που συνθέτουν τον ΦΒ συλλέκτη. Παρακάτω, παρουσιάζονται μερικές επιδράσεις (οπτικά φαινόμενα) της ενθυλάκωσης:

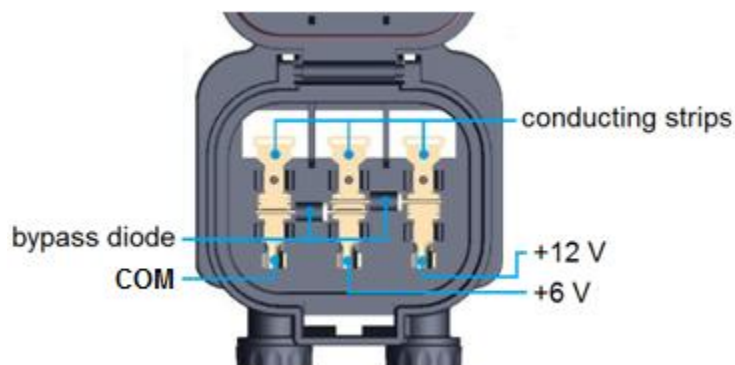
- Τυπικά, 4% ανάκλαση ηλιακής ακτινοβολίας, πραγματοποιείται μεταξύ γυαλιού και αέρα.
- Η ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται στο ηλεκτρόδιο της άνω όψης των ΦΒ στοιχείων (ράβδοι οδήγησης, δείκτες) και στην επιφάνεια τους, μπορεί να επαναφερθεί μερικώς, μέσω της ολικής ανάκλασης στην επιφάνεια του γυαλιού, εάν η επιφάνεια της μήτρας των ΦΒ στοιχείων έχει κλίση.
- Για ΦΒ στοιχεία χωρίς πίσω μεταλλικό καθρέφτη, η ηλιακή ακτινοβολία που τα διαπερνά, μπορεί να επαναφερθεί τοποθετώντας έναν ανακλαστήρα, στο πίσω μέρος της πλάτης. Η πίσω επιφάνεια, εάν είναι λευκή, εξυπηρετεί επίσης αυτό το σκοπό. Η πίσω επιφάνεια, εφόσον ανακλά διαχυτικά, επιτρέπει μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, να συλλέγεται από τη μήτρα.



Σχήμα 2.84: οπτικά φαινόμενα ενθυλάκωσης

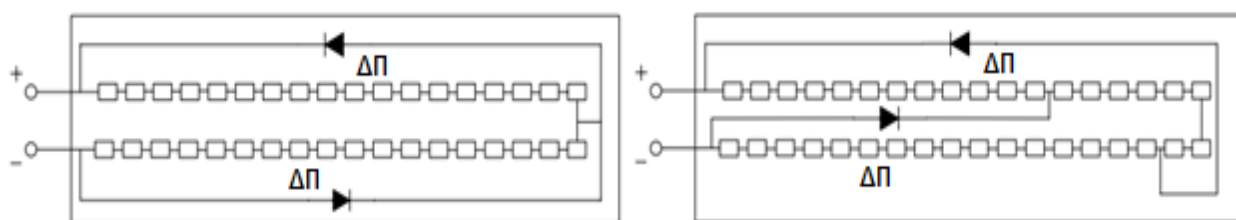
- 1) ανάκλαση στο γυαλί όψης, 2) παγίδευση ανάκλασης στη μήτρα και μετέπειτα απορρόφηση,
- 3) παγίδευση διάθλασης στο υλικό πλάτης και μετέπειτα απορρόφηση και 4) παγίδευση περιφερειακής ανάκλασης

Τέλος, στην πίσω πλευρά του ΦΒ συλλέκτη, προσκολλάται το κιβώτιο συνδέσεων, στο οποίο καταλήγουν οι απολήξεις των λωρίδων χαλκού της μήτρας ΦΒ στοιχείων και συνδέονται με τους ακροδέκτες πολικότητας του ΦΒ συλλέκτη, μέσω των οποίων παρέχεται η τάση εξόδου του ΦΒ συλλέκτη σε δύο τιμές, των 6 και 12 VDC. Επίσης, μέσα στο κιβώτιο συνδέσεων τοποθετούνται οι δίοδοι παράκαμψης ΔΠ (bypass diodes). Ο ΦΒ συλλέκτης, εφοδιάζεται με διόδους παράκαμψης, για την αποτροπή του φαινομένου της θερμής κηλίδας, που προκαλείται, λόγω σκίασης ή βλάβης των ΦΒ στοιχείων. Εκτενέστερη περιγραφή της θερμής κηλίδας, γίνεται στην παρακάτω παράγραφο (2.2.2.Π).



Σχήμα 2.85: κιβώτιο συνδέσεων ΦΒ συλλέκτη

Εν συντομία, παρατεταμένος σκιασμός κάποιου ΦΒ στοιχείου, σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπόλοιπων ΦΒ στοιχείων, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή τους και κατά συνέπεια στην αχρήστευση όλου του ΦΒ συλλέκτη, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης του καταστραμμένου ΦΒ στοιχείου. Οι δίοδοι παράκαμψης, συνδέονται παράλληλα με ομάδες των εν σειρά συνδεδεμένων ΦΒ στοιχείων, αλλά με αντίθετη πολικότητα από τα ΦΒ στοιχεία, επιτρέποντας τη χρήση του ΦΒ συλλέκτη, ακόμη και αν κάποιο ΦΒ στοιχείο υστερεί ή καταστραφεί.

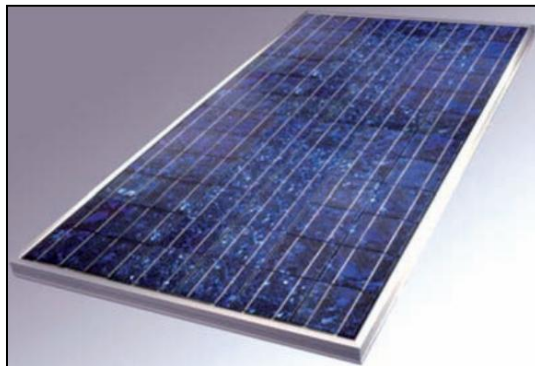


Σχήμα 2.86: διάταξη διόδων παράκαμψης (α) χωρίς αλληλοεπικάλυψη και (β) με αλληλοεπικάλυψη ΦΒ στοιχείων

Πρακτικά, μία δίοδος παράκαμψης ανά ΦΒ στοιχείο συνεπάγεται μεγάλο κόστος και γι αυτό το λόγο, μια τοποθετείται παράλληλα κατά μήκος μιας ομάδας ΦΒ στοιχείων. Ο μέγιστος αριθμός που μπορεί να καλύπτει μια ΔΠ είναι περίπου 10-20 ΦΒ στοιχεία. Για τυπικό ΦΒ συλλέκτη Πυριτίου, που αποτελείται συνήθως από 36 (ή 72) ΦΒ στοιχεία σε σειρά χρησιμοποιούνται 2 ή 4 (4 ή 8) ΔΠ. Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν δύο τρόπους τοποθέτησης των διόδων παράκαμψης, κατά τους οποίους μπορεί να παρουσιάζεται αλληλοεπικάλυψη ή όχι των ΦΒ στοιχείων.

Ο τύπος ΦΒ συλλέκτη που περιγράφηκε, αποτελεί τυπική λύση εφαρμογών σε στέγες κτιρίων ή εγκαταστάσεις στην ύπαιθρο. Με στόχο να προσαρμοστούν περισσότερο στην αρχιτεκτονική μορφή του κτιρίου, οι εταιρίες δημιουργούν ΦΒ συλλέκτες που ταιριάζουν με τις απαιτήσεις της πρακτικότητας και της αισθητικής. Μπορούν να αντικαταστήσουν κατασκευαστικά στοιχεία, όπως γυάλινες προσόψεις και

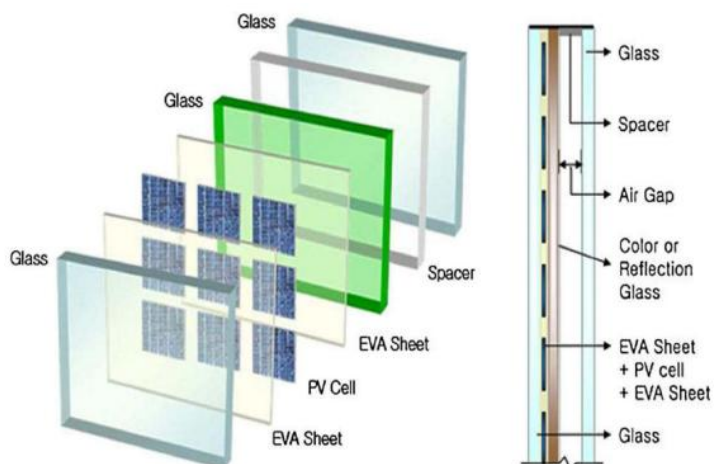
οροφές ή παραδοσιακά οικοδομικά υλικά, σε εφαρμογές όπως η σκίαση και η στεγανοποίηση. Στις στέγες των κτιρίων παραδοσιακής μορφής, προτείνεται η χρήση ΦΒ συλλεκτών με την μορφή κεραμιδιών, ενώ στις πλευρές του κτιρίου, γυάλινους ημιδιαπερατούς ΦΒ συλλέκτες, συνδυάζοντας έτσι την δυνατότητα φυσικού ημερήσιου φωτισμού, αλλά και την χρήση τους ως μονωτικοί υαλοπίνακες.



Σχήμα 2.87: τυπικός ΦΒ συλλέκτης πολυκρυσταλλικού Πυριτίου



Σχήμα 2.88: ΦΒ συλλέκτης σε μορφή κεραμιδιού



Σχήμα 2.89: α) κατασκευαστική δομή στεγανού υαλοπίνακα σε συνδυασμό με γυάλινο ημιδιαπερατό ΦΒ συλλέκτη  
β) τοποθέτηση γυάλινων ημιδιαπερατών ΦΒ συλλεκτών σε κτήριο

### 2.2.2 Η ενεργειακή αποδοτικότητα του φωτοβολταϊκού συλλέκτη

Η ικανότητα ενεργειακής μετατροπής του ΦΒ συλλέκτη βιομηχανικού επιπέδου, είναι μικρότερη της αντίστοιχης του ΦΒ στοιχείου εργαστηριακού επιπέδου. Οι βασικότεροι λόγοι είναι οι εξής:

- η μη πλήρης κάλυψη της γεωμετρικής επιφάνειάς του ΦΒ συλλέκτη, από επιφάνεια ΦΒ στοιχείων, η οποία καθορίζεται από τον παράγοντα κάλυψης  $PF$ ,
- η ανομοιογένεια των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των ΦΒ στοιχείων, που συνθέτουν το ΦΒ συλλέκτη και
- η ανακλαστικότητα του προστατευτικού επιστρώματος γυαλιού, που τοποθετείται πάνω από τα ΦΒ στοιχεία, σε όλη την επιφάνεια του ΦΒ συλλέκτη.

#### Ηλεκτρική ισχύς αιχμής $P_p$ :

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, που έχουν αναφερθεί και τα οποία ελέγχονται σε ένα εργαστηριακά παρασκευασμένο ΦΒ στοιχείο, ισχύουν επίσης και στο τελικά διατιθέμενο βιομηχανικό προϊόν ΦΒ συλλέκτη. Η γνώση του ρεύματος  $I_{sc}$ , της τάσης  $V_{oc}$ , της ισχύς  $P_m$ , του παράγον  $FF$ , επιτρέπει τον έλεγχο της απόδοσης  $\eta_c$  ΦΒ στοιχείου και κατ'επέκταση τη δυνατότητα σύγκρισης της αποδοτικότητας διαφορετικών ΦΒ συλλεκτών, κάτω από κοινές συνθήκες, που να αντιπροσωπεύουν τυπικές καταστάσεις εκμετάλλευσης ηλιακής ακτινοβολίας. Για το σκοπό αυτό, καθορίστηκαν διεθνώς οι **πρότυπες συνθήκες ελέγχου  $STC$**  (Standard Test Conditions) των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ΦΒ στοιχείου ή ΦΒ συλλέκτη, που προσδιορίζονται από συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας:

- Πυκνότητας ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας ενός ήλιου ( $1\text{ SUN} \rightarrow E_{STC} = 1\text{ kW/m}^2$ ).
- Κάθετη πρόσπτωση ΗΜ ακτινοβολίας, φάσματος αντίστοιχου του ηλιακού με AM 1,5.
- Θερμοκρασία ΦΒ συλλέκτη  $\theta_{STC} = 25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ .

Το κυριότερο τυπικό ηλεκτρικό χαρακτηριστικό ενός ΦΒ στοιχείου και κατ'επέκταση του ΦΒ συλλέκτη με βάση το οποίο θα αναζητηθεί στο εμπόριο, ώστε να καλύψει τις ανάγκες μιας συγκεκριμένης ΦΒ εφαρμογής καθώς και η εμπορική τιμή του, καθορίζεται με βάση την ισχύ αιχμής  $P_p$  (Peak Power) ή αλλιώς ονομαστική ηλεκτρική ισχύς, που αποτελεί την μέγιστη ηλεκτρική ισχύ  $P_{m,STC}$  που μπορεί να αποδώσει ο ΦΒ συλλέκτης, κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου  $STC$ .

$$P_p = P_{m,STC} = I_{m,STC} * V_{m,STC} \quad (2.33)$$

η δε μονάδα μέτρησης της στο SI, γράφεται emphaticά  $W_p$ .

Εστω, ότι η ισχύς αιχμής  $P_p$  ενός τυπικού ΦΒ συλλέκτη κρυσταλλικού Πυριτίου είναι  $75\text{ W}_p$ . Αυτό σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος ΦΒ συλλέκτης, όταν φωτίζεται με  $E_{STC} = 1\text{ kW/m}^2$ , φάσματος AM 1,5 και η θερμοκρασία  $\theta_{STC}$  του είναι  $25^\circ\text{C}$ , τότε παράγει ηλεκτρική ενέργεια με ισχύ  $75\text{ W}$ . Είναι προφανές ότι ένας ΦΒ συλλέκτης κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθ'όλο το έτος, βρίσκεται διαρκώς σε συνθήκες διαφορετικές απ'αυτές που αντιστοιχούν στον ορισμό της ισχύος αιχμής του. Κατά τη λειτουργία του ΦΒ συλλέκτη σε πραγματικές συνθήκες, η θερμοκρασία του είναι διάφορη των  $25^\circ\text{C}$  και η πυκνότητα ισχύος

μεταβάλλεται τυπικά μεταξύ του 0 έως  $1367 \text{ W/m}^2$  (ηλιακή σταθερά). Η μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς  $P_m$ , κάθε στιγμή, είναι διαφορετική και μάλιστα κατά κανόνα μικρότερη της ισχύος αιχμής  $P_p$  του.

Σε κάθε ΦΒ συλλέκτη, εκτός των χαρακτηριστικών που αναφέρονται στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC ( $P_p$ ,  $V_{oc}$  και  $I_{sc}$ ), αναγράφεται η θερμοκρασία, την οποία αποκτά ο ΦΒ συλλέκτης ευρισκόμενος σε καθορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος, που προσεγγίζουν μια μέση πραγματική κατάσταση. Η θερμοκρασιακή αυτή περιοχή ( $45\text{-}50^\circ\text{C}$ ), αφορά προσεγγιστικά, τη μέση θερμοκρασιακή κατάσταση του υλικού του ΦΒ στοιχείου του ΦΒ συλλέκτη, στο χρονικό διάστημα 2-3 ώρες πριν και μετά το μεσημέρι μιας αίθριας καλοκαιρινής ημέρας, σε μέσα γεωγραφικά πλάτη. Χαρακτηρίζεται ως **ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας NOCT** (Nominal Operating Cell Temperature) ενός ΦΒ στοιχείου και προσδιορίζεται από συγκεκριμένες συνθήκες:

- Μόνιμη κατάσταση ΦΒ συλλέκτη (ανοιχτό κύκλωμα).
- Μέση ταχύτητα ανέμου  $1 \text{ m/s}$ .
- Πυκνότητα ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας  $E_{NOCT} = 800 \text{ W/m}^2$ .
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα  $\theta_a = 20^\circ\text{C}$ .

Όταν ο ΦΒ συλλέκτης παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα σε φορτίο, σε συνθήκες ακτινοβολίας, θερμοκρασίας αέρα και ταχύτητας ανέμου, στις συνθήκες NOCT, τότε η θερμοκρασία του  $\theta_c$ , είναι λίγο μικρότερη ( $\sim 3^\circ\text{C}$ ), σε σχέση με αυτή που αντιστοιχεί σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος. Η ελάττωση αυτή αιτιολογείται με βάση τη διατήρηση της ενέργειας. Χαμηλή ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας ΦΒ στοιχείου, αποτελεί ένδειξη ταχύτερης αποβολής προς το περιβάλλον, του μέρους εκείνου της ηλιακής ακτινοβολίας, που συμβάλει, ουσιαστικά, στην αύξηση της θερμοκρασίας του. Συνεπώς, όσο μικρότερη η τιμή της για ένα ΦΒ συλλέκτη, τόσο μικρότερη η μείωση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος, σε σχέση με άλλο, ίδιας ισχύος αιχμής, του οποίου όμως, η θερμοκρασία NOCT είναι μεγαλύτερη.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	Τιμή
Τυπική ισχύς αιχμής, $P_p$ (Peak Power)	80W
Εγγύηση για ελάχιστο της ισχύος αιχμής	76W
Ηλεκτρική τάση στο σημείο ισχύος αιχμής ( $V_{m,STC}$ )	16,9V
Ηλεκτρικό ρεύμα στο σημείο ισχύος αιχμής ( $I_{m,STC}$ )	4,73A
Τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{oc,STC}$ )	21,5V
Ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc,STC}$ )	4,97A
Θερμικός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης	0,05%/K
Θερμικός συντελεστής τάσης ανοικτού κυκλώματος	-0,5%/K
Θερμικός συντελεστής μεταβολής ισχύος	-0,45%/K
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	49 °C
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	Τιμή
L x B x H (Μήκος x πλάτος x πάχος), σε mm	1425 x 652 x 36
Βάρος	11,9 kg

Πίνακας 2.3 τυπικά χαρακτηριστικά ΦΒ συλλεκτών ονομαστικής τάσης εξόδου 12 V

**Βαθμός απόδοσης  $n_m$  :**

Ο βαθμός απόδοσης ενεργειακής μετατροπής  $n_{module}$  του ΦΒ συλλέκτη, ορίζεται με παρόμοιο τρόπο όπως με αυτόν του ΦΒ στοιχείου. Συγκεκριμένα, ισούται με το λόγο της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος  $P_m$  του ΦΒ συλλέκτη, προς το λόγο της προσπίπτουσας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας  $P_{in}$  (incident) στην επιφάνεια του. Σύμφωνα με τη θεωρητική εκτίμηση του βαθμού απόδοσης  $n_m$ , θεωρείται ίσος με μονάδα:

$$n_{module} = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m * V_m}{E * S} = \frac{FF * I_{sc} * V_{oc}}{E * S} \quad (2.34)$$

όπου,  $E$  η πυκνότητα ισχύος (ένταση) ηλιακής ακτινοβολίας και  $S$  το εμβαδό επιφάνειας ΦΒ συλλέκτη.

Εκτός του συμβόλου  $E$ , χρησιμοποιείται, κατά περίπτωση και κυρίως, όταν αναφέρεται η ολική πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, μετρούμενη στο επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας, μια δεδομένη χρονική στιγμή, χρησιμοποιείται το σύμβολο  $G_t$ . ( $G_T$  για οριζόντια επιφάνεια ΦΒ συστοιχίας και  $G_\beta$  για κεκλιμένη επιφάνεια).

Καθώς το ημιαγωγικό υλικό, από το οποίο μπορεί να είναι κατασκευασμένος ένας ΦΒ συλλέκτης, ποικίλει, ο βαθμός απόδοσης  $n_m$  του, εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες και τη θερμοκρασία του ημιαγωγικού υλικού παρασκευής των ΦΒ στοιχείων του. Έτσι, η τιμή αναφοράς ή αλλιώς ονομαστική τιμή απόδοσης  $n_{m,STC}$  του ΦΒ συλλέκτη, για κάθε ημιαγωγικό υλικό παρασκευής του, καθορίζεται από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου  $STC$ :

$$n_{m,STC} = \frac{I_{m,STC} * V_{m,STC}}{G_{STC} * S} \quad (2.35)$$

Η θεωρητική εκτίμηση του αναμενόμενου βαθμού απόδοσης  $n_m$  ενός ΦΒ συλλέκτη, όπου είναι ίσος με μονάδα, στην πράξη δεν λαμβάνει υπόψη μία σειρά από παράγοντες, οι οποίοι συχνά συνεπάγονται σημαντική απόκλιση, με τη τιμή του τελικώς να είναι μικρότερη της μονάδας. Οι παράγοντες απόκλισης αποτελούν ενεργειακές απώλειες και μπορεί να σχετίζονται με το ίδιο το ΦΒ συλλέκτη ή από τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της θέσης εγκατάστασης. Έτσι, ο βαθμός απόδοσης  $n_m$ , καθορίζεται από τις αποκλίσεις που υφίσταται από την τιμή της ονομαστικής απόδοσης  $n_{m,STC}$  του ΦΒ συλλέκτη.

Οι ενεργειακές απώλειες αναλύονται στη συνέχεια του κεφαλαίου, ενώ εν συντομία, οι απώλειες αυτές αφορούν:

- τη γήρανση του ΦΒ συλλέκτη, δηλαδή στη μείωση της απόδοσής του λόγω αλλοίωσης των υλικών της μηχανικής κατασκευαστικής του, αλλά και των ΦΒ στοιχείων που των συνθέτουν,
- τις απώλειες οπτικού δρόμου και θερμοκρασίας ΦΒ στοιχείου, που δημιουργούνται λόγω τις διαφοροποίησης των χαρακτηριστικών της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας του περιβάλλοντα αέρα και των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας του ΦΒ συλλέκτη, σε σχέση με αυτά των πρότυπων συνθηκών  $STC$  και
- τις απώλειες στη δίοδο αντεπιστροφής του ΦΒ συλλέκτη.

Η τιμή του βαθμού απόδοσης  $n_m$  ενός ΦΒ συλλέκτη, μπορεί να αποδοθεί ως γινόμενο των επιμέρους συντελεστών των ενεργειακών απωλειών, που προσδιορίζουν την απόκλιση της απόδοσης του, που υφίσταται από τη τιμή της ονομαστικής απόδοσης  $n_{m,STC}$  του, με την σχέση:

$$\eta_m = \eta_{\gamma,m} * \eta_{καθ} * \eta_R * \eta_{LI} * \eta_S * \eta_P * \eta_T * \eta_D * n_{m,STC} \quad (2.36)$$

όπου,  $\eta_{\gamma,m}$  : ο συντελεστής γήρανσης του ΦΒ συλλέκτη

$\eta_{καθ}$  : ο συντελεστής καθαρότητας προστατευτικού φύλλου γυαλιού ΦΒ συλλέκτη

$\eta_R$  : ο συντελεστής απόκλισης λόγω διαφοροποίησης της ανακλαστικότητας, σε γωνίες πρόσπτωσης διάφορες της καθέτου στο ΦΒ συλλέκτη

$\eta_{LI}$  : ο συντελεστής απόκλισης στην περιοχή χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας (Low Irradiance losses)

$\eta_S$  : ο συντελεστής φασματικής απόκλισης λόγω διαφορετικού φάσματος (Spectrum) σε σχέση με το φάσμα AM 1,5

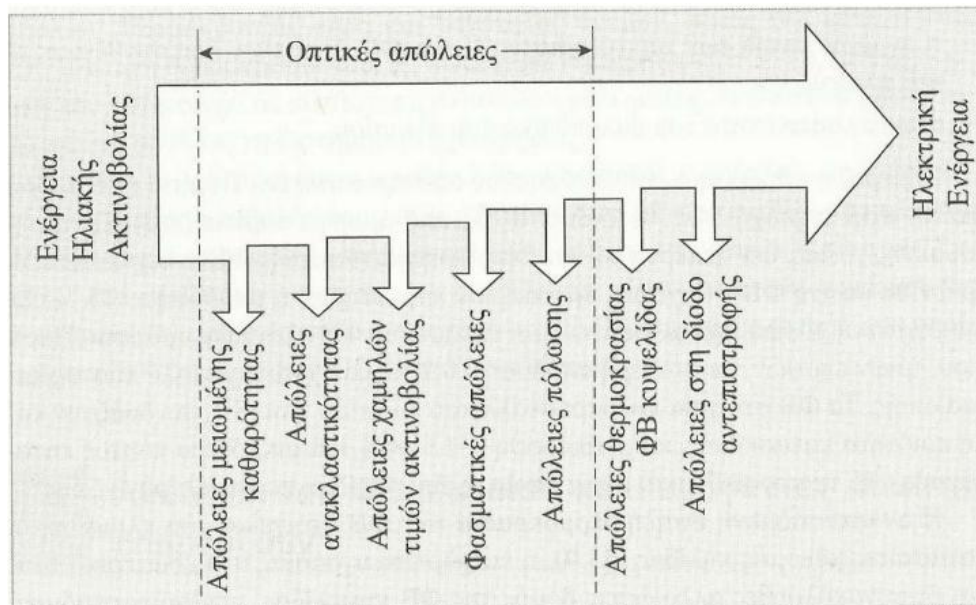
$\eta_P$  : ο συντελεστής απόκλισης εξαιτίας της πόλωσης ηλιακής ακτινοβολίας (Polarization)

$\eta_T$  : ο συντελεστής απόκλισης της απόδοσης του ΦΒ συλλέκτη εξαιτίας της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας ΦΒ στοιχείου, σε σχέση με τη θερμοκρασία αναφοράς 25°C

$\eta_D$  : ο συντελεστής απωλειών στη δίοδο αντεπιστροφής

$n_{m,STC}$  : ο συντελεστής απόδοσης ΦΒ συλλέκτη σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου *STC*

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



Σχήμα 2.90: διάγραμμα Sankey για τη ροή ενέργειας σε ΦΒ συλλέκτη

**I. Η θερμική εξάρτηση της απόδοσης φωτοβολταϊκού συλλέκτη**

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου αυξάνεται κατά τον φωτισμό του, εξαιτίας της μετατροπής, μέσα σε αυτό, μέρους της ηλιακής ενέργειας σε θερμική ενέργεια (αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του υλικού). Στην περίπτωση που το ΦΒ στοιχείο είναι ενσωματωμένο στο ΦΒ συλλέκτη, η διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ της θερμοκρασίας λειτουργίας  $\theta_c$  του ΦΒ στοιχείου και της θερμοκρασίας περιβάλλοντα αέρα  $\theta_a$  ( $\theta_c - \theta_a$ ), αυξάνει σχεδόν γραμμικά, ως συνάρτηση της ολικής πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας  $G_T$ , με τυπικό ρυθμό:

$$\frac{\theta_c - \theta_a}{G_t} \approx 30^\circ / \left( \frac{kW}{m^2} \right) \quad (2.37)$$

Μια αναλυτική έκφραση για την εξάρτηση της θερμοκρασίας του ΦΒ στοιχείου, από τις συνθήκες περιβάλλοντος, όπου βρίσκεται ο ΦΒ συλλέκτης, είναι:

$$\theta_c = \theta_a + \frac{G_t}{G_{STC}} * (T_1 * e^{B*ws} + T_2 + \Delta\theta) \quad (2.38)$$

όπου,  $G_t$  η πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του ΦΒ πλαισίου,  $G_{STC}$  η πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας σε  $STC$ ,  $B$  ο εμπειρικός συντελεστής,  $ws$  η ταχύτητα του ανέμου,  $T_1$  ή  $T_2$  οι εμπειρικοί συντελεστές που υπολογίζονται βάση τις οριακές τιμές της θερμοκρασίας του ΦΒ στοιχείου, σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες ανέμου αντίστοιχα και  $\Delta\theta$  η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ΦΒ στοιχείου και της πίσω επιφάνειας του ΦΒ συλλέκτη.

Συνεπακόλουθα, μεταβάλλεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  και η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  του ΦΒ στοιχείου, με την παρατήρηση ότι η τάση ανοικτού κυκλώματος του ΦΒ συλλέκτη, προκύπτει ως άθροισμα των αντίστοιχων τάσεων των επιμέρους ΦΒ στοιχείων, συνδεδεμένων σε σειρά:

$$I_{sc} = \frac{G_t}{G_{STC}} * I_{sc,STC} * [1 + \alpha I_{sc} * (\theta_c - \theta_{STC})] \quad (2.39)$$

$$\alpha I_{sc} = \frac{dI_{sc}}{I_{sc} * dT} \quad (2.40)$$

όπου,  $\alpha I_{sc}$  ο θερμικός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης του ΦΒ στοιχείου με  $T = 273 + \theta$  και  $I_{sc,STC}$  η τιμή ρεύματος βραχυκύκλωσης σε  $STC$ .

$$V_{oc} = V_{oc,STC} * [1 + \beta V_{oc} * (\theta_c - \theta_{STC})] * \left[ 1 + \delta(\theta_c) * \ln \left( \frac{G_T}{G_{STC}} \right) \right] \quad (2.41)$$

$$\beta V_{oc} = \frac{dV_{oc}}{V_{oc} * dT} \quad (2.42)$$

όπου,  $\beta V_{oc}$  ο θερμικός συντελεστής τάσης ανοικτού κυκλώματος του ΦΒ στοιχείου,  $V_{oc,STC}$  η τάση ανοικτού κυκλώματος σε  $STC$  και  $\delta(\theta_c)$  ο διορθωτικός παράγοντας εξάρτησης  $V_{oc}$  από την  $G_t$ .

Οι σχέσεις που περιγράφουν την εξάρτηση του ρεύματος και της τάσεως του ΦΒ συλλέκτη, όταν αυτό λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ) του, είναι οι εξής:



$$I_m = \frac{G_t}{G_{STC}} * I_{m,STC} * [1 + \alpha I_m * (\theta_c - \theta_{STC})] + C_0 \quad (2.43)$$

όπου,  $\alpha I_m$  ο θερμικός συντελεστής μέγιστου ρεύματος στην κατάσταση του ΣΜΙ,  $I_{m,STC}$  το ρεύμα μέγιστης ισχύος σε  $STC$  και  $C_0$  ο εμπειρικός συντελεστής προσαρμογής στα πειραματικά δεδομένα.

$$V_m = V_{m,STC} * [1 + \beta V_m * (\theta_c - \theta_{STC})] + C_1 * \ln\left(\frac{G_t}{G_{STC}}\right) + C_2 * \left[\ln\left(\frac{G_t}{G_{STC}}\right)\right]^2 \quad (2.44)$$

όπου,  $\beta V_m$  ο θερμικός συντελεστής μέγιστης τάσης στην κατάσταση του ΣΜΙ,  $V_{m,STC}$  η τάση μέγιστης ισχύος σε  $STC$  και  $C_1$  ή  $C_2$  οι εμπειρικοί συντελεστές προσαρμογής στα πειραματικά δεδομένα.

Η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται από το ΦΒ συλλέκτη, όταν αυτό λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ), περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_m = I_m * V_m \approx \frac{t}{G_{STC}} * P_p * [1 + \gamma_{mp} * (\theta_c - \theta_{STC})] \quad (2.45)$$

$$\gamma_{mp} = \frac{dP_m}{P_m * dT} \quad (2.46)$$

όπου,  $\gamma_{mp}$  ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος ΦΒ συλλέκτη και  $P_p$  η ισχύς αιχμής σε  $STC$ .

## II. Η απώλεια ενέργειας της απόδοσης φωτοβολταϊκού συλλέκτη

Η αναπτυσσόμενη υψηλή θερμοκρασία των ΦΒ στοιχείων του ΦΒ συλλέκτη, οι καταστάσεις σκίασης ή βλάβης ΦΒ στοιχείων (φαινόμενο θερμής κηλίδας), η εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό του και οι συνακόλουθες αλλοιώσεις δομής του ΦΒ στοιχείου, μειώνουν σταδιακά την ενεργειακή απόδοσή  $\eta_m$  του ΦΒ συλλέκτη. Το μέγεθος της επίδρασης, εξαρτάται από το ημιαγωγικό υλικό του και τη διαχρονική αξιοπιστία της μηχανικής κατασκευής και των ηλεκτρολογικών και μονωτικών υλικών. Επίσης, σκόνες και άλλα σωματίδια στην επιφάνεια όψης του ΦΒ συλλέκτη, μειώνουν την απόδοση του. Παρακάτω, αναφέρονται η επίδραση του καθενός από τους παράγοντες, που συνιστούν τις ενεργειακές απώλειες.

### **Παράγων ή συντελεστής γήρανσης $\eta_{\gamma,m}$ :**

Αφορά στη μείωση της απόδοσης του ΦΒ συλλέκτη στο χρόνο ζωής του και εκφράζεται συνήθως με το ποσοστό γήρανσης ανά έτος χρήσης. Προσδιορίζει την ελάττωση της απόδοσής τους, άρα και της ισχύος αιχμής λόγω γενικότερης αλλοίωσης των ΦΒ στοιχείων, ως ενσωματωμένα τμήματα του ΦΒ συλλέκτη. Θεωρητικά η μείωση αυτή είναι μικρή, στην πράξη όμως, εμφανίζονται αλλοιώσεις στη δομή του υλικού των ΦΒ στοιχείων, που οφείλεται σε διάφορα καιρικά αίτια όπως η υγρασία και η θερμοκρασία, κυρίως όμως σε υπερθερμάνσεις του φαινομένου της θερμής κηλίδας (hot spot).

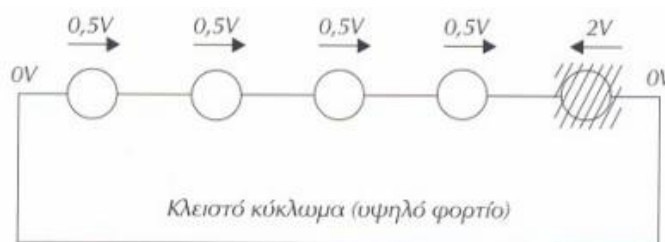
Μετρήσεις μακράς διάρκειας σε ΦΒ συλλέκτες κρυσταλλικού Πυριτίου, δίδουν μείωση της αποδοτικότητας του κάτω από πρότυπες συνθήκες, ~1% κατά έτος χρήσης (ρυθμός γήρανσης). Συνεπώς, κατά τον υπολογισμό ενός ΦΒ συστήματος σε ορισμένη εφαρμογή, επιβάλλεται να ληφθεί υπόψη η διαχρονική μείωση της αποδοτικότητας το, με εκτίμηση ενός τυπικού συντελεστή γήρανσης. Ως τυπική τιμή του για τους ΦΒ συλλέκτες που αναφέρθηκαν, λαμβάνεται η μέση τιμή του συντελεστή γήρανσης στο χρόνο εγγύησης, δηλαδή  $\eta_{\gamma,m} = 0,9$ .



**Σχήμα 2.91:** παραδείγματα γήρασης ΦΒ συλλέκτη όπου φαίνεται (α) ο αποχρωματισμός των ΦΒ στοιχείων και (β) η διάβρωση του πλαστικού υλικού προστασίας της πίσω όψης

➤ **Ανάλυση φαινομένου θερμής κηλίδας:**

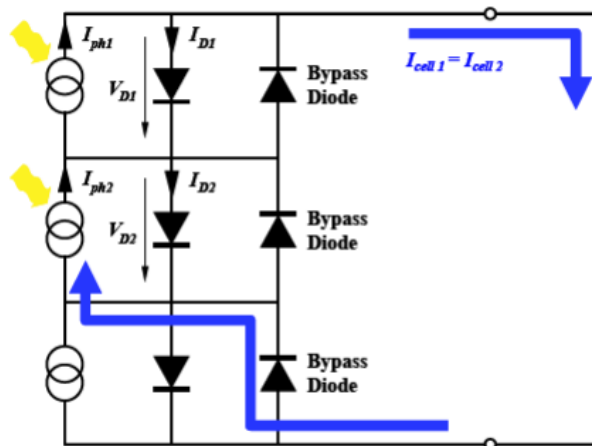
Στη παράγραφο (2.2.2.1) αναφέρθηκε ότι ένα ΦΒ στοιχείο στο σκοτάδι άγει ως δίοδος. Έτσι, η πλήρης σκίαση ή βλάβη ενός ΦΒ στοιχείου, μειώνει το ρεύμα δια μέσου των μη σκιασμένων ΦΒ στοιχείων, προκαλώντας τα φωτισμένα ΦΒ στοιχεία να παράγουν υψηλότερη τάση, μετατρέποντας το σκιασμένο ΦΒ στοιχείο σε μια δίοδο ανάστροφης πόλωσης, μηδενίζοντας με αυτόν τον τρόπο, την συνολική παραγωγή ρεύματος του κλάδου. Η κατάσταση θερμής κηλίδας, εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα, που παρουσιάζει ένα ΦΒ στοιχείο το οποίο δεν παράγει ρεύμα μέσα σε ένα κλάδο.



**Σχήμα 2.88:** σχηματισμός θερμής κηλίδας

Ακόμη περισσότερο, λόγω της σύνδεσής του με τα φωτισμένα ΦΒ στοιχεία, το σκιασμένο ΦΒ στοιχείο λειτουργεί πια σαν ηλεκτρικό φορτίο και μάλιστα είναι δυνατόν να καταναλώσει τόση ισχύ όση είναι η μέγιστη ισχύς των φωτισμένων ΦΒ στοιχείων στον κλάδο. Έτσι, αυτή η ενέργεια που χάνεται στο σκιασμένο ΦΒ στοιχείο, μετατρέπεται σε θερμότητα, που μπορεί να προκαλέσει την υπερθέρμανση του και ενδεχόμενη καταστροφή του. Εάν η θερμοκρασία του αυξηθεί πάνω από ένα όριο (85-100°C), τα στερεωτικά υλικά μπορεί να πάθουν βλάβη, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του ΦΒ συλλέκτη. Ωστόσο, με τη βοήθεια των διόδων παράκαμψης αποφεύγονται τα προβλήματα θερμής κηλίδας.

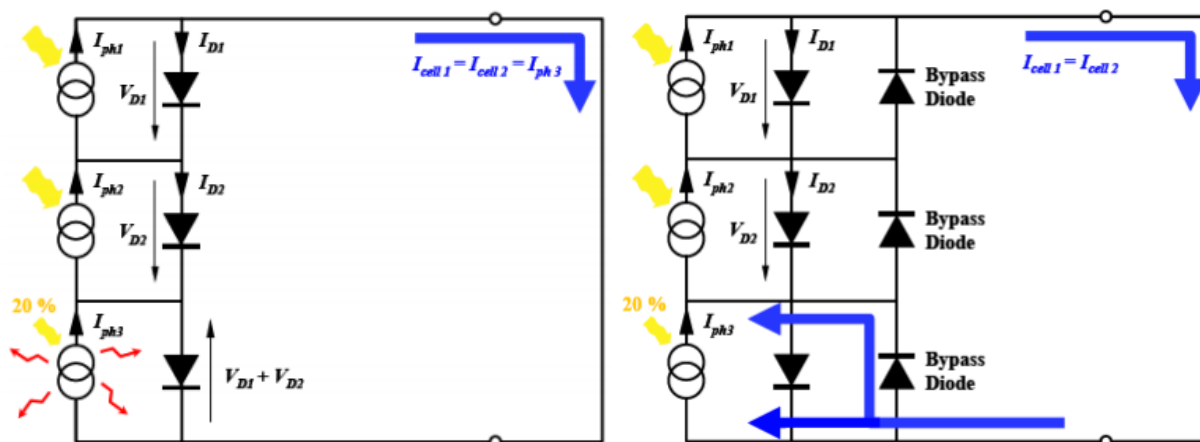
Κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας κάθε ΦΒ στοιχείο είναι ορθά πολωμένο και η ΔΠ που είναι ανάστροφα πολωμένη δεν άγει καθώς λειτουργεί σαν ανοιχτό κύκλωμα. Παρόλα αυτά, αν κάποιο ΦΒ στοιχείο σκιαστεί πλήρως, άρα πολωθεί ανάστροφα και εμφανισθεί μια διαφορά του ρεύματος βραχυκυκλώσεως μεταξύ των ΦΒ στοιχείων του κλάδου, τότε η ΔΠ άγει επιτρέποντας τη ροή του ρεύματος μέσω των υπόλοιπων ΦΒ στοιχείων του κλάδου και προστατεύει το “προβληματικό” ΦΒ στοιχείο. Η μέγιστη ανάστροφη τάση τώρα του ΦΒ στοιχείου περιορίζεται στην πτώση τάση της ΔΠ αποτρέποντας την εμφάνιση του φαινομένου. Η διαδικασία αυτή, περιγράφεται σχηματικά παρακάτω.



Σχήμα 2.92: ροή ρεύματος διαμέσου της διόδου παράκαμψης σε περίπτωση πλήρους σκίασης ενός ΦΒ στοιχείου

Στην περίπτωση μερικώς σκιασμένου ΦΒ στοιχείου, με μείωση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο 20% σε σχέση με τα υπόλοιπα, θα παράγει περίπου το 20% του φωτορεύματος, ενώ τα υπόλοιπα θα παράγουν το 100%. Λόγω της σύνδεσης σε σειρά, στο κύκλωμα θα ρέει μόνο το ρεύμα που θα παράγεται από το μερικώς σκιασμένο ΦΒ στοιχείο. Αναφορικά με τα ΦΒ στοιχεία που δεν σκιάζονται, το υπόλοιπο ρεύμα τους (δηλαδή το υπόλοιπο 80%) θα ρέει εσωτερικά σε αυτά, στις ενδογενείς διόδους τους, Επιπλέον, στο μερικώς σκιασμένο ΦΒ στοιχείο θα υφίσταται απώλεια ενέργειας, καθώς η ενδογενής διόδος του θα είναι ανάστροφα πολωμένη, από την τάση που παράγεται στα άλλα ΦΒ στοιχεία.

Πρακτικά, η περίπτωση αυτή οδηγεί στη δημιουργία θερμών κηλίδων τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε γρηγορότερη γήρανση και ενδεχόμενα καταστροφή του ΦΒ συλλέκτη. Ωστόσο, με τη βοήθεια των διόδων παράκαμψης αποφεύγονται τα προβλήματα των θερμών κηλίδων. Στην περίπτωση αυτή, η διαφορά των ρευμάτων μεταξύ των ΦΒ στοιχείων που δεν σκιάζονται και του μερικώς σκιασμένου ΦΒ στοιχείου ρέει διαμέσου της διόδου παράκαμψης. Η διαδικασία αυτή, περιγράφεται σχηματικά παρακάτω.



Σχήμα 2.93: α) περίπτωση μερικώς σκιασμένου ΦΒ στοιχείου χωρίς διόδους παράκαμψης  
β) ροή ρεύματος σε μερικώς σκιασμένο ΦΒ στοιχείο με τη χρήση διόδου παράκαμψης

### **Συντελεστής απωλειών διόδου αντεπιστροφής $\eta_D$ :**

Περιγράφει τις απώλειες που προέρχονται από την δίοδο αντεπιστροφής που τοποθετείται για να αποτρέπεται η εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή διαμέσου του ΦΒ συλλέκτη όταν αυτός δεν φωτίζεται. Οι απώλειες ενέργειας στη δίοδο αντεπιστροφής εκτιμώνται σε ~1%. Συνεπώς, ο αντίστοιχος συντελεστής απωλειών έχει την τυπική τιμή  $\eta_D = 0,99$ . Στις περισσότερες περιπτώσεις, για λόγους περιορισμού των πτώσεων τάσης στα κυκλώματα σύνδεσης των ΦΒ συλλεκτών και στις γραμμές μεταφοράς και άρα των αντίστοιχων καταναλώσεων, προτιμούνται οι διόδοι Schottky, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μικρότερη τάση λειτουργίας σε ορθή πόλωση (~0,3 V), σε αντίθεση με τις κοινές διόδους Πυριτίου (~0,7 V).

### **Συντελεστής απόκλισης ανακλαστικότητας $\eta_R$ :**

Η αυξημένη ανακλαστικότητα οπτικού συστήματος όψεως του ΦΒ συλλέκτη (προστατευτικό επίστρωμα γυαλιού + αντανακλαστικό επίστρωμα + υλικό ΦΒ στοιχείων), σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή σε πρότυπες συνθήκες, καθώς αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης, ιδιαίτερα μάλιστα, σε γωνίες μεγαλύτερες των 60°. Η αύξηση της ανακλαστικότητας του, εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών, στην επιφάνεια του. Αποδεικνύεται ασήμαντη για μικρές γωνίες πρόσπτωσης και αυξάνεται αρκετά για γωνίες πέραν των 60°. Ο συντελεστής ανακλαστικότητας  $\eta_R$ , παίρνει τιμή πρακτικά ίση με μονάδα για γωνίες πρόσπτωσης έως 60°, ενώ ελαττώνεται αρκετά έως 90° (2-6%).

### **Συντελεστής φασματικής απόκλισης $\eta_S$ :**

Αφορούν στην επίδραση της διαφοροποίησης του φάσματος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας (διαφορετικό AM σε σχέση με το AM 1,5 των πρότυπων συνθηκών). Για ΦΒ στοιχεία ευρείας περιοχής φασματικής απορρόφησης, όπως οι ΦΒ συλλέκτες c-Si, εμφανίζουν γενικά ασήμαντη ετήσια ή ακόμη και μηνιαία μεταβολή, μικρότερη του 1%. Αντίθετα, σε ΦΒ συλλέκτες στενής περιοχής φασματικής απορρόφησης, όπως τα ΦΒ στοιχεία λεπτού υμένα a-Si ή CdTe, οι ετήσιες απώλειες είναι σημαντικότερες.

### **Συντελεστής απόκλισης πόλωσης $\eta_P$ :**

Διαφοροποίηση της πόλωσης της προσπίπτουσας-διερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας. Η μέση ετήσια επίδραση του παράγοντα αυτού προσδιορίζεται σε ~2%.

### **Συντελεστής απωλειών χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας $\eta_{LI}$ :**

Η απόδοση του Φβ στοιχείου μειώνεται στις χαμηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιαίτερα κάτω της τιμής των 200 W/m<sup>2</sup> (Low Irradiance losses). Αποδεικνύονται μικρής σημασίας για εμπορικούς ΦΒ συλλέκτες καλής ποιότητας. Σε άλλες όμως περιπτώσεις οι ενεργειακές αυτές απώλειες αποδεικνύονται σχετικά σημαντικές. Γενικά, υπολογίζονται σε 3% κατά μέσο όρο το έτος.

### Συντελεστής καθαρότητας όψεως $\eta_{καθ}$ :

Η ελαφριά ομοιογενής επικάλυψη σκόνης, γύρης φυτών ή αλάτων μικροσωματιδίων, προκαλεί μείωση της καθαρότητας της επιφάνειας του ΦΒ συλλέκτη. Η επίδραση της επικάλυψης σκόνης σε μικρό βαθμό αυξάνει το ποσοστό των απωλειών ανάκλασης κατά παράγοντα, η τιμή του οποίου βρίσκεται στο διάστημα 1,3-1,5. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στην γυάλινη όψη του. Εκτός των συνηθισμένων αυτών περιπτώσεων, η επικάλυψη στην όψη του ΦΒ συλλέκτη αντικειμένων, π.χ. φύλλων ή κλαδιών ή εκτεταμένων περιττωμάτων πουλιών ή φύλλων νάιλον κ.α., που σκιάζουν ένα ή περισσότερα ΦΒ στοιχεία ενός ΦΒ συλλέκτη, δημιουργούν εντονότατο πρόβλημα λειτουργίας και απόδοσης. Η τιμή του  $\eta_{καθ}$  είναι τόσο μικρότερη από τη μονάδα, όσο εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του ΦΒ συλλέκτη, όσο σπανιότερες είναι οι βροχές στην περιοχή κλπ.

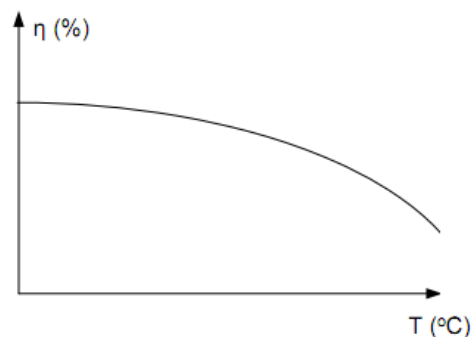
### Συντελεστής απόκλισης θερμοκρασίας $\eta_T$ :

Περιγράφει τη διαφοροποίηση της απόδοσης του ΦΒ συλλέκτη, λόγω της διαφορετικής θερμοκρασίας λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου σε σχέση με την θερμοκρασία της σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου ( $STC$ ). Επομένως, ο παράγων θερμοκρασίας  $\eta_T$  που καθορίζει την επίδραση της θερμοκρασίας στην τιμή της ισχύς αιχμής και στο συντελεστή απόδοσης του ΦΒ συλλέκτη, έχει την προσεγγιστική έκφραση:

$$\eta_T = 1 + \gamma_{mp} * (\theta_c - \theta_{STC}) \quad (2.47)$$

Τυπικός μέσος ετήσιος συντελεστής θερμικών απωλειών, για μέσα γεωγραφικά πλάτη, είναι  $\eta_T = 0,90$ . Η θερμοκρασία των ΦΒ συλλεκτών ενσωματωμένων σε κτίρια είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση ΦΒ συλλεκτών εγκατεστημένων σε ελεύθερο χώρο, τουλάχιστον κατά 10-20°C, εξαρτώμενη από την απόσταση τοποθέτησης των ΦΒ συλλεκτών από τη στέγη ή τους τοίχους του κτιρίου.

Για ΦΒ συλλέκτες κρυσταλλικού Πυριτίου, η προκαλούμενη μεταβολή της απόδοσης του ΦΒ συλλέκτη κατά τη διάρκεια της ημέρας, εξαιτίας των αλλαγών της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και της συνακόλουθης μεταβολής της θερμοκρασίας λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου, κυμαίνεται από 7-10% του  $\eta_{c,STC}$ , για ΦΒ συλλέκτες εγκατεστημένους σε ελεύθερο πεδίο και από 10-20% για ΦΒ συλλέκτες ενσωματωμένους σε κτίρια.



Σχήμα 2.94: μεταβολή απόδοσης των ΦΒ στοιχείων Πυριτίου συναρτήσει της θερμοκρασία τους

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

### 3.1 Η σύνθεση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχουν στην πλειονότητα τους, ως γενεσιουργό αιτία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, την ηλιακή ακτινοβολία. Περίοδοι μερικής ή ολικής συννεφιάς, για τους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες και χρονικά νηνεμίας για τις ανεμογεννήτριες, δημιουργούν την ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας. Η διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μπορεί να αναβαθμιστεί με ταυτόχρονη μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας, με υβριδικά συστήματα, που χαρακτηρίζονται από συνδυασμό με συμβατικές πηγές ενέργειας και σε πολλές περιπτώσεις αποθήκευσης ενέργειας. Η διερεύνηση του βαθμού κάλυψης της ενέργειας ζήτησης μιας εφαρμογής, από ένα σύστημα, με βάση το ηλιακό και το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης της εφαρμογής, οδηγεί στην επιλογή του καταλληλότερου από οικονομοτεχνικής πλευράς, συνδυασμού ανανεώσιμων και συμβατικών πηγών.

#### 3.1.1 Η ταξινόμηση των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), μπορούν να αξιοποιηθούν σε αρκετές ηλεκτρικές εφαρμογές. Καλύπτουν μεγάλη περιοχή ισχύος, από πολύ χαμηλής ισχύος αλλά ευρείας χρήσεως καταναλωτικά προϊόντα, έως συστήματα μεγάλης ισχύος, για την τροφοδοσία κυρίως νησιών ή μεγάλων πρότυπων κτιριακών συγκροτημάτων, συνδεδεμένων ή όχι με το εθνικό (διακρατικό πλέον) ή το τοπικό δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές πηγές. Το βασικό κριτήριο καθορισμού καταλληλότερου συστήματος ΑΠΕ στις κατηγορίες αυτές, προκύπτει με βάση την απαίτηση για πλήρη ή μερική κάλυψη (αυτονομία), των ενεργειακών καταναλώσεων της εφαρμογής, μηνιαίως ή ετησίως. Τα συστήματα ΑΠΕ, διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

#### ***A) Εκτός δικτύου ή απομονωμένα συστήματα ΑΠΕ (off grid ή stand alone systems) :***

Αναφέρονται έτσι τα συστήματα τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να είναι συνδεδεμένα στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Διακρίνονται σε:

##### ***A.1) Αυτόνομα συστήματα (autonomous systems) :***

Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται αποκλειστικά είτε από τη ΦΒ συστοιχία χωρίς την συμμετοχή άλλων ΑΠΕ ή πηγών συμβατικών καυσίμων όπως το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/Z), είτε από την ανεμογεννήτρια (ΑΓ) και μπορεί, να περιλαμβάνονται ή όχι, ηλεκτρικοί συσσωρευτές. Αφορούν εφαρμογές μη συνδεδεμένες με το εθνικό δίκτυο. Η παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι είτε συνεχούς (VDC), είτε εναλλασσόμενης (VAC) τάσεως. Χωρίζονται σε:

- ***Αυτόνομα συστήματα άμεσης τροφοδοσίας (direct-coupled) :***

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, αποδίδεται απευθείας στο φορτίο της εφαρμογής, όσο φωτίζεται η ΦΒ συστοιχία ή περιστρέφεται η ανεμογεννήτρια, χωρίς αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές.

- *Αυτόνομα συστήματα με αποθήκευση :*

Σχεδιάζονται με πρόβλεψη ορισμένων ημερών αυτονομίας του συστήματος, με βάση το κατάλληλο μέγεθος των ηλεκτρικών συσσωρευτών, για την αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και χρήση της, σε μεταγενέστερο χρόνο.

#### **A.2) Υβριδικά συστήματα (hybrid systems) :**

Στα υβριδικά συστήματα, όπου η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται από το συνδυασμό ΦΒ συστοιχίας με άλλες πηγές ενέργειας ΑΠΕ, όπως η ανεμογεννήτρια ή πηγές συμβατικών καυσίμων όπως το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος. Ο προσδιορισμός των συνιστωσών ΑΠΕ, προκύπτει με ολοκληρωμένη οικονομοτεχνική μελέτη του συστήματος, με κριτήριο το βαθμό συμμετοχής του Η/Ζ στην εξασφάλιση της κάλυψης των ενεργειακών απαιτήσεων της εφαρμογής. Στις πιο πολλές περιπτώσεις στο σύστημα προβλέπεται αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές για την αυτονομία αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας.

#### **B) Συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο (grid connected systems) :**

Αναφέρονται στα συστήματα τα οποία συνδέονται απευθείας στο εθνικό ή τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής παροχής (AC). Το δίκτυο αποτελεί για το σύστημα μια τεράστια δεξαμενή ηλεκτρικής ενέργειας, σταθερής ηλεκτρικής τάσης, όπως το εθνικό δίκτυο της Δ.Ε.Η. στην Ελλάδα. Επομένως, στα συστήματα αυτά δεν απαιτείται αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα, αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό του συνόλου των εγκατεστημένων συστημάτων παγκοσμίως (IEA, Photovoltaic barometer). Διακρίνονται σε:

##### **B.1) Κεντρικά συστήματα (centralized systems) :**

Συνιστούν κεντρικούς σταθμούς μεγάλης ισχύος, των οποίων η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο.

##### **B.2) Κατανεμημένα συστήματα (distributed systems) :**

Είναι συνδεδεμένα στο κεντρικό δίκτυο, ως κατανεμημένα συστήματα και διακρίνονται σε:

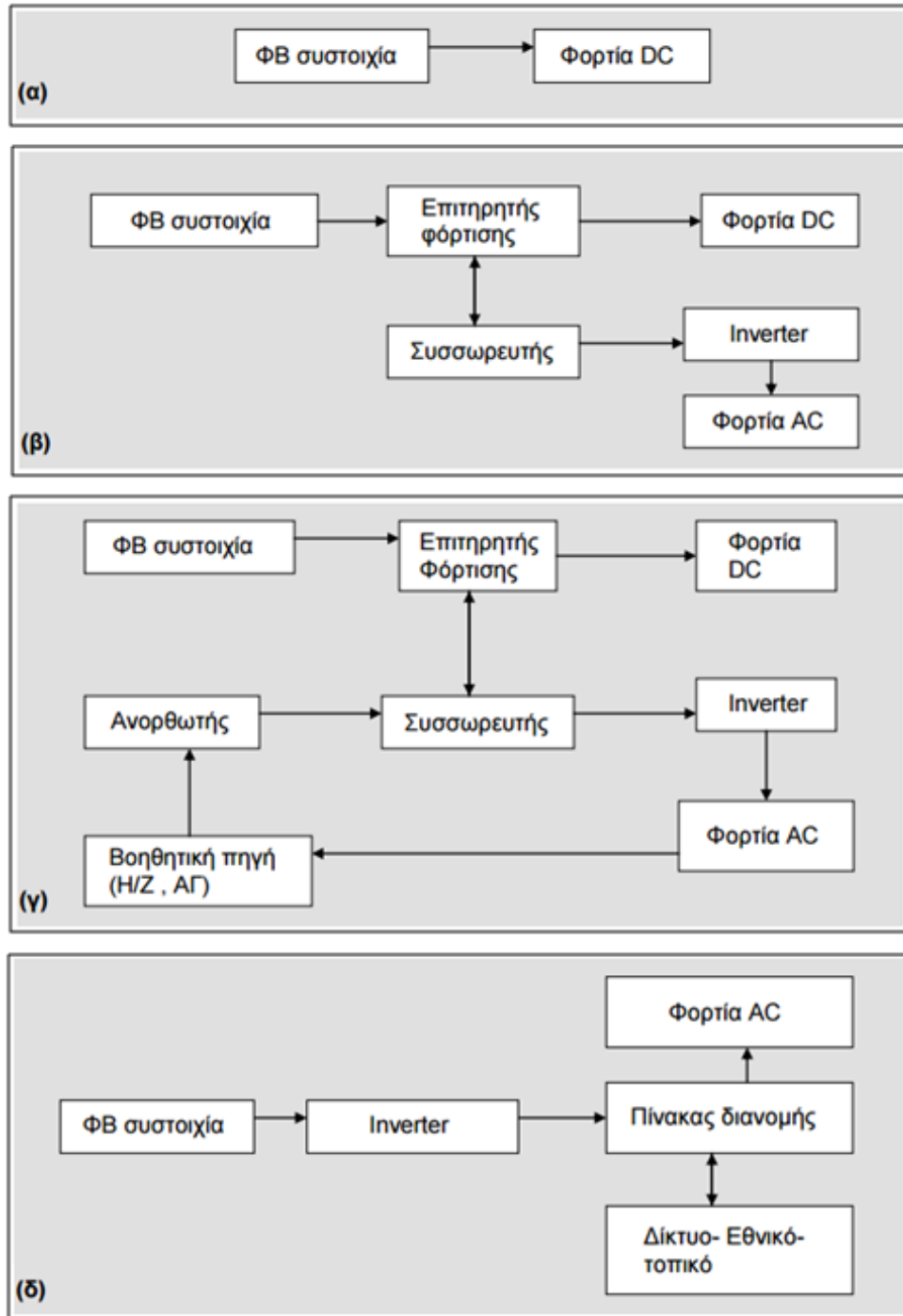
- *Συστήματα εφεδρικής λειτουργίας (grid back-up) :*

Είναι σχεδιασμένα ώστε να καλύπτουν κατά μέσο όρο, τις μηνιαίες ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής. Σε χρονικές περιόδους που το σύστημα αδυνατεί να καλύψει τις καταναλώσεις, η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται από το δίκτυο. Το δίκτυο καλύπτει έκτακτη ενεργειακή ζήτηση ή καταστάσεις αστοχίας του συστήματος ως εφεδρική πηγή ενέργειας.

- *Συστήματα αμφίδρομης λειτουργίας (grid interactive) :*

Καλύπτουν κατά μέσο όρο, τις ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής. Όπως και στο προηγούμενο σύστημα, στις περιόδους αδυναμίας ενεργειακής κάλυψης, η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται από το δίκτυο, αλλά σε περίοδο περίσσειας παραγωγής ενέργειας, η επιπλέον ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο, άρα λειτουργεί αμφίδρομα με το δίκτυο. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, μέσα στο έτος, η συνολική ενέργεια από το δίκτυο στην εφαρμογή,

προβλέπεται να είναι ίση με τη συνολική ενέργεια από το σύστημα στο δίκτυο. Αν επιδίωξη είναι, το ετήσιο οικονομικό ισοζύγιο μεταξύ παραγωγού και Δ.Ε.Η., κατά τη σχεδίαση του συστήματος, λαμβάνονται υπόψη τα διαφορετικά τιμολόγια παραγωγής και κατανάλωσης.



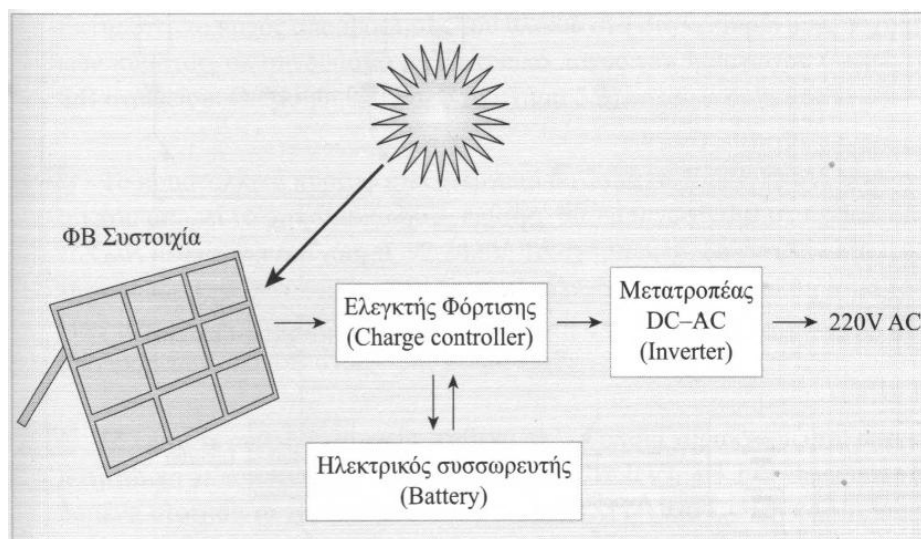
**Σχήμα 3.1:** βασικά είδη ΦΒ συστημάτων (α) Αυτόνομο ΦΒ σύστημα με συστοιχία συνδεδεμένη απευθείας στο φορτίο DC, (β) αυτόνομο ΦΒ σύστημα με αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και τροφοδοσία φορτίων DC και AC, (γ) αυτόνομο ΦΒ υβριδικό σύστημα και (δ) ΦΒ σύστημα συνδεδεμένο στο εθνικό ή τοπικό δίκτυο



### 3.1.2 Η συγκρότηση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος

Η ΦΒ συστοιχία παράγει ηλεκτρική ενέργεια συνεχής τάσης, η οποία μπορεί να τροφοδοτήσει απευθείας μόνο ηλεκτρικές συσκευές που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα. Ειδικές διατάξεις μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο, προκειμένου να τροφοδοτηθούν φορτία, τα οποία ουσιαστικά, λειτουργούν ως να έχουν συνδεθεί στο κεντρικό δίκτυο (220 VAC). Η επιλογή της απευθείας χρήσης συνεχούς τάσης ή μετατροπή της σε εναλλασσόμενη, εξετάζεται κατά περίπτωση. Στην πλειονότητα όμως των περιπτώσεων, επιλέγεται η μετατροπή της συνεχούς σε εναλλασσόμενη τάση και ο λόγος είναι ότι πολύ περισσότερα φορτία καθημερινής χρήσης (οικιακές συσκευές και εργαλεία), τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση.

Παραδείγματος χάριν, όταν η ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια προορίζεται για οικιακή χρήση, είναι προτιμότερο να προσαρμοστεί το σύστημα τροφοδοσίας στις ήδη χρησιμοποιούμενες οικιακές συσκευές μας, που λειτουργούν με εναλλασσόμενη τάση 220 V. Οι τελευταίες, λόγω μεγαλύτερης εμπορικής κατανάλωσης, χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος παραγωγής. Εξάλλου, η ηλεκτρική εγκατάσταση διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος, τάσεως 220 V, είναι σαφώς φθηνότερη της αντίστοιχης με συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, χαμηλής ηλεκτρικής τάσεως, επειδή, σε αυτή την περίπτωση απαιτούνται μεγαλύτερης διατομής καλώδια για μείωση των απωλειών στη γραμμή μεταφοράς. Ένα τυπικό αυτόνομο ΦΒ σύστημα, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.2: βασική μορφή αυτόνομου ΦΒ συστήματος

Τα κύρια τμήματα, από τα οποία αποτελείται ένα αυτόνομο ΦΒ σύστημα, είναι τα εξής:

#### A) Φωτοβολταϊκή συστοιχία (photovoltaic array) :

Σε ένα ΦΒ σύστημα, οι ΦΒ συλλέκτες διασυνδεδεμένοι ως μια ΦΒ συστοιχία, συνδυάζονται κατάλληλα, ούτως ώστε η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται σε αυτούς, να μεταφέρεται με όσο το δυνατόν υψηλότερη συνεχή τάση, πάντα μέσα στα επιτρεπτά όρια, ώστε το συνεχές ρεύμα στη γραμμή μεταφοράς, να είναι χαμηλό και αντίστοιχα χαμηλές και οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας. Η μέγιστη επιτρεπτή τάση σε ΦΒ συστήματα είναι 600 V.

**B) Ηλεκτρικός συσσωρευτής (battery electricity) :**

Το αυτόνομο ΦΒ σύστημα δεν έχει δυνατότητα εφεδρικής ενεργείας από το δίκτυο διανομής (π.χ. 230Vrms/50Hz), καθώς δεν είναι συνδεδεμένα. Επομένως, παρουσιάζεται ανάγκη μιας διάταξης αποθήκευσης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας, από τη παραγόμενη ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια, για να χρησιμοποιηθεί, όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή της ΦΒ συστοιχίας (π.χ. συννεφιασμένες ημέρες). Η καλύτερη λύση, μέχρι στιγμής, από πλευράς κόστους πυκνότητας αποταμιευμένης ενέργειας ανά μονάδα βάρους και όγκου της διάταξης, είναι ο ηλεκτρικός συσσωρευτής όπως ο συσσωρευτής Θείου-Μολύβδου (Pb/H<sup>2</sup>SO<sup>4</sup>) ή ο Νικελίου-Καδμίου (NiCd).

**Γ) Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (electric generator) :**

Σε χρονικές περιόδους, όπου η παραγόμενη ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια αδυνατεί να καλύψει την ενεργειακή ζήτηση των καταναλώσεων αλλά και του ηλεκτρικού συσσωρευτή, προστίθεται εφεδρική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/Z) είναι ειδικό ζεύγος μιας κινητήριας μηχανής και μιας ηλεκτρογεννήτριας, που παράγει ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μπορεί να περιορίσει ή και να καλύψει τη παραπάνω ζήτηση. Ο κινητήρας που χρησιμοποιεί είναι μηχανή εσωτερικής καύσης, συμβατικού καυσίμου (πετρελαίου, βενζίνης, φυσικού αερίου) και τα αέρια προϊόντα της καύσης, χρησιμοποιούνται άμεσα για την παραγωγή μηχανικής ισχύος.

**Δ) Ηλεκτρονικές διατάξεις διαχείρισης ενέργειας:**

Η διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τη ΦΒ συστοιχία, απαιτεί την παρεμβολή κατάλληλων ηλεκτρονικών συσκευών, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της μεταφοράς της ενέργειας κατά τον οικονομικότερο τρόπο καθώς και την προστασία του συσσωρευτή από υπερφόρτιση ή από υπερεκφόρτιση. Οι ηλεκτρονικές διατάξεις είναι:

- Ελεγκτής φόρτισης ηλεκτρικού συσσωρευτή (charge controller) :

Η φόρτιση του συσσωρευτή, μέσω μιας πηγής ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ ΦΒ συστοιχία, ανεμογεννήτρια, H/Z), απαιτεί συνεχή έλεγχο της κατάστασης φόρτισης τους, ώστε όταν αυτοί φτάσουν στην κατάσταση μέγιστης φόρτισης, να διακόπτεται η διαδικασία. Έτσι, με το ελεγκτή φόρτισης αποφεύγεται η υπέρταση του συσσωρευτή, η οποία θα είχε ως συνέπεια την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου λόγω ηλεκτρόλυσης και συνακόλουθα, μείωση της στάθμης του διαλύματος. Αντίστοιχα, απαιτείται έλεγχος όταν ο συσσωρευτής τροφοδοτεί την κατανάλωση, ώστε να προληφθεί η καταστροφική κατάσταση υπερεκφόρτισης.

- Ελεγκτής σημείου μέγιστης ισχύος (maximum power point tracking) :

Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που αποδίδει η ΦΒ συστοιχία, κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ημέρας, εμφανίζει σχεδόν, αναλογική συμπεριφορά προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας. Προκειμένου η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς να ισούται συνεχώς ή να προσεγγίζει τη μέγιστη ισχύ, στις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας, απαιτείται συνεχής παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος από τον ελεγκτή ΣΜΙ (MPPT). Στην περίπτωση που η ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια δεν αποταμιεύεται σε συσσωρευτές, η μη χρησιμοποίηση ελεγκτή, έχει ως αποτέλεσμα την αισθητή μείωση απόδοση της ΦΒ συστοιχίας.

- Μετατροπέας συνεχούς τάσης σε συνεχή (direct to direct current converter) :

Προκειμένου να προσαρμοστεί η παραγόμενη συνεχή τάση των ΦΒ συλλεκτών, στη τάση φόρτισης του ηλεκτρικού συσσωρευτή, χρησιμοποιείται ο μετατροπέας Σ.Ρ.-Σ.Ρ. (DC-DC converter) ή αλλιώς ψαλιδιστής (chopper), ο οποίος μετατρέπει τη συνεχή τάση σε συνεχή, μεγαλύτερης ή μικρότερης τιμής, ανάλογα με τις απαιτήσεις, βοηθώντας στη μείωση των απωλειών στη γραμμή μεταφοράς από το χώρο μετατροπής στο χώρο αποθήκευσης ή κατανάλωσης, ώστε να υπάρχει πλήρης εκμετάλλευση της παραγόμενης ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας.

- Μετατροπέας συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη (direct to alternating current converter) :

Μία ΦΒ συστοιχία ανεξάρτητα από το μέγεθος της, μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια μόνο συνεχούς τάσης. Υπάρχουν εφαρμογές όπου η συνεχής τάση είναι κατάλληλη, όπως για τη φόρτιση συσσωρευτή ή για τη τροφοδότηση φορτίων συνεχής τάσης. Αντίθετα, σε περιπτώσεις που το ΦΒ σύστημα τροφοδοτεί φορτία εναλλασσόμενης τάσης ή λειτουργεί αμφίδρομα με το ηλεκτρικό δίκτυο διανομής (π.χ. 230Vrms/50Hz), δηλαδή παρέχει ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο, χρησιμοποιείται ο μετατροπέας Σ.Ρ.-Ε.Ρ. (DC-AC converter) ή αλλιώς αντιστροφέας (inverter), για την μετατροπή της συνεχής τάσης σε εναλλασσόμενη, μονοφασική ή τριφασική.

- Μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη (alternating to alternating curr. converter) :

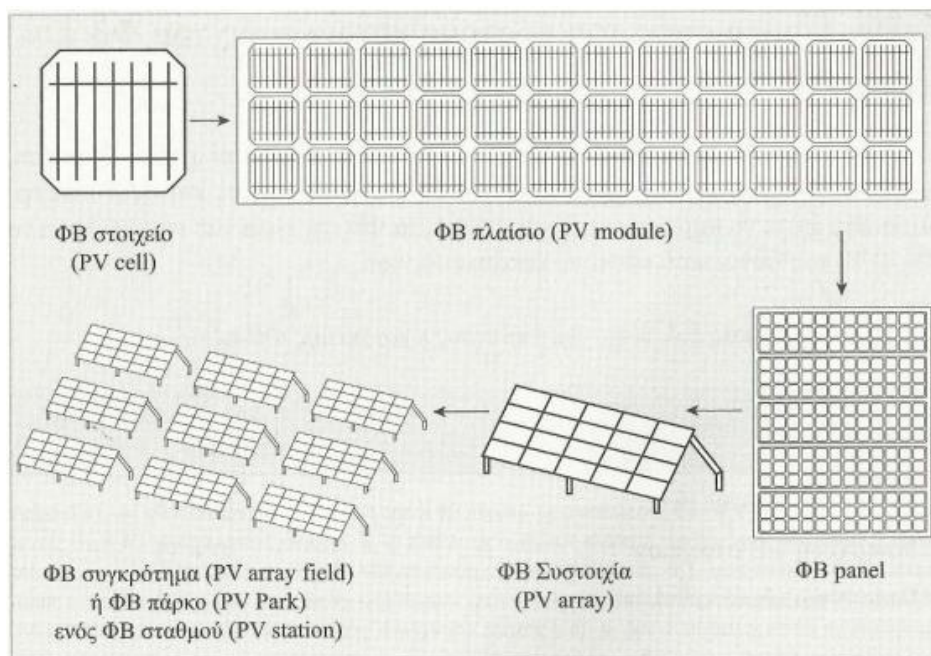
Ο μετατροπέας Ε.Ρ.-Ε.Ρ. (AC-AC converter) ή αλλιώς ανορθωτής (rectifier), στα ΦΒ συστήματα χρησιμοποιείται για την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης, δηλαδή για τη μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή, η οποία μπορεί να προέρχεται από μια ανεμογεννήτρια ή ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, ώστε να εξασφαλίζεται και με την βοήθεια του ελεγκτή φόρτισης, η φόρτιση των ηλεκτρικών συσσωρευτών.

## 3.2 Η ανάλυση διατάξεων φωτοβολταϊκού συστήματος

Στις περισσότερες περιπτώσεις ηλεκτροδότησης με τη χρήση φωτοβολταϊκού συστήματος, η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται, παρέχεται από σύνθεση περισσότερων του ενός φωτοβολταϊκών συλλέκτες, μπορεί εκατοντάδες ή ακόμη και χιλιάδες, ανάλογα με τους επιδιωκόμενους σκοπούς. Η διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, απαιτεί στην σύνθεση του φωτοβολταϊκού συστήματος, την παρεμβολή των ηλεκτρικών συσσωρευτών και των ηλεκτρονικών διατάξεων (συσκευών) διαχείρισης, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της μετατροπής, αποθήκευσης, μεταφοράς και απόδοσης της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ για τον περιορισμό της αστοχίας κάλυψης ενεργειακών απαιτήσεων των καταναλώσεων, στη σύνθεση του φωτοβολταϊκού συστήματος, προστίθεται το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος.

### 3.2.1 Η φωτοβολταϊκή συστοιχία

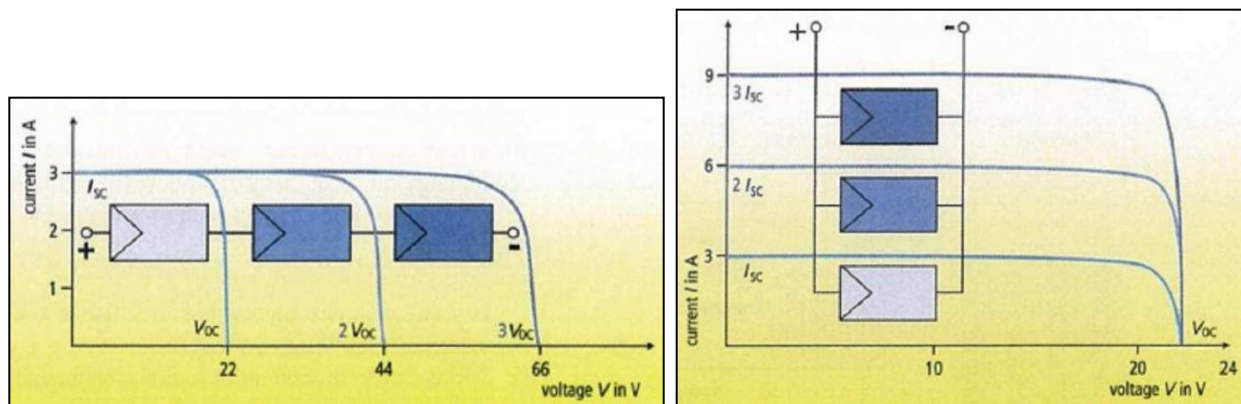
Μερικοί ΦΒ συλλέκτες συναρμολογημένοι σε ένα μεταλλικό πλαίσιο, συνήθως από Αλουμίνιο, με καλωδιώσεις που απολήγουν σε ηλεκτρολογικό κιβώτιο, ως ενιαία κατασκευή, έτοιμη για εγκατάσταση, με δυνατότητα λόγω μικρού βάρους, εύκολης αφαίρεσης, μεταφοράς ή επέμβασης στους επιμέρους ΦΒ συλλέκτες, ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες όμοιες μονάδες, ονομάζεται **ΦΒ σύνθετο** (PV array). Ο συνδυασμός πολλών ξεχωριστών ΦΒ σύνθετων, κατάλληλα συνδεδεμένων μεταξύ τους, σε μια επίπεδη συνήθως μεταλλική επιφάνεια, σταθερή ή περιστρεφόμενη, με αντίστοιχο ηλεκτρολογικό κιβώτιο, αποτελεί την **ΦΒ συστοιχία** (PV array). Ένα συνεργαζόμενο σύνολο ΦΒ συστοιχιών, αποτελούν ένα **ΦΒ συγκρότημα** (PV array field) ή **ΦΒ πάρκο** (PV Park), το οποίο, μαζί με όλες τις ηλεκτρονικές διατάξεις που χρειάζονται για τη μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη, τον έλεγχο της φόρτισης συσσωρευτών (αν υπάρχουν), για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 1 kW έως μερικά MW, επαρκούς για την τροφοδοσία οικισμών, χωριών κ.λ.π., αποτελούν το **ΦΒ σταθμό παραγωγής** (PV station).



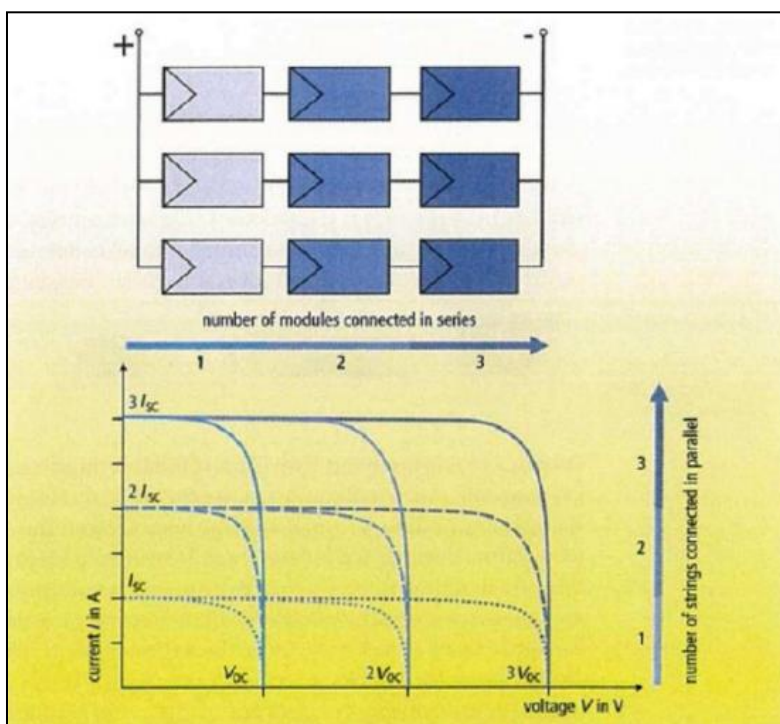
Σχήμα 3.3: τυπικοί σχηματισμοί σύνθεσης από το ΦΒ στοιχείο ως το ΦΒ συγκρότημα.

### 3.2.1.1 Η ενεργειακή απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Όπως είναι αναμενόμενο, για την αύξηση της αξιοπιστίας της ΦΒ συστοιχίας, είναι σκόπιμο όπως οι συνδέσεις μεταξύ των ΦΒ στοιχείων στους ΦΒ συλλέκτες, έτσι και ανάμεσα στους ΦΒ συλλέκτες, να μην είναι μόνο στη σειρά (αλυσίδα) αλλά και παράλληλες (κλάδος), δημιουργώντας μικτή σύνδεση μεταξύ τους. Κάθε κλάδος αποτελείται από ΦΒ συλλέκτες συνδεδεμένους σε σειρά. Οι ισοδύναμοι κλάδοι συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους. Η σύνδεση σε σειρά αυξάνει την ολική τάση, ενώ αντίθετα, η παράλληλη σύνδεση το ολικό ρεύμα. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για την σύνδεση μεταξύ των ΦΒ συστοιχιών, για την σύνθεση του ΦΒ συγκροτήματος (πάρκο).



Σχήμα 3.4: μεταβολή χαρακτηριστικής V-I ΦΒ συλλεκτών συνδεδεμένων (α) σε σειρά και (β) παράλληλα

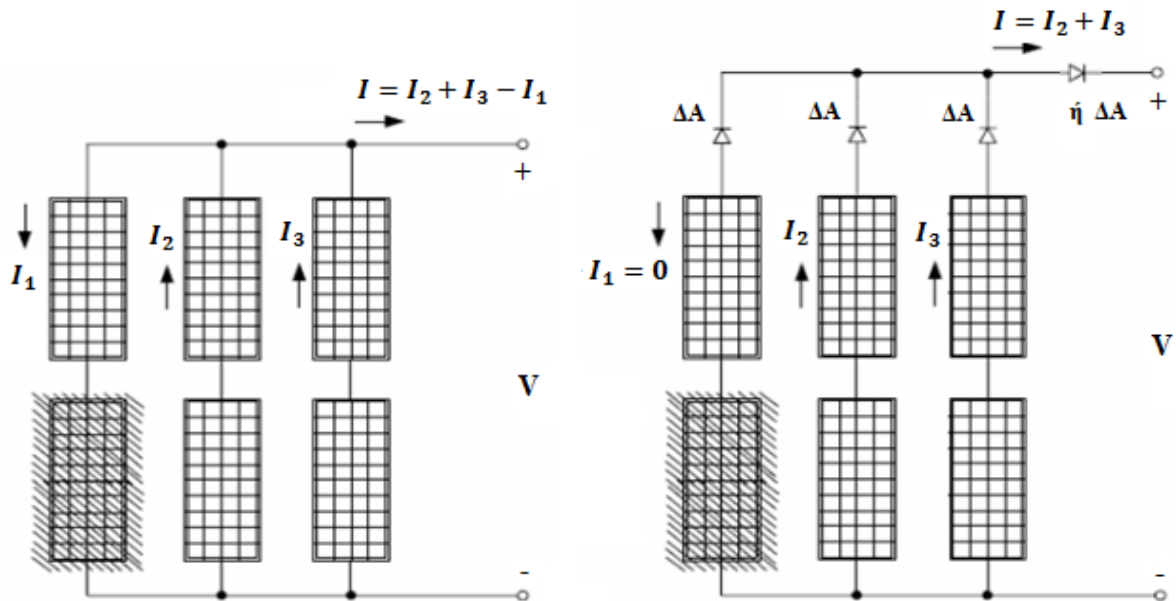


Σχήμα 3.5: μεταβολή χαρακτηριστικής V-I ΦΒ συλλεκτών μικτής σύνδεσης

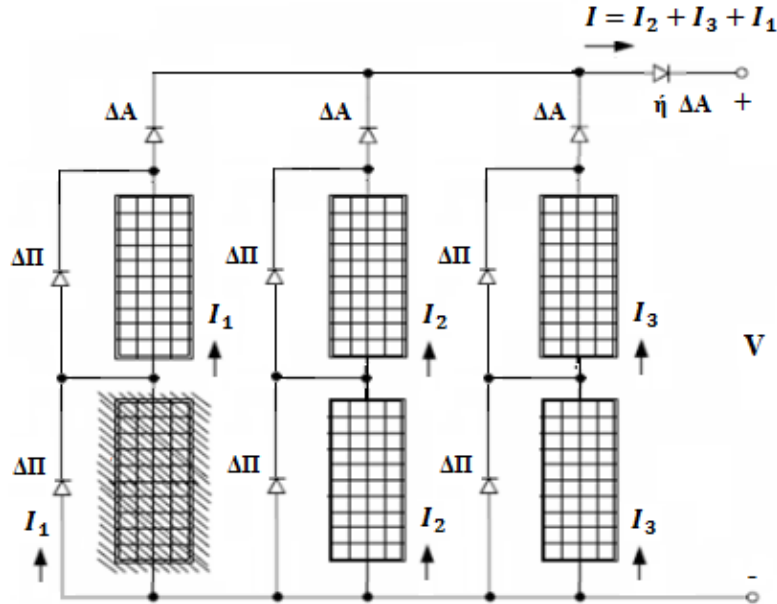
Οι ΦΒ συλλέκτες μιας ΦΒ συστοιχίας σχηματίζουν παράλληλους κλάδους, που καταλήγουν μέσω του ελεγκτή φόρτισης, στον ηλεκτρικό συσσωρευτή. Ο κάθε κλάδος εφοδιάζεται με μία δίοδο αντεπιστροφής ΔΑ, προκειμένου να αποκλειστεί, αφενός, το ρεύμα αντιστροφής κατά την εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή διαμέσου των ΦΒ συλλεκτών του κλάδου, κατά τη διάρκεια της νύκτας, αφετέρου η κυκλοφορία ρευμάτων που επιβάλλουν ένας ή περισσότεροι κλάδοι στους υπόλοιπους. Π.χ. αν για κάποιο λόγο, κάποιοι ΦΒ συλλέκτες έχουν σκιαστεί (φαινόμενο θερμής κηλίδας) ή υποστεί βλάβη (π.χ. διακοπή ηλεκτρικού αγωγού), δεν θα μηδενιστεί η ηλεκτρική ισχύς που παράγει η ΦΒ συστοιχία, καθώς εμποδίζεται από τη δίοδο αντεπιστροφής του προβληματικού κλάδου, θέτοντας τον εκτός κυκλώματος της ΦΒ συστοιχίας, η απορρόφηση ανάστροφου ρεύματος που αποδίδουν οι υπόλοιποι κλάδοι.

Επίσης, για την αποφυγή βλάβης και πιθανής παροδικής ή μερικής σκίασης των ΦΒ συλλεκτών, καθ ένας από αυτούς, παραλληλίζεται με μία δίοδο παράκαμψης ΔΠ, οι οποίες με τη σειρά τους, κατά την βλάβη ή σκίαση, οδηγούν το ρεύμα του κλάδου γύρω από τον προβληματικό ΦΒ συλλέκτη, παρακάμπτοντας τον και βγάζοντας τον εκτός κυκλώματος του κλάδου και γενικά της ΦΒ συστοιχίας. Σε αυτή την περίπτωση, δεν θα μηδενιστεί η ισχύς που παράγει ο κλάδος, καθώς εμποδίζεται από τη δίοδο παράκαμψης του προβληματικού ΦΒ συλλέκτη, η απορρόφηση ανάστροφου ρεύματος που αποδίδουν οι υπόλοιποι ΦΒ συλλέκτες του κλάδου. Η συμπεριφορά της δίοδο παράκαμψης, αντιστοιχεί στην λειτουργία που έχει περιγραφεί παραπάνω στο φαινόμενο θερμής κηλίδας, για την αντίστοιχη δίοδο παράκαμψης των ΦΒ στοιχείων, που συνθέτουν ένα ΦΒ συλλέκτη.

Η δίοδος αντεπιστροφής κάθε κλάδου, τοποθετείται στο κιβώτιο συνδέσεων του ΦΒ συλλέκτη, του οποίου ο θετικός πόλος της γραμμής μεταφοράς, καταλήγει στον ελεγκτή φόρτισης. Ένας άλλος τρόπος, είναι η τοποθέτηση μιας δίοδο αντεπιστροφής για όλους του κλάδους, αν οι γραμμές μεταφοράς καταλήγουν σε κοινό κιβώτιο συνδέσεων, πριν τον ελεγκτή φόρτισης. Η δίοδο παράκαμψης, τοποθετείται στο αντίστοιχο κιβώτιο συνδέσεων του κάθε ΦΒ συλλέκτη.



Σχήμα 3.6.α: ένταση ρεύματος ΦΒ συστοιχίας υπό σκίαση ΦΒ συλλέκτη (α) χωρίς χρήση ΔΑ και (β) με χρήση ΔΑ



Σχήμα 3.6.β: ένταση ρεύματος ΦΒ συστοιχίας υπό σκίαση ΦΒ συλλέκτη με χρήση ΔΑ και ΔΠ

Η αναλυτική έκφραση του βαθμού απόδοσης της ΦΒ συστοιχίας  $n_{array}$ , μπορεί να αποδοθεί ως γινόμενο των επιμέρους συντελεστών ενεργειακών απωλειών, καθορίζοντας τις απώλειες ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι την έξοδο της ΦΒ συστοιχίας. Μέρος των απωλειών έχουν εκφραστεί παραπάνω στον βαθμό απόδοσης του ΦΒ συλλέκτη  $n_m$ , προσδιορίζοντας την απόκλιση της απόδοσης που υφίσταται από τη τιμή  $n_{m,STC}$  και δίνονται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC. Έτσι, ο βαθμός απόδοσης της ΦΒ συστοιχίας  $n_a$ , εκφράζεται με την σχέση:

$$n_a = n_m * \eta_{W,\sigma} * \eta_M \quad (3.1)$$

όπου,  $\eta_M$  : ο συντελεστής απόκλισης λόγω διαφοροποίησης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών μεταξύ των ΦΒ συλλεκτών (mismatch)

$\eta_{W,\sigma}$  : ο συντελεστής απωλειών στα καλώδια σύνδεσης μεταξύ των ΦΒ συλλεκτών (wiring)

$n_m$  : ο βαθμός απόδοσης του ΦΒ συλλέκτη

Παρακάτω, αναφέρονται αναλυτικότερα η επίδραση του καθενός από τους παράγοντες αυτούς, στη μείωση της ενεργειακής απόδοσης της ΦΒ συστοιχίας.

#### Συντελεστής ανομοιογένειας ΦΒ συλλεκτών $\eta_M$ :

Οι απώλειες αυτές αφορούν στην ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών I-V των ΦΒ συλλεκτών που αποτελούν τη ΦΒ συστοιχία. Όλες αυτές οι διαφορές μπορεί να είναι εκ κατασκευής (εγγενείς) ή μπορεί να δημιουργούνται εξαιτίας διαφορετικών συνθηκών στις διαφορετικές θέσεις των ΦΒ συλλεκτών ή επίδρασης εξωτερικών παραγόντων που προκαλούν επίκτητη ανομοιογένεια, με τυπική τιμή του συντελεστή ανομοιογένειας ΦΒ συστοιχίας  $\eta_M = 0,98$ .

Οι απώλειες λόγω εγγενούς ανομοιογένειας, είναι γενικά ασήμαντες. Η επίδραση της εγγενούς ανομοιογένειας του ΦΒ συλλέκτη είναι ενσωματωμένη στην ισχύ αιχμής, ένα στοιχείο το οποίο καθορίζεται από τον κατασκευαστή. Η ανομοιογένεια λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας ΦΒ συλλεκτών, προκαλείται κυρίως εξαιτίας της διαφορετικής ψύξης ΦΒ συλλεκτών ή της διαφορετικής πυκνότητας ισχύος ΦΒ συστοιχιών, ενός ΦΒ συγκροτήματος.

Σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση της ΦΒ συστοιχίας προξενεί η επίκτητη ανομοιογένεια, προκαλούμενη από εντοπισμένη κάλυψη ή σκίαση της επιφάνειας ενός ή περισσότερων ΦΒ συλλεκτών, εξαιτίας φύλλων, κλαδιών, ψηλής βλάστησης, περιττωμάτων πουλιών, φύλλα νάλιου κ.ά. Σε αυτή τη περίπτωση, η μείωση απόδοσης είναι ιδιαίτερα αισθητή. Η σκίαση μάλιστα εκείνη, που μηδενίζει την απόδοση του ΦΒ συλλέκτη, μηδενίζει, πρακτικά και την απόδοση του κλάδου της ΦΒ συστοιχίας. Για την ελαχιστοποίηση όλων αυτών των πιθανών επιπτώσεων, σε περιπτώσεις που υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να συμβούν τα προηγούμενα, σε κάθε ΦΒ συλλέκτη του κλάδου, συνδέεται παράλληλα μια δίοδος παράκαμψης. Έτσι, ακόμα και στην περίπτωση ολοκληρωτικής σκίασης ενός ΦΒ συλλέκτη, ο κλάδος αποδίδει ηλεκτρική ισχύ μειωμένη κατά την ισχύ του ενός.

### **Συντελεστής απωλειών καλωδιώσεων $\eta_{w,\sigma}$ και δίοδων αντεπιστροφής $\eta_D$ :**

Οι διατομές των καλωδίων σύνδεσης μεταξύ των ΦΒ συλλεκτών της ΦΒ συστοιχίας επιλέγονται ώστε, οι απώλειες σε αυτά, να μην ξεπερνούν το 2-3%. Επομένως, είναι επιτρεπτό να θεωρείται ως τυπική τιμή του συντελεστή απωλειών στις καλωδιώσεις της ΦΒ συστοιχίας  $\eta_{w,\sigma} = 0,98$ . Οι απώλειες στη δίοδο αντεπιστροφής περιγράφονται από το συντελεστή του ΦΒ συλλέκτη. Ως τυπική τιμή για ΦΒ συστοιχία λαμβάνεται η τιμή  $\eta_D = 0,99$ , η τιμή του οποίου μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής: η πτώση τάσεως πάνω σε δίοδο Schottky, είναι  $\sim 0,3$  V. Αν το ρεύμα από έναν ΦΒ συλλέκτη είναι 3 A, όταν η ισχύς αιχμής του ΦΒ συλλέκτη είναι π.χ. 50 W, τότε η απώλεια ισχύος στη δίοδο είναι  $\sim 1$  W και ποσοστιαία,  $\sim 2\%$ . Όσο περισσότερα ΦΒ συλλέκτες σε σειρά χρησιμοποιούνται σε ένα κλάδο της ΦΒ συστοιχίας, καλυπτόμενα από μία δίοδο αντεπιστροφής, τόσο το ποσοστό αυτό μειώνεται.

### **3.2.1.2 Η θέση εφαρμογής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας**

Για να είναι εφικτή η μεγιστοποίηση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το αυτόνομο ΦΒ σύστημα, θα πρέπει να επιτυγχάνεται βέλτιστη εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας στη ΦΒ συστοιχία. Συγκεκριμένα, η ποσότητα αυτή ηλιακής ακτινοβολίας, με τη σειρά της, εξαρτάται ισχυρά από την θέση εφαρμογής της ΦΒ συστοιχίας. Με την θέση θεωρείται όχι μόνο το συγκεκριμένο σημείο της εφαρμογής επάνω στην γήινη επιφάνεια, αλλά και τον προσανατολισμό της ΦΒ συστοιχίας σε σχέση με τον ήλιο, όπως επίσης και τη σχετική τοποθέτηση μεταξύ των διαδοχικών εγκατεστημένων ΦΒ συστοιχιών, κατά τη σύσταση ενός ΦΒ συγκροτήματος.

### **I. Η στήριξη προσανατολισμού της φωτοβολταϊκής συστοιχίας**

Για το βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση ΦΒ συστοιχίας για τη μέγιστη παραγωγή καθόλα τη διάρκεια του έτους, είναι ίση με τη γεωγραφική παράλληλο (γεωγραφικό πλάτος) της περιοχής και η αζιμούθια γωνία είναι περίπου  $0^\circ$  (κατεύθυνση προς νότο). Για την Ελλάδα, η μεγιστοποίηση της συνολικής ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επιφάνεια σταθερής κλίσης, επιτυγχάνεται για νότιο προσανατολισμό και κλίση περί των  $30^\circ$ . Στα παρακάτω σχήμα (3.7), παρατίθενται ενδεικτικά η επίδραση της κλίσης και του προσανατολισμού στην ενεργειακή απόδοση ενός ΦΒ συστήματος.



Προσανατολισμός	Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο		
	30°	0°	90°
Ανατολικός - Δυτικός	85%kWh <sub>(max)</sub>	90%kWh <sub>(max)</sub>	50%kWh <sub>(max)</sub>
Νότιοανατολικός - Δυτικός	95%kWh <sub>(max)</sub>	90%kWh <sub>(max)</sub>	60%kWh <sub>(max)</sub>
Νότιος	kWh <sub>(max)</sub>	90%kWh <sub>(max)</sub>	60%kWh <sub>(max)</sub>
Βόρειοανατολικός - Δυτικός	95%kWh <sub>(max)</sub>	90%kWh <sub>(max)</sub>	30%kWh <sub>(max)</sub>
Βόρειος	60%kWh <sub>(max)</sub>	90%kWh <sub>(max)</sub>	20%kWh <sub>(max)</sub>

Σχήμα 3.7: εκμετάλλευση ποσοστού ηλιακής ενέργειας υπό γωνία κλίσης και προσανατολισμό στο βόρειο ημισφαίριο

Διακρίνονται οι τρόποι σταθερής στήριξης, εποχιακά ρυθμιζόμενης και συνεχούς παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου, με διάταξη ενός ή δύο αξόνων, που ονομάζεται ηλιακός ιχνηλάτης ή αστροστάτης (tracker). Στην Ελλάδα, διατάξεις περιστρεφόμενων βάσεων ενός άξονα, αυξάνουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε ποσοστό περίπου 23-25%, ως προς την προσπίπτουσα σε σύστημα σταθερής ετήσιας κλίσης, ενώ στην περίπτωση περιστρεφόμενων βάσεων δύο αξόνων η αύξηση ανέρχεται περίπου στο 28-30%. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι τρόποι στήριξης προσανατολισμού της ΦΒ συστοιχίας.

#### A) Σταθερή στήριξη ΦΒ συστοιχίας :

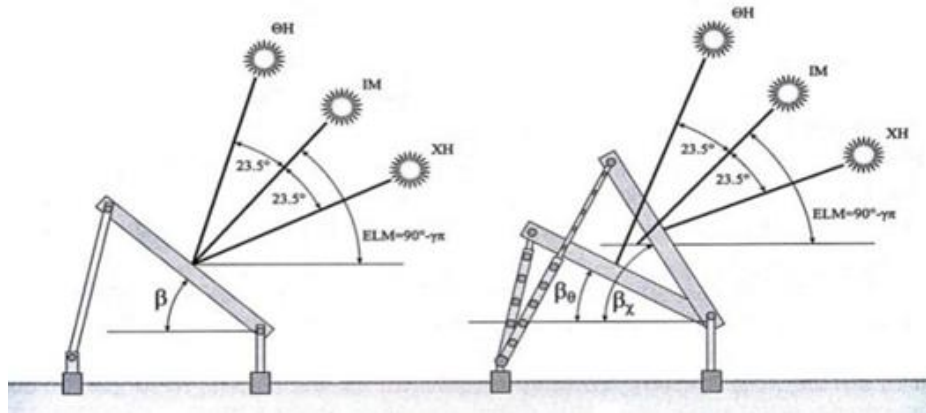
Η απουσία κινητών μερών κατά τη στήριξη της συστοιχίας με σταθερή κλίση, προσδίδει στη διάταξη επαρκή μηχανική αντοχή, ιδιαίτερα μάλιστα αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές όπου επικρατούν ισχυροί άνεμοι. Στατικές ΦΒ συλλεκτικές επιφάνειες χρησιμοποιούνται επίσης ενσωματωμένες σε κτίρια. Η πιο απλή περίπτωση είναι εκείνη κατά την οποία, ο χώρος εγκατάστασης της ΦΒ συστοιχίας, δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία καθόλα τη διάρκεια του έτους (σχήμα 3.9.α). Κατά κανόνα επιλέγουμε νότιο αζιμουθιακό προσανατολισμό ( $\gamma = 0$ ) για τη ΦΒ συστοιχία και γωνία κλίσης  $\beta$ , σύμφωνη με τη βέλτιστη γωνία κλίσης  $\beta_{βελτ}$  ( $\beta = \beta_{βελτ}$ ), κοντά στο γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$  του τόπου εγκατάστασης. Όταν η βέλτιστη γωνία κλίσης ισούται ακριβώς με το γ.π.  $\varphi$  του τόπου, οι ακτίνες του ήλιου πέφτουν κάθετα στο συλλέκτη δύο φορές το χρόνο (το μεσημέρι των ισημεριών).

#### B) Εποχιακά ρυθμιζόμενη στήριξη ΦΒ συστοιχίας :

Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται ΦΒ συστοιχία με νότιο προσανατολισμό, ο οποίος εκ κατασκευής έχει τη δυνατότητα εποχιακής ρύθμισης της γωνίας κλίσης της. Οι κατάλληλες ημερομηνίες για την αλλαγή της γωνίας κλίσης του συλλέκτη, από τη χειμερινή στη θερινή θέση και το αντίστροφο, είναι 21 Μαρτίου και 22 Σεπτεμβρίου, δηλαδή κατά την εαρινή και θερινή ισημερία αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, η γωνία μεσουράνησης του ήλιου αυξάνει σταδιακά, από  $90^\circ - \varphi$  στις 21 Μαρτίου έως το μέγιστη γωνία  $EL_{n,\theta\eta} = (90^\circ - \varphi) + 23,5^\circ$  στις 21 Ιουνίου του θερινού ηλιοστάσιου (ΘΗ). Συνεπώς, για να δέχεται η ΦΒ συστοιχία τη περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία στη διάρκεια της θερινής περιόδου (θπ), πρέπει να τοποθετηθεί με γωνία κλίσης σαφώς μικρότερη του γ.π.  $\varphi$ , ώστε οι ακτίνες να

πέφτουν κάθετες στην επιφάνεια της ΦΒ συστοιχίας. Η ελάττωση στη γωνία απόκλισης  $\delta$  του ήλιου, προκύπτει κοντά στη μέση τιμή του διαστήματος  $0=23,5^\circ$ . Εντελώς φαινομενολογικά, προκύπτει γωνία κλίσης θερινής περιόδου  $\beta_{\theta\pi}$  με ελάττωση  $15^\circ$ , κατά προσέγγιση. Αντίστοιχα, με όμοιους συλλογισμούς, χειμερινής ισημερίας και χειμερινού ηλιοστασίου (XH), προκύπτει για τη χειμερινή περίοδο ( $\chi\pi$ ), γωνία κλίσης χειμερινής περιόδου  $\beta_{\chi\pi}$  με αύξηση  $15^\circ$ .

$$\beta_{\theta\pi} = \varphi - 15^\circ \quad \text{και} \quad \beta_{\chi\pi} = \varphi + 15^\circ \quad (3.2)$$



Σχήμα 3.8: βέλτιστη ενεργειακή απολαβή ΦΒ συστοιχίας (α) σταθερής στήριξης και (β) εποχικής ρύθμισης κλίσης

### Γ) Στήριξη περιστροφικής δυνατότητας ΦΒ συστοιχίας :

#### Γ.1) Περιστροφή γύρω από ένα άξονα :

Η ΦΒ συστοιχία περιστρέφεται με μηχανισμό, γύρω από ένα (1) άξονα. Με την ανατολή ξεκινά τον πλήρη ή μερικό προσανατολισμό της προς τον ήλιο, έτσι ώστε, κατά τη διάρκεια της ημέρας, να αποκομίζει τη μέγιστη δυνατή ενέργεια ηλιακής ακτινοβολίας, στο τέλος δε της ημέρας, η ΦΒ συστοιχία επιστρέφει σε θέση αναμονής, συνήθως με νότιο προσανατολισμό. Διακρίνονται τρεις περιπτώσεις:

- Αζιμουθιακό ηλιοτρόπιο :

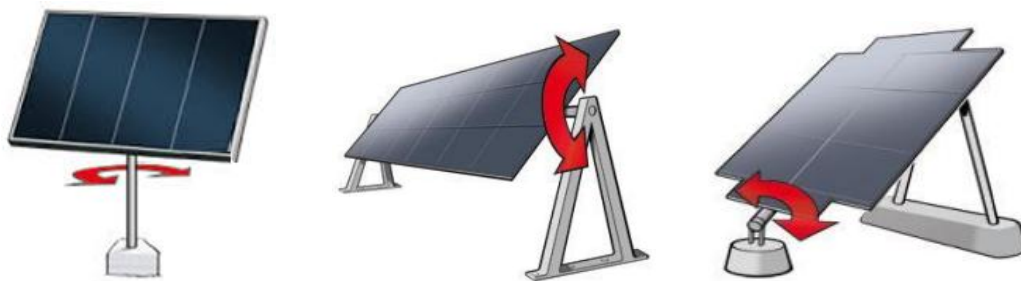
Η περιστροφή γίνεται ως προς κατακόρυφο άξονα (σχήμα 3.9.α), έτσι ώστε ο ήλιος να βρίσκεται στο κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει την κάθετη στη ΦΒ συστοιχία, του οποίου η γωνία κλίσης παραμένει σταθερή κατά την ημερήσια κίνησή του.

- Ηλιοτρόπιο οριζόντιου άξονα :

Διακρίνονται σε αυτά με οριζόντιο άξονα κατά τη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης (E-W) και σε εκείνα με άξονα κατά τη διεύθυνση Βορρά-Νότου (N-S). Στην δεύτερη περίπτωση δίνεται μια μικρή γωνία κλίσης στο άξονα  $\sim 5^\circ-10^\circ$ , με το χαμηλότερο σημείο προς το νότο (σχήμα 3.9.β).

- Ηλιοτρόπιο πολικού άξονα :

Έχει τη δυνατότητα περιστροφής γύρω από τον άξονα  $xx'$  (σχήμα 3.9.γ), με γωνία κλίσης ίση με το  $\gamma$ . π.  $\varphi$  του τόπου ή μικρότερη κατά  $5^\circ-10^\circ$ . Έτσι κατά την διάρκεια της ημέρα, ο ήλιος βρίσκεται συνεχώς στο επίπεδο που είναι κάθετο στο συλλέκτη και περιέχει τον άξονα  $xx'$ .



Σχήμα 3.9: αξιμουθιακό ηλιοτρόπιο (α) οριζόντιου (β) και πολικού άξονα ηλιοτρόπιου

Η περιστροφή της ΦΒ συστοιχίας μπορεί να βασίζεται στην αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας, με ή χωρίς τη χρήση ηλεκτρικών κινητήρων. Στην πρώτη περίπτωση, όπου γίνεται χρήση ηλεκτρικού κινητήρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οπτικό σύστημα ανίχνευσης της θέσης του ήλιου, το οποίο όμως απαιτεί πρόσθετο έλεγχο και οδήγηση, προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιοπιστία του. Στη δεύτερη περίπτωση, η κίνηση προκύπτει ως τροποποίηση της ισορροπίας πνευματικού συστήματος, εξαιτίας διαφορετικής θέρμανσής του από τον ήλιο. Το σύστημα ενισχύεται με αποσβεστήρες δονήσεων (shock absorbers), προκειμένου να αντιμετωπίζεται η δράση του ισχυρού ανέμου.

### Γ.2) Περιστροφή γύρω από δύο άξονες :

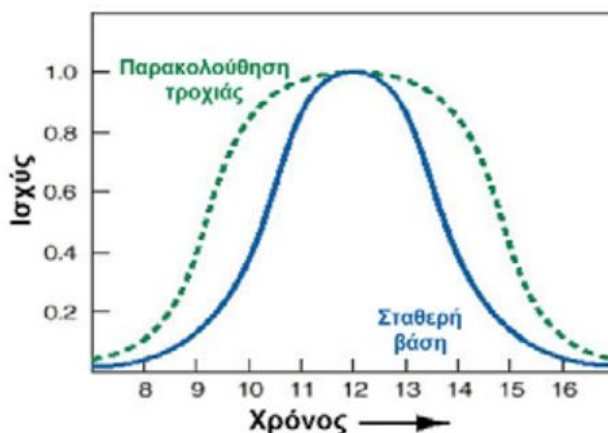
Η παρακολούθηση του ήλιου με περιστροφή γύρω από δύο (2) άξονες, επιτυγχάνεται μέσω δύο, συνήθως διαδοχικών, κινήσεων της ΦΒ συστοιχίας με ηλεκτρικούς κινητήρες, είτε ρηματικούς είτε κινητήρες συνεχούς περιστροφής, με μειωτήρες και έλεγχο στροφών, για τον προσανατολισμό του επιπέδου, κάθετα στην απευθείας ηλιακή ακτινοβολία. Ο προσδιορισμός των καταλλήλων γωνιών στροφής γίνεται με ειδικές διατάξεις (encoders), η λειτουργία των οποίων βασίζεται, είτε σε οπτική διάταξη καταμέτρησης οπών, είτε σε ηλεκτρικό ροοστάτη, περιστροφικής λειτουργίας. Όμοιο μηχανικό σύστημα, σε πολύ μικρότερες διαστάσεις, χρησιμοποιείται για τη στροφή του πυρηλιομέτρου, οπτικού οργάνου παρακολούθησης του ήλιου και καταγραφής της πυκνότητας ισχύος της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας. Η διάταξη αυτή, ονομάζεται ηλιοτρόπιο (tracker), επειδή ο συλλέκτης προσανατολίζεται συνεχώς προς τον ήλιο, έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνειά του.



Σχήμα 3.10: αξιμουθιακό ηλιοτρόπιο δύο αξόνων

Η διάταξη, με τη δύση του ήλιου, επιστρέφει σε θέση αναφοράς, που χαρακτηρίζεται από νότιο προσανατολισμό και μικρή γωνία κλίσης, προκειμένου να προφυλαχθεί από πιθανό ισχυρό άνεμο, μέχρι την ανατολή. Λίγο πριν την ανατολή του ήλιου, ο μηχανισμός στρέφει τον συλλέκτη, έτσι ώστε οι ηλιακές ακτίνες τότε, να προσπέσουν κάθετα σε αυτόν. Από τη χρονική στιγμή αυτή, αρχίζει η παρακολούθηση του ήλιου. Όσο μικρότερη η περίοδος ενεργοποίησης του μηχανισμού στροφής, τόσο

καλύτερα προσεγγίζεται η κατάσταση συνεχούς κάθετης πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών, χωρίς αυτό να είναι εξαιρετικά κρίσιμο. Μια γωνία  $10^\circ$ , μεταξύ των ακτινών του ήλιου και της καθέτου στο επίπεδο του συλλέκτη, προκαλεί μείωση  $\sim 1,5\%$ , στην πυκνότητα ισχύος της απευθείας συνιστώσας στο επίπεδο του συλλέκτη, ακτινοβολίας (μείωση συνημιτονικής συμπεριφοράς). Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια κίνησης της διάταξης, προέρχεται από την παραγόμενη από τη ΦΒ συστοιχία, ηλεκτρική ενέργεια.



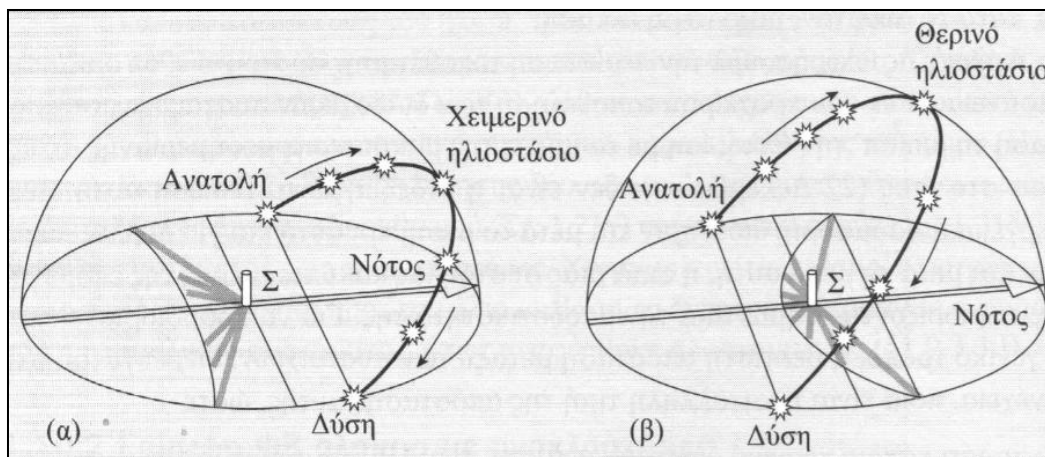
Σχήμα 3.11: απόκλιση απόδοσης ΦΒ συστοιχίας μεταξύ σταθερής βάσης και παρακολούθησης τροχιάς

Μειονέκτημα μιας τέτοιας διάταξης παρακολούθησης του ήλιου, δύο αξόνων, είναι η οικονομική επιβάρυνση για την κατασκευή των μηχανολογικών και ηλεκτρονικών τμημάτων της καθώς και η έκθεση της συστοιχίας στον κίνδυνο καταστροφής, εξαιτίας ισχυρού ανέμου. Για το λόγο αυτό, σε συστήματα με μηχανική κίνηση για τον προσανατολισμό των συλλεκτών προς τον ήλιο, ελέγχεται η ταχύτητα του ανέμου (π.χ. με ανεμόμετρο), έτσι ώστε, στην περίπτωση ισχυρών ανέμων, οι συλλεκτικές επιφάνειες να διατάσσονται οριζόντια. Σε αυτή τη θέση παρουσιάζουν μικρή μετωπική επιφάνεια προς τον άνεμο.

## II. Η απόσταση τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών

Η τοποθέτηση των ΦΒ συστοιχιών γίνεται σε στέγες κτιρίων, σε ικριώματα, σε πλαγίες λόφων κ.λ.π.. Για την σωστή λειτουργία της εγκατάστασης, κάθε ΦΒ συστοιχία πρέπει να έχει ανοιχτό οριζόντια, δηλαδή να μην σκιάζεται από κτίρια, δέντρα κ.τ.λ., καθώς και ιδανική απόσταση μεταξύ διαδοχικών ΦΒ συστοιχιών, ώστε να αποφεύγετε η σκίαση μεταξύ τους. Η σκιά που δημιουργεί μία επιφάνεια ή ένας όγκος δεν παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους, κινείται και αυξομειώνεται σύμφωνα με τη θέση και το ύψος μεσουράνησης του ήλιου στον ουρανό. Η κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας αλλάζει ανάλογα με την ώρα της μέρας. Το παρακάτω σχήμα, δείχνει την τυπική ημερήσια αλλαγή κατεύθυνσης και μήκους της σκιάς ενός στύλου, κατά τη χειμερινή και θερινή περίοδο.

Τους θερινούς μήνες, ο ήλιος παρακολουθείται υψηλά στο στερέωμα του ουράνιου θόλου, με νότιο προσανατολισμό. Έτσι, στις μεσημβρίες του ήλιου, η ακτινοβολία έχει κάθετη διεύθυνση προς την επιφάνεια του εδάφους, ενώ κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες, η ακτινοβολία του έχει οριζόντια διεύθυνση. Συνεπώς, ο σκιασμός στον τόπο είναι μεγάλος κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες, ενώ κατά την μεσημβρία, σκιασμό δημιουργούν μόνο εμπόδια οριζόντιας επιφάνειας. Σε αντίθετη περίπτωση, τους χειμερινούς μήνες, ο ήλιος παρακολουθείται χαμηλά στο στερέωμα του ουράνιου θόλου, με νότιο προσανατολισμό. Έτσι, η ακτινοβολία έχει οριζόντια διεύθυνση σε όλη τη διάρκεια της ημέρας, προς την επιφάνεια του εδάφους, συνεπώς, ο σκιασμός στον τόπο είναι μεγάλος σε όλη τη διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 3.12: διαμόρφωση σκιάς στύλου, κατά τη διάρκεια χειμερινής (α) και θερινής ημέρας (β)

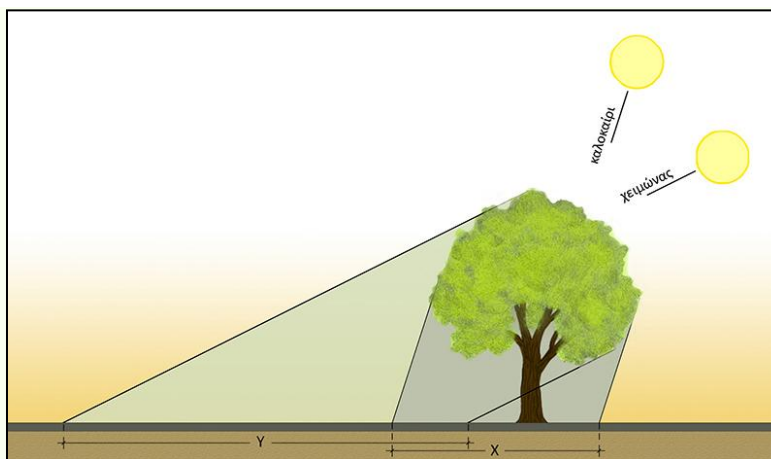
Η 21<sup>η</sup> Ιουνίου είναι η μεγαλύτερη ημέρα του έτους (ΘΗ), την ημέρα αυτή, στα γεωγραφικά πλάτη της Ελλάδας (31°-41° βόρεια), ο ήλιος ανατέλλει 28°-34° μοίρες βορειότερα της Ανατολής και δύει 28°-34° μοίρες βορειότερα της Δύσης. Η 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου είναι η μικρότερη ημέρα του έτους (ΧΗ), την ημέρα αυτή, στα γεωγραφικά πλάτη της Ελλάδας (31°-41° βόρεια), ο ήλιος ανατέλλει 28°-34° μοίρες νοτιότερα της Ανατολής και δύει 28°-34° μοίρες νοτιότερα της Δύσης.

#### A) Απόσταση ανοιχτού ορίζοντα :

Με την προϋπόθεση του συντελεστή ανοιχτού ορίζοντα, θεωρείται ότι εξασφαλίζεται η αποφυγή σκίασης, όταν η γωνία ύψους εμποδίων  $\beta_{op}$  των γειτονικών συστοιχιών, δέντρων, κτιρίων ή άλλων εμποδίων, ικανοποιεί σε τόπο με γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$  και μέσα σε αζιμούθια γωνία  $\gamma$  από -60° μέχρι +60° προς τον Νότο, την σχέση:

$$\beta_{op} \leq 48^\circ - \varphi \quad (3.3)$$

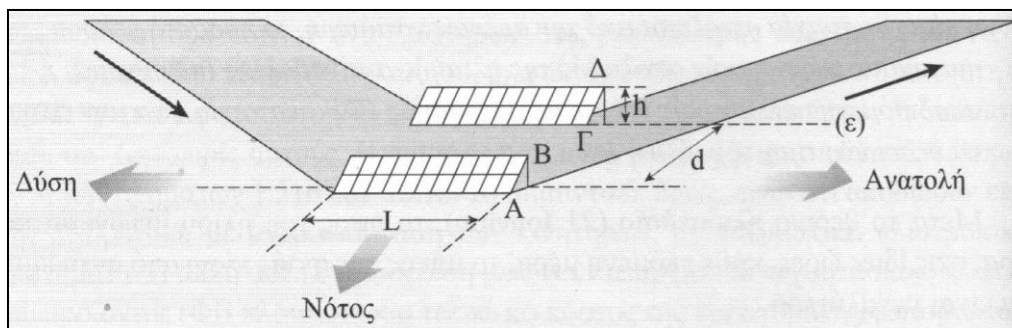
Π.χ. στην περίπτωση που μελετάτε τόπος με γεωγραφικό πλάτος +40°, η γωνία ύψους των διαφόρων εμποδίων δεν πρέπει να ξεπερνά τις  $\beta_{op} \leq 48^\circ - 40^\circ \leq 8^\circ$ .



Σχήμα 3.13: σκιά δέντρου στις 21 Δεκεμβρίου και στις 21 Ιουνίου

**B) Απόσταση μεταξύ διαδοχικών ΦΒ συστοιχιών :**

Η τοποθέτηση των διαδοχικών ΦΒ συστοιχιών, η μια πίσω απ την άλλη, γίνεται λαμβάνοντας υπόψη κατά κύριο λόγο, τη σκίαση που θα προκαλέσει μια ΦΒ συστοιχία στην αμέσως επόμενη βορειότερη της, αν η απόσταση μεταξύ τους γίνει μικρότερη μιας χαρακτηριστικής. Γενικά, η σκίαση μέρους της χαμηλότερης σειράς ΦΒ συλλεκτών μιας ΦΒ συστοιχίας, μηδενίζει την ενεργειακή απόδοση της, στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιηθούν δίοδοι παράκαμψης σε κάθε ΦΒ συλλέκτη. Άρα, απαιτείται ο προσεκτικός σχεδιασμός της χωροθέτησης των ΦΒ συστοιχιών, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η ημερήσια ενεργειακή απολαβή, για όλο το έτος, ενώ ταυτόχρονα το σύνολο των ΦΒ συστοιχιών να καταλαμβάνει, κατά το δυνατόν, μικρότερη έκταση.



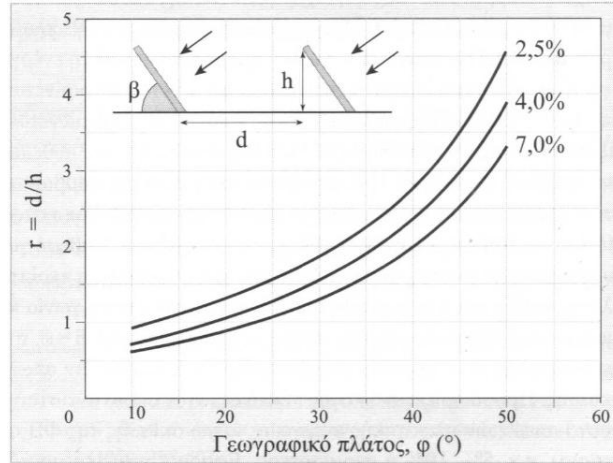
**Σχήμα 3.14:** σκίαση μεταξύ διαδοχικών ΦΒ συστοιχιών

Το παραπάνω σχήμα, δείχνει τα σκιασμένα σημεία στο έδαφος, από την ανατολή μέχρι τη δύση, μέσα σε μια μέρα του χειμώνα. Η σκιά ελαττώνεται από την ανατολή μέχρι το μεσημέρι, και αυξάνεται καθώς ο ήλιος κινείται προς τη δύση (κίνηση κατά τη φορά των βελών στο σχήμα). Για να προσδιοριστεί, κατά γενικό τρόπο, η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των ΦΒ συστοιχιών, διερευνάται στη συνέχεια, ποια είναι η κατάλληλη τιμή της απόστασης αυτής, ώστε παρότι κάποιο χρονικό διάστημα μετά την ανατολή ή πριν τη δύση, η πίσω ΦΒ συστοιχία σκιάζεται από την αμέσως νοτιότερη, το ποσοστό μείωσης της ημερήσιας ενεργειακής απολαβής της ηλιακής ακτινοβολίας από τη ΦΒ συστοιχία, να μην ξεπερνά δεδομένη τιμή 5%-10%. Η διερεύνηση πραγματοποιείται με τη χρήση μοντέλων υπολογισμού για την περίπτωση τοποθέτησης ΦΒ συστοιχιών σε επίπεδο ή κεκλιμένο έδαφος.

**B.1) Μοντέλο προσδιορισμού σε οριζόντιο έδαφος :**

Αρχικά, οι υπολογισμοί του μοντέλου, αφορούν στον προσδιορισμό όλων των συνιστωσών της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, για αίθρια ημέρα, χρησιμοποιώντας εξισώσεις κίνησης του ήλιου, στις διάφορες θέσεις του κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας. Με βάση την ημερήσια μεταβολή των συντελεστών απόκλισης από τις πρότυπες συνθήκες, λόγω της σκίασης, προσδιορίζεται η συνολική αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς από καθένα τους ΦΒ συλλέκτες και συγκρίνεται με την αντίστοιχη ενέργεια από ΦΒ συλλέκτες μη σκασμένης ΦΒ συστοιχίας.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η χωροθέτηση των ΦΒ συστοιχιών, εξετάζεται το αποτέλεσμα της σκίασης που συναρτάται με το λόγο  $r = d/h$ , της απόστασης  $d$  μεταξύ των διαδοχικών ΦΒ συστοιχιών (διάδρομος) ως προς το ύψος τους  $h$  και διερευνάται, η εξάρτηση του λόγου  $r$  από το  $\gamma$ . π.  $\varphi$  του τόπου εγκατάστασης, υπό δεδομένη μέγιστη απώλεια ημερήσιας ενέργειας 5% και 10% λόγω σκίασης, κατά το ΧΗ (22 Δεκεμβρίου), όπου η τροχιά του ήλιου είναι η χαμηλότερη, για κάθε τόπο στο βόρειο ημισφαίριο.

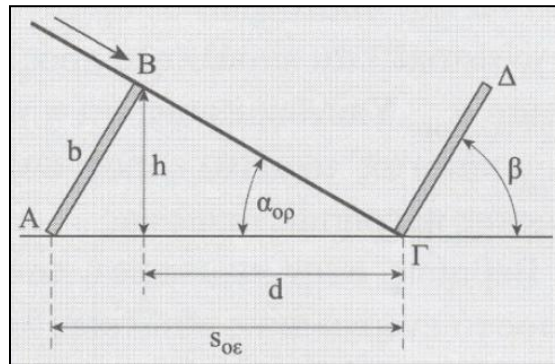


Σχήμα 3.15: μελέτη σκίασης

Όπως προκύπτει από την μελέτη αυτή, καθώς αυξάνει το γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$  του τόπου, ο λόγος  $r$  αυξάνει έντονα και συνακόλουθα μειώνεται και το πλήθος των ΦΒ συστοιχιών που μπορούν να τοποθετηθούν ανά μονάδα μήκους, κατά τη διεύθυνση βορρά-νότου. Τα συμπεράσμα αυτό απεικονίζεται στο παραπάνω διάγραμμα (σχήμα 3.15), από το οποίο δίδεται η δυνατότητα να προσδιορίζεται, για κάθε γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$ , ο κατάλληλος λόγος  $r$ , με βάση το ετήσιο ποσοστό ενεργειακών απωλειών 2,5%, 4% και 7%, όπου αντιστοιχούν στα ποσοστά απωλειών 5%, 10% και 20%, κατά την 22<sup>α</sup> Δεκεμβρίου. Με καθορισμένο το λόγο  $r$ , για το συγκεκριμένο τόπο, η απόσταση σε οριζόντιο έδαφος  $s_{οε}$ , που αποτελεί την επαναλαμβανόμενη απόσταση τοποθέτησης των ΦΒ συστοιχιών απείρου μήκους, δίδεται από:

$$s_{οε} = d + b * \cos \beta \quad \text{ή} \quad s_{οε} = r * h + b * \cos \beta \quad \text{ή} \quad \frac{s_{οε}}{b} = r * \sin \beta + \cos \beta \quad (3.4)$$

όπου,  $d$  το διάκενο μεταξύ ΦΒ συστοιχιών,  $b$  το πλάτος της ΦΒ συστοιχίας και  $\beta$  η γωνία κλίσης της.



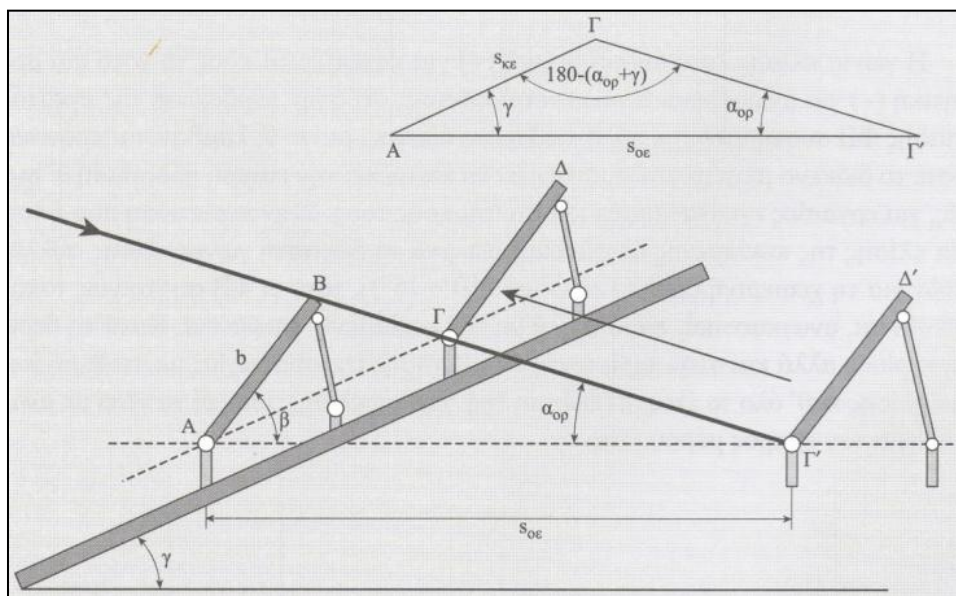
Σχήμα 3.16: ελάχιστη απόσταση επανάληψης διαδοχικών ΦΒ συστοιχιών σε οριζόντιο έδαφος

Η γωνία  $\alpha_{ορ}$ , αποτελεί την αντίστοιχη της διέδρου, μεταξύ του επιπέδου της σκιάς της άνω πλευράς της ΦΒ συστοιχίας και του οριζόντιου επιπέδου πάνω στο μεσημβρινό του τόπου, προσδιορίζεται από:

$$\tan \alpha_{ορ} = \frac{1}{r} \quad (3.5)$$

**B.2) Μοντέλο προσδιορισμού σε κεκλιμένο έδαφος :**

Με βάση τους αρχικούς υπολογισμούς, που αναφέρθηκαν στο μοντέλο σε επίπεδη επιφάνεια, για τον προσδιορισμό της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, την απόκλιση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω σκίασης, όπως και ο λόγος  $r$ , που είναι το αποτέλεσμα της σκίασης, προσδιορίζονται και στο μοντέλο σε κεκλιμένη επιφάνεια. Στην περίπτωση τοποθέτησης της ΦΒ συστοιχίας σε κεκλιμένη επιφάνεια με γωνία κλίσεως  $\gamma$ , η αντίστοιχη σχέση για την απόσταση διαδοχικών σειρών, πάνω στο κεκλιμένο έδαφος, μπορεί να προκύψει από τη γεωμετρία των ΦΒ συστοιχιών σε οριζόντιο επίπεδο, αν θεωρήσουμε ότι η πίσω ΦΒ συστοιχία μετατοπίζεται παράλληλα προς αυτή, κατά τη διεύθυνση της πλευράς ΒΓ, της γωνίας  $\alpha_{op}$ .



**Σχήμα 3.17:** ελάχιστη απόσταση επανάληψης διαδοχικών ΦΒ συστοιχιών σε κεκλιμένο έδαφος

Η απόσταση σε κεκλιμένο έδαφος  $s_{κε}$ , μεταξύ των διαδοχικών ΦΒ συστοιχιών, προκύπτει με επίλυση του τριγώνου  $AB\Gamma'$  και δίδεται από τη σχέση:

$$\frac{s_{κε}}{b} = s_{οε} * \frac{\sin \alpha_{op}}{\sin(\alpha_{op} + \gamma)} \quad \text{ή} \quad \frac{s_{κε}}{b} = (r * \sin \beta + \cos \beta) * \frac{\sin \alpha_{op}}{\sin(\alpha_{op} + \gamma)} \quad (3.6)$$

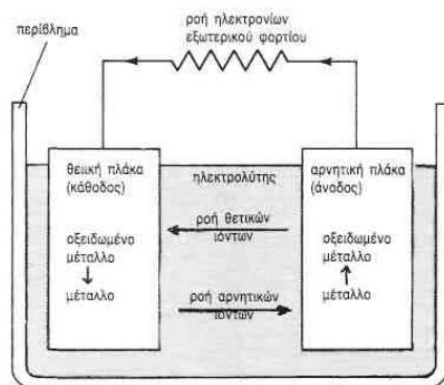
Στην περίπτωση κατωφέρειας προς το νότο ( $\gamma > 0$ ), το ποσοστό ενεργειακής απώλειας λόγω σκίασης, για τους ΦΒ συλλέκτες στο κεκλιμένο έδαφος, είναι μικρότερο του αντίστοιχου ποσοστού, το οποίο καθορίστηκε για ΦΒ συλλέκτες στο οριζόντιο έδαφος. Η γωνία κλίσης λαμβάνεται θετική (+) για κατωφέρεια προς το νότο και αρνητική (-) για ανωφέρεια. Στην περίπτωση εγκατάστασης ΦΒ σε πολύ κεκλιμένο έδαφος, με  $\gamma > 0$ , λαμβάνεται πρόνοια ώστε το διάκενο μεταξύ των ΦΒ συστοιχιών να επιτρέπει την ευχερή πρόσβαση σε αυτές, για εργασίες εγκατάστασης και συντήρησής τους. Στην περίπτωση που η γωνία κλίσης της κεκλιμένης επιφάνειας, ξεπερνά τη βέλτιστη γωνία κλίσης συλλεκτών για τη χειμερινή θέση ( $\gamma > \beta_{\chi\pi}$ ), τότε οι ΦΒ συστοιχίες τοποθετούνται αναγκαστικά παράλληλα με τη κεκλιμένη επιφάνεια.



### 3.2.2 Ο ηλεκτρικός συσσωρευτής

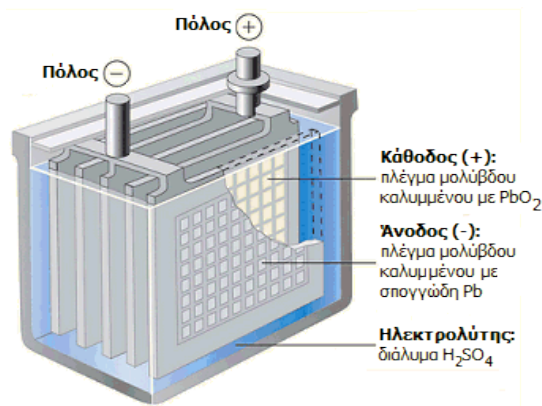
Στη βασική του μορφή, ένα στοιχείο ηλεκτρικού συσσωρευτή αποτελείται από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια, συνήθως, με τη μορφή επίπεδων πλακών, εμβαπτισμένα σε ορισμένο διάλυμα ηλεκτρολύτη, ο οποίος αντιδρά επιφανειακά με τις πλάκες. Κατά το στάδιο της φόρτισής του, μια ηλεκτρική πηγή συνεχούς τάσεως, συνδέεται στα άκρα του και δημιουργεί στο εσωτερικό του ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο κινεί ευκίνητα ιόντα του ηλεκτρολύτη, προς τις αντίθετα πολωμένες πλάκες του συσσωρευτή ένα για το θετικό πόλο (+, άνοδος) και ένα για τον αρνητικό πόλο (-, κάθοδος), όπου αποδίδουν το φορτίο τους.

Αποτέλεσμα των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στα μεταλλικά ηλεκτρόδια, είναι η αλλοίωση της δομής τους, σε βάθος μερικών μικρών, μετατρέπόμενα σε νέα, διαφορετικά μεταξύ τους σώματα. Τα αλλοιωμένα ηλεκτρόδια εμφανίζουν διαφορετικά ηλεκτροχημικά δυναμικά ως προς το διάλυμα και η διαφορά μεταξύ τους, ισούται με την ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) του ηλεκτρικού συσσωρευτή. Με λίγα λόγια, ο ηλεκτρικός συσσωρευτής μετατρέπει την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 3.18: βασική μορφή ενός στοιχείου ηλεκτρικού συσσωρευτή

Εκτός των ηλεκτρικών συσσωρευτών, που ονομάζονται δευτερογενή στοιχεία ή ηλεκτρικά στοιχεία δευτέρας τάξεως, υπάρχουν και εκείνα τα οποία δίνουν ηλεκτρική ενέργεια, μετατρέποντας την δυναμική ενέργεια που αποθηκεύτηκε στο εσωτερικό τους, κατά τις χημικές αντιδράσεις, που έγιναν μεταξύ ενώσεων ή στοιχείων. Ονομάζονται πρωτογενή στοιχεία ή στοιχεία πρώτης τάξεως, ενώ διακρίνονται στο ότι δεν επαναφορτίζονται και ως εκ τούτου, δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τις ΦΒ εφαρμογές.



Σχήμα 3.19: εσωτερική δομή ενός τυπικού ηλεκτρικού συσσωρευτή

### 3.2.2.1 Η χαρακτηριστική ανάλυση του ηλεκτρικού συσσωρευτή

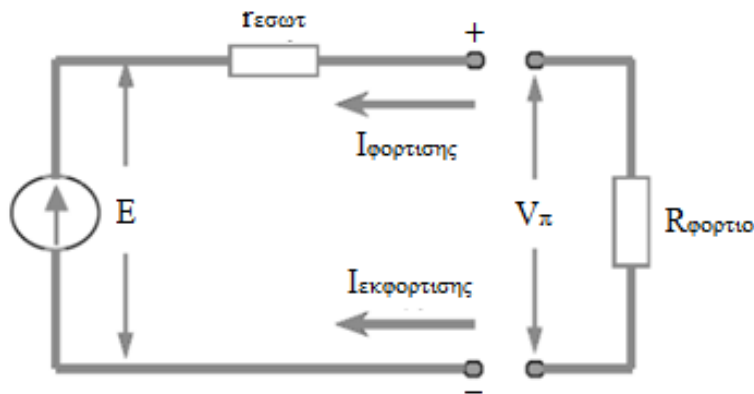
Τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν τις δυνατότητες ενός συσσωρευτή είναι, η ονομαστική τάση  $V_B$  στους πόλους του, που εκφράζεται με την έννοια της Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης (ΗΕΔ) και η ονομαστική χωρητικότητά του  $C_N$ . Σε γενικές γραμμές, ένας συσσωρευτής αποτελείται από δύο ή περισσότερα στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα. Με σύνδεση των στοιχείων σε σειρά, αυξάνει η τάση  $2 * V$ , ενώ η χωρητικότητα παραμένει η ίδια, ενώ με παράλληλη σύνδεση, η χωρητικότητα του συσσωρευτή αυξάνεται  $2 * C$ , αλλά η τάση παραμένει ίδια.

#### Πολική τάση $V_\pi$ :

Η τιμή της ΗΕΔ του ηλεκτρικού συσσωρευτή εκφράζεται σε Volt (V), με την υπόθεση ότι, ο συσσωρευτής λειτουργεί ως ιδανική πηγή σταθερής τάσης, διατηρώντας σταθερή πολική τάση  $V_\pi$ , ενώ βρίσκεται μεταξύ 1-4 V, ανά στοιχείο. Η πολική τάση  $V_\pi$ , στα άκρα ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή με  $ΗΕΔ = E$ , που τροφοδοτεί κάποιο φορτίο, δίδεται από τη σχέση:

$$V_\pi = E - (I * r_{εσωτ}) \quad (3.7)$$

όπου,  $r_{εσωτ}$  η εσωτερική αντίσταση συσσωρευτή και  $I$  το ρεύμα στο κλειστό κύκλωμα. Αν  $I \rightarrow 0$ , τότε πρακτικά  $V_\pi \approx E$ .



Σχήμα 3.20: Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτρικού συσσωρευτή

#### Ονομαστική τάση $V_B$ :

Με καλή προσέγγιση, η ισοδύναμη πολική τάση  $V_\pi$  ισούται με την ονομαστική τάση  $V_B$  του συσσωρευτή. Για να προκύψει μια διάταξη συσώρευσης σε υψηλότερη ΗΕΔ, πλήθος  $N_{στ}$  όμοιων ηλεκτρικών στοιχείων, συνδυάζονται μεταξύ τους σε σειρά.

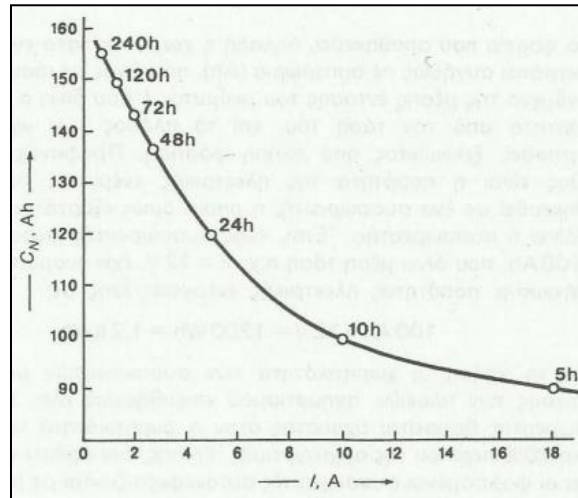
$$V_B = V_\pi * N_{στ} \quad (3.8)$$

#### Ονομαστική χωρητικότητα $C_N$ :

Η ονομαστική χωρητικότητα  $C_N$  ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή, αφορά στο ηλεκτρικό φορτίο  $Q$  που μπορεί να αποθηκευθεί στο εσωτερικό του, με τη μορφή χημικής ενέργειας, κάτω από ορισμένες συνθήκες, καθορισμένες, κυρίως, από τη θερμοκρασία. Σε ιδανικές συνθήκες, ισούται με το γινόμενο της

έντασης ρεύματος εκφόρτισης  $I$  που είναι δυνατόν να αποδώσει, ανεξάρτητα από την τάση του, επί το πλείθος των ωρών  $t$  μέχρι να εκφορτιστεί τελείως, ξεκινώντας από πλήρη φόρτιση, με μονάδα μέτρησης στο SI, το 1 Ah (Amperehour).

$$C_N = \frac{I}{t} \quad (3.9)$$



Σχήμα 3.21: μεταβολή χωρητικότητας και ωρών αυτονομίας συσσωρευτή συναρτήσει του ρεύματος εκφόρτισης

### Ονομαστική ηλεκτρική ενέργεια $E_N$ :

Εξίσου χρήσιμο ηλεκτρικό χαρακτηριστικό, είναι η ποσότητα της ονομαστικής ηλεκτρικής ενέργειας  $E_N$  που μπορεί να αποδώσει ένα ηλεκτρικός συσσωρευτής. Σε ιδανικές συνθήκες, ισούται με το γινόμενο της ονομαστικής τάσης  $V_B$  του, επί την ονομαστική χωρητικότητα  $C_N$  του, με μονάδα μέτρησης στο SI, το 1 Wh (Watt-hour).

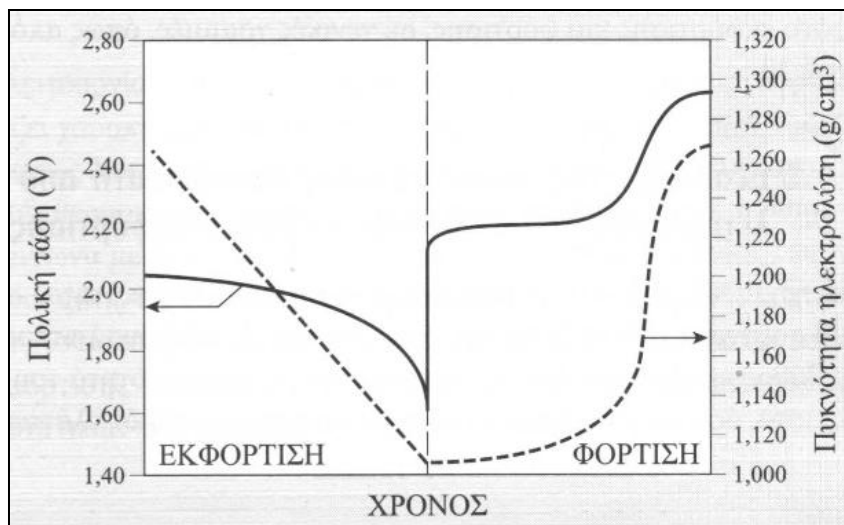
$$E_N = V_B * C_N \quad (3.10)$$

### Χρόνος ζωής :

Ο χρόνος ζωής ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή εκφράζεται σε κύκλους λειτουργίας, καθένας από τους οποίους περιλαμβάνει τις διαδοχικές διαδικασίες εκφόρτισης και φόρτισης του, ενώ εξαρτάται από παραμέτρους όπως ο ρυθμός (ρεύμα) φόρτισης και εκφόρτισης και οι ακραίες θερμοκρασίες λειτουργίας. Ο συσσωρευτής δεν πρέπει να υφίστανται παρατεταμένη φόρτιση σε πολύ υψηλή τάση για αυτόν (overcharging), ούτε να εκφορτίζονται κάτω από ένα όριο (overdischarging). Η υπερφόρτιση έχει ως επακόλουθο την ηλεκτρόλυση, δηλαδή την παραγωγή υδρογόνου, με ταυτόχρονη έντονη ελάττωση της στάθμης του ηλεκτρολυτικού διαλύματος (απώλεια νερού).

Για το προσδιορισμό της κατάστασης φόρτισης, η παρακολούθηση της πολικής τάσης  $V_\pi$  του συσσωρευτή, δίνει μια προσεγγιστική εικόνα της κατάστασης. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, η πολική τάση  $V_\pi$  του συσσωρευτή μειώνεται, αρχικά με χαμηλό ρυθμό, ώστε πρακτικά, να μπορεί να θεωρηθεί, περίπου σταθερή. Ο ρυθμός μείωσης της τάσης, προς το τέλος της διαδικασίας αυξάνει ραγδαία. Κατά την αντίστροφη διαδικασία, η τάση αποκτά πολύ γρήγορα, περίπου σταθερή τάση 2-2,1

V, η οποία αυξάνεται αργά, ενώ προς το τέλος της φόρτισης, παρουσιάζει απότομη αύξηση. Κατά τη φόρτιση, μόλις η πολική τάση  $V_{\pi}$  φτάσει την τιμή 2,4 V/στοιχείο, η φόρτιση διακόπτεται.



Σχήμα 3.22: μεταβολή πυκνότητας και πολικής τάσης συσσωρευτή κατά τις φάσεις εκφόρτισης και φόρτισης

Ομοίως, διακόπτεται η λειτουργία του συσσωρευτή (παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε καταναλωτή), όταν η πολική τάση  $V_{\pi}$  ελαττωμένη προσεγγίσει μια τιμή που έχει επιλεγεί ως ελάχιστο όριο λειτουργίας. Γενικά, η τιμή αυτή σχετίζεται με το βάθος εκφόρτισης, με το οποίο είναι επιθυμητό να επαναλαμβάνονται οι κύκλοι λειτουργίας. Οποσδήποτε, επανειλημμένη λειτουργία του σε τάσεις κάτω από 1,75-1,80 V, προκαλεί δραματική μείωση στο χρόνο ζωής του συσσωρευτή. Προκειμένου να αποφευχθεί μια τέτοια κατάσταση, το τροφοδοτούμενο φορτίο τίθεται εκτός λειτουργίας, όταν η τάση φτάσει το προκαθορισμένο επιτρεπτό κάτω όριο πολικής τάσης.

Παρακάτω, περιγράφονται οι παράμετροι λειτουργίας, από τους οποίους εξαρτάται ο χρόνος ζωής του ηλεκτρικού συσσωρευτή:

➤ **Κανονικός ρυθμός φόρτισης  $I_{\phi}$  :**

Πολύ σημαντική παράμετρος για την διατήρηση του συσσωρευτή σε καλή κατάσταση είναι η ήπια φόρτισή του. Η φόρτιση του συσσωρευτή γίνεται με εφαρμογή συνεχούς τάσεως στους πόλους του συσσωρευτή, έτσι ώστε το σύστημα να διαρρέεται από ορισμένο ρεύμα. Γενικά, συνίσταται φόρτιση με ρεύμα χαμηλής τιμής. Όσο μακρύτερη είναι η περίοδος φόρτισης μέχρι το άνω όριο τάσης φόρτισης, τόσο υψηλότερη η τελική στάθμη χωρητικότητας. Αν συσσωρευτής με ονομαστική χωρητικότητα  $C_N$ , ο κανονικός ρυθμός φόρτισης προϋποθέτει τάση φόρτισης  $V_{\phi}$  και ρεύμα φόρτισης  $I_{\phi}$ :

$$V_{\phi} = \sim 1,2 * V_B \tag{3.11}$$

$$I_{\phi} = \frac{C_N}{10} \quad \text{ή} \quad I_{\phi} = \frac{C_N}{20} \tag{3.12}$$

όπου, 10 και 20 ο τυπικός χρόνος φόρτισης  $t_c$  (σε ώρες h) για συσσωρευτές κοινής κατασκευής στοιχείων και ενισχυμένης κατασκευής στοιχείων (ΦΒ εφαρμογής), αντίστοιχα.

➤ **Βάθος εκφόρτισης  $\beta_{εκφ}$  ή DOD (Depth of Discharge) :**

Το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης  $\beta_{εκφ}$ , είναι το μέγιστο ποσοστό της ονομαστικής χωρητικότητας  $C_N$  το οποίο μπορεί να αποδοθεί από τον συσσωρευτή. Συνήθως καταδεικνύεται από την τάση αποκοπής (τάση βάθους εκφόρτισης) και από τον ρυθμό εκφόρτισης. Μπορεί να έχει ρηχό βάθος εκφόρτισης, μεταξύ 10-15% της χωρητικότητας  $C_N$  ή βαθύ βάθος εκφόρτισης 50-80%. Για ρηχό βάθος, ο συσσωρευτής είναι σχεδιασμένος όταν ξεκινά να δίνει πολλά Ampere σε μικρό χρονικό διάστημα, όπως αυτός ενός αυτοκινήτου και στην συνέχεια το δυναμό τον επαναφορτίζει. Στην περίπτωση με βαθύ βάθος, παρέχει λίγα Ampere για μεγάλα χρονικά διαστήματα, όπως σε συσσωρευτή για ΦΒ εφαρμογές.

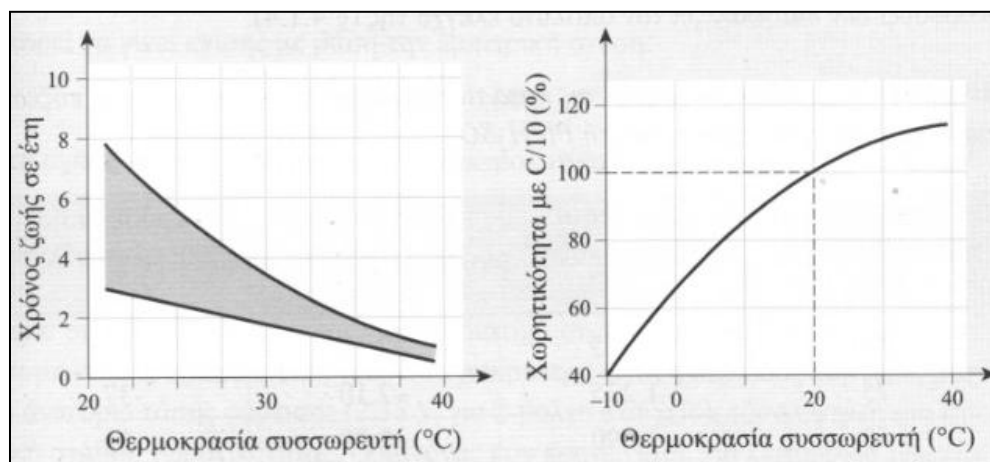
Ένας κανόνας που προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά των συσσωρευτών και πρακτικά, περιγράφει το χρόνο ζωής τους, είναι ότι το γινόμενο βάθους εκφόρτισης επί το πλήθος των κύκλων λειτουργίας  $N_k$  είναι, με καλή προσέγγιση, σταθερό. Δηλαδή:

$$\beta_{εκφ} * N_k = \text{σταθερό} \quad (3.13)$$

Για τους συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης, το γινόμενο αυτό παίρνει την τιμή 1200, ενώ για κοινούς συσσωρευτές περιορίζεται στο 120. Π.χ. περιοδική εκφόρτιση-φόρτιση ενός καλής ποιότητας συσσωρευτή, σε ποσοστό 20% κάτω από την ονομαστική χωρητικότητά του, αντιστοιχεί σε 4500 κύκλους λειτουργίας. Αν το βάθος εκφόρτισης αυξηθεί σε 40%, οι κύκλοι λειτουργίας ελαττώνονται κάτω από τους μισούς. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί, ότι η διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή για ΦΒ εφαρμογή, που λειτουργεί με βάθος εκφόρτισης  $\beta_{εκφ} = 0,25-0,3$ , μπορεί να υπερβεί τα 10 χρόνια.

➤ **Θερμοκρασία λειτουργίας :**

Η θερμοκρασία λειτουργίας ενός συσσωρευτή αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο, που επηρεάζει χαρακτηριστικά το χρόνο ζωής και τη χωρητικότητά  $C_N$  του. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, πάνω από τους 20°C, μειώνουν το χρόνο ζωής του. Αλλά και οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες προκαλούν έντονη μείωση στο φορτίο που μπορεί να αποθηκεύσει, υπό δεδομένο ρυθμό φόρτισης (ισχυρή μείωση της ευκινησίας των ιόντων).

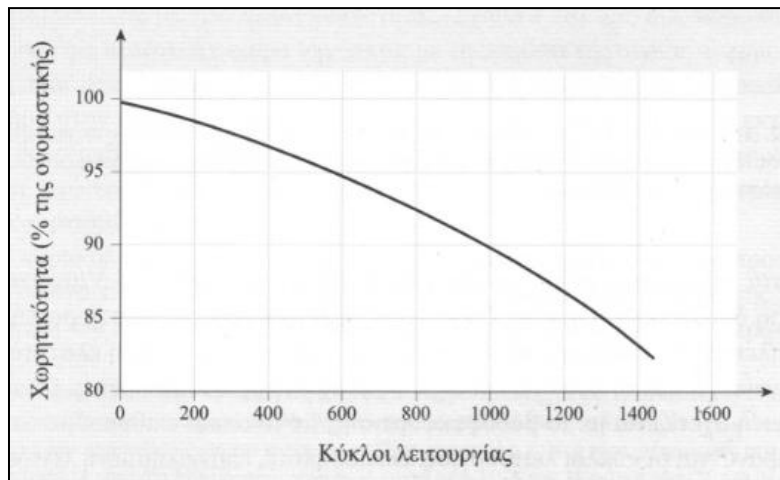


**Σχήμα 3.23:** α) μείωση χρόνου ζωής του συσσωρευτή σε υψηλές θερμοκρασίες  
β) μειωμένη χωρητικότητα υπό ρυθμό φόρτισης συσσωρευτή σε χαμηλές θερμοκρασίες

### 3.2.2.2 Η ενεργειακή διαστασιολόγηση του ηλεκτρικού συσσωρευτή

Η χωρητικότητα του ηλεκτρικού συσσωρευτή ελαττώνεται με την αύξηση του αριθμού κύκλων λειτουργίας του και οφείλεται στη σταδιακή μείωση των ενεργών υλικών των ηλεκτροδίων (γήρανση συσσωρευτή). Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται η τυπική εξάρτηση της χωρητικότητας ενός συσσωρευτή, όσο αυξάνει ο χρόνος ζωής του, μετρούμενος σε κύκλους λειτουργίας, με δεδομένο βάθος εκφόρτισης. Όπως παρατηρείται, η χωρητικότητά του ελαττώνεται και μάλιστα, όσο αυξάνονται οι κύκλοι λειτουργίας, ο ρυθμός ελάττωσης αυξάνει.

Η ελάττωση της χωρητικότητας, πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον υπολογισμό της ονομαστικής χωρητικότητας  $C_N$  του συσσωρευτή, ώστε μέσα στο χρόνο ζωής του, να διατηρεί τη δυνατότητα να καλύπτει ημερησίως την ενέργεια, που απαιτεί η εφαρμογή, με το βάθος εκφόρτισης  $\beta_{εκφ}$ . Η ελάττωση της ονομαστικής χωρητικότητας, προσδιορίζεται με το **συντελεστή γήρανσης  $\eta_{γ,B}$**  η τιμή του οποίου προκύπτει 0,8, για όλη τη ζωή του. Δηλαδή, μείωση της χωρητικότητας στο τέλος της ζωής του συσσωρευτή, στο 80% της αρχικής τιμής του.



Σχήμα 3.24: μεταβολή χωρητικότητας συσσωρευτή συναρτήσει των κύκλων λειτουργίας

Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ηλεκτρικού συσσωρευτή, αλλά και των παραμέτρων λειτουργίας που καθορίζουν το χρόνο ζωής του, είναι δυνατή η διαστασιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης του ηλεκτρικού συσσωρευτή. Έτσι, σε ένα ηλεκτρικό συσσωρευτή ονομαστικής χωρητικότητας  $C_N$ , η **μέγιστη ενεργός χωρητικότητα  $C_0$** , η οποία αποτελεί την αξιοποιήσιμη χωρητικότητα για την κάλυψη της εφαρμογής, είναι:

$$C_0 = C_N * \beta_{εκφ} * \eta_{γ,B} \quad (3.14)$$

Επομένως, η **μέγιστη ενεργός ηλεκτρική ενέργεια  $E_0$**  που μπορεί να αποταμιευτεί και να ανακτηθεί, δηλαδή να αξιοποιηθεί σε ιδανικές συνθήκες, σε κάθε κύκλο λειτουργίας, είναι:

$$E_0 = V_B * C_N * \beta_{εκφ} * \eta_{γ,B} \quad \text{ή} \quad E_0 = V_B * C_0 \quad (3.15)$$

Όταν φορτίζεται ένας συσσωρευτής, ένα ποσοστό της τάξεως του 10-20% της προσφερόμενης σε αυτόν ηλεκτρικής ενέργειας χάνεται, θερμαίνοντας τον ηλεκτρολύτη ή προκαλώντας ηλεκτρόλυση. Έτσι, ένας ηλεκτρικός συσσωρευτής χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο **βαθμό ενεργειακής απόδοσης**  $n_E$ , με τυπική τιμή 80-85%.

$$n_E = \frac{E_0}{E_N} \quad (3.16)$$

Επίσης, χρησιμοποιείται ο αντίστοιχος **βαθμός απόδοσης φορτίου**  $n_q$ , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του φορτίου εκφόρτισης, προς το φορτίο φόρτισης, με τυπική τιμή βαθμού απόδοσης φορτίου  $n_q \approx 90\%$ .

Εκτός από το βαθμό ενεργειακής απόδοσης  $\eta_E$ , σημαντικός συντελεστής της διαστασιολόγησης του ηλεκτρικού συσσωρευτή αποτελεί ο βαθμός απόδοσης χωρητικότητας του, ο οποίος αναφέρεται ως **κατάσταση φόρτισης SOC** (State of Charge), που εκφράζει το ποσοστό της χωρητικότητας ενός πλήρως φορτισμένου συσσωρευτή και ορίζεται σαν το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας:

$$SOC = \frac{C_0}{C_N} \quad (3.17)$$

Άρα, ένας συσσωρευτής του οποίου τα 3/4 της ενέργειας του έχουν αφαιρεθεί, δηλαδή έχει εκφορτιστεί κατά 75%, λέγεται ότι βρίσκεται στο 25% SOC, της αρχικής του χωρητικότητας.

### Ηλεκτρικός συσσωρευτής Μολύβδου - Θεικού οξέος

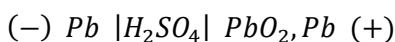
Ο συσσωρευτής Μολύβδου-Θεικού οξέος ( $Pb/H^2SO^4$ ) είναι ίσως ο δημοφιλέστερος τύπος ηλεκτρικού συσσωρευτή, γνωστός από τις αρχές του εικοστού αιώνα. Οι βιομηχανικής παραγωγής συσσωρευτές Μολύβδου έχουν υψηλή μηχανική αντοχή και συνακόλουθα, αυξημένη δυνατότητα για βαθιές εκφορτίσεις, με δυνατότητα μεγάλων ρευμάτων. Διακρίνονται επίσης στους συσσωρευτές με ηλεκτρολύτη υγρής κατάστασης και με παχύρρεστο ηλεκτρολύτη (gel), αεροστεγώς σφραγισμένους (sealed), οι οποίοι δεν απαιτούν συμπλήρωση νερού. Οι συσσωρευτές αυτοί πλεονεκτούν των πρώτων, επειδή δεν απαιτούν συντήρηση και έχουν τη δυνατότητα χρήσης σε κλειστούς χώρους, που περιέχουν ευαίσθητα μηχανικά ή ηλεκτρονικά όργανα. Μπορούν ακόμα να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές υπό κλίση, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος διαρροής ηλεκτρολυτικού υγρού.



Σχήμα 3.25: κατασκευαστική δομή τυπικού συσσωρευτή μολύβδου εμπορίου

Χαρακτηρίζονται όμως, από μικρά βάθη εκφόρτισης και σχετικά μικρά ρεύματα εκφόρτισης. Επίσης, υστερούν σε σχέση με τους συσσωρευτές υγρής κατάστασης, όσον αφορά την αξιοποιήσιμη χωρητικότητά τους σε θερμοκρασίες κάτω του 0°C. Στους 0°C η χωρητικότητα περιορίζεται στο ~65% της ονομαστικής στους 20°C. Στους συσσωρευτές τύπου gel, η χωρητικότητα σε αντίστοιχες συνθήκες είναι κάτω του 30% της ονομαστικής τιμής της. Η ονομαστική τάση ενός στοιχείου συσσωρευτή Μολύβδου είναι 2,25 V, ενώ το άνω όριο τάσης φόρτισης 2,35 V. Έτσι, οι τυπικές ονομαστικές τάσεις με τις οποίες κυκλοφορούν, οι εμπορικά διατιθέμενοι συσσωρευτές μολύβδου, είναι 6 V (τρία στοιχεία) και συνηθέστερα, 12 V (έξι στοιχεία) και 24 V (δώδεκα στοιχεία).

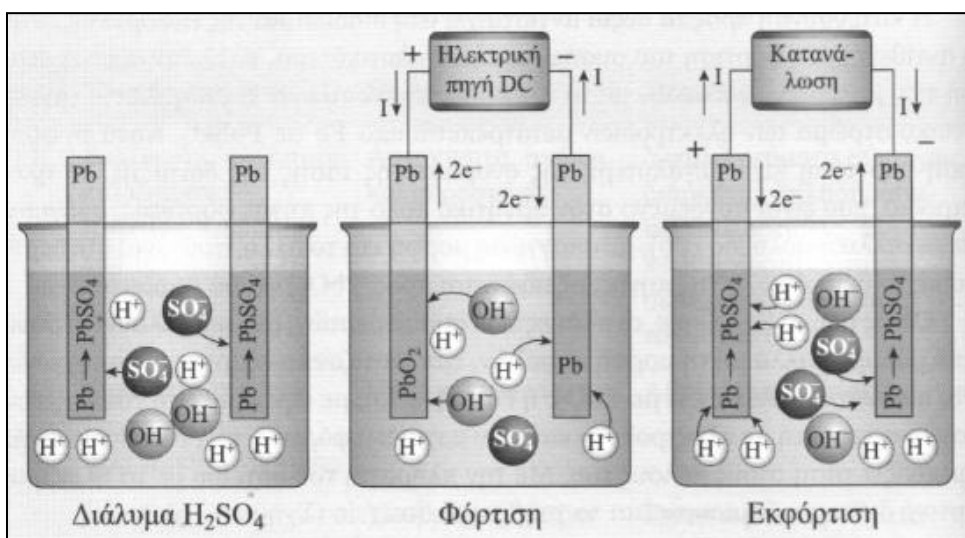
Τα ηλεκτρόδια των βιομηχανικών συσσωρευτών κατασκευάζονται από πλάκες Μολύβδου με τη μορφή κυψελών. Οι κυψέλες στην αρνητική πλάκα πληρώνονται με πορώδη Μόλυβδο ενώ στην θετική, με φαιά οξείδια Μολύβδου, προκειμένου η ενεργός επιφάνεια κάθε μολύβδινης πλάκας να είναι αυξημένη και κατά συνέπεια και η χωρητικότητά του συσσωρευτή. Οι πλάκες των συσσωρευτών, δεν αποτελούνται μόνο από Μόλυβδο αλλά με τη μορφή κυψελών, εμπλουτίζονται εξαρχής, με σπογγώδη Pb η αρνητική πλάκα και με PbO<sub>2</sub> η θετική. Έτσι, με την πλήρωση του δοχείου του συσσωρευτή με ηλεκτρολύτη και πριν αρχίσει η φόρτισή του, ο συσσωρευτής εμφανίζει τάση στους πόλους του. Με την πλήρωση του δοχείου με το ηλεκτρολυτικό διάλυμα, δημιουργείται το γαλβανικό στοιχείο :



με ΗΕΔ,  $E = 2,0 \text{ V}$ . Φυσικά το σύστημα δεν έχει αποκτήσει την ονομαστική χωρητικότητά του και απαιτείται περαιτέρω φόρτιση.

**Διαδικασία φόρτισης συσσωρευτή :**

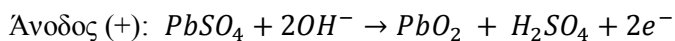
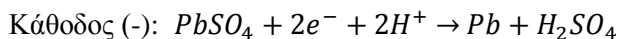
Η φόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή γίνεται με εφαρμογή συνεχούς τάσεως στους πόλους του συσσωρευτή, έτσι ώστε το σύστημα να διαρρέεται από ορισμένο ρεύμα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Γενικά, συνίσταται φόρτιση με ρεύμα χαμηλής τιμής, όπως ορίζει ο κανονικός ρυθμός φόρτισης  $I_{\phi}$ , δηλαδή  $C/20$  για συσσωρευτή κοινής κατασκευής στοιχείων και  $C/10$  για ενισχυμένης κατασκευής.



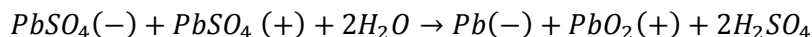
Σχήμα 3.26: χημική διαδικασία συσώρευσης ηλεκτρικού φορτίου κατά τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης



Οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στα δύο ηλεκτρόδια κατά τη φόρτιση, είναι οι ακόλουθες:



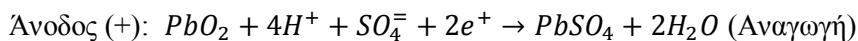
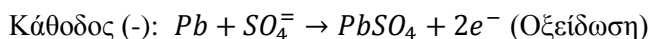
Η ολική δράση κατά τη φόρτιση περιγράφεται από την αντίδραση:



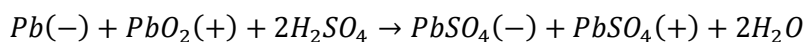
Άρα, κατά τη φόρτιση αυξάνεται η περιεκτικότητα του Θεικού οξέως στο διάλυμα, δηλαδή, η πυκνότητά του αυξάνει προς την τιμή του καθαρού ηλεκτρολύτη (1,24-1,28 g/cm<sup>3</sup>).

#### Διαδικασία εκφόρτισης συσσωρευτή :

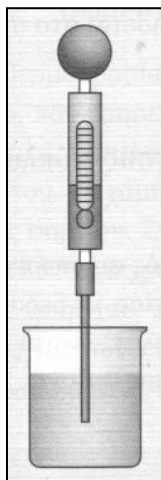
Αν στα άκρα του συσσωρευτή συνδεθεί ένας καταναλωτής, τότε συμβαίνει εκφορτίσή του και, κατά τις χημικές αντιδράσεις στις επιφάνειες των δύο ηλεκτροδίων, μετατρέπονται σταδιακά και τα δύο σε PbSO<sub>4</sub>.



Η ολική δράση κατά την εκφόρτιση περιγράφεται από την αντίδραση:



Άρα, κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή ελαττώνεται η περιεκτικότητα του Θεικού οξέως στο διάλυμα. Η παρακολούθηση της περιεκτικότητας του H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> στο διάλυμα, εκφραζόμενη με την μεταβολή της πυκνότητάς του (g/cm<sup>3</sup>), κατά τους χρόνους φόρτισης-εκφόρτισης, αποτελεί ένα πολύ απλό τρόπο ελέγχου της καταστάσεως φόρτισης του συσσωρευτή.



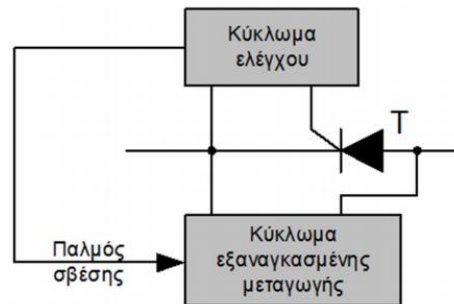
Σχήμα 3.27: όργανο μέτρησης πυκνότητας ηλεκτρολύτη

### 3.2.3 Τα ηλεκτρονικά διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας

Οι ηλεκτρονικές διατάξεις διαχείρισης της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας, από κατασκευαστικής πλευράς, μπορούν να συνδυαστούν για τη σύνθεση κύριων μονάδων. Συνήθως, δύο είναι οι διατάξεις που μπορεί να αποτελέσουν ξεχωριστές συσκευές, ο ελεγκτής φόρτισης ηλεκτρικών συσσωρευτών και ο μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη. Στην διάταξη του ελεγκτή φόρτισης, ενσωματώνονται συνήθως ο μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε συνεχή και ο ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος. Στις δυο αυτές ξεχωριστές μονάδες, μπορεί να βρίσκεται ενσωματωμένος και ο μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσεως σε συνεχή, αλλά συνήθως, αποτελεί τμήμα του Η/Ζ. Σε μια τελευταία σύνθεση και ο ελεγκτής φόρτισης, μπορεί να βρίσκεται ενσωματωμένος με τον μετατροπέα συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη, οπότε οι διατάξεις αυτές μαζί, συνθέτουν ολοκληρωμένη μονάδα.

#### 3.2.3.1 Ο μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε συνεχή

Η μετατροπή μιας συνεχούς τάσεως  $V_0$  σε συνεχή  $V_1$  ( $V_0 \neq V_1$ ), βασίζεται στη χρήση υψίσχυων ημιαγωγικών διακοπτικών στοιχείων κυκλωμάτων, τα οποία διαχειρίζονται μεγάλη ισχύ, με ελάχιστες απώλειες. Οι ψαλιδιστές παρουσιάζουν υψηλή απόδοση της τάξεως του 94% και κατασκευάζονται για ισχύς μεταξύ δέκα και εκατομμυρίων Watt, ενώ η συχνότητα μεταγωγής είναι μεταξύ 100 Hz - 1 kHz. Οι ημιαγωγικοί διακόπτες που χρησιμοποιούνται, μπορεί να είναι τρανζίστορ ισχύος (MOSFET, IGBT), θυρίστορ ή G.T.O (Gate Turn Off thyristor). Η χρήση των τρανζίστορ και των G.T.O, προσφέρεται περισσότερο, διότι αποφεύγονται τα κυκλώματα εξαναγκασμένης μεταγωγής που απαιτούν τα θυρίστορ.



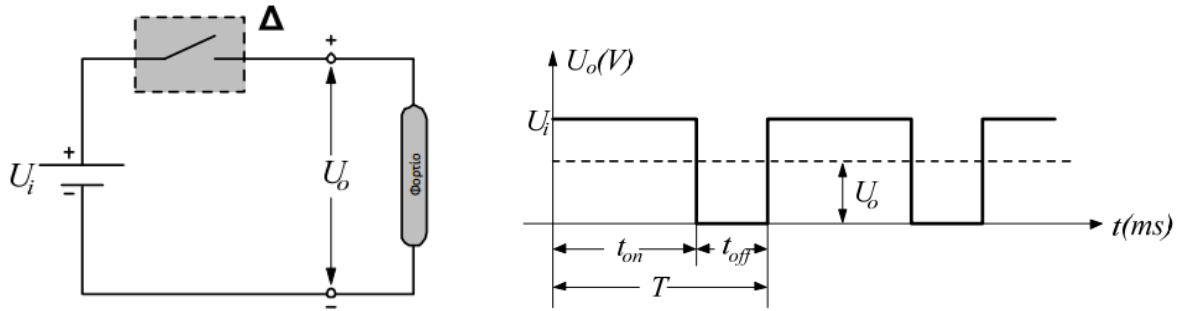
Σχήμα 3.28: θυρίστορ με τα κυκλώματα έναυσης και σβέσης

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ψαλιδιστή. Ανοιγοκλείνοντας τον διακόπτη Δ, η συνεχής τάση εισόδου μετατρέπεται στην έξοδο σε συνεχόμενους παλμούς τάσης, δηλαδή σε μια περιοδικά μεταβαλλόμενη τάση με θετική μέση τιμή. Κατά τον χρόνο αγωγής  $t_{on}$ , ο διακόπτης είναι κλειστός και η τάση εισόδου συνδέεται απευθείας στο φορτίο, ενώ στο χρόνο αποκοπής  $t_{off}$ , ο διακόπτης είναι ανοιχτός και η τάση στο φορτίο είναι μηδενική. Στην περίπτωση που το φορτίο έχει και επαγωγική συνιστώσα συνδέεται και μια δίοδος ελευθέρως ροής.

Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου, είναι:

$$V_{o,rms} = V_o \sqrt{\frac{T}{t_{on}}} = V_o \sqrt{\frac{1}{\alpha}} \quad (3.18)$$

όπου,  $\alpha = t_{on}/T$  ο βαθμός χρησιμοποίησης (duty cycle) του μετατροπέα και  $V_o$  η μέση τάση εξόδου του.



Σχήμα 3.29: Ισοδύναμο κύκλωμα και χαρακτηριστική λειτουργίας μετατροπέα συνεχούς τάσεως σε συνεχή

Μεταβάλλοντας λοιπόν τον βαθμό χρησιμοποίησης  $\alpha$ , επιτυγχάνεται γραμμική μεταβολή της τάσης εξόδου, από το μηδέν έως την τιμή  $V_i$ , δηλαδή ο ψαλιδιστής συμπεριφέρεται σαν ρυθμιζόμενη αντίσταση. Έτσι, ο έλεγχος του ψαλιδιστή επιτυγχάνεται με μεταβολή του βαθμού  $\alpha$ , με τις παρακάτω δύο τεχνικές:

**1) διαμόρφωσης του εύρους των παλμών (Δ.Ε.Π. - PWM, Pulse Width Modulation) :**

Διατηρώντας σταθερή την συχνότητα έναυσης και σβέσης των ημιαγωγικών στοιχείων ( $f = 1/T = t_{on}/t_{off} = \text{σταθερό}$ ) και μεταβάλλοντας το χρόνο αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων.

**2) διαμόρφωσης της συχνότητας των παλμών (Δ.Σ.Π. - FM, Frequency Modulation) :**

Διατηρώντας σταθερό το χρόνο αγωγής ή αποκοπής του ημιαγωγικού στοιχείου και μεταβάλλοντας την περίοδο  $T$  του παλμού, άρα και τη συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα

Η ταξινόμηση των ψαλιδιστών, μπορεί να γίνει με αρκετά κριτήρια:

A) Ανάλογα με τη διαμόρφωση της τάσης εξόδου από τη τάση εισόδου :

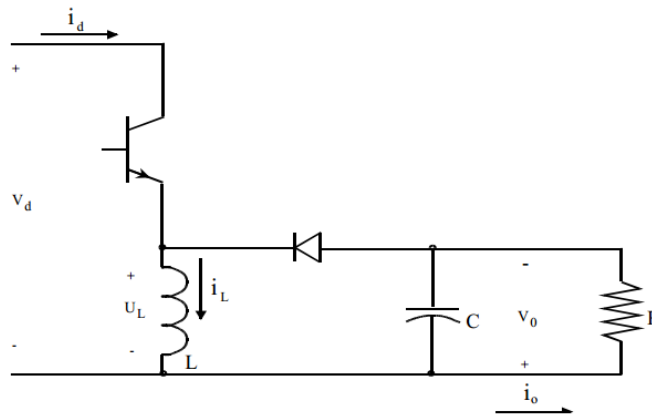
- **Ψαλιδιστής υποβιβασμού** (step down dc-dc converter) ή **εν σειρά ψαλιδιστής** (buck dc-dc converter), στον οποίο η τάση εξόδου είναι μικρότερη ή το πολύ ίση με την τάση εισόδου.
- **Ψαλιδιστής ανύψωσης** (step up dc-dc converter) ή **εν παράλληλο ψαλιδιστής** (boost dc-dc converter), στον οποίο η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη ή το λιγότερο ίση με την τάση εισόδου.
- **Ψαλιδιστής υποβιβασμού-ανύψωσης** (step up-down dc-dc converter) ή **εν σειρά-εν παράλληλο ψαλιδιστής** (buck-boost dc-dc converter), στον οποίο η τάση εξόδου μπορεί να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την τάση εισόδου.

B) Ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς της ενέργειας :

- **Ψαλιδιστής άμεσης σύνδεσης**, όταν δεν υπάρχει στοιχείο αποθήκευσης της ενέργειας.
- **Ψαλιδιστής έμμεσης σύνδεσης**, όταν υπάρχει στοιχείο αποθήκευσης της ενέργειας.

Στον ψαλιδιστή, μπορεί να τοποθετηθεί μικροελεγκτής ΣΜΙ (MPPT), ο οποίος συνεχώς ελέγχει και ορίζει την προσαρμογή του σημείου λειτουργίας (ΣΛ) του συστήματος παραγωγής ενέργειας, με το σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ), που καθορίζουν οι κρατούσες συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας

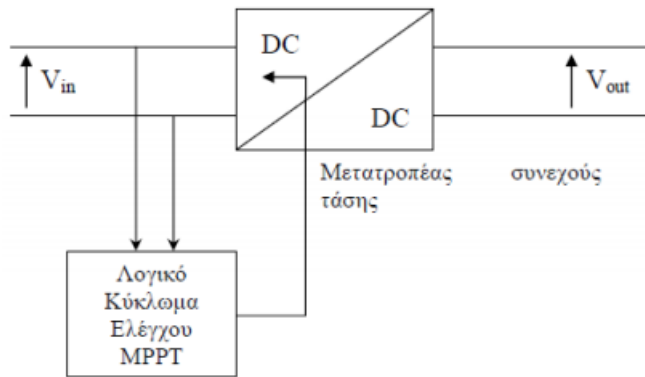
περιβάλλοντος. Ο μικροελεγκτής ΣΜΙ μετρά την τάση και την ένταση εξόδου των ΦΒ συστοιχιών, στέλνει σήμα στον ψαλιδιστή να ανυψώσει ή να μειώσει την τάση μέχρι να εντοπιστεί το ΣΜΙ, άρα χρησιμοποιείται ψαλιδιστής υποβιβασμού-ανύψωσης (step up-down dc-dc converter).



Σχήμα 3.30: κυκλωματικό διάγραμμα ψαλιδιστή υποβιβασμού - ανύψωσης τάσης

### 3.2.3.2 Ο ελεγκτής σημείου μέγιστης ισχύος

Όπως προαναφέρθηκε στην εξέταση των ΦΒ στοιχείων, η ένταση που παράγεται από ένα ΦΒ στοιχείο, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα απ ότι μεταβάλλεται η τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης - έντασης, το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Ωστόσο επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο ΦΒ στοιχείο δεν είναι σταθερή, ομοίως σταθερή δεν είναι και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό, για κάθε στιγμή το ΦΒ στοιχείο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης - έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του.



Σχήμα 3.31: απλοποιημένο κυκλωματικό διάγραμμα ελεγκτή MPPT

Η λειτουργία του μικροελεγκτή ΣΜΙ, βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση των τιμών τάσης και έντασης εξόδου της ΦΒ συστοιχίας, προκαλώντας ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης, αυξάνεται η ισχύς που παρέχει η ΦΒ συστοιχία, τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό είναι και το σημείο μέγιστης λειτουργίας (ΣΛ). Για να επιτευχθεί η λειτουργία αυτή, στα άκρα του ψαλιδιστή ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης, όπου εισέρχεται η ισχύς της ΦΒ συστοιχίας ενσωματώνεται ο ελεγκτής.

Ανά πάσα στιγμή η ισχύς που παράγεται από μια ΦΒ συστοιχία είναι  $P = V * I$ . Εάν λόγω μεταβολής στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ή μεταβολή του φορτίου, αλλάξει η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, μετατοπιστεί δηλαδή σε διαφορετικό σημείο λειτουργίας (ΣΛ) πάνω στη καμπύλη V-I, τότε θα υπάρξει μεταβολή της τάσης και μεταβολή της έντασης κατά  $dV$  και  $dI$  αντίστοιχα. Η ισχύς στο καινούργιο σημείο λειτουργίας (ΣΛ), θα είναι τώρα:

$$dP = P' - P = V * dI + I * dV \quad (3.19)$$

Στο ΣΜΙ, η κλίση της καμπύλης ισχύος της ΦΒ συστοιχίας μηδενίζεται. Δηλαδή ισχύει:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Leftrightarrow V * \frac{dI}{dV} + I = 0 \Leftrightarrow \frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \quad (3.20)$$

όπου ο πρώτος όρος εκφράζει την δυναμική αντίσταση της πηγής  $Z_d$ , ενώ ο δεύτερος την στατική αντίσταση  $Z_s$ .

Με βάση αυτή την εξίσωση υπάρχουν δυο διαφορετικοί τρόποι για την εύρεση του ΣΜΙ:

- A) Μία διαταραχή ρεύματος εισάγεται περιοδικά στην φωτοβολταϊκή πηγή ενώ μετρούνται η δυναμική αντίσταση αυτής  $Z_d$  και η στατική αντίσταση  $Z_s$ . Η τάση λειτουργίας αυξάνεται ή μειώνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η εξίσωση του σημείου μέγιστης ισχύος, δηλαδή  $Z_s = -Z_d$ .
- B) Σύμφωνα με μια δεύτερη μέθοδο ελέγχου, η τάση αυξάνεται όσο ισχύει η συνθήκη  $(dP/dV) \geq 0$ , που συνεπάγεται και ταυτόχρονη αύξηση της ισχύος. Σε αντίθετη περίπτωση η τάση μειώνεται, ενώ όταν ο ρυθμός μεταβολής είναι πολύ κοντά στο μηδέν, η τάση σταθεροποιείται.

Το λογικό κύκλωμα ελέγχου μετρά την τάση και την ένταση εξόδου της ΦΒ συστοιχίας, η οποία βέβαια εξαρτάται κάθε στιγμή από την ακτινοβολία που προσπίπτει, τη θερμοκρασία της ΦΒ συστοιχίας και φυσικά από την αντίσταση που συναντά η ΦΒ συστοιχίας στα άκρα της. Εφαρμόζοντας μία από τις παραπάνω μεθόδους, στέλνει σήμα στον ψαλιδιστή υποβιβασμού-ανύψωσης, να ανυψώσει ή να μειώσει την τάση, μέχρι να εντοπιστεί το ΣΜΙ. Ανάλογα με την περίπτωση λοιπόν, το συγκεκριμένο κύκλωμα λειτουργεί είτε ως ψαλιδιστής ανύψωσης είτε ως ψαλιδιστής υποβιβασμού τάσης.

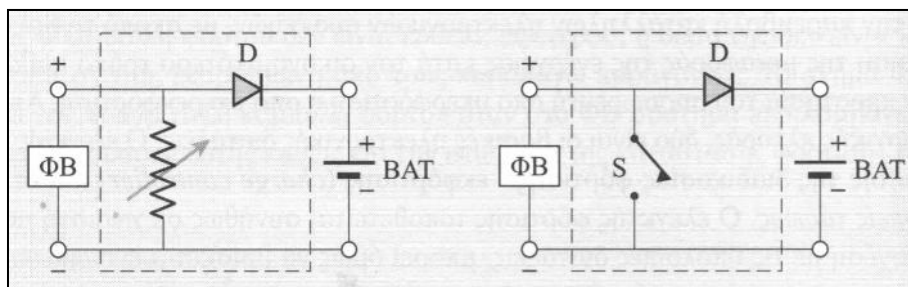
### **3.2.3.3 Ο ελεγκτής φόρτισης ηλεκτρικών συσσωρευτών**

Στην πιο περιορισμένη του μορφή, ο ελεγκτής φόρτισης, εποπτεύει τη διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης, μέσω μετρήσεων της πολικής τάσης του συσσωρευτή, ώστε να τον απομονώνει, αφενός από το σύστημα παραγωγής της ενέργειας, στην περίπτωση της υπερφόρτισης και αφετέρου από το σύστημα κατανάλωσης, στην περίπτωση της υπερεκφόρτισης. Και στις δύο περιπτώσεις, η διακοπή αυτή προκαλείται όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή ξεπεράσει, προς τα άνω και αντίστοιχα προς τα κάτω, ορισμένα όρια τάσης (setpoints), όπου ενεργοποιούνται οι ηλεκτρικοί διακόπτες.

Μια μονάδα ελεγκτή φόρτισης, περιλαμβάνει σύνολο ολοκληρωμένων συστημάτων είτε μικροελεγκτές (microcontrollers), που ελέγχουν ηλεκτρικούς διακόπτες, είτε ηλεκτρομηχανικούς (relay), είτε ηλεκτρονικούς ισχύος (MOSFET, TRIAC κ.α). Σε κάθε περίπτωση, στο κύκλωμα παρεμβάλλεται μια δίοδος, για την προστασία του συστήματος αποθήκευσης από εκφόρτιση, μέσω των κυκλωμάτων της διάταξης ή του υπόλοιπου συστήματος. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις ελεγκτών, αυτή που αφορά μόνο ΦΒ συστήματα και εκείνη που φορά, οποιαδήποτε πηγή ηλεκτρική ενέργειας (ΦΒ, ΑΓ, Η/Ζ).

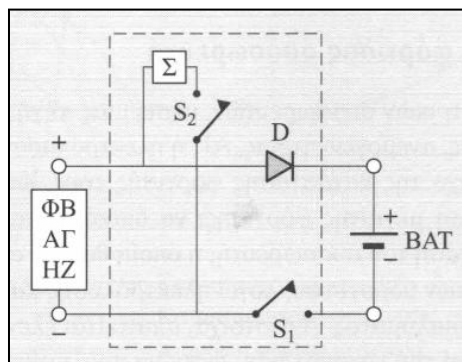
### Ελεγκτής φόρτισης ΦΒ συστήματος :

Στην ειδική περίπτωση ενός ΦΒ συστήματος, το οποίο χαρακτηρίζεται ως πηγή σταθερού ρεύματος, χρησιμοποιούνται διατάξεις, των οποίων τα τυπικά διαγράμματα δείχνονται στο παρακάτω σχήμα. Χαρακτηριστικό αυτού του ρυθμιστή είναι ότι το ελεγχόμενο στοιχείο είναι συνδεδεμένο παράλληλα με τη ΦΒ συστοιχία, με δυνατότητα να λειτουργεί, είτε μεταβαλλόμενο γραμμικά, ανάλογα με τη μέγιστη φόρτιση, είτε ως διακόπτης ON/OFF. Στην περίπτωση του παράλληλου ελεγκτή (shunt controller), όταν επιτευχθεί η μέγιστη φόρτιση (όριο τάσης - setpoint), το ελεγχόμενο στοιχείο βραχυκυκλώνει το τη ΦΒ συστοιχία, δίχως να προκαλείται καμία απολύτως βλάβη σε αυτή. Έτσι, απομονώνεται το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα αποθήκευσης της.



Σχήμα 3.32: τυπικά διαγράμματα παράλληλου ελεγκτής φόρτισης με γραμμικό (α) και διακοπτικό (β) στοιχείο

### Ελεγκτής φόρτισης υβριδικού συστήματος :



Σχήμα 3.33: διάγραμμα ελεγκτής φόρτισης σειράς με στοιχείο απόδοσης ή απόρριψης περίσσειας ενέργειας

Η βασική αρχή λειτουργίας της διάταξης του σχήματος (3.33), βασίζεται στη χρήση δύο διακοπών Δ1 και Δ2, εκ των οποίων ο πρώτος διακόπτει το ρεύμα από το σύστημα ενέργειας στο σύστημα αποθήκευσης, όταν η τάση φόρτισης φτάσει στο setpoint. Την ίδια στιγμή ενεργοποιείται ο διακόπτης Δ2, ο οποίος εισάγει στην έξοδο του συστήματος ενέργειας, ένα στοιχείο απόδοσης (Σ) της επί πλέον ενέργειας, την οποία δεν έχει τη δυνατότητα να απορροφήσει το σύστημα αποθήκευσης. Το στοιχείο απόδοσης, πρέπει να μπορεί να αποβάλλει εύκολα την αποδιδόμενη σ αυτό ενέργεια, προς το περιβάλλον (ροή ενέργειας με θερμοαγωγή από την ηλεκτρονική διάταξη προς το μεταλλικό ψυκτήρα και από κει προς το περιβάλλον με συναγωγή και ακτινοβολία). Ονομάζεται ελεγκτής σειράς (series controller).

Υπάρχουν διάφορες εκδόσεις αυτού του ρυθμιστή, με διαφορές που εντοπίζονται στο τρόπο που προσεγγίζεται η τελική κατάσταση φόρτισης, από κάθε μία από αυτές. Συνοπτικά, αυτές είναι:

- **Απλός ρυθμιστής φόρτισης σειράς**, με ένα όριο τάσης.
- **Ρυθμιστής φόρτιση σειράς δύο βαθμίδων σταθερού ρεύματος**, φτάνοντας στο όριο τάσης, η φόρτιση διατηρείται σε επίπεδα συντήρησης.
- **Ρυθμιστής φόρτισης σειράς δύο βαθμίδων τάσεως**. Επιτρέπει για μικρό χρονικό διάστημα, τη φόρτιση σε τάση λίγο μεγαλύτερη της οριακής (14,5 V με οριακή τάση φόρτισης τα 14 V, σε συσσωρευτή ονομαστικής τάσης 12 V) και στην συνέχεια επιβάλλεται ως άνω όριο η οριακή τάση. Προκαλείται, έτσι, για λίγο ανάδευση του ηλεκτρολύτη και αποφυγή διαστρωμάτωσης (stratification).
- **Ρυθμιστής φόρτισης σειράς ελέγχου διακοπτικού στοιχείου**, με παλμούς, είτε μεταβολής συχνότητας είτε μεταβλητού πλάτους (pulse frequency or width modulation).
- **Γραμμικός ρυθμιστής φόρτισης σειράς σταθερής τάσης**, κατά τη φόρτιση προσαρμόζεται συνεχώς η ισοδύναμη αντίσταση του ηλεκτρικού στοιχείου σε σειρά, ώστε η τάση φόρτισης να παραμένει σταθερή.

Οι παραπάνω διατάξεις ελεγκτών φόρτισης, συμπληρώνονται από παρόμοια διάταξη ελέγχου εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης της ενέργειας, με σκοπό την προστασία του συσσωρευτή από υπερεκφόρτιση (overdischarging). Διακόπτει το κύκλωμα παροχής ενέργειας από το συσσωρευτή στην κατανάλωση, όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή μειούμενη, φτάσει ορισμένη τιμή (disconnect setpoint). Π.χ σε ένα σύστημα συσσωρευτών με ονομαστική τάση 24 V, τίθεται ως σημείο αποσύνδεσης, η τάση 22-23 V. Το σύστημα ρυθμίζεται έτσι ώστε να παρουσιάζει χρονική αντοχή 5-10 sec, σε βυθίσεις τάσης που προκαλούνται κατά την είσοδο, στο κύκλωμα κατανάλωση, ενός φορτίου μεγάλης ισχύος.

Τέλος, σε περίπτωση κορεσμού των συσσωρευτών, η επιπλέον ενέργεια, καταναλώνεται σε παθητικό φορτίο (αντίσταση) ή οδηγείται σε βοηθητική διάταξη. Μπορεί επίσης να υποβάλει το συσσωρευτή, περιοδικά (ανά εβδομάδα) και για μερικές ώρες μόνο, σε τάση υπερφόρτισης, ώστε να προλαμβάνεται η διαστρωμάτωση του ηλεκτρολύτη. Η λειτουργία του εξασφαλίζει μεγάλη διάρκεια ζωής στους συσσωρευτές, η οποία μπορεί να ξεπεράσει και τα 10 χρόνια, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργία (θερμοκρασία) και το βάθος εκφόρτισης.

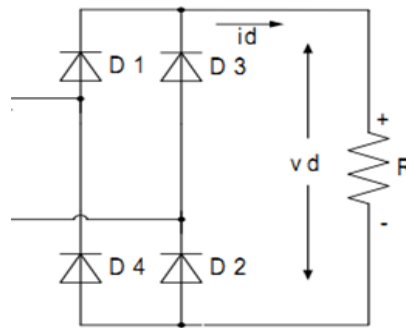
Επισημαίνοντας, πάντως, ότι η αντιστοιχία των ορίων των τάσεων διακοπής φόρτισης-εκφόρτισης με την κατάσταση φόρτισης του, μια δεδομένη χρονική στιγμή, εξαρτάται από τη θερμοκρασία του και από τους κύκλους λειτουργίας του συσσωρευτή, μέχρι εκείνη τη στιγμή. Έτσι, η πραγματική κατάσταση φόρτισης, μπορεί να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας έξυπνα ηλεκτρονικά συστήματα, με βάση τη θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη και εξισώσεις ή πίνακες τιμών, που περιγράφουν τις εξαρτίσεις που αναφέρθηκαν (Temperature compensated voltage limits systems. Fuzzy logics systems)

#### **3.2.3.4 Ο μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσεως σε συνεχή**

Ο ανορθωτής χρησιμοποιείται για την μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή. Η μονάδα αυτή στα ΦΒ συστήματα χρησιμοποιείται για την ανόρθωση του εναλλασσόμενου σήματος που μπορεί να προέρχεται από μια ανεμογεννήτρια (ΑΓ) ή ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/Z) ώστε να εξασφαλίζεται απευθείας τροφοδοσία των φορτίων ή και με την βοήθεια του ελεγκτή φόρτισης, η φόρτιση των ηλεκτρικών συσσωρευτών. Υπάρχουν δύο ειδών ανορθωτών:

**Ανορθωτής μη ελεγχόμενης φάσης :**

Είναι ο ανορθωτής που μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή, χρησιμοποιώντας διόδους. Λόγω του ότι οι διόδους είναι ημιαγωγοί των οποίων η έναυση τους δεν μπορεί να ελεγχθεί, καθώς λειτουργούν από τη φύση τους στο πρώτο τεταρτημόριο, δηλαδή η τάση και το ρεύμα έχουν καθορισμένη πολικότητα από την πλευρά του συνεχούς ρεύματος κατά συνέπεια και η τάση εξόδου αυτής της ανορθωτικής διάταξης δεν μπορεί να ελέγχεται. Δηλαδή, όταν η τάση εισόδου του ανορθωτή παρουσιάζει κάποιες αυξομειώσεις τότε και η συνεχή τάση εξόδου με την σειρά της παρουσιάζει αυξομειώσεις. Για τον λόγο αυτό η ανόρθωση αυτή ονομάζονται μη ελεγχόμενη και χρησιμοποιείται, σε εφαρμογές όπου δεν υπάρχει ανάγκη σταθεροποίησης της συνεχούς τάσης εξόδου.



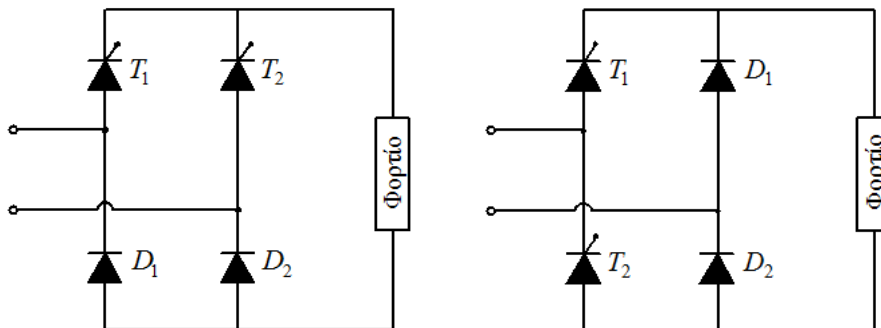
Σχήμα 3.34: διάγραμμα μονοφασικής μη ελεγχόμενης ανόρθωσης σε συνδεσμολογία γέφυρας

**Ανορθωτής ελεγχόμενης φάσης :**

Σκοπός της διάταξης αυτής, είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου, σε ελεγχόμενο μέγεθος συνεχή τάση, μεταβάλλοντας τη γωνία αγωγής των διακοπτικών στοιχείων. Ο ανορθωτής ελεγχόμενης φάσης διακρίνεται σε:

- Ημieleγχόμενος ανορθωτής :

Χρησιμοποιεί 2 διόδους και 2 thyristor. Μπορεί να λειτουργήσει σε δύο τεταρτημόρια, δηλαδή, στον ημieleγχόμενο ανορθωτή μπορεί να αντιστραφεί η πολικότητα της τάσης, όχι όμως και η φορά του ρεύματος, καθώς οι διόδους και τα thyristor είναι μονόπορα στοιχεία.

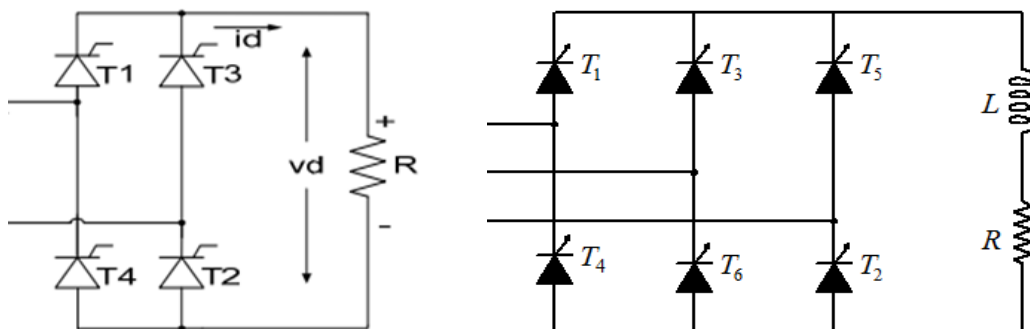


Σχήμα 3.35: διάγραμμα ημieleγχόμενης ανόρθωσης σε συνδεσμολογία (α) συμμετρικής και (β) ασύμμετρης γέφυρας



- Πλήρως ελεγχόμενος ανορθωτής :

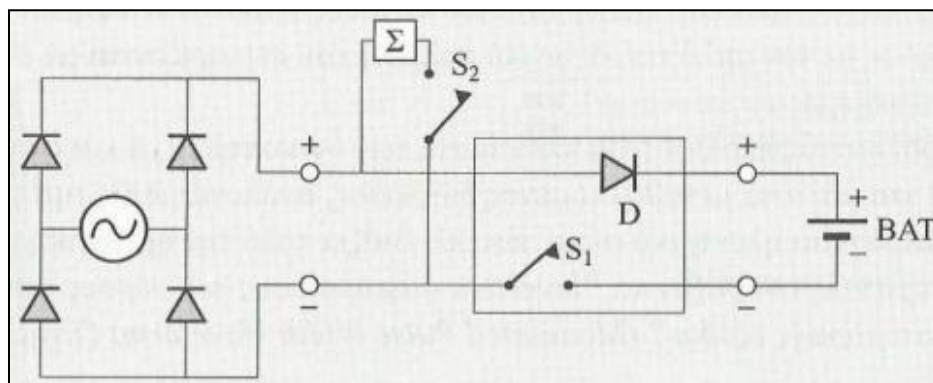
Χρησιμοποιεί 4 θυρίστορ. Σε αντίθεση με τον ημιελεγχόμενο, ο πλήρως ελεγχόμενος ανορθωτής μπορεί να λειτουργήσει και στα τέσσερα τεταρτημόρια. Πράγματι στην κατάλληλη χρονική στιγμή, η έναυση του ενός θυρίστορ, προκαλεί την ανάστροφη πόλωση και τη σβέση του προηγούμενου, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται η χρήση κυκλωμάτων έναυσης και σβέσης.



Σχήμα 3.36: πλήρως ελεγχόμενης ανόρθωσης σε συνδεσμολογία (α) μονοφασικής και (β) τριφασικής γέφυρας

Σε όλους τους ανορθωτές ελεγχόμενης φάσης, η μεταγωγή (commutation), δηλαδή η μετάβαση του ρεύματος από το ένα θυρίστορ στο άλλο (ή από το θυρίστορ σε δίοδο στις ημιελεγχόμενες διατάξεις) επιτυγχάνεται πολύ εύκολα με τη λεγόμενη φυσική μεταγωγή (line commutation), οφειλόμενη στην εναλλασσόμενη τάση του δικτύου. Η ιδιότητα αυτή της φυσικής μεταγωγής κάνει τους συγκεκριμένους (phase controlled converters), ιδιαίτερα απλούς και λιγότερο δαπανηρούς. Λόγω δε των σχετικά μικρών απωλειών των διακοπτικών στοιχείων, η απόδοση τους είναι αρκετά μεγάλη της τάξης του 90% και άνω.

Στην διάταξη ενός ΦΒ συστήματος, συνδυάζεται ένα σύστημα ανόρθωσης της παρεχόμενης, από την ενεργειακή πηγή (ΑΓ, Η/Ζ), εναλλασσόμενης ηλεκτρικής τάσης (μονοφασικής ή τριφασικής μορφής), χωρίς να παρεμβάλλεται μετασχηματιστής, με μια διάταξη μετατροπής συνεχούς σε συνεχές ρεύμα (DC-DC), όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Το αριστερό τμήμα του διαγράμματος είναι ένας ανορθωτής με διόδους σε διάταξη γέφυρας, για τη μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή. Το δεξί τμήμα είναι ένας ψαλιδιστής με ελεγκτή φόρτισης σειράς, για τη μετατροπή της συνεχούς τάσεως σε συνεχή, διαφορετικής τιμής. (S1), (S2) διακοπτικά συστήματα, (D) δίοδος αντεπιστροφής και (Σ) ελεγχόμενο στοιχείο στο οποίο αποδίδεται η πλεονάζουσα ενέργεια.



Σχήμα 3.37: διάγραμμα μετατροπέα AC-DC σε σειρά με μετατροπέα DC-DC και ελεγκτή φόρτισης σειράς

### **3.2.3.5 Ο μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη**

Καθώς ο αντιστροφέας τροφοδοτείται από μία πηγή συνεχούς τάσης, επιτρέπει την ρύθμιση των μέσω των τιμών της τάσης εισόδου και όπως εξυπακούεται και τη ρύθμιση της ενεργούς τιμής της τάσης εξόδου. Θεωρώντας μόνο τις θεμελιώδεις συνιστώσες τάσης και ρεύματος, στην έξοδο του αντιστροφέα, σε σχέση με τον χρόνο, κατά τη διάρκεια μίας περιόδου μπορεί να λειτουργεί και στα τέσσερα τεταρτημόρια. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί, μόνο εάν ο αντιστροφέας αποτελείται από αμφίδρομους ηλεκτρονικούς διακόπτες (π.χ. bipolar transistor ισχύος, MOSFET, θυρίστορ κ.λ.π.), τα οποία εξασφαλίζουν και τις δύο πολικότητες της τάσης ανεξάρτητα από τη φορά του ρεύματος.

#### **I. Η ταξινόμηση του αντιστροφέα βάση της αρχής λειτουργίας του**

Η ταξινόμηση βάση της αρχής λειτουργίας του αντιστροφέα, μπορεί να γίνει:

A) Ανάλογα με τη τοπολογία σύνδεση τους :

**A.1) Αντιστροφέας ημιγέφυρας**

**A.2) Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας**

B) Ανάλογα με την πηγή τροφοδοσίας τους :

Είναι δυνατό να αλλάξει η μορφή της πηγής τροφοδοσίας, χρησιμοποιώντας παθητικά στοιχεία, έτσι ο αντιστροφέας διακρίνεται σε:

**B.1) Αντιστροφέας συνεχούς έντασης (CSI, Current Source Inverter) :**

Όταν ως είσοδος του λαμβάνεται μια πηγή έντασης, ενώ έχει ένα πηνίο σε σειρά με την πηγή.

**B.2) Αντιστροφέας συνεχούς τάσης (VSI, Voltage Source Inverter) :**

Όταν ως είσοδος του λαμβάνεται μια πηγή τάσης, ενώ έχει ένα πυκνωτή παράλληλα συνδεδεμένο με την πηγή. Ο έλεγχος του αντιστροφέα συνεχούς τάσης, επιτυγχάνεται με τις παρακάτω τεχνικές:

- διαμόρφωση τετραγωνικής κυματομορφής :

Για τον έλεγχο του πλάτους της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου, ελέγχεται το πλάτος της συνεχούς τάσης εισόδου. Έτσι, ο αντιστροφέας πρέπει να ελέγξει μόνο τη συχνότητα της τάσης εξόδου. Η εναλλασσόμενη τάση εξόδου έχει μια κυματομορφή παρόμοια με τετραγωνική.

- διαμόρφωση του εύρους των παλμών :

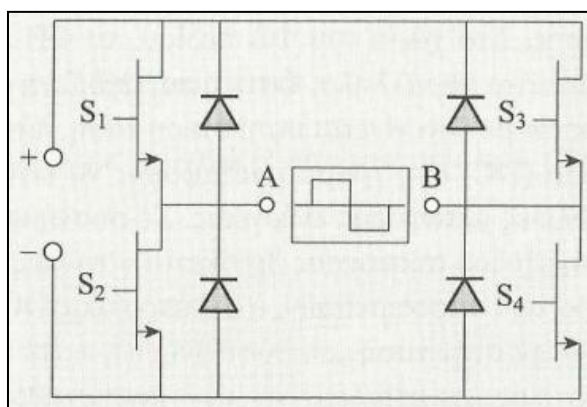
Ο αντιστροφέας στην έξοδο του, ελέγχει το πλάτος και την συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης, μέσω της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών των ηλεκτρονικών διακοπών του αντιστροφέα.

- διαμόρφωση απαλοιφή τάσης :

Σε αυτούς συνδυάζονται τα χαρακτηριστικά των δύο προηγούμενων αντιστροφέων. Εδώ, είναι δυνατός ο έλεγχος του πλάτους και της συχνότητας της τάσης εξόδου του μετατροπέα, αν και η

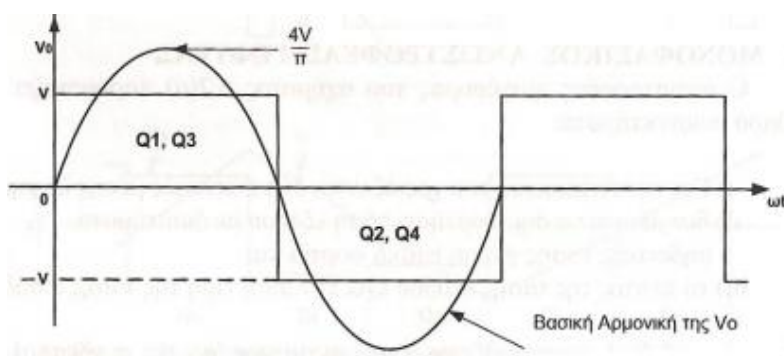
είσοδος του αντιστροφέα είναι μια σταθερή συνεχή τάση και στους ηλεκτρονικούς διακόπτες του μετατροπέα δεν επιβάλλεται διαμόρφωση PWM (η κυματομορφή της τάσης εξόδου είναι σχεδόν τετραγωνική). Αυτή η τεχνική λειτουργεί μόνο σε μονοφασικό αντιστροφέα.

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα. Αποτελείται από ηλεκτρονικούς διακόπτες (ημιαγωγά στοιχεία ισχύος), η συνδυασμένη λειτουργία των οποίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας σειράς τετραγωνικών παλμών διαδοχικά ορθών και αντεστραμμένων (inversion).



Σχήμα 3.38: διάγραμμα μετατροπέα DC-AC

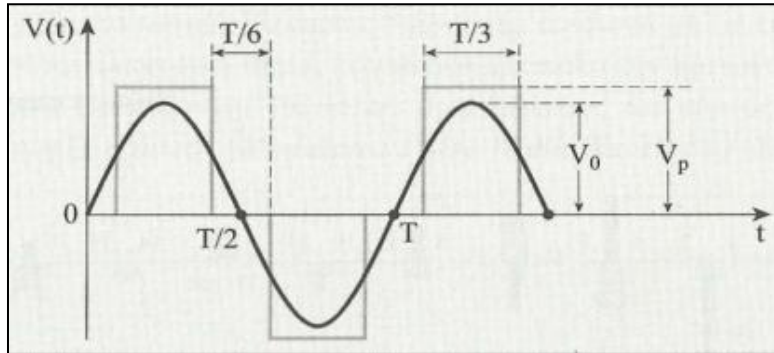
Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (DC-AC conversion), επιτυγχάνεται με κλείσιμο-άνοιγμα των διακοπτικών στοιχείων S1, S2, S3, S4, ανά δύο, χιαστί (1, 4 και 2, 3). Όσο τα S1, S4 είναι αγωγή και τα S2, S3 σε αποκοπή, τα σημεία A και B έχουν πρόσημα + και - αντίστοιχα. Όταν συμβαίνει το αντίστροφο, τα A και B έχουν πρόσημα - και + αντίστοιχα. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται η εναλλασσόμενη τετραγωνική τάση (κέντρο του διαγράμματος). Επίσης σε κάθε διακοπτικό στοιχείο, προστίθεται από μία δίοδος, ώστε να αποκόπτεται η επιστρεφόμενη ισχύς από μη ωμικά φορτία κατανάλωσης.



Σχήμα 3.39: τάση εξόδου μονοφασικού αντιστροφέα για τετραγωνικό παλμό εισόδου

Μια βελτιωμένη έκδοση αντιστροφέων, αποτελεί εκείνος του οποίου η τάση εξόδου παρουσιάζεται με τη μορφή του διαμορφωμένου ημίτονου (modified sine inverter), όπως εμφανίζεται στο επόμενο σχήμα. Με σωστή ρύθμιση των χρόνων έναυσης-σβέσης των διακοπών, επιτυγχάνουμε μικρή τροποποίηση της κυματομορφής εξόδου του, η οποία χαρακτηρίζεται από ότι ο αρνητικός τετραγωνικός παλμός είναι

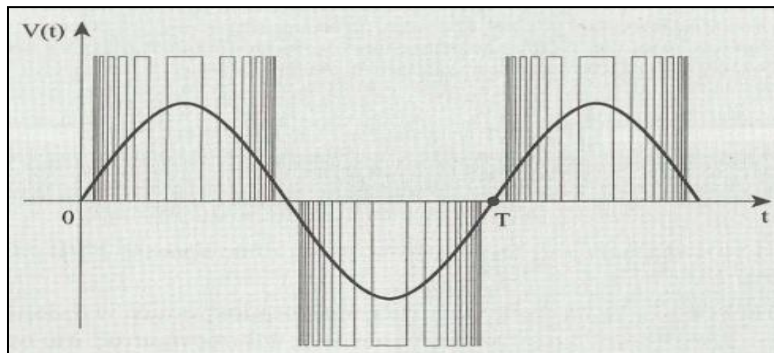
μετατοπισμένους χρονικά, σε σχέση με τον θετικό, κατά  $T/6$  της περιόδου της συνολικής κυματομορφής. Το χρονικό εύρος των τετραγωνικών τμημάτων είναι  $T/3$ .



**Σχήμα 3.40:** μορφή του διαμορφωμένου ημιτόνου σε σύγκριση με το καθαρό ημίτονο  $V_p$  πλάτος τετραγωνικού παλμού,  $V_0$  πλάτος αντίστοιχου θεμελιώδους ημιτονικής κυματομορφής

Το πλεονέκτημα αυτής της διαμορφωμένης τετραγωνικής κυματομορφής, είναι ότι περιορίζεται το μέγεθος των πλατών των ανωτέρων αρμονικών του διαμορφωμένου σήματος και άρα περιορίζεται δραστικά η παραμόρφωση σήματος, σε σχέση με τον απλό τετραγωνικό παλμό. Η περίπτωση με μετατόπιση  $\tau = T/6$  μεταξύ των αντεστραμμένων παλμών εμφανίζει μικρότερη παραμόρφωση, που επιβάλουν οι ανώτερες αρμονικές στο σήμα της θεμελιώδους.

Σε μια επόμενη έκδοση, επιβάλλοντας περισσότερα κλεισίματα των διακοπών 1, 4 και στη συνέχεια των 2, 3 και μάλιστα μεταβαλλόμενης διάρκειας, δηλαδή διαμόρφωση του εύρους των παλμών, ανάλογα με τις τιμές ενός ημιτόνου, παράγεται ηλεκτρικό σήμα, το οποίο πλησιάζει πολύ την ημιτονική μορφή, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



**Σχήμα 3.41:** κυματομορφή εξόδου μετατροπέα DC-AC διαμόρφωσης εύρους παλμών

Η κυματομορφή της τάσης εξόδου  $V_0$ , δίνεται με χρήση των σειρών Fourier, από την σχέση:

$$V_0 = \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} * \sin\left(\frac{n\tau}{2}\right) * \sin(n\omega t) \quad (3.21)$$

όπου,  $n$  ο αριθμός της  $n$ -οστής αρμονικής της τάσης εξόδου,  $(4V/\pi)$  η βασική αρμονική της τάσης εξόδου και  $\tau$  το πλάτος τετραγωνικού παλμού έναυσης.

Η τάση εξόδου είναι μια κυματομορφή, η οποία αποτελείται από την θεμελιώδη αρμονική συνιστώσα και από τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες, οι οποίες πρέπει να εξαλειφθούν ή να μειωθούν έτσι ώστε να παρουσιάζει συντελεστή ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD, Total Harmonic Distortion) μικρότερο του 5%. Η τιμή αυτή δίνεται στις προδιαγραφές του κατασκευαστή του αντιστροφέα. Η τιμή του THD, ο οποίος χαρακτηρίζει την ποιότητα ενός εναλλασσόμενου μη ημιτονοειδούς μορφής σήματος, δίνεται από την σχέση:

$$THD\% = \frac{1}{V_{0,1}} \left[ \sum_{n=3,5}^{\infty} (V_{0,n})^2 \right]^{1/2} * 100 \quad (3.22)$$

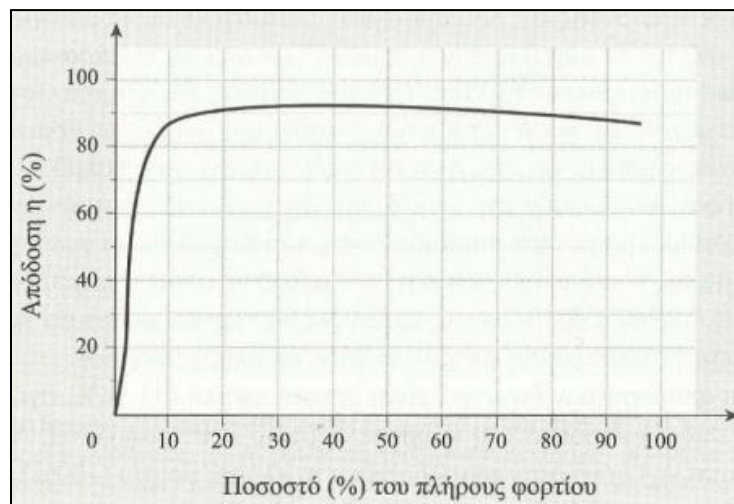
όπου,  $V_{0,1}$  το πλάτος της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου και  $V_{0,n}$  το πλάτος της n-οστής αρμονικής.

Για καθαρά ημιτονοειδή σήματα τάσης ή ρεύματος, ο  $THD\% = 0\%$ . Καθώς η λειτουργία κάθε αντιστροφέα συνοδεύεται, κατά περίπτωση, από παραγωγή μεγάλου πλήθους αρμονικών υψηλών συχνοτήτων (κυρίως με τον απλό τετραγωνικό παλμό), αυτές περιορίζονται με ηλεκτρονικά φίλτρα.

Ο βαθμός απόδοσης αντανακλά το ποσό της ισχύος που χάνεται ως απώλειες στον αντιστροφέα και αποτελεί ίσως το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του. Οι κυριότερες απώλειες εμφανίζονται στους ηλεκτρονικούς διακόπτες (ημιαγωγά στοιχεία ισχύος), ενώ άλλες πηγές απωλειών αποτελούν οι ωμικές αντιστάσεις των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, οι απώλειες αερισμού κτλ. Ο βαθμός απόδοσης σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης, ορίζεται ως το πηλίκο της εναλλασσόμενης ισχύος εξόδου  $P_{AC}$  προς την συνεχή ισχύ εισόδου  $P_{DC}$ , δηλαδή:

$$\eta_{inv} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (3.23)$$

Γενικά, η απόδοση των αντιστροφέων είναι υψηλή 93-96%, εξαρτώμενη από το ποσοστό του πλήρους φορτίου που τροφοδοτεί. Απαιτείται υψηλή απόδοση, όχι μόνο σε πλήρες φορτίο (100%), αλλά και στη περίπτωση που αυτό είναι μειωμένο. Συγκεκριμένα, κύριο απαιτούμενο χαρακτηριστικό ενός αντιστροφέα είναι η υψηλή απόδοση (> 90%) ακόμα κι όταν το φορτίο είναι μόνο 10% του πλήρους.



**Σχήμα 3.42:** μεταβολή της απόδοσης μετατροπέα DC-AC συναρτήσει του πλήρους φορτίου που τροφοδοτεί

## **II. Η ταξινόμηση του αντιστροφέα βάση του φωτοβολταϊκού συστήματος**

Ανάλογα με το είδος του ΦΒ συστήματος, ο αντιστροφέας διακρίνεται σε δύο κατηγορίες:

### **A) Αντιστροφέας ΦΒ συστήματος εκτός δικτύου :**

Λειτουργεί ανεξάρτητα από το ηλεκτρικό δίκτυο και καθίσταται ικανός να μετατρέπει τη συνεχή μορφή της ενέργειας σε εναλλασσόμενη, προσαρμόζοντάς την τάση και τη συχνότητα, στα αντίστοιχα επίπεδα των καταναλώσεων της εφαρμογής.

### **B) Αντιστροφέας ΦΒ συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο :**

Λειτουργεί σε συνδυασμό με το ηλεκτρικό δίκτυο και καθίσταται ικανός, να μετατρέπει τη συνεχή μορφή της ενέργειας σε εναλλασσόμενη, προσαρμόζοντάς την τάση και τη συχνότητα, στα αντίστοιχα επίπεδα του ηλεκτρικού δικτύου. Επίσης διαχωρίζονται ανάλογα με το είδος της τάσης που αποδίδουν:

- Μονοφασικός αντιστροφέας, με τυπικά μεγέθη ισχύος έως 10-11 kW.
- Τριφασικός αντιστροφέας, με μεγέθη ισχύος από 6-7 kW έως και 1 MW.

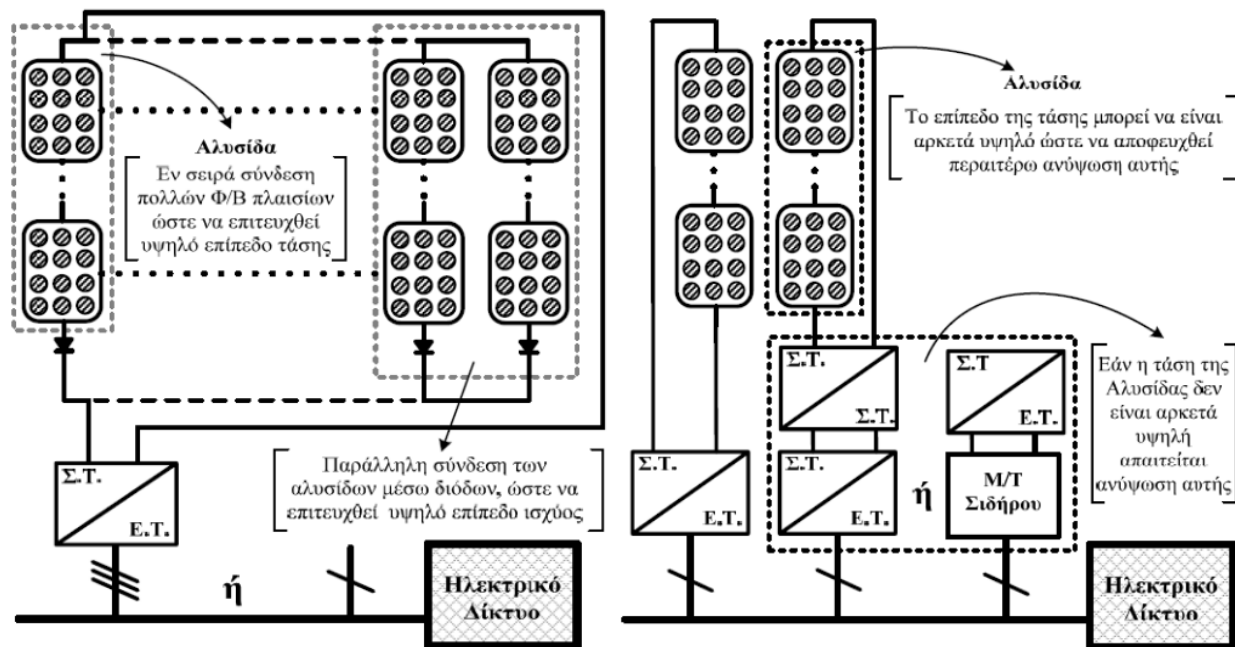
Τονίζεται ότι η εταιρία παροχής ενέργεια στην Ελλάδα (ΔΕΗ), επιβάλλει τη σύνδεση των αντιστροφέων σε τριφασικό σύστημα για εγκαταστάσεις άνω των 5 kW, ενώ εγκαταστάσεις άνω των 100 kW συνδέονται υποχρεωτικά στο δίκτυο Μέσης Τάσης (MT) της.

Επιπλέον, ο αντιστροφέας ανάλογα της τεχνολογίας διασύνδεσης των ΦΒ συλλεκτών σε αυτόν, διακρίνεται στις παρακάτω κατηγορίες:

### **Κεντροποιημένος Αντιστροφέας (centralized inverter) :**

Αρχικά, οι ΦΒ συλλέκτες συνδέονται σε σειρά σχηματίζοντας αλυσίδες (strings) και παράγουν υψηλή τάση ώστε να μην χρειάζεται κάποιο περαιτέρω στάδιο ανύψωσης της τάσης. Στη συνέχεια, οι αλυσίδες συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα προς, επίτευξη υψηλών επιπέδων ισχύος. Ο αντιστροφέας αυτός, συνοδεύεται από αρκετά μειονεκτήματα, όπως υψηλή συνεχή τάση των καλωδίων και ενεργειακές απώλειες. Στην περίπτωση που κάποια παράλληλη αλυσίδα σκιαστεί, η τιμή της τάσης που επικρατεί στα άκρα της, υπολείπεται των υπολοίπων.

Για την αποφυγή σκίασης ή θερμικής καταπόνησης, η σύνδεση αλυσίδων πραγματοποιείται μέσω διόδων αντεπιστροφής, επιβαρύνοντας την απόδοση του ΦΒ συστήματος, καθώς και η ύπαρξη ενός κεντρικού ελεγκτή ΣΜΙ, για έλεγχο ανόμοιων ΦΒ συλλεκτών, επιφέρει μειωμένη ενεργειακή παραγωγή. Επιπλέον, σχεδιάζονται κάθε φορά για διαφορετικά επίπεδα ισχύος, γεγονός που επιδρά στο κόστος κατασκευής τους, καθώς δεν είναι εφικτή η μαζική παραγωγή. Επίσης, λόγω ενός μόνο κεντρικού αντιστροφέα, η ολοκληρωτική διακοπή της ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας, είναι αναπόφευκτη σε περιπτώσεις προγραμματισμένης συντήρησης ή βλάβης.



Σχήμα 3.43: α) κεντριοποιημένος αντιστροφέας  
 β) αντιστροφέας στοιχειοσειράς

**Αντιστροφέας στοιχειοσειράς (string inverter) :**

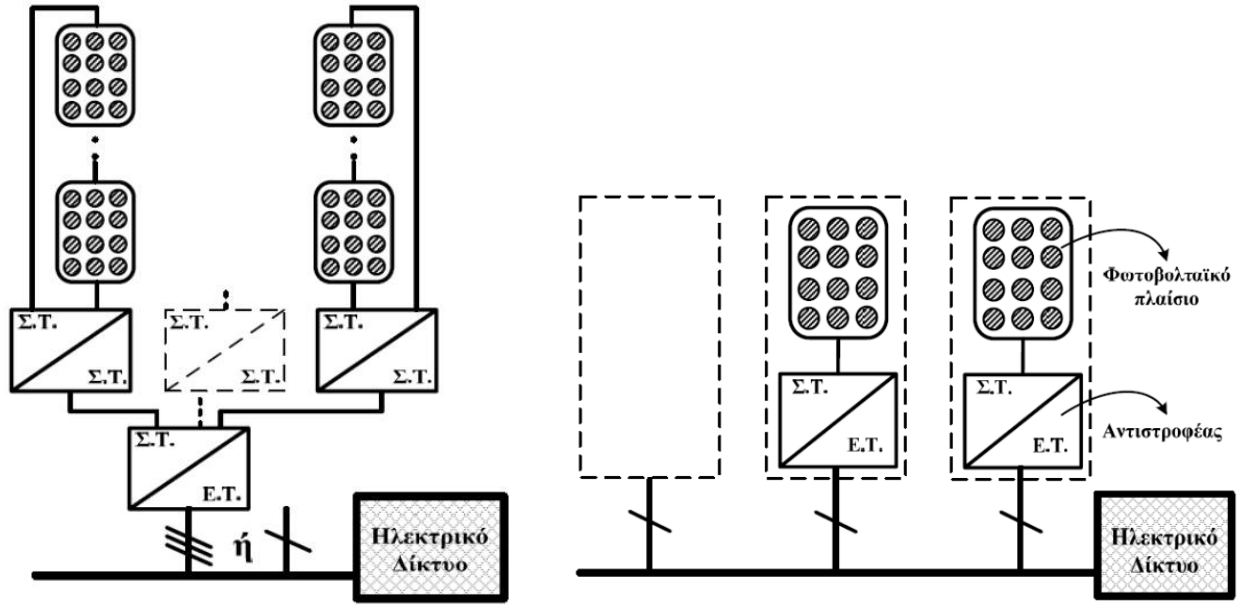
Ο αντιστροφέας στοιχειοσειράς, περιλαμβάνει μόνο μία αλυσίδα ΦΒ συλλεκτών η οποία συνδέεται με αυτόν. Η τάση των ΦΒ συλλεκτών, μπορεί να είναι αρκετά υψηλή, έτσι ώστε να αποφευχθεί το στάδιο ανύψωσης τάσης και να μετατραπεί απευθείας σε εναλλασσόμενη, το οποίο όμως σημαίνει αρκετούς ΦΒ συλλέκτες σε σειρά (16 για τα ευρωπαϊκά ΦΒ συστήματα). Η συνολική τάση ανοιχτού κυκλώματος για 16 ΦΒ συλλέκτες, μπορεί να φτάσει τα 720 V, ενώ η τάση λειτουργίας 450-510 V. Μείωση των ΦΒ συλλεκτών, μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ψαλιδιστή ή μετασχηματιστή συνδεδεμένου στην εναλλασσόμενη πλευρά του αντιστροφέα, για ανύψωση της τάσης.

Στο συγκεκριμένο αντιστροφέα, παρατηρούνται μικρότερες απώλειες (απουσία διόδων και χρήση ξεχωριστού ελεγκτή ΣΜΙ για κάθε αλυσίδα), μεγαλύτερη απόδοση και μειωμένο κόστος εξαιτίας της μαζικής παραγωγής. Σημαντικά μειονεκτήματα αποτελεί, η αρκετά υψηλή τιμή συνεχούς τάσης που εμφανίζεται στα άκρα των αλυσίδων και απαιτεί τη χρήση ακριβού βοηθητικού εξοπλισμού. Επίσης, λόγω της εν σειράς διασύνδεσης των ΦΒ συλλεκτών, εγκυμονεί ο κίνδυνος εμφάνισης του φαινομένου της θερμής κηλίδας σε αυτά, σε περιπτώσεις σκίασης.

**Αντιστροφέας πολλαπλών στοιχειοσειρών (multi-string inverter) :**

Ο αντιστροφέας πολλαπλών στοιχειοσειρών, αποτελεί μία περαιτέρω εξέλιξη του αντιστροφέα στοιχειοσειράς. Περιλαμβάνει τη σύνδεση διαφόρων αλυσίδων, με το δικό τους ψαλιδιστή ανύψωσης τάσης η καθεμιά και στη συνέχεια, με ένα κοινό αντιστροφέα. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της κάθε αλυσίδας ξεχωριστά, ενώ ενδεχόμενη επέκταση του ΦΒ συστήματος, με ένα ορισμένο όριο ισχύος, μπορεί να πραγματοποιηθεί προσθέτοντας μία αλυσίδα με έναν ψαλιδιστή.

Η συγκεκριμένη τοπολογία αποτελεί έναν ευέλικτο σχεδιασμό με υψηλή απόδοση. Η χρησιμοποίηση πολλών ανεξάρτητων αλυσίδων, περιορίζει τον κίνδυνο ολικής διακοπής της ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας, σε περίπτωση που εμφανιστεί βλάβη σε κάποιες από αυτές. Το μειονέκτημα που παρουσιάζεται όμως στην ύπαρξη ενός και μόνο κεντρικού αντιστροφέα, αναιρεί το πλεονέκτημα των ανεξαρτήτων αλυσίδων, στην περίπτωση που ο ίδιος παρουσιάσει βλάβη. Τέλος δύσκολη είναι και η επέκταση της παραγόμενης ισχύος χωρίς αλλαγή του αντιστροφέα.



Σχήμα 3.44: α) αντιστροφέας πολλαπλών στοιχειοσειρών  
β) αντιστροφέας ενσωματωμένος σε ΦΒ συλλέκτη

#### Ενσωματωμένος αντιστροφέας (module integrated inverter) :

Η ενσωμάτωση είναι η ολοκλήρωση του αντιστροφέα και του ΦΒ συλλέκτη σε μία ηλεκτρική διάταξη. Με αυτήν την τοπολογία εξαλείφεται το πρόβλημα σύνδεσης ανόμοιων ΦΒ συλλεκτών καθώς υπάρχει μόνο η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου ΦΒ συλλέκτη. Το επίπεδο ισχύος κάθε μονάδας, περιορίζεται το πολύ στα 300 W, όμως διευκολύνεται η επέκταση του ΦΒ συστήματος λόγω της δομής του, επιτρέποντας την παραγωγή μεγαλύτερων ποσών ηλεκτρικής ενέργειας.

Η συνεχής τάση που επικρατεί στα άκρα της μονάδας, δύσκολα μετατρέπεται απευθείας σε εναλλασσόμενη, σύμφωνη με τις προδιαγραφές του ηλεκτρικού δικτύου, χωρίς τη διαμεσολάβηση ψαλιδιστή ανύψωσης τάσης. Μειονέκτημα αποτελεί η ενσωμάτωση του ψαλιδιστή στο πίσω μέρος της μονάδας, με άμεση συνέπεια στην έκθεση θερμοκρασιών και κλιματικών συνθηκών, που οδηγούν σε μείωση της διάρκειας ζωής τους. Όσον αφορά το κόστος, μπορεί να υπάρχει αύξηση της τιμής της κιλοβατώρας λόγω της περίπλοκης τοπολογίας, όμως ευνοείται η μαζική παραγωγή, το οποίο οδηγεί σε χαμηλό κατασκευαστικό κόστος και χαμηλές τιμές λιανικής πώλησης.

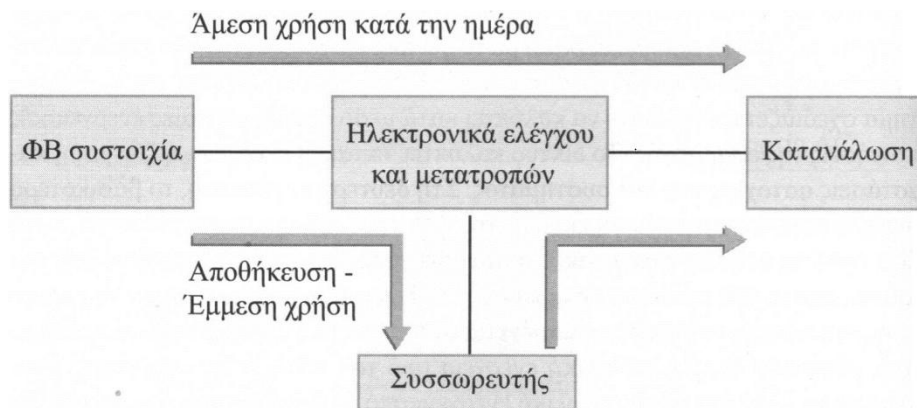


### 3.3 Η μελέτη αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος

Στις περισσότερες περιπτώσεις συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μη συνδεδεμένων στο δίκτυο, όπως το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, απαιτείται αποθήκευση και μετατροπή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, από το σύστημα. Συνεπώς, αρχικά επιβάλλεται η εύρεση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας, με βάση τις ενεργειακές απαιτήσεις για τη κάλυψη της εφαρμογής και τα ηλιακά δεδομένα του γεωγραφικού τόπου της εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Εν συνεχεία, για τον προσδιορισμό των κατάλληλων ηλεκτρικών συσσωρευτών, των ηλεκτρονικών διατάξεων διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας και ίσως όπου ζητηθεί, του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, προκειμένου να βελτιστοποιείται η εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, ώστε να μεγιστοποιείται η αξιοπιστία του αυτόνομου συστήματος.

#### 3.3.1 Η ενεργειακή αποδοτικότητα του φωτοβολταϊκού συστήματος

Κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, μέρος της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στη ΦΒ συστοιχία, μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είτε χρησιμοποιείται για την απευθείας τροφοδοσία των ηλεκτρικών συσκευών της εφαρμογής, οι οποίες αναφέρονται στη συνέχεια, ως καταναλώσεις ή φορτία (άμεση χρήση), είτε αποθηκεύεται σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύκτας ή των περιόδων συννεφιάς (έμμεση χρήση). Οι περιπτώσεις αυτές, αποτυπώνονται παραστατικά στο παρακάτω σχήμα. Επίσης, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, είτε αξιοποιείται ως έχει, δηλαδή ως ενέργεια συνεχούς τάσης, είτε μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη τάση, η οποία εναλλασσόμενη τάση ενδείκνυται, δεδομένης της ευρείας χρήσης των ηλεκτρικών συσκευών με τροφοδοσία 220 VAC.



Σχήμα 3.45: διάγραμμα ροής παραγόμενης ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας σε τυπικό ΦΒ σύστημα

Σε κάθε περίπτωση, η μετατροπή της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια, στην είσοδο του ΦΒ συστήματος και η μεταφορά της, στο χώρο τελικής διαχείρισης για την αξιοποίησής της, στην έξοδο του προς τις καταναλώσεις, συνοδεύεται από ενεργειακές απώλειες. Μέρος της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται, μετατρέπεται σε θερμότητα στη ΦΒ συστοιχία, ενώ μέρος της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από αυτήν, μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια, αυξάνοντας τη θερμοκρασία των καλωδίων, συσσωρευτών και ηλεκτρονικών διατάξεων, κατά τη ροή της μέσω αυτών και αποβαλλόμενη τελικά, προς το περιβάλλον.

**Αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια ΦΒ συστήματος  $E_{\Phi B \Sigma}$  :**

Η ολική ηλεκτρική ενέργεια που αποδίδεται από τη ΦΒ συστοιχία  $E_{array}$ , μέσα σε μια ημέρα, ισούται με το άθροισμα των ενεργειών, που αποδίδουν όλοι οι  $N$  (αριθμός) ΦΒ συλλέκτες, της ΦΒ συστοιχίας. Στη γενική περίπτωση, θεωρείται ότι ένα μέρος της αποδιδόμενης ενέργειας  $E_a$ , αποτελεί ηλεκτρική ενέργεια άμεσης απόδοσης  $E_{a,\alpha}$ , χωρίς να αποταμιευθεί και το υπόλοιπο μέρος, αποτελεί ηλεκτρική ενέργεια έμμεσης απόδοσης  $E_{a,\varepsilon}$ , κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου μιας εφαρμογής, καθώς προηγουμένως αποταμιεύθηκε σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές.

$$E_a = E_{a,\alpha} + E_{a,\varepsilon} \quad (3.24)$$

Στην ολική ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται από τα φορτία της εφαρμογής  $E_L$ , μέσα σε μια ημέρα, ένα μέρος της, αποτελεί ηλεκτρική ενέργεια άμεσης κατανάλωσης  $E_{L,\alpha}$ , χωρίς να αποταμιευθεί και το υπόλοιπο μέρος, αποτελεί ηλεκτρική ενέργεια έμμεσης κατανάλωσης  $E_{L,\varepsilon}$ , καθώς προηγουμένως αποταμιεύθηκε σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές.

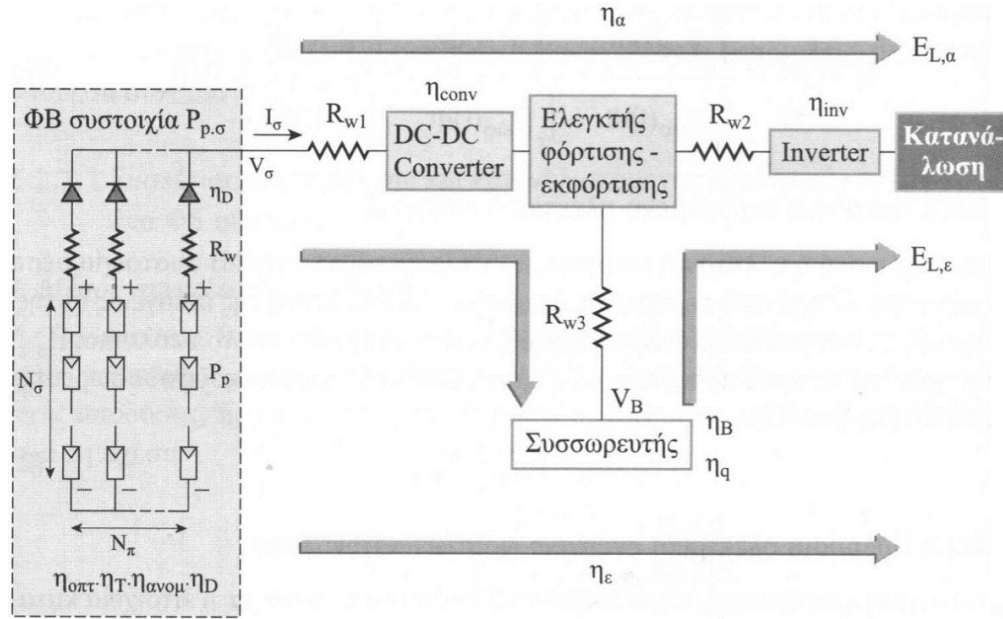
$$E_L = E_{L,\alpha} + E_{L,\varepsilon} = \sum_{i=1}^{n_\alpha} P_{L,\alpha} * t_\alpha + \sum_{i=1}^{n_\varepsilon} P_{L,\varepsilon} * t_\varepsilon \quad (3.25)$$

όπου,  $n_\alpha$  το πλήθος των φορτίων ισχύος  $P_{L,\alpha}$  έκαστο, που τροφοδοτούνται άμεσα από τη ΦΒ συστοιχία,  $n_\varepsilon$  το πλήθος των φορτίων ισχύος  $P_{L,\varepsilon}$  έκαστο, που τροφοδοτούνται έμμεσα από τον συσσωρευτή και  $t_\alpha - t_\varepsilon$  οι χρόνοι λειτουργίας των φορτίων άμεσης και έμμεσης τροφοδοσίας, αντίστοιχα.

Σε κάθε χαρακτηριστικό τμήμα της γραμμής παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, προσδιορίζεται ο βαθμός αξιοποίησης της διαθέσιμης ενέργειας ή της απόδοσης του, αν αφορά σε ενεργειακή μετατροπή. Οι χρησιμοποιούμενοι συντελεστές χαρακτηρίζουν το αίτιο, που προκαλεί την απώλεια ή το τμήμα του συστήματος στο οποίο συμβαίνει. Αναλυτικότερα, καθορίζονται οι συντελεστές απωλειών ενέργειας στα επόμενα τμήματα του ΦΒ συστήματος:

- στη ΦΒ συστοιχία,
- στις γραμμές μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας,
- στις ηλεκτρονικές διατάξεις διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας και
- στον ηλεκτρικό συσσωρευτή (αν το ΦΒ σύστημα περιλαμβάνει)

οι συντελεστές απωλειών ενέργειας στη ΦΒ συστοιχία, προσδιορίζουν την ελάττωση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, σε σχέση με αυτή που προσδιορίζεται από τα χαρακτηριστικά των ΦΒ συλλεκτών σε πρότυπες συνθήκες, εξαιτίας των παραγόντων που αναφέρονται αναλυτικά στην παράγραφο (2.2.2). Στο παρακάτω σχήμα, έχουν σχεδιαστεί τα διάφορα τμήματα ενός τυπικού αυτόνομου ΦΒ συστήματος, καθώς επίσης και οι μέσοι συντελεστές ενεργειακών μετατροπών σε κάθε τμήμα του.



Σχήμα 3.46: διάγραμμα συντελεστών απώλειας ενέργειας και αποδόσεων διατάξεων σε τυπικό ΦΒ σύστημα

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις (3.24) και (3.25) και λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές απωλειών ενέργειας, μπορεί να προκύψει το ενεργειακό ισοζύγιο ημερήσιας αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ΦΒ συστοιχίας  $E_a$  - καταναλωμένης ηλεκτρικής ενέργειας φορτίων  $E_L$ , μέσα από κάθε δρόμο μεταφοράς ενέργειας, άμεσης ή έμμεσης και συνολικά, που οδηγεί στις επόμενες ισότητες.

$$E_{a,\alpha} = \frac{E_{L,\alpha}}{\eta_\alpha} \quad , \quad E_{a,\varepsilon} = \frac{E_{L,\varepsilon}}{\eta_\varepsilon} \quad \text{και} \quad E_a = \frac{E_{L,\alpha}}{\eta_\alpha} + \frac{E_{L,\varepsilon}}{\eta_\varepsilon} = \frac{E_L}{\eta_{\mu\epsilon\tau}} \quad (3.26)$$

όπου,  $\eta_\alpha - \eta_\varepsilon$  ο συντελεστής απωλειών κατά την άμεση και έμμεση μεταφορά ενέργειας αντίστοιχα και  $\eta_{\mu\epsilon\tau}$  ο συντελεστής απωλειών ενέργειας στη συνολική μεταφορά της ενέργειας.

Η ολική ηλεκτρική ενέργεια που αποδίδεται από το ΦΒ σύστημα  $E_{\Phi B \Sigma}$ , προσδιορίζεται από την ανάγκη κάλυψης, της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουν τα φορτία της εφαρμογής  $E_L$ . Επομένως, θέτοντας ίσες αυτές τις δύο τιμές ( $E_{\Phi B \Sigma} = E_L$ ) και αντικαθιστώντας στη σχέση (3.26), προκύπτει η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια ΦΒ συστήματος  $E_{\Phi B \Sigma}$ :

$$E_{\Phi B \Sigma} = E_a * \eta_{\mu\epsilon\tau} \quad (3.27)$$

Η τιμή του συντελεστή απωλειών μεταφοράς ενέργειας  $\eta_{\mu\epsilon\tau}$ , καθορίζεται από το συνολικό αποτέλεσμα των ημερήσιων (μηνιαίων ή ετησίων) όλων των συντελεστών απωλειών και απόδοσης των αντίστοιχων τμημάτων και διατάξεων:

$$\eta_{\mu\epsilon\tau} = \eta_{H\Delta} * \eta_E * \eta_W \quad (3.28)$$

όπου,  $\eta_{H\Delta}$  : ο ολικός συντελεστής απόδοσης των ηλεκτρονικών διατάξεων

$\eta_W$  : ο συντελεστής ενεργειακής απώλειας στις γραμμές μεταφοράς

$\eta_E$  : ο συντελεστής απόδοσης ενέργειας του ηλεκτρικού συσσωρευτή

Γενικά, τυπικές τιμές του συντελεστή απωλειών μεταφοράς ενέργειας βρίσκονται στην περιοχή 0,68 έως 0,98, ανάλογα με τη σύνθεση του ΦΒ συστήματος. Στη συνέχεια αναφέρονται αναλυτικότερα οι εκφράσεις του συντελεστή απωλειών κατά τους δύο δρόμους τροφοδοσίας, δηλαδή της άμεσης και έμμεσης μεταφοράς ενέργειας.

➤ Συντελεστής απωλειών άμεσης μεταφοράς ενέργειας  $\eta_\alpha$  :

Αφορά το τμήμα της ΦΒ γεννήτριας από την έξοδο της ΦΒ συστοιχίας μέχρι την έξοδο του αντιστροφέα. Καθορίζεται από:

- Βαθμός απόδοσης ψαλιδιστή  $n_{conv}$  :

Η απόδοση των σύγχρονων ψαλιδιστών κυμαίνεται μεταξύ 87% και 93%. Τυπική τιμή για τις εφαρμογές,  $n_{conv} \approx 90\%$ . Συνοδεύεται συνήθως, από ελεγκτή ΣΜΙ. Στην περίπτωση ΦΒ συστήματος χωρίς διάταξη παρακολούθησης ΣΜΙ, η απώλεια ενέργειας ορισμένης χρονικής στιγμής, λόγω απόκλισης του σημείου λειτουργίας (ΣΛ) από το ΣΜΙ, εκφράζεται με ένα συντελεστή απώλειας  $\eta_{NIT}$  (Non Ideal maximum point tracking), η τιμή του οποίου, σε ορισμένες περιπτώσεις όπου οι απώλειες είναι αυξημένες, μπορεί να γίνει μικρότερη του 0,8. Παρουσία ελεγκτή ΣΜΙ ισούται με  $\eta_{NIT} = 1$ .

- Συντελεστής απωλειών καλωδιώσεων γραμμών μεταφοράς  $\eta_W$  :

Ο συντελεστής προσδιορίζεται με βάση τις απώλειες στις αντιστάσεις  $R_{w1}$ ,  $R_{w2}$  και  $R_{w3}$ , των γραμμών μεταφοράς. Θεωρούνται συνολικές απώλειες σε όλη τη διαδρομή του ρεύματος, κατά τους δύο δρόμους τροφοδοσίας. Σε κάθε περίπτωση, οι διαστάσεις των καλωδίων επιλέγονται έτσι ώστε οι απώλειες να μην υπερβαίνουν το 2-3%. Θεωρείται λοιπόν, ως τυπική τιμή του συντελεστή απωλειών Joule, σε κάθε συνολική γραμμή μεταφοράς την  $\eta_W = 0,98$ .

- Βαθμός απόδοσης αντιστροφέα  $n_{inv}$  :

Οι διατάξεις σύγχρονης τεχνολογίας χαρακτηρίζονται από υψηλό συντελεστή  $\sim 96\%$ . Η απόδοση του εξαρτάται από το ποσοστό του φορτίου που καλύπτει κάθε στιγμή. Η απαίτηση από έναν αντιστροφέα είναι να αποδίδει το ίδιο καλά, τόσο σε μικρό ποσοστό φορτίου, όσο και σε πλήρες φορτίο (π.χ. απόδοση 90% σε 10% του φορτίου, 96% σε 80-100% του φορτίου). Τυπική τιμή για τις εφαρμογές  $n_{inv} = 94\%$ .

Αναλυτική έκφραση για το συντελεστή απωλειών  $\eta_\alpha$ :

$$\eta_\alpha = \eta_W * n_{conv} * \eta_{NIT} * n_{inv} \quad (3.29)$$

➤ Συντελεστής απωλειών έμμεσης μεταφοράς ενέργειας  $\eta_\epsilon$  :

Αφορά το τμήμα του ΦΒ συστήματος από την έξοδο της ΦΒ συστοιχίας μέχρι την έξοδο του αντιστροφέα, διαμέσου του ηλεκτρικού συσσωρευτή. Ο συντελεστής έμμεσης μεταφοράς, εξαρτάται από τον συντελεστή άμεσης μεταφοράς  $\eta_\alpha$  και επιπλέον από:

- Συντελεστής απωλειών διόδου αντεπιστροφής  $\eta_D$ :

Η κατανάλωση ενέργειας στη δίοδο αντεπιστροφής ( $\Delta A$ ) στον επιτηρητή φόρτισης. Τυπική τιμή συντελεστή  $\eta_D \approx 0,99$ .

- Συντελεστής απόδοσης ηλεκτρικού συσσωρευτή  $n_E$ :

Η απώλεια ενέργειας κατά τη φόρτιση και στη συνέχεια, εκφόρτιση των ηλεκτρικών συσσωρευτών. Για τη συνολική φάση φόρτισης - εκφόρτισης (κύκλος λειτουργίας), εκφράζεται με το συντελεστή απόδοσης συσσωρευτή, με τυπική τιμή  $n_E = 0,85$ .

- Συντελεστής απωλειών καλωδιώσεων γραμμών μεταφοράς  $\eta_W$ :

Ο συντελεστής προσδιορίζεται με βάση τις απώλειες στην αντίσταση  $R_{w3}$ , της γραμμής μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τον ελεγκτή φόρτισης, μέχρι τον χώρο του συσσωρευτή. Τυπική τιμή του συντελεστή,  $\eta_W = 0,98$ .

Αναλυτική έκφραση για το συντελεστή απωλειών  $\eta_\varepsilon$ :

$$\eta_\varepsilon = \eta_\alpha * \eta_D * n_E * \eta_W \quad (3.30)$$

#### Βαθμός απόδοσης ΦΒ συστήματος $\eta_{\Phi B \Sigma}$ :

Σύμφωνα με τη γενικότερη έννοια του βαθμού απόδοσης μιας ΦΒ συστοιχίας  $n_a$  ή ενός ΦΒ συστήματος  $n_{\Phi B \Sigma}$ , όπου είναι ίσος με μονάδα, προσδιορίζεται από το πηλίκο της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας της ΦΒ συστοιχίας  $E_a$  ή του ΦΒ συστήματος  $E_{\Phi B \Sigma}$  αντίστοιχα, προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, στη επιφάνεια της ΦΒ συστοιχίας:

$$n_a = \frac{E_a}{"H_t" * S} \quad \text{και} \quad n_{\Phi B \Sigma} = \frac{E_{\Phi B \Sigma}}{"H_t" * S} \quad (3.31)$$

όπου,  $S$  το εμβαδό επιφάνειας της ΦΒ συστοιχίας και " $H_t$ " η ημερήσια ενεργειακή απολαβή, από την ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας (" $H_t$ " για οριζόντια επιφάνεια ΦΒ συστοιχίας και " $H_\beta$ " για κεκλιμένη επιφάνεια).

Το ολοκλήρωμα της πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας  $G_t$ , μια δεδομένη χρονική στιγμή, δίδει την ημερήσια ενεργειακή απολαβή " $H_t$ ":

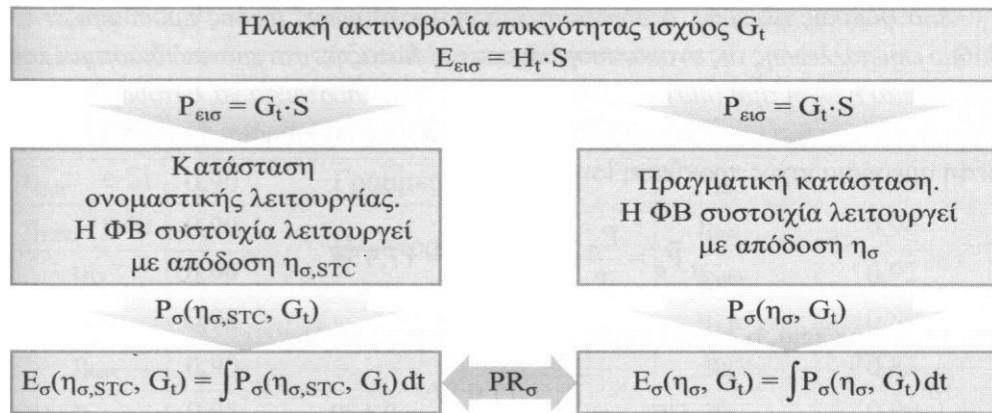
$$"H_t" = \int_0^T G_t dt \quad (3.32)$$

Στην πράξη όμως, ο βαθμός απόδοσης του ΦΒ συστήματος  $n_{\Phi B \Sigma}$  εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, η αναλυτική έκφραση του οποίου, ως γινόμενο των επιμέρους συντελεστών που καθορίζουν τις ενεργειακές απώλειες και αποδόσεις όλων των επιμέρους τμημάτων και διατάξεων του ΦΒ συστήματος, μέχρι την είσοδο του καταναλωτή, δίνεται με την σχέση:

$$n_{\Phi B \Sigma} = n_a * \eta_{\mu\epsilon\tau} \quad (3.33)$$

**Λόγος επίδοσης ΦΒ συστήματος  $PR_{\Phi B \Sigma}$  :**

Η απόδοση ενός ενεργειακού συστήματος  $\eta_{\Phi B \Sigma}$ , προσδιορίζει το ποσοστό της διαθέσιμης ενέργειας που μετατρέπεται από το σύστημα, σε αξιοποιήσιμη μορφή. Το πρακτικό όμως αποτέλεσμα, που αποτελεί και ζητούμενο κατά την αξιοποιήσιμη κάθε ενεργειακής πηγής, είναι η σχέση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, προς αυτή που θα μπορούσε να αποδοθεί κάτω από ιδανική λειτουργία του συστήματος, μέσα σε μια ολοκληρωμένη χρονική μονάδα, όπως είναι η ημέρα (μήνας ή έτος). Η σχέση αυτή προσδιορίζεται από μια παράμετρο που ονομάζεται λόγος επίδοσης  $PR$  (Performance Ratio).



**Σχήμα 3.47:** σχηματική παράσταση της έννοιας του λόγου επίδοσης Φβ συστοιχίας

Σύμφωνα με τη γενικότερη έννοια του λόγος επίδοσης μιας ΦΒ συστοιχίας  $PR_a$  ή ενός ΦΒ συστήματος  $PR_{\Phi B \Sigma}$ , όπου είναι ίσος με μονάδα, προσδιορίζεται από το πηλίκο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, προς την ενέργεια  $E_a(\eta_{\sigma, STC}, G_t)$ , που θα απέδιδε η ΦΒ συστοιχία, αν λειτουργούσε ιδανικά, χωρίς τις επιπλέον απώλειες λόγω των αποκλίσεων από την κατάσταση λειτουργίας των πρότυπων συνθηκών ελέγχου (STC), δεχόμενη κάθε στιγμή την ίδια πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια της ημέρας.

$$PR_a = \frac{E_a}{E_a(\eta_{\sigma, STC}, G_t)} \quad \text{και} \quad PR_{\Phi B \Sigma} = \frac{E_{\Phi B \Sigma}}{E_a(\eta_{\sigma, STC}, G_t)} = PR_a * \eta_{μετ} \quad (3.34)$$

Στην πράξη όμως, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και η τιμή του είναι μικρότερη της μονάδας. Οι τυπικές τιμές της για ΦΒ συστοιχία, κυμαίνονται στο διάστημα 70-90%, ενώ ολόκληρης του ΦΒ συστήματος χαμηλότερα, λόγω των απωλειών κατά τη μεταφορά και τις ενεργειακές μετατροπές στις ηλεκτρικές διατάξεις του ΦΒ συστήματος. Συνεπώς, ο λόγος επίδοσης καθορίζει την απόκλιση της αποδιδόμενης από τη ΦΒ συστοιχία ή το ΦΒ σύστημα, ενέργειας σε σχέση με ιδανική δυνατότητα.

Ο λόγος επίδοσης, μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά, με τρόπο ανεξάρτητο της σχέσης (3.34), εκφράζοντας αναλυτικά ως γινόμενο των επιμέρους παραγόντων που προσδιορίζονται από τα χαρακτηριστικά της ΦΒ συστοιχίας. Η τελική έκφραση είναι:

$$PR_a = PR_R * PR_{LI} * PR_S * PR_P * PR_T * PR_M * PR_{W, \sigma} * PR_{NIT} * PR_D \quad (3.35)$$

όπου,  $PR_R$  : ο λόγος επίδοσης λόγω διαφοροποίησης της ανακλαστικότητας, σε γωνίες πρόσπτωσης διάφορες της καθέτου στη ΦΒ συστοιχία

- $PR_{LI}$  : ο λόγος επίδοσης στην περιοχή χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας
- $PR_S$  : ο λόγος επίδοσης φασματικής απόκλισης λόγω διαφορετικού φάσματος σε σχέση με το φάσμα AM 1,5
- $PR_P$  : ο λόγος επίδοσης εξαιτίας της πόλωσης ηλιακής ακτινοβολίας
- $PR_T$  : ο λόγος επίδοσης της ΦΒ συστοιχίας εξαιτίας της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας ΦΒ συλλεκτών, σε σχέση με τη θερμοκρασία αναφοράς 25°C
- $PR_M$  : ο λόγος επίδοσης λόγω διαφοροποίησης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών μεταξύ ΦΒ συστοιχιών
- $PR_{MIT}$  : ο λόγος επίδοσης που αφορά στη μη σύμπτωση του ΣΛ της ΦΒ γεννήτριας με το ΣΜΙ της ΦΒ συστοιχίας
- $PR_{W,\sigma}$  : ο λόγος επίδοσης εξαιτίας απωλειών στα καλώδια σύνδεσης μεταξύ ΦΒ συστοιχιών
- $PR_D$  : ο λόγος επίδοσης εξαιτίας απωλειών στη δίοδο αντεπιστροφής

Οι χαρακτηριστικές τιμές των λόγων επίδοσης των επιμέρους παραγόντων, αποτελούν, τις αντίστοιχες τιμές των συντελεστών απόκλισης ενεργειακών απωλειών που έχουν αναφερθεί παραπάνω, στις απώλειες μεταφοράς ενέργειας  $\eta_{μετ}$ .

#### Αποδοτικότητα $Y_{\Phi B \Sigma}$ - συντελεστής χρησιμοποίησης ΦΒ συστήματος $CF_{\Phi B \Sigma}$ :

Αποδοτικότητα μιας ΦΒ συστοιχίας  $Y_a$  (Array Yield), ορίζεται το πηλίκο της αποδιδόμενης ημερησίως (μηνιαίως ή ετησίως) ηλεκτρικής ενέργειας  $E_a$ , δια της ισχύος αιχμής  $P_p$  της:

$$Y_a = \frac{E_a}{P_p} \quad (3.36)$$

Εκφράζεται συνήθως σε kWh/kWp\*d. Στην περίπτωση του μηνός ή έτους, στη θέση του d (day) θέτουμε mo (month) ή y (year), αντιστοίχως. Οι μέσες τιμές αποδοτικότητας μηνός ή έτους, μακράς περιόδου δεδομένων, εκφράζουν το φωτοβολταϊκό δυναμικό του τόπου στις αντίστοιχες περιόδους.

Αν στο δεύτερο μέλος της παραπάνω σχέσης (3.36), αντί της ημερήσιας ενέργειας, τεθεί η μέση ημερήσια ισχύς από τη ΦΒ συστοιχία:

$$\bar{P}_a = \frac{E_a}{t} \quad (3.37)$$

προκύπτει ο συντελεστής χρησιμοποίησης ή εκμετάλλευσης ισχύος  $CF_a$  (Capacity Factor):

$$CF_a = \frac{\bar{P}_a}{P_p} \quad (3.38)$$

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης προσδιορίζει το βαθμό εκμετάλλευσης της ονομαστικής ισχύος της διάταξης, στο χρονικό διάστημα που αναφέρεται η μέση τιμή (ημέρα, μήνας, έτος), ως η ΦΒ συστοιχία

να λειτουργούσε συνεχώς στο διάστημα αυτό. Κατά τη μελέτη προσδιορισμού του κατάλληλου μεγέθους ΦΒ συστήματος για κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων μιας εφαρμογής, το ενδιαφέρον μετατοπίζεται από τις ημερήσιες τιμές των ηλιακών και άλλων δεδομένων, στις μέσες τιμές μεγαλύτερων χρονικών περιόδων. Η καταλληλότερη διάρκεια αξιοποίησης μέσω των τιμών δεδομένων είναι ο μήνας.

Στη διάρκεια ενός μηνός, τα δεδομένα αυτά μεταβάλλονται μεν αλλά σε βαθμό που να μη παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις από την αντίστοιχη μέση τιμή τους. Η αναφορά σε μέσες τιμές ετησίως σχετίζεται με μια γενικότερη εκτίμηση του δυναμικού της ηλιακής ακτινοβολίας σ' ένα τόπο και των σχετιζομένων με αυτή, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι μέσες μηνιαίες τιμές περιγράφουν πιο αξιόπιστα το τελικό αποτέλεσμα, κατά μέσο όρο μέσα σ' αυτή τη χρονική περίοδο. Ο προηγούμενος ορισμός εφαρμόζεται αναλόγως και στην περίπτωση μηνιαίων ή ετησίων δεδομένων.

Παραδείγματος χάριν, αν μια ΦΒ συστοιχία, ισχύος αιχμής  $P_p = 100 \text{ W}$ , παράγει κατά τη διάρκεια μιας ορισμένης ημέρας, ηλεκτρική ενέργεια  $E_a = 430 \text{ Wh}$ , τότε προκύπτουν:

$$Y_a = \frac{430}{100} = 4,3 \text{ Wh/Wp} \quad , \quad \bar{P}_a = \frac{430}{24 \text{ h}} = 17,9 \text{ W} \quad \text{και} \quad CF_a = \frac{17,9}{100} = 0,179$$

Έστω ότι η ΦΒ συστοιχία αυτή, απέδωσε κατά το μήνα Ιούλιο ( $N = 31$  ημέρες) συνολική ηλεκτρική ενέργεια  $E_a = 15100 \text{ Wh}$ . Τότε:

$$\bar{P}_a = \frac{15100}{31 * 24 \text{ h}} = 20,3 \text{ W} \quad \text{και} \quad CF_a = \frac{20,3}{100} = 0,203$$

Το αποτέλεσμα αυτό σημαίνει ότι, αν θεωρήσουμε αδιάλειπτη λειτουργία για τη ΦΒ συστοιχία κατά το μήνα Ιούλιο, θα παρείχε ηλεκτρική ενέργεια με ισχύ ίση με 20,3% της ονομαστικής τιμής της.

Σε αναλογία με τα προηγούμενα, ορίζεται η αποδοτικότητα, καθώς επίσης και ο ημερήσιος συντελεστής χρησιμοποίησης ισχύος του ΦΒ συστήματος:

$$Y_{\Phi B \Sigma} = \frac{E_{\Phi B \Sigma}}{P_p} \quad , \quad \bar{P}_{\Phi B \Sigma} = \frac{E_{\Phi B \Sigma}}{T} \quad \text{και} \quad CF_{\Phi B \Sigma} = \frac{\bar{P}_{\Phi B \Sigma}}{P_p} \quad (3.39)$$

Σημειώνεται ότι η αποδοτικότητα και ο συντελεστής χρησιμοποίησης του ΦΒ συστήματος, χαρακτηρίζονται από μικρότερες τιμές από τις τιμές των αντίστοιχων ποσοτήτων για τη ΦΒ συστοιχία, κατά τον συντελεστή απωλειών μεταφοράς ενέργειας  $\eta_{μετ}$ .

### Πραγματική ηλεκτρική ενέργεια ΦΒ συστοιχίας $E_a$ :

Η πραγματική αποδιδόμενη από μια ΦΒ συστοιχία ηλεκτρικής ισχύς, απέχει γενικά από την τιμή της στο ΣΜΙ. Με τη χρησιμοποίηση συστημάτων παρακολούθησης του ΣΜΙ, προσεγγίζεται αρκετά καλά η λειτουργία της ΦΒ συστοιχίας στην κατάσταση αυτή. Θεωρώντας μια ΦΒ συστοιχία ισχύος αιχμής  $P_p$ , η οποία δεχόμενη ηλιακή ακτινοβολία πυκνότητας ισχύος  $G_t$ , αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια με ισχύ  $P_m$ , που αφορά στο ΣΜΙ της κατάστασης λειτουργίας. Διατυπώνεται η διατήρηση ενέργειας, μεταξύ της εισερχόμενης, στη ΦΒ συστοιχίας, ισχύος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και της αντίστοιχα παραγόμενης από αυτήν, μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος για την πραγματική κατάσταση λειτουργίας και για την ιδανική περίπτωση των πρότυπων συνθηκών ( $G_{STC} = 1 \text{ kW/m}^2$ ,  $\theta_c = 25^\circ\text{C}$ , AM 1,5):



$$P_m = \eta_a * G_t * S \quad (3.40)$$

και

$$P_p = \eta_{a,STC} * G_{STC} * S \quad (3.41)$$

Απαλείφοντας το εμβαδό  $S$  της επιφάνειας της ΦΒ συστοιχίας από τις σχέσεις (3.40) και (3.41), προκύπτει:

$$P_m = P_p * \frac{G_t}{G_{STC}} * \frac{\eta_a}{\eta_{a,STC}} \quad (3.42)$$

και δίδει την στιγμιαία μέγιστη ηλεκτρική ισχύ της ΦΒ συστοιχίας, ως συνάρτηση των στιγμιαίων τιμών του συντελεστή απόδοσης  $\eta_a$  της ΦΒ συστοιχίας και της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας.

Το στοιχείο που ενδιαφέρει για τον προσδιορισμό του μεγέθους της ΦΒ συστοιχίας, είναι η συμπεριφορά της κατά τη διάρκεια μιας ολοκληρωμένης χρονικής μονάδας (ημέρα, μήνας, έτος). Η ολοκλήρωση της σχέσης (3.44) ως προς το χρόνο, μέσα στην ημέρα, δίδει την ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια  $E_a(\eta_{a,STC}, G_t)$ , λειτουργίας στο ΣΜΙ. Αν η ΦΒ συστοιχία λειτουργεί κάτω από τις πρότυπες συνθήκες STC, η ηλεκτρική ενέργεια που θα μπορούσε να δώσει μέσα στην περίοδο  $T$ , δίνεται από:

$$E_a(\eta_{a,STC}, G_t) = \int_T P_m(\eta_{a,STC}, G_t) d_t = \int_T \eta_{a,STC} * S * G_t d_t = \eta_{a,STC} * S * \int_T G_t d_t = \eta_{a,STC} * S * "H_t" \quad (3.43)$$

Συνεπώς, είναι προφανής ο λόγος αξιοποίησης της έννοιας του λόγου επίδοσης της ΦΒ συστοιχίας, καθώς αντικαθιστώντας τις σχέσεις (3.35) και (3.43), στην σχέση (3.34), προκύπτει η πραγματική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ΦΒ συστοιχίας  $E_a$ :

$$PR_a = \frac{E_a}{E_a(\eta_{a,STC}, G_t)} = \frac{E_a}{\eta_{a,STC} * S * "H_t"} = \frac{E_a}{\eta_{a,STC} * S * G_{STC}} * \frac{G_{STC}}{"H_t"} \Rightarrow PR_a = \frac{E_a}{P_p} * \frac{G_{STC}}{"H_t"} \Rightarrow$$

$$E_a = P_p * PR_a * \frac{"H_t"}{G_{STC}} \quad (3.44)$$

Αντίστοιχα, ο λόγος επίδοσης του ΦΒ συστήματος, μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά:

$$PR_{\Phi B \Sigma} = PR_a * PR_{\mu \epsilon \tau} \quad (3.45)$$

όπου,  $PR_a$  : ο λόγος επίδοσης της ΦΒ συστοιχίας

$PR_{\Phi B \Sigma}$  : ο λόγος επίδοσης εξαιτίας απωλειών μεταφοράς ενέργειας

Οι χαρακτηριστικές τιμές των παραπάνω λόγων επίδοσης, αποτελούν οι τιμές των συντελεστών απόκλισης που έχουν αναφερθεί παραπάνω στις απώλειες μεταφοράς ενέργειας  $\eta_{\mu \epsilon \tau}$ .

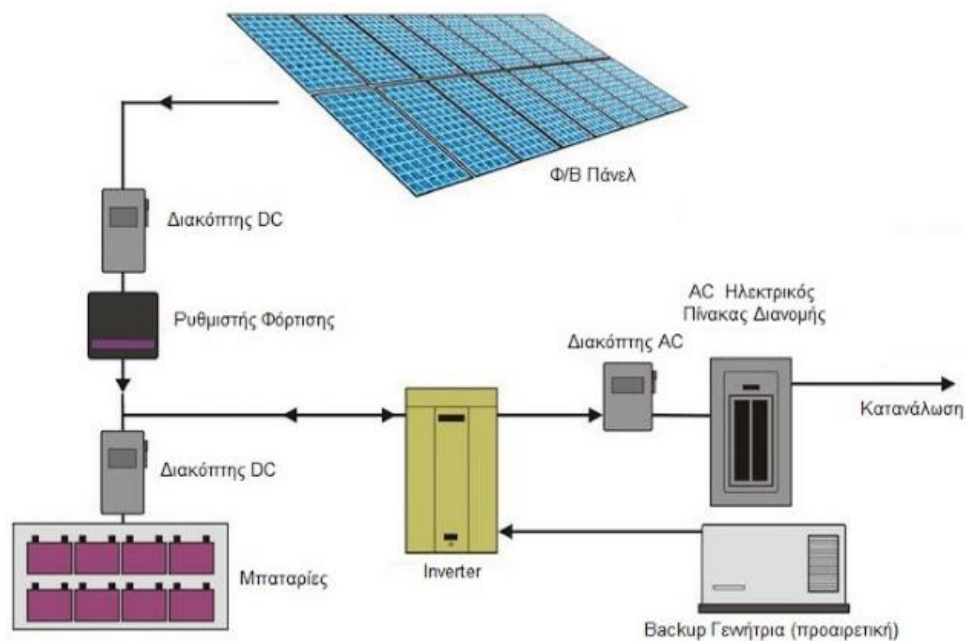
### 3.3.2 Η ενεργειακή διαστασιολόγηση του φωτοβολταϊκού συστήματος

Το αυτόνομο ΦΒ σύστημα, σχεδιάζεται με δυνατότητα αυτονομίας, που συνήθως δεν ξεπερνά τις δέκα ημέρες, δεδομένης της μειωμένης πιθανότητας αίθριων ημερών κατά τη περίοδο φθινοπώρου-άνοιξης, στα μεσαία και μικρά γ.π. φ, καλύπτοντας ενεργειακά τη λειτουργία της εφαρμογής. Έτσι, προσδιορίζεται η σχέση μεταξύ του ηλιακού δυναμικού του τόπου, με την αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια της ΦΒ συστοιχίας, με βάση τα μοντέλα συνεχών αίθριων ημερών και ημερών αυτονομίας.

Κύριο ρόλο πηγής ενέργειας στις μη αίθριες ημέρες, παίζει ο συσσωρευτής του ΦΒ συστήματος, του οποίου το μέγεθος πρέπει να αυξηθεί αναλογικά προς τον αριθμό των συννεφιασμένων ημερών. Στην κατάσταση αυτή, η ΦΒ συστοιχία πρέπει να είναι επαρκής ώστε κατά τις υπόλοιπες αίθριες ημέρες, να καλύπτει καθημερινά, όχι μόνο την ημερήσια ενεργειακή απαίτηση  $E_L$ , αλλά και να επαναφέρει σταδιακά τον συσσωρευτή, στην αρχική του κατάσταση φόρτισης.

Πέραν της δυνατότητας του χρόνου αυτονομίας της ΦΒ συστοιχίας, υπάρχει η δυνατότητα τροφοδοσίας των καταναλώσεων με τη χρήση Η/Ζ, εισάγοντας το κριτήριο βαθμού συμμετοχής του στην εξασφάλιση της κάλυψης των ενεργειακών απαιτήσεων της εφαρμογής, το οποίο διασφαλίζει τη λειτουργία των καταναλώσεων σε κάθε περίπτωση αστοχίας της ΦΒ συστοιχίας ή του συσσωρευτή και επαναφέρει τον εκφορτισμένο συσσωρευτή στην κατάσταση πλήρους φόρτωση.

Σε κάθε περίπτωση, κατά τη σχεδίαση ενός ΦΒ συστήματος, λαμβάνεται μέριμνα ώστε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά κάθε τμήματός του, να ταιριάζουν με τα αντίστοιχα του προηγούμενου και του επόμενου. Στο παρακάτω σχήμα, δίδεται ηλεκτρολογικό διάγραμμα, όπου παρουσιάζονται όλες οι επιμέρους ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές διατάξεις του αυτόνομου ΦΒ συστήματος καθώς και το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, υποστήριξης της ΦΒ συστοιχίας ή συμπαραγωγής με αυτήν.



Σχήμα 3.48: αυτόνομο ΦΒ σύστημα με ηλεκτρικό συσσωρευτή και ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος

### **3.3.2.1 Ο υπολογισμός της ισχύος αιχμής φωτοβολταϊκής συστοιχίας**

Η δυνατότητα προσδιορισμού του μεγέθους της καταλληλότερης ΦΒ συστοιχίας, δίδεται από τον υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος αιχμής της ΦΒ συστοιχία, για κάθε μήνα του έτους, η οποία οφείλει να καλύπτει τις ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής, για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Προφανώς, αν καλύπτει τις ενεργειακές απαιτήσεις κατά τον κρίσιμο μήνα της περιόδου χρήσης, τότε καλύπτει τις αντίστοιχες απαιτήσεις όλης της περιόδου. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το ΦΒ σύστημα  $E_{\Phi B \Sigma}$  (σχέση 3.27), πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον την απαιτούμενη καταναλώμενη ενέργεια  $E_L$  από τα φορτία της εφαρμογής ( $E_{\Phi B \Sigma} = E_L$ ).

#### **I. Το μοντέλο συνεχών αίθριων ημερών**

Με γνωστό το λόγο επίδοσης ΦΒ συστοιχίας για ορισμένο τόπο, μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς αιχμής  $P_{p(0)}$ , της ΦΒ συστοιχίας, έτσι ώστε να καλύπτονται τουλάχιστον, οι ημερήσιες ενεργειακές απαιτήσεις των φορτίων της εφαρμογής, μέσα σε ορισμένη χρονική περίοδο χρήσης. Με μηνιαία μέση ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης της εφαρμογής  $E_L$ , για δεδομένο μήνα, από την σχέση (3.45) της πραγματικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ΦΒ συστοιχίας  $E_a$ , προκύπτει:

$$P_{p(0)} = \frac{1}{PR_a} * \frac{G_{STC}}{H_t} * \frac{E_L}{\eta_{μετ}} \quad (3.47)$$

ή στην περίπτωση άμεσης και έμμεσης τροφοδοσίας των φορτίων της εφαρμογής:

$$P_{p(0)} = \frac{1}{PR_a} * \frac{G_{STC}}{H_t} * \left( \frac{E_{L,\alpha}}{\eta_\alpha} + \frac{E_{L,\varepsilon}}{\eta_\varepsilon} \right) \quad (3.48)$$

#### **II. Το μοντέλο κάλυψης ημερών αυτονομίας**

Για δεδομένη ημερήσια καταναλώμενη ενέργεια  $E_L$  που πρέπει να καλύπτεται από το ΦΒ σύστημα, με δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών απαιτήσεων κατά τη διάρκεια  $n$  συνεφιασμένων ημερών, μέσα σε χρονική περίοδο αναφοράς,  $N$  ημερών, είναι προφανές, ότι η περίπτωση αυτή διαφέρει από εκείνη των συνεχών αίθριων ημερών. Στην περίπτωση αυτή, θα απαιτηθεί μεγαλύτερης ισχύος ΦΒ συστοιχία, προκειμένου, κατά τις αίθριες ημέρες, πλήθους  $N - n$ , η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή να επανέλθει στο αρχικό επίπεδο.

Η ενέργεια που θα δώσει ο συσσωρευτής μέσα στις  $n$  συνεφιασμένες ημέρες, είναι προφανώς

$$n * E_L$$

ενώ το επιπλέον απαιτούμενο ποσό ενέργειας ανά ημέρα, ισούται με το κλάσμα:

$$\frac{n * E_L}{N - n}$$

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια που πρέπει να δώσει η ΦΒ συστοιχία, στην έξοδο της, είναι:

$$\frac{1}{\eta_{\varepsilon}} * \frac{n * E_L}{N - n}$$

Συνεπώς, η ΦΒ συστοιχία πρέπει να έχει ισχύ αιχμής  $P_{p(n)}$ , που δίδεται από την επόμενη σχέση, σε αναλογία με τη σχέση (3.48):

$$P_{p(n)} = \frac{1}{PR_a} * \frac{G_{STC}}{H_t} * m * \left[ \frac{E_{L,\alpha}}{\eta_{\alpha}} + \frac{E_{L,\varepsilon}}{\eta_{\varepsilon}} + \left( \frac{n}{N - n} * \frac{E_L}{\eta_{\varepsilon}} \right) \right] \quad (3.49)$$

όπου,  $m$  ο συντελεστής περιθωρίου υπολογισμού των φορτίων της εφαρμογής.

Στην πράξη, στον υπολογισμό του ΦΒ συστήματος και προκειμένου να καλυφθεί πιθανή υποεκτίμηση των φορτίων της εφαρμογής, στον υπολογισμό τους χρησιμοποιείται ένας συντελεστής περιθωρίου  $m$ , που αφορά στην εκτίμηση των ημερήσιων ενεργειακών καταναλώσεων και του οποίου η τιμή επιλέγεται, κατά περίπτωση, στο διάστημα 1 - 1,2, δηλαδή έως 20% επιπλέον των καταγραφέντων φορτίων.

Για  $n = 0$ , έχουμε την περίπτωση των συνεχόμενων αίθριων ημερών, από την σχέση (3.48).

Στην περίπτωση που η ΦΒ εγκατάσταση περιλαμβάνει H/Z, η ισχύς αιχμής της ΦΒ συστοιχίας υπολογίζεται από την σχέση (3.48) και όχι από την σχέση (3.49), επειδή για την επαναφορά του ηλεκτρικού συσσωρευτή στην αρχική κατάσταση φόρτισης του, την αναλαμβάνει το H/Z.

### **3.3.2.2 Ο υπολογισμός της χωρητικότητας ηλεκτρικού συσσωρευτή**

Σε αυτή τη παράγραφο υπολογίζεται η απαραίτητη χωρητικότητα του ηλεκτρικού συσσωρευτή προκειμένου να καλυφθεί η ημερήσια ενεργειακή απαίτηση της εφαρμογής, καθώς και το θέμα της αυτονομίας της ΦΒ γεννήτριας, μέσω του μεγέθους συσσωρευτή. Έπειτα όμως, διευρύνονται οι παράγοντες που καθορίζουν την συνθήκη περιορισμού του βάθους εκφόρτισης (όρια εκφόρτισης) ενός συσσωρευτή, ο οποίος επαναφορτίζεται μέσα ΦΒ συστοιχίας, με γνώμονα τη χρυσή τομή μεταξύ της διασφάλισης πολλών κύκλων ζωής (λειτουργίας) σε συνδυασμό με τις τοπικές κλιματικές συνθήκες.

#### **I. Το μοντέλο συνεχών αίθριων ημερών**

Για την αποθήκευση της παραγόμενης ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας, έχει επιλεγεί συστοιχία συσσωρευτών, συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας  $C_N$ . Η αποθηκευόμενη ηλεκτρική ενέργεια  $E_C$ , χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την τροφοδοσία ηλεκτρικών συσκευών, είτε απευθείας, ως ενέργεια συνεχούς ρεύματος είτε μετά από μετατροπή, ως ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος. Συνεπώς, η συνολική αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια ή ενέργεια εκφόρτισης  $E_{εκφ}$ , που μπορεί να αποδοθεί από το σύστημα αποθήκευσης προς την κατανάλωση, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες από το συσσωρευτή μέχρι την είσοδο της εφαρμογής των καταναλώσεων, ισούται με:

$$E_{εκφ} = V_B * C_N * \beta_{εκφ} * \eta_{εκφ} \quad (3.50)$$

όπου,  $\eta_{εκφ} = \eta_D * \eta_w * \eta_{inv}$  ο συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας του κυκλώματος εκφόρτισης. Αν η τροφοδοσία των φορτίων κατανάλωσης γίνεται με συνεχές ρεύμα (π.χ. απευθείας από το συσσωρευτή) τότε, στον προσδιορισμό του  $\eta_{εκφ}$  τίθεται  $\eta_{inv} = 1$ .

Η απαίτηση κάλυψης, κατά ελάχιστον, της έμμεσης ενέργειας κατανάλωσης  $E_{L,\varepsilon}$  από την ενέργεια εκφόρτισης  $E_{εκφ}$ , σε κάθε κύκλο λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης, επιβάλλει την ισότητα:

$$E_{εκφ} = E_{L,\varepsilon} \quad \text{ή} \quad E_{εκφ} = V_B * C_N * \beta_{εκφ} * \eta_{εκφ} \quad (3.51)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση της χωρητικότητας λόγω γήρανσης των συσσωρευτών, στη θέση του  $C_N$  θέτουμε  $\eta_{\gamma,B} * C_N$  όπου  $\eta_{\gamma,B}$ , ο παράγων γήρανσης συσσωρευτή ώστε στο τέλος των κύκλων ζωής (λειτουργίας) του, η απομένουσα χωρητικότητα, να καλύπτει τις ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής.

Τελικά, με βάση την προηγούμενη ανάλυση, προκύπτει η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της ενεργούς απαιτούμενης χωρητικότητας  $C_{(0)}$ , του συστήματος αποθήκευσης:

$$C_{(0)} = \frac{E_{L,\varepsilon} * m}{V_B * \beta_{εκφ} * \eta_{εκφ} * \eta_{\gamma,B}} \quad (3.52)$$

όπου,  $m$  ο συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών φορτίων, με τιμές μέχρι 1,2, για πιθανή υποτίμηση των φορτίων της εφαρμογής ή πιθανή μελλοντική προσθήκη νέων.

## II. Το μοντέλο κάλυψης ημερών αυτονομίας

Έστω  $C_{(n)}$ , η ενεργός χωρητικότητα του συσσωρευτή, που είναι ικανή να καλύψει, την απαίτηση για η διαδοχικές συνεφιασμένες ημέρες. Κάθε ημέρα, η αποθηκευμένη ενέργεια στο συσσωρευτή ελαττώνεται κατά το ποσό που απαιτείται, προκειμένου να καλυφθεί η ημερήσια ενεργειακή απαίτηση των φορτίων κατανάλωσης της εφαρμογής. Το συνολικό βάθος εκφόρτισης στις  $n$  συνεφιασμένες ημέρες + 1 αίθρια ημέρα, είναι  $\beta_{εκφ}$ . Η ενέργεια που θα απαιτηθεί από την ηλεκτρική εφαρμογή μέσα στις  $n$  συνεφιασμένες ημέρες, είναι  $n * E_L$ . Η διατήρηση της ενέργειας, δίδει σε πλήρη αναλογία με την παραπάνω σχέση (3.52):

$$C_{(n)} * V_B * \beta_{εκφ} * \eta_{εκφ} * \eta_{\gamma,B} = n * E_L * m \Rightarrow$$

$$C_{(n)} = \frac{(n + b) * E_L * m}{V_B * \beta_{εκφ} * \eta_{εκφ} * \eta_{\gamma,B}} \quad (3.53)$$

όπου,  $(n + b)$  η αυτονομία του συσσωρευτή με  $b = E_{L,\varepsilon} / E_L$  το ποσοστό των φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας. Στην πράξη λαμβάνεται ίση με  $n + 1$  ( $b = 1$ ).

Όταν όλα τα φορτία καλύπτονται από την αποθηκευμένη στο συσσωρευτή, ενέργεια, τότε  $b = 1$ . Αν πρόκειται για φορτία άμεσης τροφοδοσίας, τότε  $b = 0$ . Για απλότητα, σε συνδυασμό με την αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας του συστήματος, δεδομένου μάλιστα ότι το ποσοστό συμμετοχής του κόστους συσσωρευτή στο τελικό κόστος του συστήματος, είναι σαφώς μικρότερο του αντίστοιχου για τη ΦΒ συστοιχία, είναι προτιμότερο να θεωρήσουμε  $b = 1$ .

Για  $n = 0$ , έχουμε την περίπτωση που απαιτείται για την πλήρη κάλυψη της ημερήσιας ενέργειας, από την σχέση (3.52).

**Επιλογή βάθους εκφόρτισης  $\beta_{εκφ}$  :**

- $\beta_{εκφ} = 0,4$  για 1-3 ημέρες αυτονομίας
- $\beta_{εκφ} = 0,6$  για 4-6 ημέρες αυτονομίας
- $\beta_{εκφ} = 0,8$  για 7-10 ημέρες αυτονομίας
- $\beta_{εκφ} = 0,2-0,3$  για θερμοκρασία περιβάλλοντος  $< 0^\circ\text{C}$

**Περιορισμός βάθους εκφόρτισης :**

Το ρεύμα φόρτισης του συσσωρευτή αποτελεί το συνολικό ρεύμα λειτουργίας από τη ΦΒ συστοιχία. Θεωρείται ότι το σημείο λειτουργίας (ΣΛ) συμπίπτει, όπως είναι επιθυμητό, με το σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ). Το ρεύμα φόρτισης του συσσωρευτή  $I_\varphi$ , είναι ανάλογο με το μέγιστο συνολικό ρεύμα που παρέχει η ΦΒ συστοιχία  $I_{m,a,STC}$ , κάτω από τις δεδομένες συνθήκες φωτισμού. Το ρεύμα αυτό ακολουθεί μια σχεδόν αναλογική εξάρτηση από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, συνεπώς, με καλή προσέγγιση:

$$I_\varphi = I_{m,a,STC} * \frac{G_t}{G_{STC}} \quad (3.54)$$

Το ρεύμα  $I_\varphi$ , κατά τις μεσημεριανές ώρες μιας αίθριας ημέρας, παίρνει τη μέγιστη τιμή του, ίση με:

$$I_{\varphi,max} = I_{m,a,STC} * \frac{G_m}{G_{STC}} \quad (3.55)$$

όπου,  $G_m$  η μέγιστη τιμή της πυκνότητας ισχύος, στο επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας, κατά το ηλιακό μεσημέρι της αίθριας ημέρας.

Αυτό το μέγιστο ρεύμα φόρτισης, πρέπει να υπακούει στην εμπειρική συνθήκη φόρτισης, του χαμηλού ρυθμού φόρτισης:

$$I_{\varphi,max} \leq \frac{C^*}{t_c} \quad (3.56)$$

όπου,  $C^*$  η ενεργός τιμή  $C_{(0)}$  ή  $C_{(n)}$  της χωρητικότητας του συσσωρευτή και  $t_c = 10$  h, ο τυπικός χρόνος φόρτισης για συσσωρευτές ενισχυμένου τύπου.

Από τις παραπάνω σχέσεις (3.55) και (3.56), προκύπτει ότι:

$$I_{m,a,STC} \leq \frac{C^*}{t_c} * \frac{G_{STC}}{G_m} \quad (3.57)$$

Ολοκληρώνοντας την σχέση (3.54) μέσα στην ημέρα, προκύπτει το ηλεκτρικό φορτίο  $\Delta C$  που προσφέρει η ΦΒ συστοιχία στο συσσωρευτή, μέσα στην ημέρα. Μέρος του φορτίου αυτού, σύμφωνα με την απόδοση φορτίου  $\eta_q$  του συσσωρευτή, καλύπτει το φορτίο που αποδίδεται στην κατανάλωση κατά την εκφόρτιση του.

$$\Delta C = \eta_q * \frac{I_{m,a,STC}}{G_{STC}} * H_t \quad (3.58)$$

Συνδυάζοντας της σχέσεις (3.57) και (3.58), έπεται:

$$\Delta C \leq \eta_q * \frac{C^*}{t_c} * \frac{H_t}{G_m} \quad (3.59)$$

οπότε:

$$\beta_{εκφ} \leq \beta_{εκφ.ορ} \quad \mu\epsilon \quad \beta_{εκφ.ορ} = \frac{\eta_q * H_t}{G_m * t_c} \quad (3.60)$$

όπου,  $\beta_{εκφ} = \Delta C / C^*$  το βάθος εκφόρτισης και  $\beta_{εκφ.ορ}$  το οριακό βάθος εκφόρτισης συσσωρευτή, χαρακτηριστικό των μετεωρολογικών δεδομένων του τόπου εγκατάστασης του ΦΒ συστήματος.

Η συνθήκη της σχέσης (3.60), αποτελεί κριτήριο περιορισμού του βάθους εκφόρτισης του συσσωρευτή, σύμφωνα με το οποίο, το βάθος εκφόρτισης  $\beta_{εκφ}$ , πρέπει να παραμένει μικρότερο του  $\beta_{εκφ.ορ}$ , καθόλα τη διάρκεια της λειτουργίας της ΦΒ γεννήτριας. Για παράδειγμα, εάν το οριακό βάθος εκφόρτισης  $\beta_{εκφ.ορ}$  του συσσωρευτή παίρνει τιμές από 0,4 (χειμώνας) έως 0,79 (καλοκαίρι), τότε, σε ετήσια βάση το βάθος εκφόρτισης  $\beta_{εκφ}$ , πρέπει να είναι μικρότερο του 40%. Η κρίσιμη περίοδος για τον ημερήσιο κύκλο λειτουργίας ενός συσσωρευτή, ο ποιος φορτίζεται από το ΦΒ σύστημα, είναι προφανώς ο χειμώνας, καθώς χαμηλές θερμοκρασίας επιβάλλουν μικρά πραγματικά βάθη εκφόρτισης.

### **3.3.2.3 Ο καθορισμός μεγέθους της φωτοβολταϊκής συστοιχίας**

Στη γενική περίπτωση, θεωρείται ότι η ΦΒ συστοιχία αποτελείται από  $N$  ΦΒ συλλέκτες, κατανεμημένους σε  $N_\pi$  κλάδους συνδεδεμένους παράλληλα, ο καθένας από τους οποίους συνίσταται από  $N_\sigma$  ΦΒ συλλέκτες, συνδεδεμένους σε σειρά. Ισχύει η σχέση:

$$N_\sigma * N_\pi = N \quad (3.61)$$

Στη συνέχεια αναλύονται τα βήματα, βάση των οποίων προσδιορίζεται ο πραγματικός αριθμός  $N$  των ΦΒ συλλεκτών της ΦΒ συστοιχίας

#### **I. Ο αρχικός καθορισμός συνολικού αριθμού φωτοβολταϊκών συλλεκτών**

Πρώτιστος, πραγματοποιείται ένας αρχικός υπολογισμός του συνολικού αριθμού  $N^*$  των ΦΒ συλλεκτών, η τιμή του οποίου προκύπτει από το πηλίκο της ισχύς αιχμής του ΦΒ συστοιχίας συνεχόμενων αίθριων ημερών  $P_{p(0)}$  ή κάλυψης συννεφιασμένων ημερών  $P_{p(n)}$ , προς την ισχύ αιχμής του ΦΒ συλλέκτη  $P_{p,m}$ :

$$N^* = \left[ \frac{P_p}{P_{p,m}} \right] \quad (3.62)$$

Η αγκύλη [], χρησιμοποιείται εδώ για να δηλώσει την πράξη της στρογγυλοποίησης προς τα άνω, του περιεχόμενου δεκαδικού αριθμού.

Αφού υπολογιστεί η ισχύ αιχμής της ΦΒ συστοιχίας  $P_p$ , από τις σχέσεις (3.47) ή (3.48), καθορίζεται στη συνέχεια, η ισχύς αιχμής του ΦΒ συλλέκτη  $P_{p,m}$ , που αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή, ως δομική μονάδα του ΦΒ συστήματος. Για λόγους αποφυγής απωλειών εξαιτίας ανομοιογένειας, απαιτούνται ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ΦΒ συλλεκτών στις ίδιες πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

## II. Ο καθορισμός αριθμού φωτοβολταϊκών συλλεκτών συνδεδεμένων σε σειρά

Στο επόμενο βήμα, υπολογίζεται ο αριθμός  $N_\sigma$  των ΦΒ συλλεκτών που πρέπει συνδεθούν σε σειρά. Επιδιώξη είναι, το ΦΒ σύστημα να λειτουργεί κάθε στιγμή, στο εκάστοτε σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ), με αντίστοιχη τάση εξόδου της ΦΒ συστοιχίας  $V_{m,a}$ , ίση με:

$$V_{m,a} = N_\sigma * V_{m,m} \quad (3.63)$$

όπου,  $V_{m,m}$  η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος του ΦΒ συλλέκτη, στις συνθήκες λειτουργίας.

Η τάση  $V_{m,a}$  αποτελεί παράμετρο προσαρμογής στις προδιαγραφές της εφαρμογής και στις τεχνικοοικονομικές απαιτήσεις της. Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι επόμενες περιπτώσεις:

- Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές χωρίς παρεμβολή ψαλιδιστή :

Η τάση  $V_{m,a}$ , ενδείκνυται να υπερκαλύπτει τη μέγιστη επιτρεπτή τάση φόρτισης  $V_\varphi$  του συσσωρευτή, η οποία προσεγγιστικά ισούται με  $\sim 1,2 * V_B$ , π.χ. για συσσωρευτή ονομαστικής τάσης  $V_B = 12$  V, το άνω όριο τάσης φόρτισης  $V_\varphi$  είναι  $\sim 14,2$  V.

- Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές με παρεμβολή ψαλιδιστή :

Τότε η τάση  $V_{m,a} = V_{conv}$  στην είσοδο του ψαλιδιστή. Η τάση αυτή, σύμφωνα με το κριτήριο τάσης για το περιορισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης στην έξοδο της ΦΒ συστοιχίας, που περιγράφεται παρακάτω, δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή που καθορίζεται από τον κώδικα ηλεκτρικών εγκαταστάσεων που ισχύει στη χώρα εφαρμογής.

- Μετατροπή συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη με χρήση αντιστροφέα :

Τότε η τάση  $V_{m,a} = V_{inv}$  στην είσοδο του αντιστροφέα. Αν περιλαμβάνεται συσσωρευτής, ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στην πρώτη περίπτωση. Αν η ΦΒ συστοιχία συνδέεται απευθείας με τον αντιστροφέα, χωρίς την παρουσία συσσωρευτή, τότε λαμβάνεται υπόψη η περιοχή τάσεων εισόδου του αντιστροφέα, σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Σε κάθε περίπτωση, ο αριθμός  $N_\sigma$  των ΦΒ συλλεκτών που πρέπει συνδεθούν σε σειρά, προσδιορίζεται από την ονομαστική τάση εισόδου  $V_N$ , της διάταξης ή τον συνδυασμό διατάξεων που αναφέρθηκαν παραπάνω και ακολουθεί μετά την έξοδο της ΦΒ συστοιχίας, θέτοντας  $V_N \approx V_{m,a}$ , από τη σχέση:

$$N_\sigma = \left\lceil \frac{V_N}{V_{m,m}} \right\rceil \quad (3.64)$$

όπου η ονομαστική τάση εισόδου της διάταξης ή τον συνδυασμό διατάξεων  $V_N$ , ισούται με την τάση  $V_B$  του συσσωρευτή ή με  $V_{conv}$  του ψαλιδιστή ή με  $V_{inv}$  του αντιστροφέα.



**Περιορισμός μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης εξόδου ΦΒ συστοιχίας :**

Στη Ευρώπη, η μέγιστη επιτρεπτή τάση  $V_{max}$  για μια ΦΒ συστοιχία μπορεί να φτάνει τα 1000 V, ενώ στις ΗΠΑ, τα 600 V. Η δυνατότητα αυτή καθορίζει τον μέγιστο αριθμό ΦΒ συλλεκτών συνδεδεμένων σε σειρά στη ΦΒ συστοιχία, σε συνδυασμό με τις τεχνικές προδιαγραφές του αντιστροφέα. Η μέγιστη τάση που μπορεί να εμφανιστεί στην έξοδο της ΦΒ συστοιχίας αντιστοιχεί στο άθροισμα των τάσεων ανοικτού κυκλώματος, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου και την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας. Χαμηλή θερμοκρασία και υψηλή  $G_t$ , έχουν ως συνέπεια την αύξηση της  $V_{oc}$ , πιθανότατα πάνω από την ονομαστική της τιμή.

Για την κάλυψη αυτών των καταστάσεων, που είναι πιθανές, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις χαμηλών θερμοκρασιών, με υψηλές τιμές  $G_t$  (πρόσθετη διάχυτη ανάκλαση σε διάσπαρτα πυκνά σύννεφα), καθορίζονται διορθωτικοί συντελεστές. Για πιθανές χαμηλότερες θερμοκρασίες περιοχής όπως αυτές που αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα (3.1), η αναμενόμενη μέγιστη τάση ανοικτού κυκλώματος του ΦΒ συλλέκτη, προκύπτει από την ονομαστική με πολλαπλασιασμό της επί τον αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης τάσης  $\eta_{\delta,V}$ , της δεξιάς στήλης. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, το πλήθος  $N_{\sigma}$ , όπου έχει προκύψει από τη σχέση (3.64), πρέπει να ικανοποιεί το επόμενο κριτήριο:

$$N_{\sigma} \leq \left\lfloor \frac{V_{max}}{V_{oc} * \eta_{\delta,V}} \right\rfloor \quad (3.65)$$

Χαμηλότερη πιθανή θερμοκρασία περιοχής °C	Συντελεστής διόρθωσης τάσης $\eta_{\delta,V}$
10	1,08
0	1,10
-10	1,13
-20	1,17
-40	1,25

**Πίνακας 3.1:** ελάχιστες πιθανές θεοκρασίες περιβάλλοντα αέρα περιοχής και συντελεστής διόρθωσης τάσεως

Π.χ. αν θεωρήσουμε ότι το ΦΒ σύστημα πρόκειται να εγκατασταθεί σε τόπο με ελάχιστη πιθανή θερμοκρασία 0°C, η τάση-κριτήριο ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc,κρ}$  του ΦΒ συλλέκτη είναι:

$$V_{oc,κρ} = V_{oc} * \eta_{\delta,V}$$

Για  $V_{oc} = 22$  V και  $\eta_{\delta,V} = 1,1$ , προκύπτει  $V_{oc,κρ} = 24,2$  V. Κατά συνέπεια, ο μέγιστος αριθμός ΦΒ συλλεκτών σε σειρά, με προδιαγραφές χώρας εφαρμογής  $V_{max} = 800$  V, είναι:

$$N_{\sigma} \leq \left\lfloor \frac{800}{24,2} \right\rfloor = 33$$

Άρα, στον τόπο αυτό δεν επιτρέπεται να συνδεθούν σε σειρά, περισσότερα των 33 ΦΒ συλλεκτών, με ονομαστική  $V_{oc} = 22$  V.

### **III. Ο καθορισμός αριθμού παράλληλων κλάδων φωτοβολταϊκών συλλεκτών**

Στο τελευταίο βήμα, υπολογίζεται ο αριθμός  $N_{\pi}$  παράλληλων κλάδων των ΦΒ συλλεκτών. Με γνωστά το συνολικό αριθμό  $N^*$  των ΦΒ συλλεκτών, από τον αρχικό υπολογισμό και τον αριθμό  $N_{\sigma}$  των ΦΒ συλλεκτών που πρέπει συνδεθούν σε σειρά, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{\pi} = \left\lceil \frac{N^*}{N_{\sigma}} \right\rceil \quad (3.66)$$

Ο ακέραιος αριθμός  $N_{\pi}$ , πρέπει να ικανοποιεί το κριτήριο ρεύματος, που αναφέρεται στη συνέχεια, για το περιορισμό του ολικού μέγιστου ρεύματος της ΦΒ συστοιχίας, για τη φόρτιση των ηλεκτρικών συσσωρευτών.

#### **Περιορισμός ολικού μέγιστου ρεύματος ΦΒ συστοιχίας για φόρτιση συσσωρευτών :**

Το ρεύμα που παρέχει η ΦΒ συστοιχία στο κύκλωμα φόρτισης, σχετίζεται άμεσα με το ρεύμα φόρτισης  $I_{\varphi}$  του ηλεκτρικού συσσωρευτή, που περιορίζεται με βάση την ανισότητα  $I_{\varphi} \leq C/10$ . Έτσι, εξετάζεται η περίπτωση που το ολικό ρεύμα ΦΒ συστοιχίας  $I_a$  φορτίζει τη μοναδική συστοιχία συσσωρευτών του ΦΒ συστήματος. Το ολικό ρεύμα ΦΒ συστοιχίας  $I_a$ , από όλους τους παράλληλους κλάδους, ισούται με:

$$I_a = I_{\pi} = N_{\pi} * I_m \quad (3.67)$$

όπου,  $I_m$  το ρεύμα του ΦΒ συλλέκτη που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Κατά συνέπεια, ο αριθμός  $N_{\pi}$  των παράλληλων κλάδων που καθορίζει το  $I_{\varphi}$ , πρέπει να είναι τόσο, ώστε να προκύπτει επαρκές ρεύμα φόρτισης, μέσα στα πλαίσια του προηγούμενου περιορισμού.

Οι κατασκευαστές παρέχουν ως τεχνικό στοιχείο, το ρεύμα μέγιστης ισχύος  $I_{m,m,STC}$  του ΦΒ συλλέκτη σε STC. Υψηλότερη πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας ΦΒ συλλέκτη, προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές. Η προκαλούμενη μεταβολή του  $I_m$ , λόγω αύξησης θερμοκρασίας, είναι πρακτικά, ασήμαντη. Αντίθετα, αύξηση της  $G_t$ , πέραν της τιμής της σε STC (1 kW/m<sup>2</sup>), προκαλεί σχεδόν αναλογική αύξηση του  $I_m$ . Σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας σε σύννεφα, σε συνδυασμό με τη διερχόμενη διαμέσου διάκενου στα σύννεφα, μπορεί να προκαλέσει ισχυρή αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Η κατάσταση αυτή είναι μικρής πιθανότητας και βαρύτητας.

Γενικά, καθορίζεται ένας συντελεστής διόρθωσης ρεύματος φόρτισης  $\eta_{\delta,I}$ , ίσο με  $\eta_{\delta,I} = 1,15$ , προκειμένου να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό της πραγματικής πιθανής τιμής του ρεύματος φόρτισης του συσσωρευτή της ΦΒ γεννήτριας. Το μέγιστο πιθανό ολικό ρεύμα ΦΒ συστοιχίας  $I_a$ , που αντιστοιχεί σε κατάσταση βραχυκύκλωσης ( $I_a = I_{SC}$ ), αρκεί να πληροί την επόμενη συνθήκη:

$$N_{\pi} * I_{m,m,STC} * \eta_{\delta,I} \leq \frac{C^*}{t_c} \quad (3.68)$$

όπου,  $I_{m,m,STC}$  το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος σε STC,  $C^*$  η υπολογισθείσα ενεργός τιμή  $C_{(0)}$  ή  $C_{(N)}$  της χωρητικότητας του συσσωρευτή και  $t_c = 10$  h.

Άρα, ο ακέραιος αριθμός  $N_{\pi}$  των παράλληλων κλάδων της ΦΒ συστοιχίας, πρέπει να ικανοποιεί την παραπάνω ανισότητα (3.68).

Σημειώνεται επίσης, ότι η μέγιστη ένταση ρεύματος στη γραμμή μεταφοράς  $I_{m,m,STC}$ , προσδιορίζει το εμβαδόν της διατομής του καλωδίου μεταφοράς, σύμφωνα με τον ισχύοντα ηλεκτρολογικό κανονισμό.

#### **3.3.2.4 Ο καθορισμός χαρακτηριστικών του ελεγκτή φόρτισης**

Για να καθοριστεί το είδος του ελεγκτή φόρτισης που θα χρησιμοποιηθεί στο ΦΒ σύστημα, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω ηλεκτρικά χαρακτηριστικά:

- Τάση εισόδου: πρέπει να ισούται, με τη τάση ανοικτού κυκλώματος της ΦΒ συστοιχίας:

$$N_{\sigma} * V_{oc,a} \quad (3.69)$$

- Ρεύμα εισόδου: πρέπει να ισούται, με το ρεύμα βραχυκυκλώματος της ΦΒ συστοιχίας:

$$N_{\pi} * I_{sc,a} \quad (3.70)$$

- Τάση εξόδου: πρέπει να ισούται, με την ονομαστική τάση  $V_B$  του συσσωρευτή.
- Ρεύμα εξόδου: πρέπει να ισούται, με το ρεύμα φόρτισης  $I_{\phi}$  του συσσωρευτή.

#### **3.3.2.5 Ο καθορισμός χαρακτηριστικών του αντιστροφέα**

Για να καθοριστεί το είδος του αντιστροφέα που θα χρησιμοποιηθεί στη ΦΒ γεννήτρια, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω ηλεκτρικά χαρακτηριστικά:

- Τάση εισόδου: πρέπει να ισούται, με την ονομαστική τάση  $V_B$  του συσσωρευτή.
- Ισχύς αιχμής (εισόδου): πρέπει να ισούται, με την συνολική εγκατεστημένη ισχύ  $E_L$  των φορτίων της εφαρμογής, έστω και για μικρό χρονικό διάστημα.
- Τάση εξόδου: πρέπει να ισούται, με την τάση των φορτίων κατανάλωσης (π.χ. 230 VAC).
- Ισχύς εξόδου: πρέπει να ισούται, με την ισχύ των φορτίων της εφαρμογής που λειτουργούν ταυτόχρονα. Θεωρώντας ότι ο συντελεστής ταυτοχρονισμού  $\eta_{\tau av}$  των φορτίων είναι 0,47, η ισχύς εξόδου είναι  $E_L * \eta_{\tau av}$ .

#### **3.3.2.6 Ο υπολογισμός αποδιδόμενης ισχύς του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους**

Η κάλυψη των απαιτήσεων από το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος πρέπει αφενός, να εξασφαλίζει τη λειτουργία της εγκατάστασης, όταν το ΦΒ σύστημα δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε επιπλέον ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας, αφετέρου, να επαναφέρει τους εκφορτισμένους συσσωρευτές στην κατάσταση πλήρους φόρτισης.

Ο χρόνος φόρτισης  $t_{(c)}$  του συσσωρευτή, από το H/Z, δίνεται από την σχέση:

$$t_{(c)} = \frac{\beta_{εκφ} * C^*}{\eta_q * I_{\varphi}} \quad (3.71)$$

Επομένως, το Η/Ζ θα πρέπει να έχει την δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας, τουλάχιστον για τον χρόνο φόρτισης  $t_{(c)}$  των συσσωρευτών.

Η ισχύς που απαιτείται από το Η/Ζ, για τη φόρτιση των συσσωρευτών σε χρόνο φόρτισης  $t_{(c)}$ , είναι:

$$P_{(N)} = 1,2 * V_B * I_{\varphi} \quad (3.72)$$

Τέλος, η συνολική αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ  $P_{H/Z}$  από το Η/Ζ, για την παράλληλη κάλυψη, της ισχύ των φορτίων  $P_{(0)}$ , κατά την κανονική λειτουργία της εφαρμογής και την ισχύ  $P_{(N)}$ , που απαιτείται από το Η/Ζ για τη φόρτιση των συσσωρευτών, δίδεται από τη σχέση:

$$P_{H/Z} = P_{(N)} + P_{(0)} \quad (3.73)$$

### **3.3.2.7 Ο υπολογισμός διατομής καλωδίων της γραμμής μεταφοράς**

Στα ΦΒ συστήματα είναι πολύ σημαντικός ο περιορισμός των απωλειών ενέργειας στις γραμμές μεταφοράς. Οι διατομές των καλωδίων σύνδεσης μεταξύ των ΦΒ συλλεκτών της ΦΒ συστοιχίας επιλέγονται έτσι ώστε, οι απώλειες σε αυτά, να μην ξεπερνούν το 2-3%. Επομένως, το αποδεκτό ποσοστό πτώσης τάσης στη γραμμή μεταφοράς πρέπει να είναι μικρότερο από 2-3%. Οι απώλειες που εμφανίζονται στη γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μιας ΦΒ γεννήτριας, μήκους  $L$ , από τη πηγή, ονομαστικής τάσεως  $V_{\pi}$ , μέχρι το σημείο αξιοποίησής της, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\Delta V}{V_{\pi}} = \frac{I(A)}{V_{\pi}(V)} * \frac{R}{l} \left( \frac{\Omega}{km} \right) * 2 * L(km) \quad (3.74)$$

όπου,  $R/l$  η αντίσταση του υλικού του αγωγού των καλωδίων ανά μονάδα μήκους του και  $l$ , το μήκος του αγωγού, με  $l = 2 * L$ , με  $L$  το μήκος της γραμμής μεταφοράς. Το  $R/l$  εκφράζεται συνήθως σε μονάδες  $\Omega/km$ . Η σχέση αυτή, προκύπτει από το νόμο του Ohm για τον αγωγό, σταθερής διατομής, της γραμμής μεταφοράς,  $\Delta V = I * R$ .

Προκειμένου να προσδιοριστεί η κατάλληλη διατομή καλωδίου, από τα διατιθέμενα τυποποιημένα συστήματα διατομώ, προσδιορίζεται αρχικά, σύμφωνα με το αποδεκτό ποσοστό απωλειών στη γραμμή μεταφοράς (π.χ. 2%), το ρεύμα που πρόκειται να τη διαρρέει και την τάση στην είσοδο της γραμμής, την τιμή του  $R/l$ , σε  $\Omega/km$ . Έτσι, η τιμή αυτή, προσδιορίζει την κατάλληλη τιμή της διατομής μέσω του παραπάνω πίνακα (3.2), όπου εμφανίζει την αντιστοιχία ωμικής αντίστασης  $\Omega$  ανά km χάλκινου καλωδίου με το εμβαδόν διατομής του, σε  $AWG$  ή  $mm^2$ .

Παραδείγματος χάριν, θεωρείται ότι κατοικία τροφοδοτείται από ΦΒ γεννήτρια με αριθμό ΦΒ συλλεκτών  $N = 4$  και χαρακτηριστικά:  $I_{sc} = 4,5$  A,  $V_{oc} = 21$  V και  $I_{m,m,STC} = 4,0$  A,  $V_{m,m,STC} = 17$  V σε κατάσταση STC. Ουσιαστικά, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας στο σημείο μέγιστης ισχύος σε STC,  $I_{m,m,STC}$  και  $V_{m,m,STC}$ , αντιπροσωπεύουν μια οριακή μέση κατάσταση λειτουργίας του ΦΒ συλλέκτη καθόλα το έτος. Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οριακές για τον υπολογισμό της καταλληλότερης διατομής των καλωδίων της, ώστε οι απώλειες σ αυτή, να μην ξεπερνούν το 2%.

Από τους δυνατούς συνδυασμούς σύνθεσης των ΦΒ συλλεκτών, αυτός με τους ΦΒ συλλέκτες σε σειρά χαρακτηρίζεται από υψηλή τάση και το μικρότερο δυνατό μέγιστο ρεύμα της ΦΒ συστοιχίας. Επίσης, η χρήση converter (για φόρτιση συσσωρευτή), δίδει τη δυνατότητα μεταφοράς ενέργειας ως το inverter υπό υψηλή τάση, οπότε μειώνεται αντίστοιχα το ρεύμα στη γραμμή μεταφοράς. Στις δύο αυτές καταστάσεις λόγω του μειωμένου ρεύματος, ελαχιστοποιούνται οι απώλειες αντίστασης των καλωδίων στις γραμμές μεταφοράς και συνακόλουθα η διατομή των καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνεπώς, η ΦΒ συστοιχία θα έχει ως τυπικά χαρακτηριστικά ρεύματος  $I_{m,a,STC}$  και τάσης  $V_{m,a,STC}$ :

$$I_{m,a,STC} = I_{m,m,STC} = 4 \text{ A}$$

$$V_{\pi} = V_{m,a,STC} = N * V_{m,m,STC} = 4 * 17 = 68 \text{ V}$$

Από την παραπάνω σχέση (3.74), προκύπτει:

$$\frac{R}{l} \left( \frac{\Omega}{km} \right) = \frac{\Delta V}{V_{\pi}} * \frac{V_{\pi}}{I} * \frac{1}{2 * L(km)} = 0,002 * \frac{68}{4} * \frac{1}{2 * 40 * 10^{-3}} = 4,25 \frac{\Omega}{km}$$

Επομένως, από τον παραπάνω πίνακα (3.2), προκύπτει ότι η πλησιέστερη στην τιμή αυτή τυποποιημένη διατομή καλωδίου μετρικού συστήματος, είναι  $4 \text{ mm}^2$ .

Τυποποιημένες διατομές αγωγών AWG	Τυποποιημένες διατομές αγωγών μετρικό σύστημα ( $\text{mm}^2$ )	R/l ( $\Omega/\text{km}$ ) Μέγιστη τιμή
20	0,5	36,7
18	0,75	24,8
17	1	18,2
16	1,5	12,2
14	2,5	7,56
12	4	4,7
10	6	3,11
8	10	1,84
6	16	1,16
4	25	0,734
2	35	0,529
1	50	0,391
2/0	70	0,27
3/0	95	0,195
4/0	120	0,154

**Πίνακας 3.2:** τυποποιημένες διατομές αγωγών καλωδίων χαλκού στο μετρικό σύστημα κατά αντίστοιχες τιμές ωμικής αντίστασης ανά km καλωδίου και προσεγγιστική αντιστοιχία του μετρικού με το Αγγλοσαξονικό σύστημα (AWG)

### 3.3.2.8 Ο υπολογισμός συνολικού κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος

Για τον υπολογισμό του πραγματικού συνολικού κόστους μιας ΦΒ γεννήτριας (κόστος προμήθειας, εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας), ακολουθούνται τα επόμενα βήματα:

- 1) Με βάση το επιτόκιο αναγωγής (τρέχον επιτόκιο)  $d$  (discount rate), που μπορεί να είναι επιτόκιο δανεισμού, προεξόφλησης, επένδυσης ή καταθέσεων και τον τρέχοντα πληθωρισμό  $i$  (inflation rate), υπολογίζεται το αποπληθωρισμένο επιτόκιο  $r$  (rate), από τη σχέση:

$$r = \frac{1+d}{1+i} - 1 = \frac{d-1}{1+i} \quad (3.75)$$

- 2) Υπολογίζεται το ολικό κόστος κύκλου ζωής της επένδυσης  $LCC$  (Life Cycle Cost), το οποίο αποτελείται από:

- Το αρχικό κόστος επένδυσης  $C_0$  (κόστος προμήθειας και εγκατάστασης του αρχικού συστήματος).
- Η διάρκεια ζωής της εγκατάστασης/επένδυσης  $N$  έτη.
- Το ολικό κόστος αντικατάστασης τμημάτων του συστήματος  $C_R$  :

Προκύπτει ως άθροισμα των τιμών κόστους αντικατάστασης  $C_{R,X}$ , όλων των αντικαθισταμένων τμημάτων  $X$  (π.χ. συσσωρευτών, Η/Ζ, ή), στο χρόνο ζωής  $N$  του συστήματος. Το  $C_{R,X}$  για το τμήμα  $X$ , προκύπτει με αναγωγή του κόστους αντικατάστασης του, στο έτος αρχικής επένδυσης του συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του αντίστοιχου παράγοντα παρούσας αξίας  $PVF$  (Present Value Factor).

$$PVF = (1+r)^{-n} \quad (3.76)$$

όπου,  $n$  το έτος αντικατάστασης του τμήματος  $X$ .

Ο παράγων αυτός μπορεί να γραφεί με την επόμενη αναλυτικότερη μορφή:

$$PVF_{X,j} = (1+r)^{-j \cdot N_{R,X}} \quad (3.77)$$

όπου,  $N_{R,X}$  η περίοδος αντικατάστασης του τμήματος  $X$  και  $j$  οι φορές αντικατάστασης του μέσα στο χρόνο ζωής  $N$  του συστήματος ( $j = 1 \dots v_X$ , όπου το ακέραιο μέρος του κλάσματος  $N/N_{R,X}$  και  $n = j \cdot N_{R,X}$ ).

Δηλαδή:

$$C_R = \sum_X C_{R,X} \quad \mu\epsilon \quad C_{R,X} = \sum_j^{v_X} PVF_{X,j} \cdot C_{R,X,j} \quad (3.78)$$

όπου,  $C_{R,X,j}$  το κόστος αντικατάστασης του τμήματος  $X$ , το έτος  $j \cdot N_R$ . Το κόστος αυτό λαμβάνεται συνήθως σταθερό ίσο με το κόστος αρχικής αγοράς του  $C_{0,X}$ .

➤ **Το ολικό κόστος συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος ανά έτος  $C_{OM}$  :**

Προκύπτει με αναγωγή του ολικού ετήσιου κόστους συντήρησης και λειτουργίας των τμημάτων του, θεωρούμενο σταθερό ανά έτος, σε παρούσα αξία, με αναφορά στο χρόνο ζωής του συστήματος, μέσω του παράγοντα ανάκτησης κεφαλαίου  $CRF$  (Capital Recovery Factor).

$$CRF = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-N}} \quad (3.79)$$

Αν  $C_{OM,y}$  (Operation & Maintenance), είναι το ολικό κόστος συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος, ανά έτος, για  $N$  έτη, η παρούσα αξία του  $C_{OM}$ , είναι:

$$C_{OM} = \frac{C_{OM,y}}{CRF} \quad (3.80)$$

Στην περίπτωση  $i = d$ , στη θέση του  $CRF$  τίθεται  $1/N$ .

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, το ολικό κόστος κύκλου ζωής της επένδυσης  $LCC$ , δίδεται από τη σχέση:

$$LCC = C_0 + C_R + C_{OM} - S \quad (3.81)$$

όπου,  $S$  η απομένουσα αξία του συστήματος στο τέλος του χρόνου ζωής του.

- 3) Υπολογίζεται το Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος  $KEOO$ , αποτελούμενο από το Άμεσο Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος,  $AKEOO$ , που προκύπτει με αφαίρεση των ετήσιων εκροών (εξόδων) από τις ετήσιες εισροές της επένδυσης και το Έμμεσο Καθαρό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος  $EKEOO$ :

$$KEOO = AKEOO + EKEOO \quad (3.82)$$

όπου το  $AKEOO$ , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$AKEOO = A * K * \Pi \quad (3.83)$$

με  $A$  = Περίοδος αξιοποίησης μέσα στο έτος σε ημέρες

$K$  = Κόστος ηλεκτρικής κιλοβατώρας

$\Pi$  = Πλήθος ΦΒ κιλοβατωρών ανά ημέρα

Εμπειρικά προκύπτει ότι  $EKEOO = 50\% AKEOO$ . Συνεπώς:

$$KEOO = 1,5 * AKEOO \quad (3.84)$$

Το  $EKEOO$  είναι αποτέλεσμα:

- Του περιορισμού της οικολογικής επιβάρυνσης, λόγω της χρήσης Ανανεώσιμης Πηγής Ενέργειας.
- Της μείωσης των πρόσθετων κοινωνικών δαπανών, που προκαλούνται από τη χρήση των συμβατικών καυσίμων, π.χ. ιατρική και φαρμακευτική περίθαλψη, πρόωρη σύνταξη κ.α.

Όταν το  $EKEOO$  δεν αποτιμάται τότε  $KEOO = AKEOO$ .

4) Η Καθαρή Παρούσα Αξία  $KΠΑ$  ( $NPV$ , Net Present Value), της επένδυσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$NPV = \frac{KEOO}{CRF} - C_0 + S * PVF(N) \quad (3.85)$$

Αν η απομένουσα αξία θεωρηθεί μηδενική ( $S = 0$ ), προκειμένου να προσδιοριστεί η τιμή της στη δυσμενέστερη περίπτωση, τότε η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$NPV = \frac{KEOO}{CRF} - C_0 \quad (3.86)$$

Η επένδυση χαρακτηρίζεται ως βιώσιμη, από το έτος  $N$  εκείνο ( $N = N_{EΠΑ}$ , Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής), από το οποίο και μετά η  $KΠΑ$  καθίσταται θετική. Το  $N_{EΠΑ}$  προκύπτει από τη προηγούμενη σχέση (3.85), θέτοντας  $KΠΑ (N_{EΠΑ}) = 0$ .

$$N_{EΠΑ} = \frac{-\ln\left(\frac{KEOO - r * C_0}{KEOO - r * S}\right)}{\ln(1 + r)} \quad (3.87)$$

Αν η απομένουσα αξία θεωρηθεί μηδενική ( $S = 0$ ), τότε η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$N_{EΠΑ} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{r * C_0}{KEOO}\right)}{\ln(1 + r)} \quad (3.88)$$

5) Το κόστος ενέργειας  $COE$ , δηλαδή, το κόστος της παραγόμενης, από το σύστημα, ηλεκτρικής kWh, προκύπτει διαιρώντας το ολικό ετήσιο κόστος της επένδυσης ( $ALCC$ , Annualised LCC),  $ALCC = LCC * CRF$ , διά της ετησίως παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας  $E_y$  σε kWh

$$COE = \frac{LCC * CRF}{E_y} \quad (3.89)$$

Για ρεαλιστικό προσδιορισμό του  $COE$ , στη θέση της  $E_y$ , πρέπει να τίθεται η ενέργεια από το σύστημα, η οποία τελικώς θα αξιοποιηθεί. Ιδιαίτερα, στην περίπτωση απομονωμένων ενεργειακών συστημάτων (εκτός δικτύου), στη θέση της  $E_y$ , τίθεται η ετήσια ενεργειακή ζήτηση φορτίων  $E_{L,y}$ .



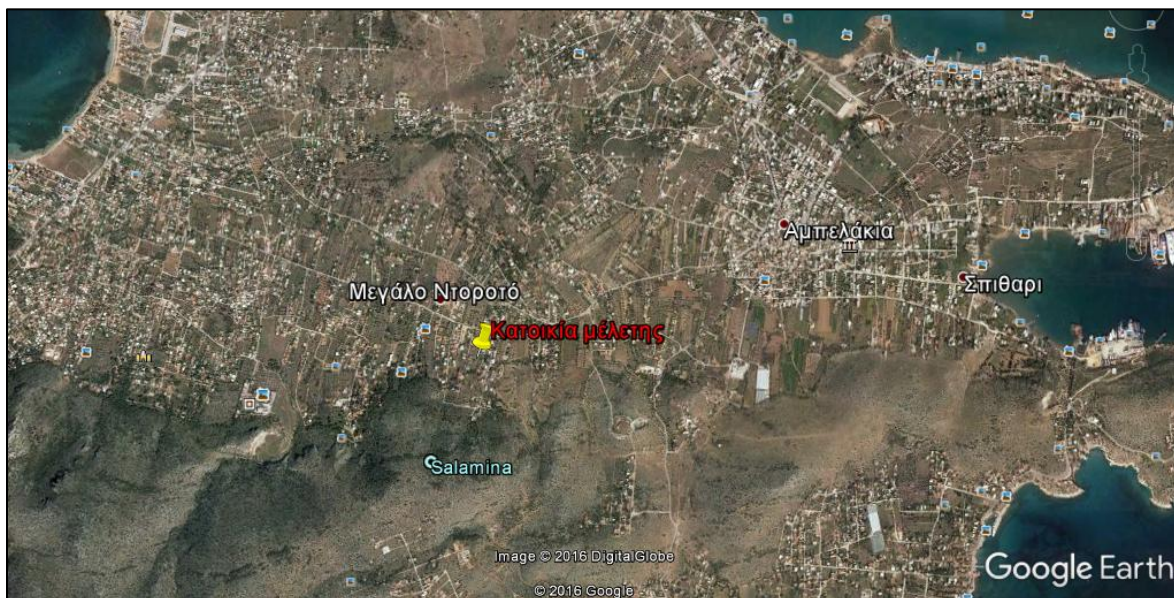
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

#### Μελέτη υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτόνομη οικία

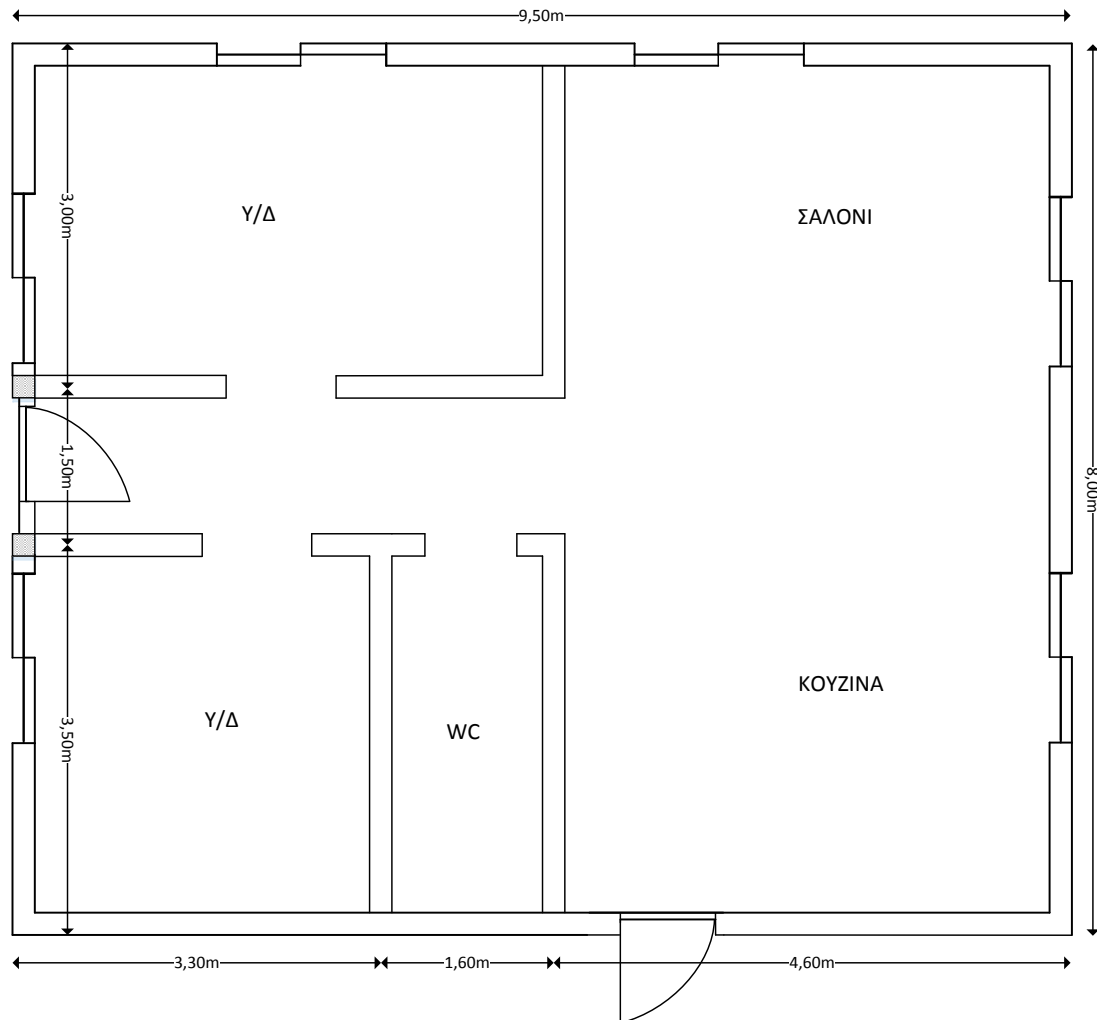
##### 4.1 Η περιγραφή της τοποθεσίας και χωροθέτησης της υπό μελέτης αυτόνομης οικίας

Η οικία βρίσκεται στην περιοχή Ντοροτό στην Σαλαμίνα. Αποτελείται από το κυρίως κτίριο, το οποίο είναι διώροφο και έχει συνολικό εμβαδό  $150 \text{ m}^2$  και ένα ακόμα βοηθητικό κτίριο το οποίο χρησιμοποιείται ως εργαστήριο και έχει εμβαδό  $45 \text{ m}^2$ . Τα δύο κτίσματα βρίσκονται σε οικόπεδο συνολικής επιφάνειας  $900 \text{ m}^2$ , το οποίο διαθέτει τον απαιτούμενο χώρο για την εγκατάσταση μικρού φωτοβολταϊκού συστήματος. Χώρος υπάρχει ακόμα και στην στέγη του κύριου κτίσματος, η οποία είναι δίριχτη, με την μία πλευρά να έχει νότιο προσανατολισμό  $35^\circ$  και  $5^\circ$  αζιμούθια απόκλιση προς την δύση.



Σχήμα 4.1: τοποθεσία της υπό μελέτης αυτόνομης οικίας

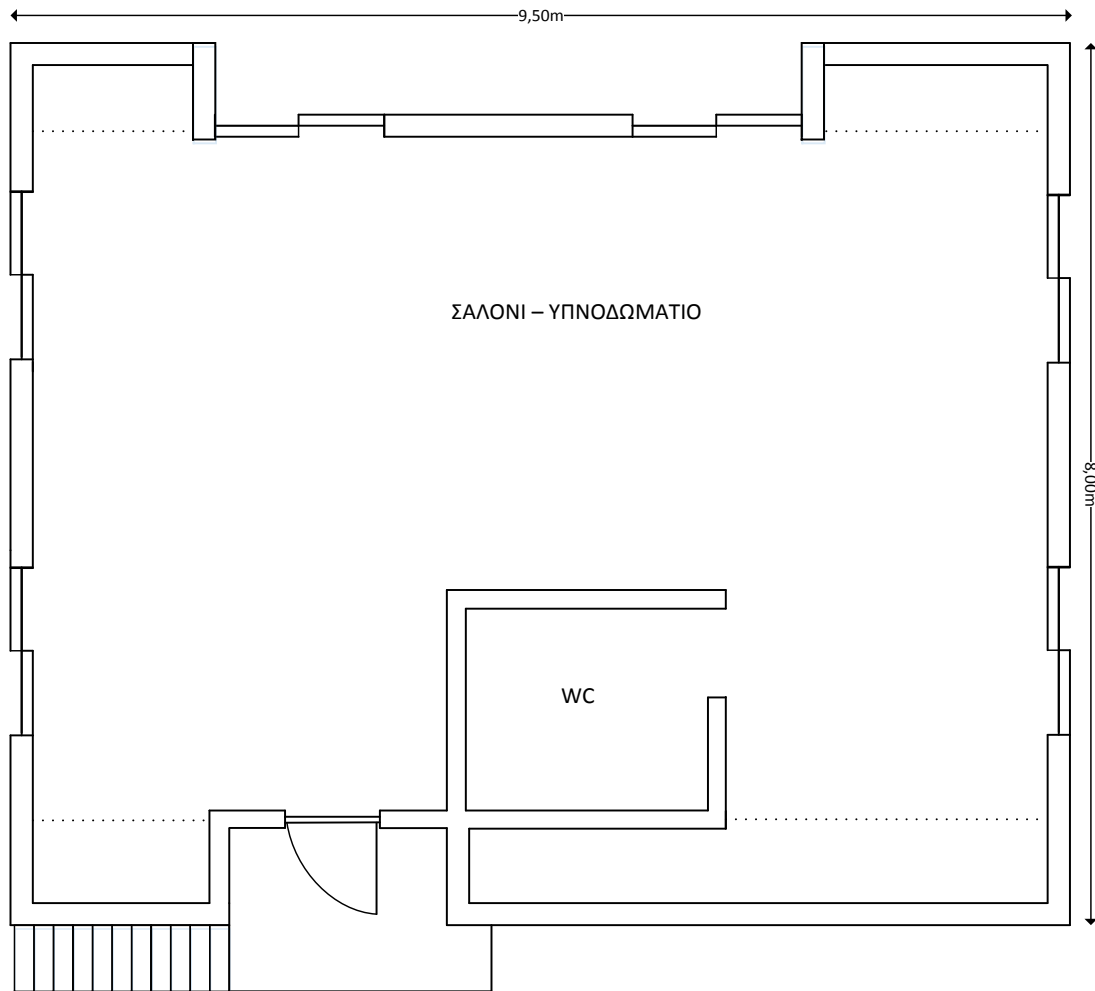
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι κατόψεις του βοηθητικού κτιρίου, των ορόφων του κεντρικού κτιρίου της οικίας, καθώς και της στέγης της.



Ισόγειο

Κλίμακα 1:50

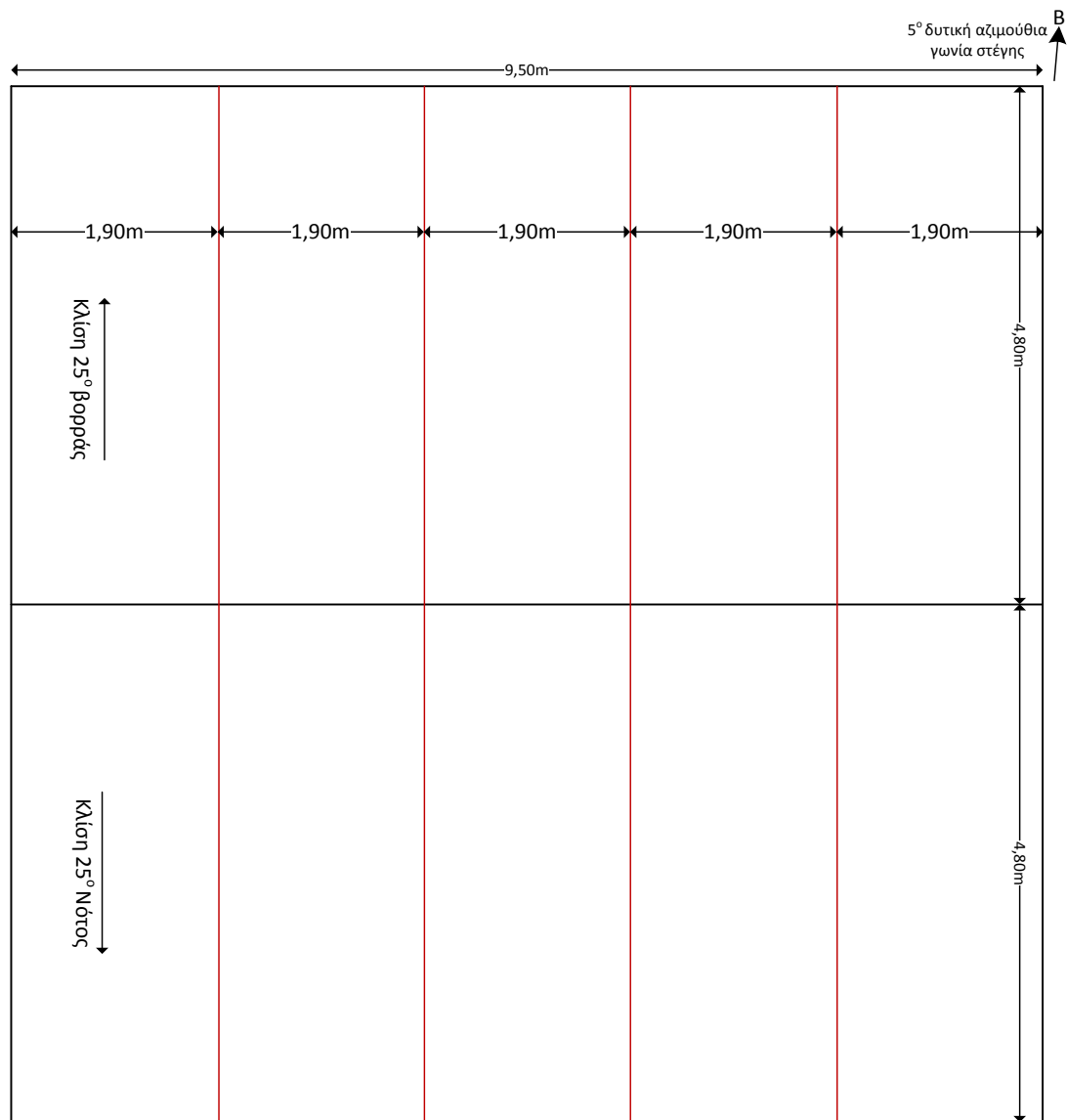
Σχήμα 4.2: κάτοψη ισογείου της υπό μελέτης αυτόνομης οικίας



1<sup>ος</sup> όροφος

Κλίμακα 1:50

Σχήμα 4.3: κάτοψη 1<sup>ου</sup> ορόφου της υπό μελέτης αυτόνομης οικίας



Στέγη

Κλίμακα 1:50

Σχήμα 4.4: κάτοψη στέγης της υπό μελέτης αυτόνομης οικίας

## 4.2 Η εκτίμηση για την επιλογή διατάξεων του υπό μελέτης υβριδικού συστήματος

---

Στην μελέτη προτείνεται η εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, το οποίο όμως θα χρησιμοποιείται μόνο ως εφεδρεία σε δυσμενείς περιόδους οι οποίες εμφανίζονται κατά την χειμερινή περίοδο όταν πλέον το κόστος του εξοπλισμού για περαιτέρω αυτονόμηση του συστήματος κρίνεται τελείως ασύμφορο.

Τα στοιχεία τα οποία σταθεροποιούν γενικότερα το σύστημα και μπορούν να βελτιώσουν κατά κάποιο βαθμό την απόδοση της χρήσης ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους είναι οι συσσωρευτές. Δημιουργώντας ένα αποθηκευτικό σύστημα μεγάλης χωρητικότητας το οποίο μπορεί να αποθηκεύει το 100% της ονομαστικής ισχύος του ζεύγους, βελτιώνουμε σημαντικά τον βαθμό απόδοσης του ίδιου του ζεύγους. Σε συνάρτηση με αυτό αν αναλογιστούμε πως θα γίνει και χρήση μίας φωτοβολταϊκής γεννήτριας μπορούμε να υποθέσουμε πως αυξάνοντας την αποθηκευτική δυνατότητα των συσσωρευτών δεν θα χρειαζόταν ποτέ να γίνει χρήση ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα έχουμε δύο στοιχεία τα οποία είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο τα αυτόνομα συστήματα δεν βρίσκουν εφαρμογή παντού, παρά μόνο όταν το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας δεν δύναται να τροφοδοτήσει την εγκατάσταση ή το κόστος το οποίο απαιτείται για την τροφοδότηση της είναι πολύ υψηλό. Πρώτο και κυριότερο είναι το κόστος των συσσωρευτών. Οποιασδήποτε τεχνολογίας συσσωρευτές και εάν επιλέξουμε από αυτούς οι οποίοι είναι διαθέσιμοι στην εποχή μας, παρατηρούμε αρκετά υψηλό κόστος αγοράς το οποίο πολλές φορές φτάνει το μισό του συνολικού έργου, (εάν επιλεγούν συσσωρευτές διάρκειας πολλών ετών). Ακόμα πιο αρνητικό είναι το γεγονός πως η τιμή τους έχει αρχίσει να ανεβαίνει ανησυχητικά αντί να κατεβαίνει όπως θα ήταν λογικό λόγω της πολύ μεγάλης αύξησης της αγοράς των συσσωρευτών τα τελευταία έτη. Η τιμή του μόλυβδου κατά το τελευταίο μόλις έτος έχει αυξηθεί κατά 30% και η αύξηση αυτή έχει μετακυλήσει και στο τελικό προϊόν κατά ένα ποσοστό της τάξης του 20%. Και καθώς ακόμα και σήμερα οι συσσωρευτές μολύβδου είναι αυτοί οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά κόρων σε αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας το γεγονός αυτό έρχεται να προστεθεί στην είδη ασύμφορη τιμή των συσσωρευτών οι οποίοι προορίζονται για συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ένα δεύτερο αρνητικό στοιχείο σχετικά με την χρήση συσσωρευτών σε τέτοια συστήματα είναι η διάρκεια ζωής τους η οποία σε μέγιστο βαθμό μπορεί να φτάσει τα 13-15 χρόνια κάνοντας χρήση των πλέον σύγχρονων στοιχείων και υποθέτοντας πως η συνθήκες λειτουργείας τους αλλά και η συντήρησή τους (σε όποιες τεχνολογίες αυτή απαιτείται), είναι ιδανικές.

Εύκολα κάποιος διακρίνει πως οι συσσωρευτές είναι ίσως το πιο σημαντικό μέρος μίας αυτόνομης εγκατάστασης, αλλά και από ότι αρχίζει να φαίνεται θα είναι το σημαντικότερο στοιχείο γενικότερα στην διαχείριση των ανανεώσιμων πηγών από τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά όσο το κόστος τους παραμένει υψηλό και όσο οι τεχνολογικές τους εξελίξεις βασίζονται σε υφιστάμενες τεχνολογίες των οποίων ο βαθμός απόδοσης μπορεί να βελτιώνεται ελαφρώς αλλά δεν παρουσιάζεται κάποιο άλμα, τόσο η χρήση τους στο πεδίο των ανανεώσιμων πηγών θα είναι περιορισμένη μόνο στον απαραίτητο βαθμό και θα εξαρτάται από δευτερογενής παράγοντες όπως θεσμικά κίνητρα για την χρησιμοποίησή τους ή ίσως και την υποχρεωτική εφαρμογή τους σε σταθμούς παραγωγής από ΑΠΕ. Τόσο επίσης θα χρειάζεται προσοχή η επιλογή και η διαστασιολόγηση τους σε διάφορες εφαρμογές ώστε να δημιουργούνται συστήματα αποδοτικά και αξιόπιστα προς τον εκάστοτε επενδυτή.

Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες καθώς και οι αντιστροφείς, είναι τα στοιχεία που ολοκληρώνουν το σύστημα μας και τα οποία παρουσιάζουν μείωση στο κόστος τους τα τελευταία έτη. Ειδικά στις

φωτοβολταϊκές γεννήτριες έχει παρατηρηθεί μείωση κόστους 80% στην τελευταία δεκαετία καθιστώντας τις μια από τις πιο φθηνές λύσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ελέγχουμε την ισχύ των φορτίων κατά την χειμερινή περίοδο διότι εκείνη είναι η περίοδος κατά την οποία το σύστημα βρίσκεται στην δυσμενέστερη κατάσταση. Αυτό συμβαίνει λόγω της μειωμένης παραγωγής του φωτοβολταϊκού, η οποία οφείλεται κατά κύριο λόγο στην μικρή διάρκεια της ημέρας, αλλά επίσης λόγω του ότι η γωνία του ηλίου είναι μικρότερη σε σχέση με το καλοκαίρι.

Κατά τους υπόλοιπους μήνες του έτους η παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος θα υπερκαλύπτει την ζήτηση με αποτέλεσμα αυτή να μην χρησιμοποιείται εκτός εάν ο χρήστης αποφασίσει να προσθέτει την συγκεκριμένη περίοδο φορτία.

Οι Inverters οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν παρέχουν την δυνατότητα να τροφοδοτούν συγκεκριμένα επιπρόσθετα φορτία, όταν υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια η οποία δεν καταναλώνεται, ή ακόμα και να διοχετεύσουν την ενέργεια αυτή στο δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κάτι τέτοιο όμως στην περίπτωση μας δεν είναι δυνατό να συμβεί λόγω του ότι δεν υπάρχει σύνδεση με το δημόσιο δίκτυο.

Απώτερος σκοπός είναι η ενέργεια η οποία παράγεται από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια να μας παρέχει όσο το δυνατόν περισσότερη αυτονομία ακόμα και κατά τους χειμερινούς μήνες και το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος να χρησιμοποιείται μόνο σε περιόδους παρατεταμένης συννεφιάς (μεγαλύτερης των τριών ημερών). για τον περιορισμό της χρήσης συμβατικών καυσίμων

Στην περίπτωση μας υπερδιαστασιολόγηση ορισμένων στοιχείων που απαρτίζουν το σύστημα κρίνεται αναγκαία και αυτό διότι σαν εναλλακτική λύση στην περίπτωση που η παραγόμενη από τον ήλιο ενέργεια δεν μας καλύπτει, έχουμε μόνο το πετρέλαιο του οποίου το κόστος είναι πολύ υψηλό και η μόνιμη χρήση του σε τόσο μικρές εγκαταστάσεις θεωρείτε σίγουρα ασύμφορη.

### 4.3 Η ανάλυση της ηλεκτρικής ενεργειακής ανάγκης της υπό μελέτης αυτόνομης οικίας

---

Η καταγραφή της ηλεκτρικής ενεργειακής ανάγκης, μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης, πραγματοποιείται κατά την χειμερινή περίοδο του έτους, καθώς ένα υβριδικό σύστημα, βρίσκεται συνήθως στην δυσμενέστερη κατάσταση του, για την κάλυψη της ηλεκτρικής ενεργειακής ζήτησης από τα ηλεκτρικά φορτία της εγκατάστασης. Αυτό συμβαίνει λόγω της μειωμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, η οποία οφείλεται κατά κύριο λόγο στην μικρή διάρκεια της ημέρας, αλλά επίσης και λόγω του ότι, η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρότερη σε σχέση με το καλοκαίρι. Έτσι, η καταγραφή της ηλεκτρικής ενεργειακής ανάγκης, κατά την χειμερινή περίοδο του έτους, ενδείκνυται για την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ταυτόχρονα, για τον περιορισμό της χρήσης διατάξεων συμβατικών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην υπό μελέτη αυτόνομη οικία, κατοικεί όλο το έτος, τριμελής οικογένεια και οι ηλεκτρικές ενεργειακές ανάγκες της είναι λίγο αυξημένες σε σχέση με το μέγεθος της, πρώτων, λόγω της έλλειψης συστήματος κεντρικής θέρμανσης, καθώς οι χώροι θερμαίνονται/ψύχονται ξεχωριστά μέσω ηλεκτρικών συσκευών ή όπως στην περίπτωση του ισόγειου, όπου υπάρχει ενεργειακό τζάκι, παρέχοντας θέρμανση σε όλο τον όροφο μέσω αεραγωγών, αλλά και δεύτερων, λόγω του εργαστηρίου στον βοηθητικό χώρο, στο οποίο είναι εγκατεστημένος μικρός Η/Μ εξοπλισμός.

Θετικό σημείο στις ηλεκτρικές ενεργειακές ανάγκες της αυτόνομης οικίας, είναι το γεγονός πως χρησιμοποιείται φούρνος κουζίνας με κατανάλωση υγραερίου και διαθέτει ηλιακό θερμοσίφωνα 300 lt, ικανός να παρέχει νερό για όλα τα μέλη της οικογένειας σχεδόν για όλες τις ημέρες του έτους.

Στην συνέχεια, ακολουθεί πίνακας, όπου παρουσιάζονται τα ηλεκτρικά φορτία της υπό μελέτης αυτόνομης οικίας, ως προς την ηλεκτρική ισχύ τους αλλά και ως προς την ηλεκτρική ενεργειακή κατανάλωση τους κατά την χειμερινή περίοδο του έτους, ώστε να πραγματοποιηθεί μελέτη, για την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ταυτόχρονα για τον περιορισμό της χρήσης διατάξεων συμβατικών καυσίμων.

Είδος φορτίου	Τεμάχια	Ισχύς συσκευής (W)	Ώρες λειτουργίας ανά ημέρα (H)	Ενεργειακή κατανάλωση ανά ημέρα (Wh)
Φορτία μεγάλης Ισχύος (Οικίας)				
Ηλεκτρικός στεγνωτήρας μαλλιών	1	2000	5min (0,08)	160
Ηλεκτρική σκούπα	1	2000	15min (0,25)	500
Air condition 9000BTU	1	1000	120min (2)	2000
Καφετιέρα	1	1600	10min (0,16)	250
Αντίσταση ηλιακού θερμοσίφωνα	1	4000	10min (0,16)	640
Λοιπά φορτία οικίας				
Τηλεόραση	2	120	120min (2)	480
Ηλεκτρονικός υπολογιστής	3	100	120min (2)	600
Ψυγείο	1	140	900min (15)	2100
Ενυδρείο	1	120	900min (15)	1800
Ραδιόφωνο	1	50	300min (5)	250
Φωτισμός				
Λαμπτήρες αλογόνου (E27)	10x0,5ταυτ. 5	80	360min (6)	2400
Λαμπτήρες φθορισμού (T8)	8x0,5ταυτ. 4	50	360min (6)	1200
Λαμπτήρες οικονομίας (CFL)	8x0,5ταυτ. 4	30	360min (6)	720
Φορτία μεγάλης Ισχύος εργαστηρίου				
Γωνιακός τροχός	1	900	5min (0,08)	72
Ηλεκτροσυγκόλληση	1	4000	5min (0,08)	320
Φαλτσοπρίονο	1	1800	10min (0,16)	288
Σέγα	1	1000	10min (0,16)	160
Δράπανο	1	800	10min (0,16)	130
Μικρό καλοριφέρ Λαδιού	1	1000	60min (1)	1000
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>31</b>	<b>21.350 W</b>	<b>-</b>	<b>15.070 Wh</b>

**Πίνακας 4.1:** ηλεκτρική ενεργειακή κατανάλωση της υπό μελέτης αυτόνομης οικίας



#### 4.4 Η διαστασιολόγηση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας του υβριδικού συστήματος

---

Κατά την διαστασιολόγηση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας το βασικό δεδομένο το οποίο λαμβάνεται υπόψη είναι η συνολική ηλεκτρική ενεργειακή κατανάλωση ανά ημέρα, κατά τους χειμερινούς μήνες, όπου σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα (4.1), η ηλεκτρική ενεργειακή κατανάλωση της υπό μελέτης αυτόνομης οικίας, έχει υπολογιστεί  $\approx 15,070 kWh$ .

Χρειάζεται μία φωτοβολταϊκή συστοιχία η οποία θα είναι ικανή να παράγει κατά μέσο όρο τις ημέρες του Δεκεμβρίου, οπότε και εμφανίζεται το χειμερινό ηλιοστάσιο, τις απαιτούμενες  $kWh$  και εάν είναι εφικτό να υπάρχει ελάχιστα μεγαλύτερη παραγωγή. Αυτό διότι εάν έχουμε παρατεταμένη εμφάνιση συννεφιασμένων ημερών και οι συσσωρευτές φτάσουν στο κατώφλι το οποίο τους έχουμε ορίσει, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα τις επόμενες ημέρες να γίνεται σταδιακή αναπλήρωση των χαμένων αποθηκευμένων  $Wh$  από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια προς τους συσσωρευτές.

Για την επιλογή του μεγέθους της φωτοβολταϊκής συστοιχίας θα κάνουμε χρήση της εφαρμογής PVGIS. Η εφαρμογή καταγράφοντας για χρόνια ηλιακά δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς σε όλη την Ευρώπη καθώς και ηλιακά δεδομένα από δορυφορικούς σταθμούς, είναι σε θέση να παρέχει πολύ εύκολα δεδομένα για την εκτιμώμενη ηλεκτρική παραγωγή των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης τους, τον προσανατολισμό τους, δηλαδή με την κλίση τους ως προς το επίπεδο της γης, αλλά και ως προς την αζιμούθια γωνία τους και τέλος ανάλογα με τον τύπο του φωτοβολταϊκού συλλέκτη, του οποίου γίνεται χρήση.

Στο παρακάτω σχήμα (4.5), παρουσιάζεται ο υπολογισμός της ηλεκτρικής παραγωγής, βάση της εφαρμογής PVGIS, για φωτοβολταϊκή συστοιχία με ισχύ αιχμής  $1 kWp$ , τοποθετημένη στην στέγη της υπό μελέτης οικίας, η οποία όπως αναφέρεται προηγουμένως έχει  $35^\circ$  νότια κλίση με αζιμούθια γωνία  $5^\circ$  προς την δύση. Επίσης, ορίζεται το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της τοποθεσίας της υπό μελέτης οικίας και επιλέγεται φωτοβολταϊκός συλλέκτης πολυκρυσταλλικού Πυριτίου.

Παρατηρείται ότι η μικρότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζεται κατά τον μήνα Δεκέμβριο και αυτή είναι  $2,58 kWh$  κατά μέσο όρο ημερησίως. Για να καλυφθεί η ζήτηση των  $15,04 kWh$  ημερησίως χρειάζεται  $6 kWp$  φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Επειδή η εφαρμογή σε αυτό το στάδιο δεν είναι δυνατό να υπολογίσει απώλειες οι οποίες εμφανίζονται κατά την μετατροπή της ενέργειας από τους διάφορους μετατροπείς οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε αυτόνομα συστήματα (πχ. Ρυθμιστές φόρτισης) παρά μόνο από έναν κεντρικό αντιστροφέα και επίσης δεν λαμβάνει υπόψη της απώλειες ενέργειας οι οποίες εμφανίζονται πάνω στους συσσωρευτές κατά την φόρτιση και εκφόρτιση τους (οι οποίες για τα στοιχεία τα οποία επιλέγονται παρακάτω μπορεί να φτάσουν έως και το 15%), επιλέγεται να γίνει αύξηση της γεννήτριας στα  $7 kWp$ .

Σύμφωνα και με τις μετρήσεις, επιλέγεται φωτοβολταϊκός συλλέκτης τεχνολογίας πολυκρυσταλλικού Πυριτίου, τυποποιημένης διάστασης  $166 cm \times 100 cm \times 3,5 cm$  του κατασκευαστικού οίκου Hansol ο οποίος έχει έδρα την Ν. Κορέα. Ο κάθε φωτοβολταϊκός συλλέκτης θα έχει ισχύ αιχμής  $260 Wp$  και συμμορφώνεται με όλα τα Ευρωπαϊκά πρότυπα ποιότητας για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Για το σύνολο των  $7 kWp$  τα οποία απαιτούνται στο έργο χρειάζονται 27 φωτοβολταϊκές συλλέκτες τα οποία είναι δυνατό να τοποθετηθούν στο σύνολο τους στην στέγη της οικίας.

## Performance of Grid-connected PV

### PVGIS estimates of solar electricity generation

Location: 37°57'15" North, 23°30'44" East, Elevation: 66 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF

Nominal power of the PV system: 1.0 kW (crystalline silicon)

Estimated losses due to temperature and low irradiance: 10.3% (using local ambient temperature)

Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.4%

Other losses (cables, inverter etc.): 14.0%

Combined PV system losses: 24.7%

Fixed system: inclination=35 deg., orientation=5 deg.				
Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	2.89	89.5	3.63	113
Feb	3.49	97.7	4.44	124
Mar	4.51	140	5.84	181
Apr	4.81	144	6.35	190
May	4.98	154	6.67	207
Jun	5.28	158	7.21	216
Jul	5.20	161	7.22	224
Aug	5.15	160	7.16	222
Sep	4.84	145	6.60	198
Oct	4.08	126	5.41	168
Nov	3.27	98.2	4.23	127
Dec	2.58	80.0	3.26	101
Year	4.26	130	5.67	173
Total for year		1550		2070

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh)

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh)

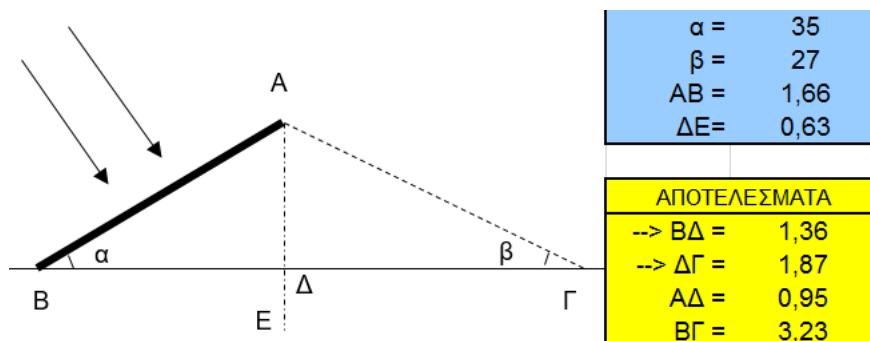
Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>)

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>)

Σχήμα 4.5: παραγωγή φωτοβολταϊκής συστοιχίας ισχύος αιχμής 1KWp βάση τοπικών δεδομένων

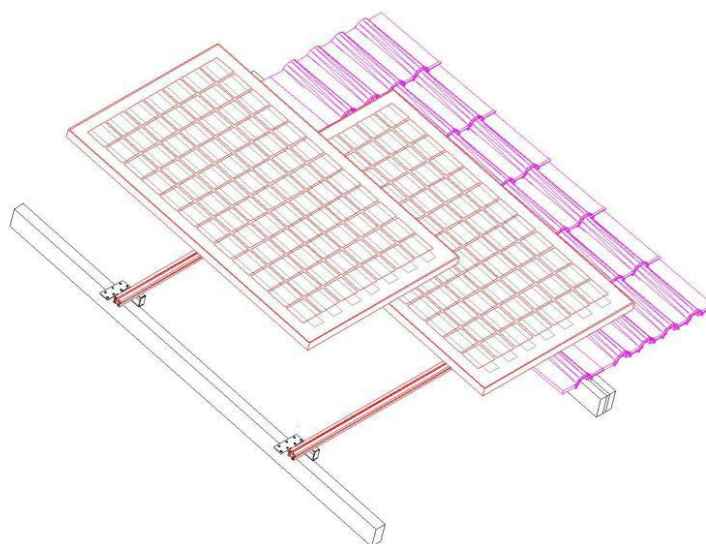
#### 4.5 Η χωροθέτηση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας του υβριδικού συστήματος

Για τον υπολογισμό της προβολής των φωτοβολταϊκών συλλεκτών υπό κλίση στο επίπεδο της γης χρησιμοποιήθηκε υπολογιστικό φύλλο excel στο οποίο εισάγοντας τα δεδομένα του των φωτοβολταϊκού συλλέκτη και την κλίση στην οποία πρόκειται να τοποθετηθεί, εφαρμόζοντας τους τριγωνομετρικούς τύπους παίρνουμε αποτελέσματα για την προβολή τους στο επίπεδο της γης. Το φύλλο έχει δημιουργηθεί με σκοπό τον υπολογισμό της σκίασης μεταξύ τραπεζιών στο ίδιο επίπεδο αλλά κάτι τέτοιο στην περίπτωση της στέγης δεν χρειάζεται.

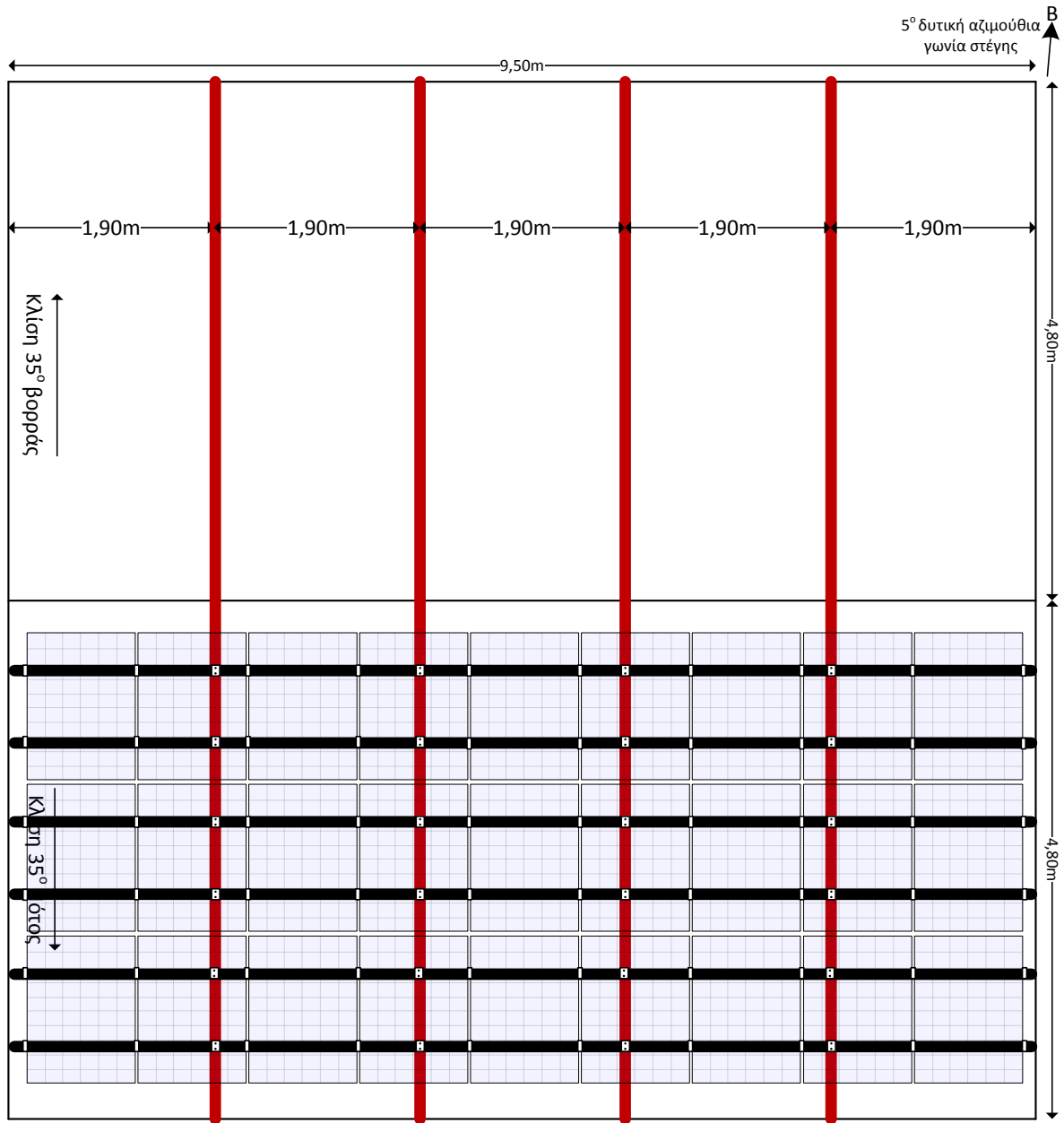


Σχήμα 4.6: φύλλο excel υπολογισμού σκίασης

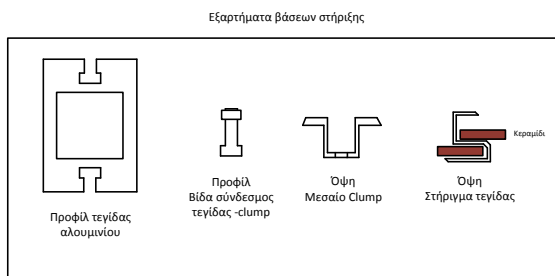
Οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες θα τοποθετηθούν σε τρεις σειρές των εννέα τεμαχίων ανά σειρά. Για την συγκεκριμένη χωροθέτηση, χρειάζονται 6 τεγίδες μήκους 9,4m η κάθε μία η οποίες θα είναι κατασκευασμένες από ανοδιωμένο αλουμίνιο. Η ανοδίωση κρίνεται απαραίτητη καθώς η απόσταση της οικίας από της θάλασσα είναι μικρότερη των 3<sup>ov</sup> χλμ. Οι τεγίδες θα δεθούν με τα 24 στηρίγματα τα οποία θα τοποθετηθούν πάνω στις τεγίδες της στέγης, θα προεξέχουν από τα κρεμμύδια και θα υποστηρίξουν τα φωτοβολταϊκούς συλλέκτες με 60 μεταλλικά clumps τα οποία θα συνδεθούν 4 ανά συλλέκτη. Στα παρακάτω σχήματα, παρουσιάζονται οι βάσεις στήριξης καθώς και οι κατόψεις της χωροθέτησης των βάσεων στήριξης και η χωροθέτηση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών επάνω στην στέγη της οικίας.



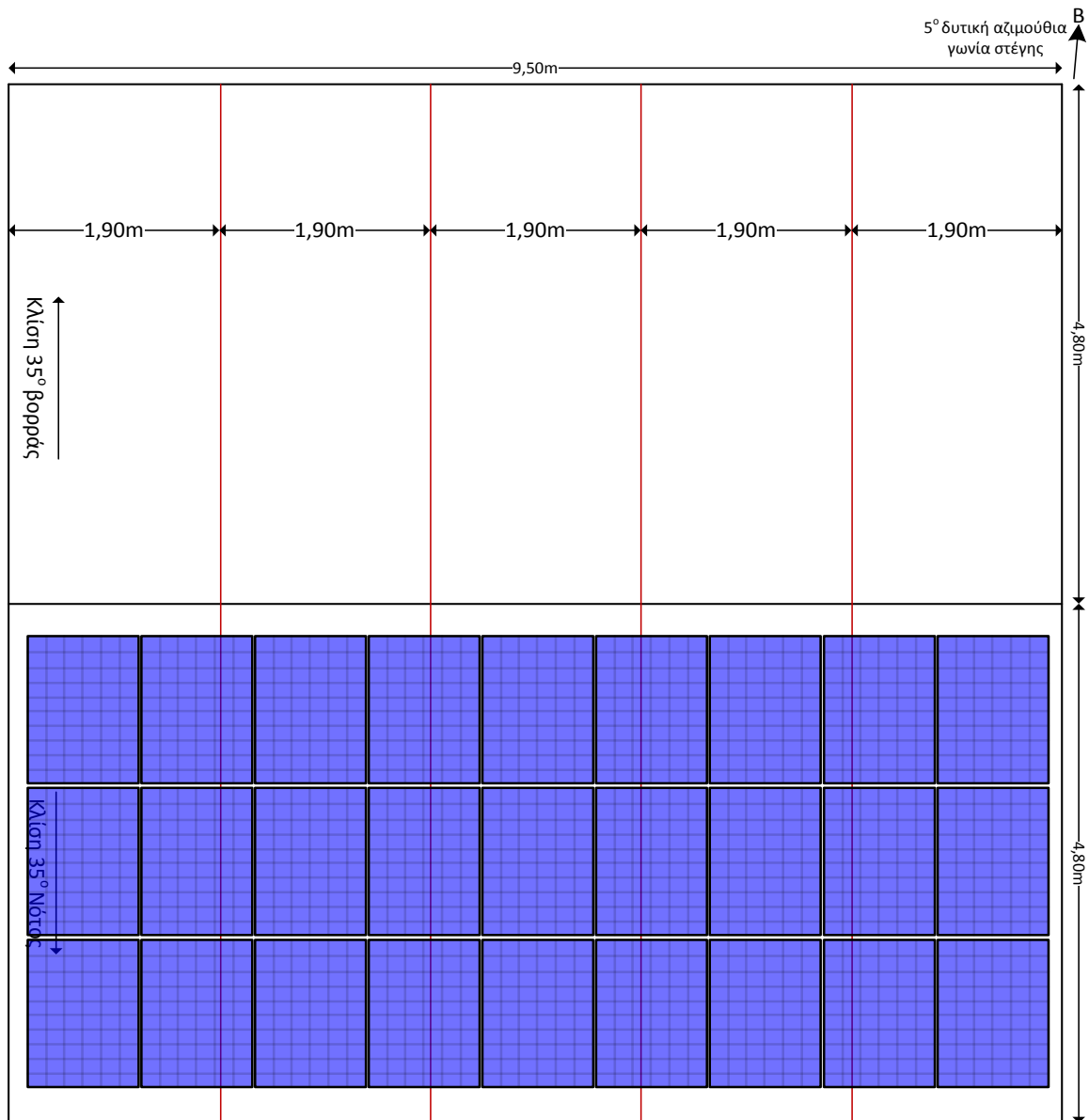
Σχήμα 4.7: βάσεις στήριξης φωτοβολταϊκών συλλεκτών



Στέγη με βάσεις στήριξης  
Κλίμακα 1:50



Σχήμα 4.8: χωροθέτηση βάσεων στήριξης και λοιπών παρελκόμενων



Στέγη με 27  
φωτοβολταϊκά πάνελ  
Κλίμακα 1:50

Σχήμα 4.9: χωροθέτηση φωτοβολταϊκών συλλεκτών

#### 4.6 Η διαστασιολόγηση των αντιστροφών του υβριδικού συστήματος

---

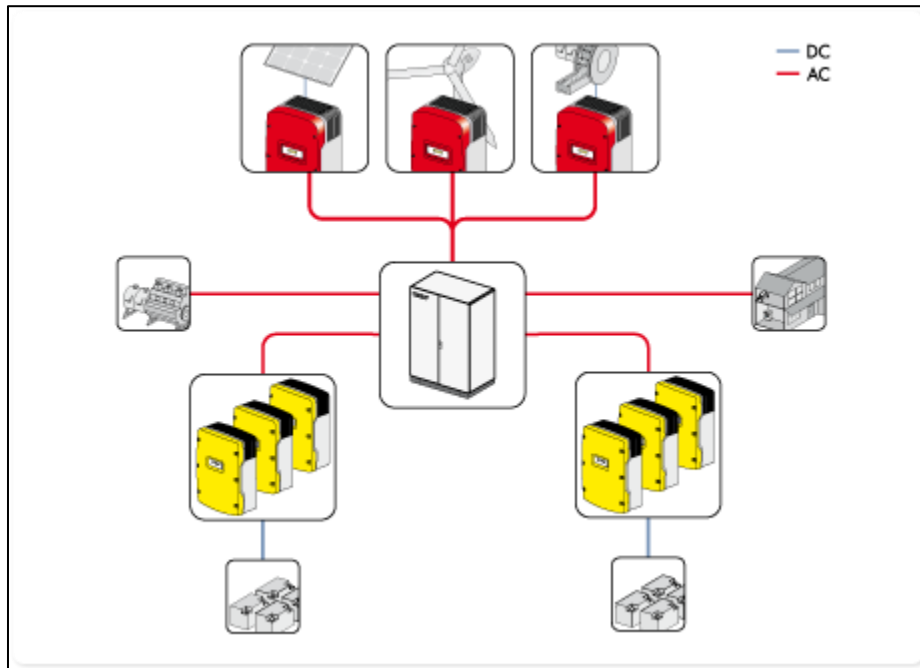
Είναι εμφανές πως χρειάζεται ένα σύστημα ικανό να διαχειριστεί ισχύ φωτοβολταϊκής γεννήτριας τουλάχιστον 7 KW και να μπορεί να τροφοδοτήσει ισχύ στην έξοδο του τουλάχιστον 21,5 KW σύμφωνα με τον πίνακα (4.1) των ηλεκτρικών φορτίων. Είναι σίγουρο πως ποτέ δεν θα λειτουργήσουν όλα τα φορτία ταυτόχρονα στην εγκατάσταση, αλλά επειδή το σύστημα είναι αυτόνομο και χρειάζεται να υπάρχει η δυνατότητα επαύξησης των φορτίων της εγκατάστασης χωρίς προβλήματα επιλέγεται αντιστροφή που να μπορεί να παράγει ισχύ AC στην έξοδο του με έναν σχετικά μεγάλο συντελεστή ταυτοχρονισμού (0,8), δηλαδή τουλάχιστον 17,2 KW.

Επίσης χρειάζεται ένα σύστημα το οποίο να μπορεί να διαχειριστεί ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος και να πραγματοποιεί αυτόματα την λειτουργία του όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο βάση του ποσοστού εκφόρτισης των συσσωρευτών, depth of discharge ή D.O.D. ή της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών όπως προτιμάται να αναφέρετε σε κάποια άλλα μοντέλα, state of charge ή S.O.C.

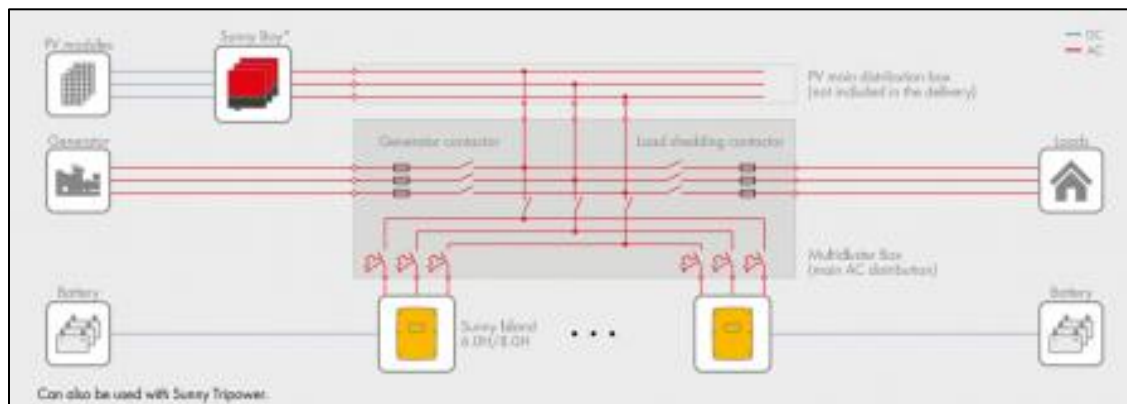
Επιλέγεται αντί του συνηθισμένου συστήματος ρυθμιστή φόρτισης - αντιστροφή να γίνει χρήση του συστήματος AC coupling της εταιρίας SMA. Η επιλογή του συγκεκριμένου συστήματος γίνεται κατά κύριο λόγο για την αποφυγή απωλειών που θα εμφανιζόντουσαν στο σύστημα κατά τις περιόδους ταυτοχρονισμού των φορτίων με την παραγωγή. Δηλαδή δεν χρειάζεται πλέον να γίνει διπλή μετατροπή της ενέργειας, δηλαδή μετατροπή της ενέργειας αρχικώς με έναν DC-DC μετατροπέα ο οποίος είναι απαραίτητος για την φόρτιση των συσσωρευτών και για την ομαλή λειτουργία του αυτόνομου αντιστροφέα και ακολούθως μετατροπή της DC ενέργειας των συσσωρευτών σε AC μέσω του αντιστροφέα. Με το συγκεκριμένο σύστημα δημιουργείτε ένα μικροδίκτυο (εφεξής θα αποκαλείται δίκτυο), έτοιμο να διαχειριστεί οποιαδήποτε πηγή ενέργειας ακόμα και να συνδεθεί με άλλα δίκτυα και στο οποίο τα φορτία είναι πάντα σε προτεραιότητα επιλέγοντας πλήρως αυτόματα από ποια πηγή θα παραχθεί η απαιτούμενη ενέργεια. Απαραίτητη προϋπόθεση για να συμβεί αυτό σε εγκατάσταση με φωτοβολταϊκό σύστημα, είναι να υπάρχουν τουλάχιστον 2 αντιστροφείς, ένας ο οποίος διαμορφώνει το δίκτυο και λειτουργεί σαν αυτόνομος αντιστροφέας και άλλος ένας ο οποίος λειτουργεί σαν διασυνδεδεμένος και αναγνωρίζοντας την τάση αναφοράς την οποία παράγει ο πρώτος μετατρέπει απευθείας την DC ενέργεια της φωτοβολταϊκής γεννήτριας σε AC η οποία παρέχεται προς τον κεντρικό κόμβο του δικτύου και μπορεί είτε να καταναλωθεί από τα φορτία είτε να απορροφηθεί από του αυτόνομους αντιστροφείς και να υποθηκευθεί στους συσσωρευτές.

Ο παραλληλισμός όλων των πηγών επιτυγχάνεται μέσω ενός πίνακα διανομής ο οποίος έχει εγκατεστημένα ρελέ ισχύος στις παροχές της γεννήτριας, των φορτίων και των αυτόνομων αντιστροφών. Τα ρελέ αυτά τα χειρίζεται ο αυτόνομος αντιστροφέας ο οποίος μόνιμα ελέγχει την ζήτηση και την παραγωγή και αποφασίζει εάν χρειάζεται να κλείσει κάποιο ρελέ ή να το ανοίξει. Επίσης ο αυτόνομος αντιστροφέας είναι αυτός ο οποίος συγχρονίζει την γωνία φάσης του συστήματος ώστε να μην υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ των πηγών, είναι σε θέση να μειώσει την παραγωγή των διασυνδεδεμένων αντιστροφών όταν αυτό απαιτείται, πράγμα το οποίο το κάνει αυξάνοντας ελαφρώς την συχνότητα. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν το σύστημα δηλαδή χρειάζεται ενέργεια είτε για την κάλυψη των φορτίων είτε για να γίνει φόρτιση των συσσωρευτών, οι αυτόνομοι αντιστροφείς μειώνουν ελαφρώς την συχνότητα ώστε να αντιληφθούν οι υπόλοιπες πηγές πως πρέπει να διοχετεύσουν όση ενέργεια μπορούν να παράγουν στο δίκτυο.

Το συγκεκριμένο σύστημα αν και έχει σχετικά υψηλό κόστος και δεν ενδείκνυται για τόσο μικρές εφαρμογές, τουλάχιστον όχι με τον τρόπο τον οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, επιλέχθηκε λόγω των πολλών δυνατοτήτων του, της εύκολης επεκτασιμότητας του και της απεριόριστης παραμετροποίησης του η οποία παρέχετε από την κατασκευάστρια εταιρία προς τον χρήστη. Το κύκλωμα του συστήματος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα στο οποίο είναι εμφανές πως κάθε πηγή συνδέεται στο δίκτυο με τον απαραίτητο μετατροπέα, ο οποίος συνήθως είναι αντιστροφείας, χωρίς την προσθήκη επιπλέον συσκευών ελέγχου.



Σχήμα 4.10: τοπολογία συστήματος πολλαπλών πλεγμάτων της εταιρίας SMA



Σχήμα 4.11: μονογραμμικό σχέδιο συστήματος πολλαπλών πλεγμάτων της εταιρίας SMA

Στο συγκεκριμένο στάδιο μένει να γίνει η επιλογή του μεγέθους του συστήματος πολλαπλών πλεγμάτων (εφεξής Multicluster) και η επιλογή των αντιστροφών οι οποίοι θα συνδεθούν πάνω σε αυτό.

Για την φωτοβολταϊκή γεννήτρια επιλέγεται ο αντιστροφέας Sunny Tripower 8.000TL ο οποίος είναι τριφασικός και μπορεί να διαχειριστεί ισχύ φωτοβολταϊκού συστήματος έως 8KW.

Για τους συσσωρευτές επιλέγεται ο αυτόνομος αντιστροφέας διαμόρφωσης δικτύου sunny island 8.0H ισχύος εξόδου 6KW για μόνιμη λειτουργία και 8KW για 30 λεπτά. Ο συγκεκριμένος αντιστροφέας είναι μονοφασικός και θα χρειαστούν 3 τεμάχια τα οποία θα τοποθετηθούν ένα ανά φάση. Με την προσθήκη 1 κάρτας επικοινωνίας SMA syscan και πραγματοποιώντας την απαραίτητη καλωδίωση η οποία εμφανίζεται στο ακόλουθο σχέδιο, οι αντιστροφείς συνθέτουν ένα τριφασικό cluster και επικοινωνούν με το Multicluster box ώστε να παρακολουθούνται οι εκάστοτε μετρήσεις του κάθε κλάδου αλλά και να γίνεται χειρισμός των ρελέ ισχύος του Multicluster.

Με την τοποθέτηση στον master αντιστροφέα sunny island αλλά και στον διασυνδεδεμένο αντιστροφέα sunny Tripower, μίας ακόμα κάρτας επικοινωνίας SMA com και την προσθήκη στο σύστημα μίας μονάδας συγκέντρωσης και καταγραφής δεδομένων SMA web box όλες οι χρήσιμες πληροφορίες όπως μετρήσεις παραγωγής της κάθε μονάδας, μετρήσεις τάσεων, εντάσεων, συχνοτήτων κ.α. καθώς και πλήρη στοιχεία για τους συσσωρευτές, είναι δυνατό να παρακολουθούνται μέσω του portal της SMA. Στο σύστημα προστίθεται ακόμα και μία sensor box με αισθητήρια ακτινοβολίας και θερμοκρασίας πλαισίου, ώστε και αυτές οι πληροφορίες να είναι διαθέσιμες προς τον χρήστη μέσω του portal της εταιρίας.

Οι αντιστροφείς θα συνδεθούν στον πίνακα Multicluster box 6 ο οποίος δύναται να διαχειριστεί ισχύ έως 55KW από ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος και από φωτοβολταϊκή γεννήτρια, ενώ έως 32KW από τους αυτόνομους αντιστροφείς. Επίσης θα χρησιμοποιηθεί και μία μονάδα χειρισμού του αυτόνομου αντιστροφέα (remote control) μέσω της οποίας είναι εφικτός ο τοπικός χειρισμός του συστήματος. Από την στιγμή που υπάρχει στο σύστημα η μονάδα καταγραφής δεδομένων sunny web box σχεδόν όλες οι ρυθμίσεις οι οποίες γίνονται τοπικά από το remote control μπορούν να πραγματοποιηθούν και απομακρυσμένα από οποιαδήποτε συσκευή έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο ανοίγοντας στο ρούτερ της εγκατάστασης την πόρτα της ip στην οποία είναι συνδεδεμένη η web box.

Στο σύνολο για το σύστημα διαχείρισης και μετατροπής της ενέργειας θα χρειαστούν οι ακόλουθες μονάδες οι οποίες υπερκαλύπτουν τις ανάγκες της εγκατάστασης και των οποίων τα πλήρη τεχνικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο τέλος της παρούσας μελέτης.

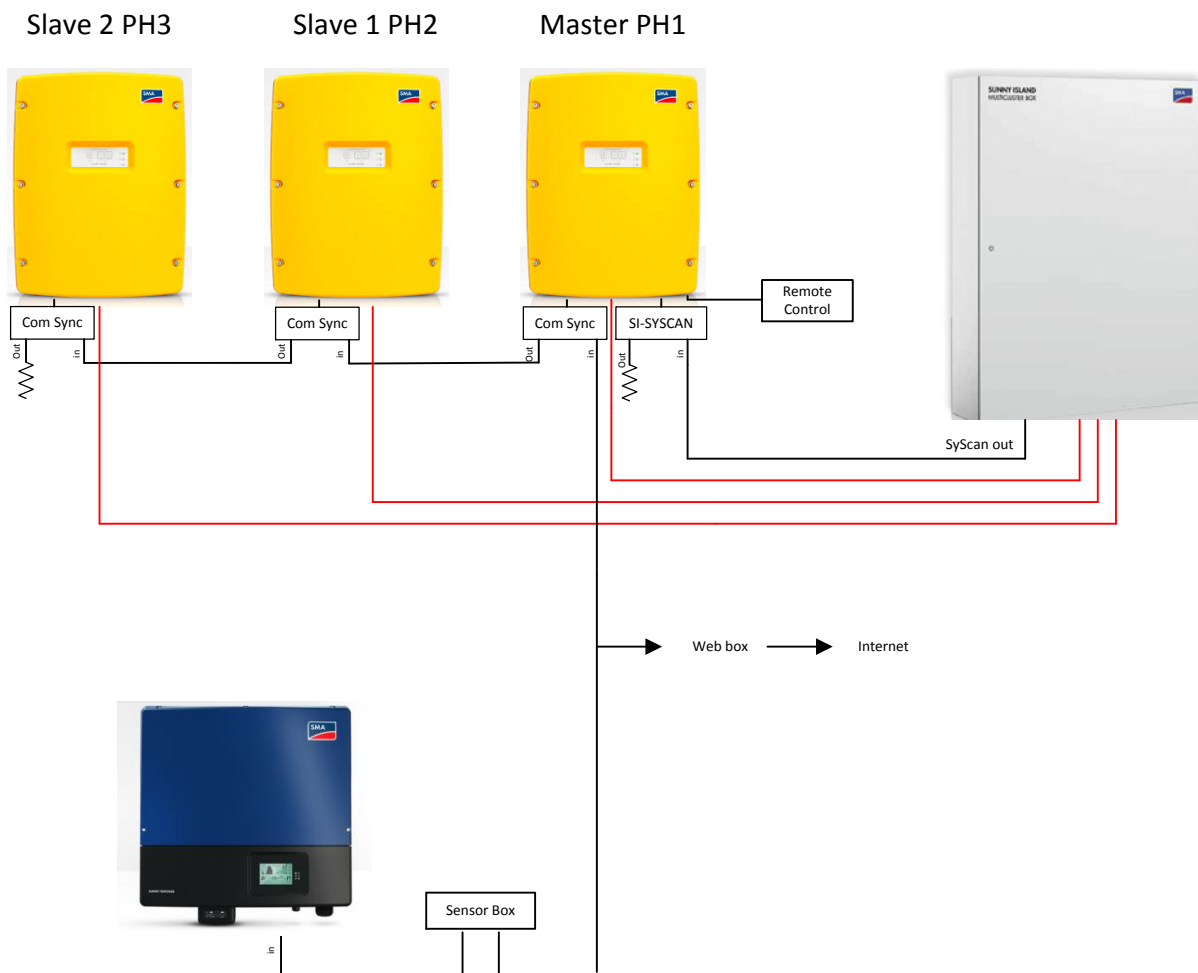
- 3 τεμάχια αντιστροφείς sunny island 8.0H
- 1 τεμάχιο αντιστροφέας sunny Tripower 8000 TL
- 1 τεμάχιο Multicluster box -6
- 1 τεμάχιο remote control
- 1 τεμάχιο sunny web box συμβατή με το πρωτόκολλο RS485
- 1 τεμάχιο sensor box με μετατροπέα για RS485



1 κάρτα επικοινωνίας SMA Sys can

1 κάρτα επικοινωνίας SMA Com για σύνδεση μέσω RS485

1 τεμάχιο SMA Bat fuse B.03 μέσω του οποίου θα πραγματοποιηθεί η σύνδεση των συσσωρευτών με το cluster των sunny island.



Σχήμα 4.11: καλωδίωση BUS

## 4.7 Η διαστασιολόγηση των ηλεκτρικών συσσωρευτών του υβριδικού συστήματος

Για αυτονομία τουλάχιστον τριών ημερών πρέπει οι συσσωρευτές που θα επιλεγθούν να είναι σε θέση να αποθηκεύσουν το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας η οποία θα καταναλωθεί αυτές τις ημέρες υποθέτοντας μηδενική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Επίσης πρέπει να οριστεί ένα κατώφλι στο ποσοστό εκφόρτισης των συσσωρευτών ώστε να υπάρχει η βεβαίωση πως οι συσσωρευτές δεν θα κάνουν εκφόρτιση ποτέ χαμηλότερα από αυτό το σημείο, πράγμα το οποίο θα μειώνει δυσανάλογα την διάρκεια ζωής τους.

Το ελάχιστο ποσοστό S.O.C. το ορίζουμε σε 50% πράγμα που σημαίνει ότι οποιαδήποτε στιγμή το ποσοστό φόρτισης των συσσωρευτών πέσει κάτω από 50%, το σύστημα θα δώσει εντολή στην γεννήτρια να εκκινήσει και να αναλάβει κάλυψη των φορτίων καθώς και την φόρτιση των συσσωρευτών. Το κρίσιμο ποσοστό S.O.C. ορίζεται σε 20% πράγμα που σημαίνει ότι εάν για οποιονδήποτε λόγο το ζεύγος δεν εκκινήσει και το ποσοστό φόρτισης των συσσωρευτών φτάσει το συγκεκριμένο επίπεδο, το ρελέ των φορτίων θα ανοίξει και θα σταματήσει η εκφόρτιση των στοιχείων για την ασφάλεια τους. Η Μέθοδος φόρτισης των συσσωρευτών στην αρχή θα είναι με σταθερό ρεύμα, με μέγιστο ρεύμα το ρεύμα ασφαλείας του οποίου την τιμή έχουμε ορίσει εμείς ώστε να μην υπάρξει υπερφόρτωση του ζεύγους και στην συνέχεια θα μετατρέπεται σε φόρτιση με σταθερή τάση την οποία θα ορίσουμε αργότερα κατά την επιλογή των στοιχείων.

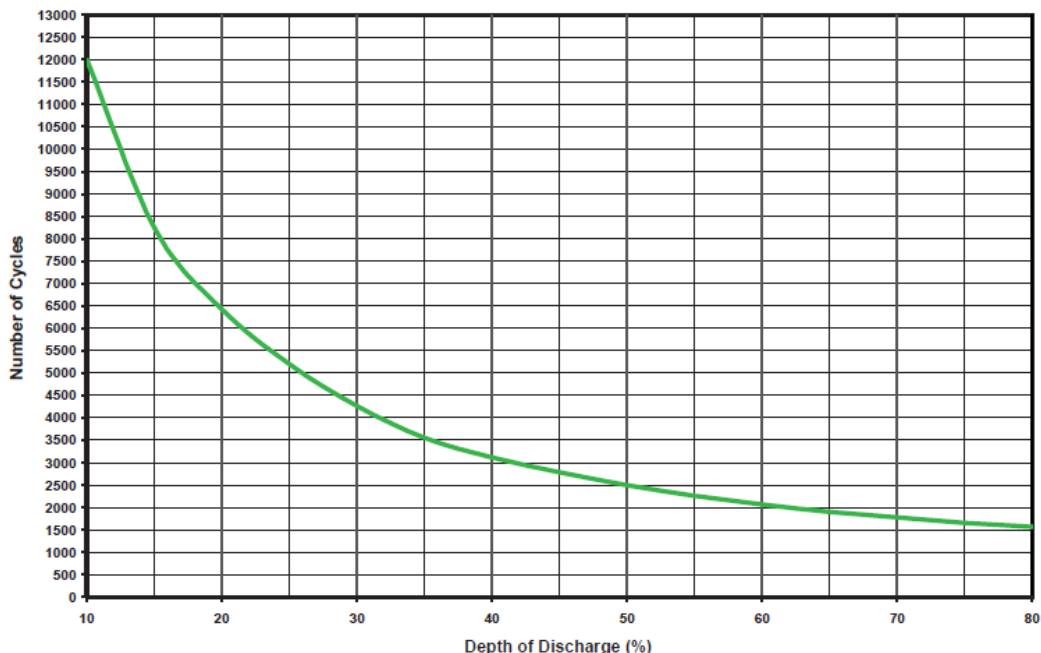
Αρ.	Όνομασία	Ελάχ. τιμή	Μέγ. τιμή	Τιμή	Μονάδα
1	Adr			Master	
109	GnSocTm1Stp	1	95	70	%
110	GnSocTm1Str	1	95	50	%

Σχήμα 4.12: ρύθμιση εκκίνησης γεννήτριας βάση S.O.C.

Το μέγιστο ρεύμα φόρτισης των συσσωρευτών είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος καθώς πρώτων εάν είναι πολύ μικρό επηρεάζει αρνητικά την διάρκεια ζωής των στοιχείων και δεύτερων θα αναγκάζεται το ζεύγος να λειτουργεί για πολλές ώρες με αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση πετρελαίου. Βάση του πίνακα φορτίων κατά την χειμερινή περίοδο οι ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης ανέρχονται σε 15.070Wh. Για αυτονομία της οικίας για τρεις ημέρες χρειάζονται συσσωρευτές ικανοί για αποθήκευση 45.210Wh και επειδή το κατώφλι S.O.C. το ορίσαμε στο 50% θα πρέπει να έχουν ικανότητα αποθήκευσης διπλάσιας ενέργειας, δηλαδή 90.420Wh. Οι αυτόνομοι αντιστροφείς οι οποίοι έχουν επιλεγθεί λειτουργούν με τάση dc 48V. Συνεπώς οι συσσωρευτές θα πρέπει να είναι χωρητικότητας τουλάχιστον 1883Ah και συνολικής ονομαστικής τάσης της συστοιχίας 48V.

Επιλέγεται να γίνει χρήση 2V στοιχείων μολύβδου, ανοιχτού τύπου, κατάλληλων για χρήση σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα στοιχεία τα οποία είναι του κατασκευαστικού οίκου Enersys και είναι της σειράς Power safe TS. Έχουν θετικές σωληνωτές πλάκες των οποίων το grid περιέχει λίγο περισσότερο αντιμόνιο από αυτές των συνηθισμένων 2V συσσωρευτών τεχνολογίας Orps, πράγμα το οποίο προσφέρει λίγο περισσότερους κύκλους ζωής. Επίσης, φέρουν πιστοποίηση κατά IEC 61427 που είναι το πρότυπο δοκιμών των συσσωρευτών για φωτοβολταϊκές εφαρμογές, πιστοποιητικό το οποίο οι περισσότεροι συσσωρευτές τεχνολογίας orps οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές δεν έχουν. Η επιλογή αυτή κατά κύριο λόγο γίνεται για την διάρκεια ζωής την οποία παρουσιάζουν τα συγκεκριμένα στοιχεία η οποία με σωστή συντήρηση και μικρό βάθος εκφόρτισης μπορεί να φτάσει τα 12 έτη όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχέδιο.

Number of Cycles vs Depth of Discharge (25°C)



Σχήμα 4.13: καμπύλη κύκλων εκφόρτισης ηλεκτρικών συσσωρευτών

Το ακριβές μοντέλο του συσσωρευτή θα είναι το TYS 8 το οποίο μπορεί να παρέχει 900Ah σε (C10) και θα χρησιμοποιηθούν 48 στοιχεία τα οποία θα σχηματίζουν δύο παραλληλίες των 48V, συνολικής χωρητικότητας 1800Ah (C10). Όλα τα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών παρουσιάζονται στο τέλος της μελέτης στο επισυναπτόμενο τεχνικό φυλλάδιο.

Βάση της χωρητικότητας των στοιχείων επιλέγεται μέγιστο ρεύμα φόρτισης δηλαδή charge current max, 200A (συνολικό ρεύμα και των τριών αντιστροφών sunny island) με το οποίο θα μπορεί να αναπληρώνεται το 10% του ποσοστού των συσσωρευτών περίπου σε μία ώρα (200A X 48V = 9600Wh).

Αρ.	Ονομασία	Ελάχ. τιμή	Μέγ. τιμή	Τιμή	Μονάδα
1	Adr			Master	
9	BatChrgCurMax	10	900	200	A

Σχήμα 4.14: ρύθμιση μέγιστου ρεύματος φόρτισης ηλεκτρικών συσσωρευτών

Η τάση φόρτισης των στοιχείων κατά το στάδιο boost charge ορίζεται σε 2,4Volt ανά στοιχείο για 3 ώρες και στην συνέχεια float charge 2,33Volt ανά στοιχείο στους 20degC με temperature compensation.

Αρ.	Ονομασία	Ελάχ. τιμή	Μέγ. τιμή	Τιμή	Μονάδα
1	Adr			Master	
37	ChrgVtgBoost	1,5	2,7	2,4	V
38	ChrgVtgEqu	1,5	2,7	2,45	V
39	ChrgVtgFlo	1,4	2,4	2,33	V
40	ChrgVtgFul	1,5	2,7	2,45	V

Σχήμα 4.15: ρύθμιση τάσεως φόρτισης ηλεκτρικών συσσωρευτών

#### 4.8 Η διαστασιολόγηση του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους του υβριδικού συστήματος

Είναι απαραίτητη η χρήση τριφασικού ζεύγους το οποίο τουλάχιστον να είναι ικανό να καλύψει όλη την ζήτηση των φορτίων δηλαδή 17,2KW. Δεν απαιτείται μεγαλύτερο ζεύγος για την ταυτόχρονη φόρτιση των συσσωρευτών λόγω μίας ρύθμισης η οποία θα πραγματοποιηθεί και η οποία ονομάζεται Generator current nominal. Με την συγκεκριμένη παράμετρο την οποία ρυθμίζουμε στα 75A AC, το σύστημα ελέγχει την ζήτηση των φορτίων και εάν το συνολικό καταναλισκόμενο AC ρεύμα στα φορτία είναι ίδιο με αυτό το οποίο έχουμε ρυθμίσει τότε σταματάει η φόρτιση των συσσωρευτών. Εάν το καταναλισκόμενο συνολικό AC ρεύμα είναι κατά 10A μικρότερο από αυτό το οποίο έχει ρυθμίσει τότε οι συσσωρευτές θα φορτίζουν με ρεύμα που περισσεύει από αυτή την διαφορά η οποία θα είναι 10A X 230V = 2,3KW. Ο έλεγχος της συγκεκριμένης ρύθμισης προηγείται του ελέγχου μέγιστου ρεύματος φόρτισης dc τον οποίο περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο και ο οποίος βρίσκεται εφαρμογή μόνο όταν η διαφορά του σαν ποσοστό ισχύος ξεπεράσει αυτή που προκύπτει από το GnCurNom.

Πιο απλά με τις συγκεκριμένες ρυθμίσεις βεβαιώνετε πως το ζεύγος δεν θα λειτουργήσει ποτέ πάνω από την επιθυμητή ισχύ η οποία στην περίπτωση μας είναι τα 17,2KW και επίσης είναι σαφές πως κατά την λειτουργία του προτεραιότητα έχουν τα φορτία και ακολουθεί η φόρτιση των συσσωρευτών. Στο συγκεκριμένο προφίλ φορτίου είναι βέβαιο πως ελάχιστες θα είναι οι περιπτώσεις που το GnCurNom θα περιορίζει την φόρτιση των συσσωρευτών και εάν αυτό συμβεί θα συμβεί για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, διότι η συνολική ημερήσια κατανάλωση είναι 15,04KWh και είναι εμφανές πως φορτία ισχύος 17,2KW εάν παρέμεναν σε λειτουργία για πολύ ώρα θα υπερβαίναμε κατά πολύ την ημερήσια ενέργεια.

Αρ.	Ονομασία	Ελάχ. τιμή	Μέγ. τιμή	Τιμή	Μονάδα
1	Adr			Master	
96	GnCurNom	0	1000	75	A

**Σχήμα 4.16:** ρύθμιση μέγιστου ρεύματος λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους

Επίσης το H/Z πρέπει να είναι ικανό να μπορεί να φορτίσει πλήρως τους συσσωρευτές σε 10 ώρες.

Ο ρυθμός φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών πρέπει να παρέχει ρεύμα φόρτισης ( $C_{10}$ ):

$$I_{10} = C_{10}/T = 1800Ah/10h = 1800/10h = 180A_{dc}$$

Η τάση της συστοιχίας των συσσωρευτών είναι 48V (αποτελούμενη από 2 παραλληλίες των 24 στοιχείων 2V), όπως φαίνεται παραπάνω η τάση φόρτισης (boost charge) είναι 2,4volt, άρα για την πλήρη φόρτιση της συστοιχίας απαιτείται τάση:

$$U_{\text{συστ.}} = U_{\text{συσσ.}} * N_{\text{εν σειρά συσσ.}} = 2,4V * 24\text{τεμ.} = 57,6V_{dc}$$

Οπότε για την πλήρη φόρτιση των συσσωρευτών σε 10 h απαιτείται ισχύς:

$$P_{\text{συστ.}} = U_{\text{συστ.}} * I_{\text{συστ.}} = 57,6V_{dc} * 180A_{dc} = 10,36KW$$

Και η φαινόμενη ισχύς θα είναι ίση με:

$$S = P/\cos\phi = 10,36/0,8 = 12,95KVA$$

Επίσης το ζεύγος έχει πάνελ το οποίο να επιτρέπει την λήψη επαφών για την αυτόματη εκκίνηση και διακοπή του.

Καθώς το ζεύγος βρίσκεται πλησίον της οικίας πρέπει να συνοδεύεται από κουβούκλιο ηχομόνωσης το οποίο θα περιορίζει την ηχορύπανση στον περιβάλλοντα χώρο.

Μπορεί να είναι 3.000σ.α.λ. ή και 1.500σ.α.λ. καθώς η χρήση του θα είναι πολύ περιορισμένη και δεν θα σημειώνει πολλές ώρες λειτουργίας ανά έτος.

Επιλέγεται ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος του Ιταλικού οίκου Filippi. Το μοντέλο της γεννήτριας είναι το PWD-20TE ισχύος 17,2KW/22KVA. Είναι 1500σ.α.λ. το οποίο βοηθάει στην διάρκεια ζωής αλλά και παράγει μειωμένο θόρυβο κατά την λειτουργία του. Το μοτέρ είναι τρικύλινδρο, πετρελαίου, του οίκου Deutz, με κατανάλωση 4.4 λίτρων πετρελαίου ανά ώρα λειτουργίας. Επίσης το ζεύγος είναι υδρόψυκτο λαδιού και αυτός είναι άλλος ένας παράγοντας ο οποίος επηρεάζει θετικά την διάρκεια ζωής του.

Οι επαφές στο πάνελ του ζεύγους συνδέονται με το ρελέ 2 του master αντιστροφέα στο οποίο έχουμε ορίσει την ρύθμιση auto gen. Μέσω αυτής της ρύθμισης η επαφή του ρελέ του αντιστροφέα κλείνει όταν χρειάζεται εξωτερική πηγή ενέργειας βάσει των κριτηρίων τα οποία περιγράφονται στις προηγούμενες παραγράφους.

Αρ.	Ονομασία	Ελάχ. πμή	Μέγ. πμή	Τιμή
1	Adr			Master
175	Rly2Op			AutoGn

**Σχήμα 4.17:** ρύθμιση επαφής για την αυτόματη εκκίνηση του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους

#### 4.9 Ο υπολογισμός της διατομής καλωδίων του υβριδικού συστήματος

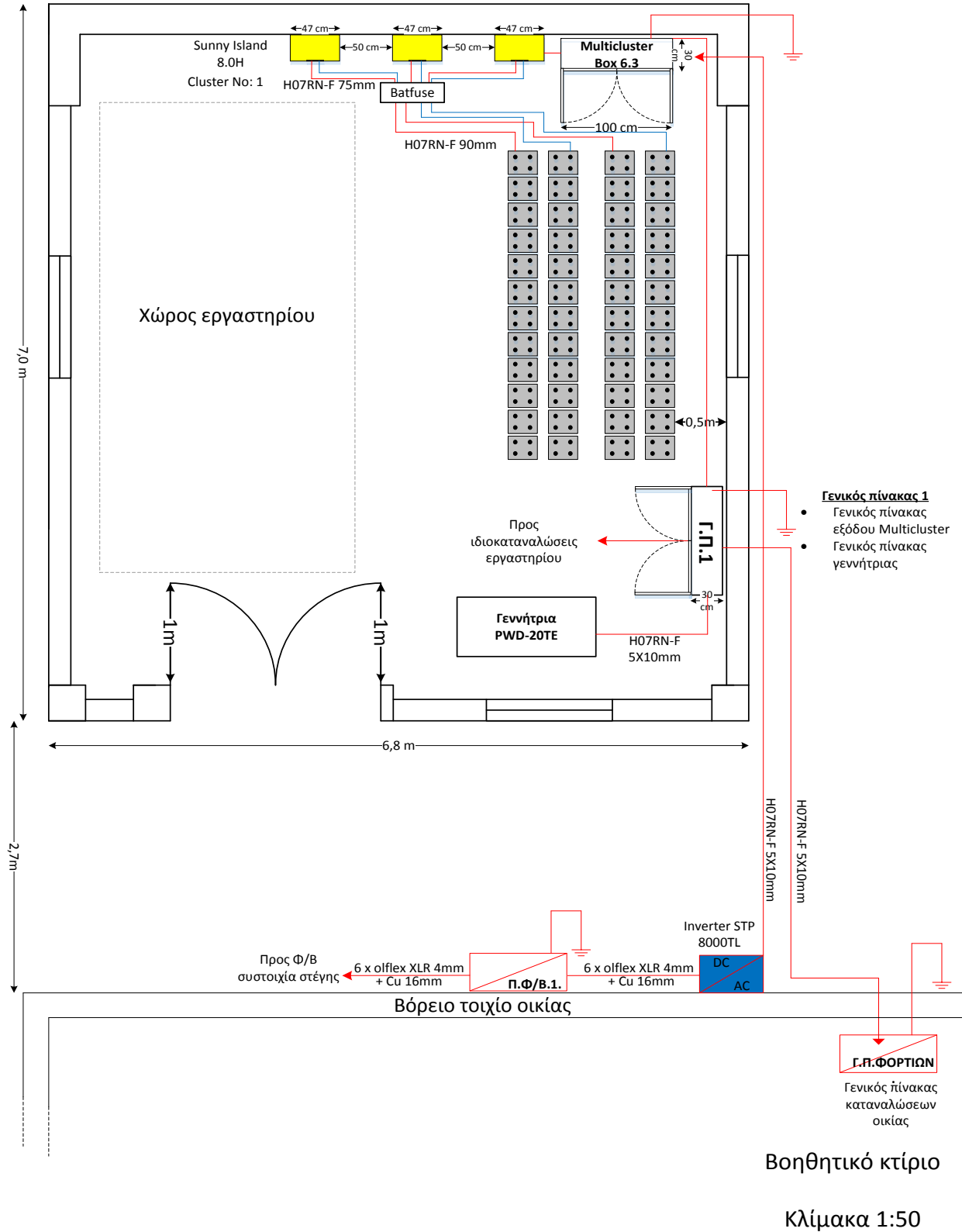
Η διατομή των αγωγών επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη τους σχετικούς πίνακες του HD384, ώστε το μέγιστο ρεύμα που θα διέρχεται από τον αγωγό να είναι μικρότερο προς το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα που αναφέρεται στους πίνακες. Επίσης η πτώση τάσης πάνω στους αγωγούς δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 1% της ονομαστικής τάσης λειτουργίας τους.

Στον παρακάτω πίνακα (4.2), αναγράφονται οι αποστάσεις των καλωδίων, καθώς και το είδος των καλωδίων που είναι κατάλληλα και συνιστάται να χρησιμοποιηθούν για την διασύνδεση των διατάξεων του υβριδικού συστήματος μεταξύ τους και για την σύνδεση του υβριδικού συστήματος με τον πίνακα της ηλεκτρικής εγκατάστασης της αυτόνομης οικίας.

A/A	Διαδρομή	Απόσταση	Είδος καλωδίου	Ρεύμα / Φάση	Κατασκευή
1	Πλαίσια → Π.Φ/Β Σ.	9 m	SOLAR ZZ-F	Isc= 9.07A	Στον αέρα
2	Π.Φ/Β → STP 8000TL	3 m	SOLAR ZZ-F	Isc= 9,07A	Στον αέρα
3	STP 8000TL → M.C.BOX 6.3	9 m	HO7RN-F	11,59 A	Στον αέρα
4	Γεννήτρια → Γ.Π.Γεννήτριας	4 m	HO7RN-F	31,88 A	Στον αέρα
5	Γ.Π.Γεννήτριας → M.C.BOX 6.3	5 m	HO7RN-F	31,88 A	Στον αέρα
6	M.C.BOX ↔ Sunny island	5 m	HO7RN-F	34,78 A	Στον αέρα
7	Sunny island ↔ Batfuse	2 m	HO7RN-F	166,67 A	Στον αέρα
8	Batfuse ↔ Συσσωρευτές	3 m	HO7RN-F	250 A	Στον αέρα
9	M.C.BOX 6.3 → Π.Εξ.Multicluster	5 m	HO7RN-F	34,78 A	Στον αέρα
10	Π.Εξ.Multicluster → Γ.Π.Φορτίων	7 m	HO7RN-F	34,78 A	Στον αέρα
11	Αντικεραυνικές ακίδες Φ/Β → Θεμελειακή γείωση	6,5 m	Cu		Στον αέρα

**Πίνακας 4.2:** πίνακας διευθέτησης καλωδίων

Στο επόμενο σχήμα (4.18), παρουσιάζεται κάτοψη της διαδρομής των καλωδίων, τα οποία είναι κατηγοριοποιημένα στον παραπάνω πίνακα (4.2) και εν συνεχεία ακολουθεί ο υπολογισμός της κατάλληλης διατομής τους.



Σχήμα 4.18: κάτοψη παρουσίασης διαδρομής καλωδίων

### Φ/Β συστοιχία – Πίνακας Φ/Β συστήματος :

Το καλώδιο που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι τύπου SOLAR ZZ-F κατάλληλο για Φ/Β εγκαταστάσεις και για συνθήκες θερμοκρασίας -40 έως 120<sup>0</sup> C. Επίσης είναι κατάλληλο για τάσεις dc 900/1500V.

Τα junction boxes των Φ/Β πλαισίων έχουν εξόδους MC4 (4mm<sup>2</sup>) οπότε θα εξετασθεί η χρήση αγωγού 4mm<sup>2</sup>. Η μέγιστη απόσταση του αγωγού από το πρώτο Φ/Β πλαίσιο έως τον αντιστροφέα είναι περίπου 8 μέτρα.

Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα για επιτοίχια ηλεκτρική γραμμή με μόνωση ERP δύο φορτιζόμενων αγωγών διατομής 4mm που προκύπτει από τον πίνακα 52-K1 του ΕΛΟΤ HD 384 είναι 42Α. Σύμφωνα με τον πίνακα 52-Δ1 του ΕΛΟΤ HD 384 για θερμοκρασία περιβάλλοντος 70<sup>0</sup> C ο συντελεστής διόρθωσης είναι 0,58. Από τον πίνακα 52-E1 του ίδιου προτύπου ο συντελεστής διόρθωσης για δύο κυκλώματα, σε σωλήνα είναι 0,8.

Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα βάση του προτύπου είναι:

$$I=42 \times 0,58 \times 0,80 = 19,49A$$

Η Φ/Β συστοιχία έχει ρεύμα βραχυκύκλωσης I<sub>sc</sub> = 9,07Α οπότε η διατομή 4mm είναι αποδεκτή.

Η πτώση τάσεως που θα εμφανίζεται στον αγωγό διατομής S=4mm και μήκους L=8m υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta U=2\rho \cdot (I \cdot L) / S$$

Όπου:

ρ: η ειδική αντίσταση του χαλκού (0,0168Ω mm<sup>2</sup>/m στους 20<sup>0</sup> C και 0,0219Ω mm<sup>2</sup>/m στους 70<sup>0</sup> C).

I: το ρεύμα βραχυκύκλωσης I<sub>sc</sub> της στοιχειοσειράς.

L: το μέγιστο μήκος της ηλεκτρικής γραμμής

S: η διατομή του αγωγού της ηλεκτρικής γραμμής

Οπότε έχουμε:

$$\begin{aligned} \Delta U &= 2\rho \cdot (I \cdot L) / S \\ \Delta U &= 2 \cdot 0,0219 (\Omega \text{ mm}^2/\text{m}) \cdot (9,07A \cdot 8m) / 4\text{mm} \\ &= 0,0438 \cdot 18,14 = 0,79V \text{ Πτώση τάσης στην γραμμή.} \end{aligned}$$

Η μέγιστη παραγόμενη τάση της Φ/Β στοιχειοσειράς θα είναι η τάση της μεγαλύτερης στοιχειοσειράς (25<sup>0</sup> C):

$$\begin{aligned} U_{m,\theta} &= U_{m25C} + (\text{temp. coeff. } U_{oc}) \cdot (\theta - 25^{\circ}C) \times N_{\text{πλαίσια σε σειρά}} \\ U_{m,\theta} &= 30,5V + (-0,029) \cdot (25-25^{\circ}C) \times 14 \\ U_{m,\theta} &= 427V \end{aligned}$$



Οπότε έχουμε:

$$\Delta U/U_m = 0,79V/427V = 0,01\%$$

Η τάση της στοιχειοσειράς είναι εντός των ορίων του αντιστροφέα, το ίδιο ισχύει και για το ρεύμα. Συνεπώς επιλέγεται καλώδιο ZZF 4mm<sup>2</sup>.

Sunny Tripower	Maximum input voltage (DC)	Maximum input current (MPP) (DC)	Maximum short-circuit current per string input (DC)
		Input area A/B	A1 ... A5 / B
8000TL	1,000 V	22.0 A / 11.0 A	33 A / 12.5 A

Σχήμα 4.19: όρια τάσης και ρεύματος αντιστροφέα sunny Tripower 8000TL

**Πίνακας Φ/B – Αντιστροφέας Sunny Tripower 8000TL :**

Επιλέγεται καλώδιο ίδιο με την ανωτέρω περίπτωση λόγω ίδιων χαρακτηριστικών ρεύματος αλλά μικρότερης απόστασης.

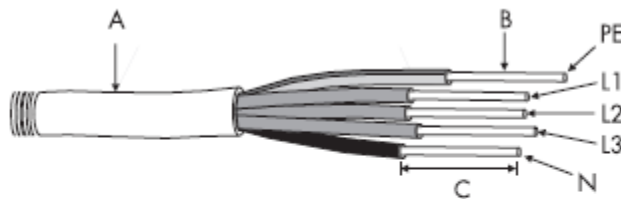
**Αντιστροφέας Sunny Tripower 8000TL – Multicluster box :**

Όπως φαίνεται παρακάτω ο αντιστροφέας δέχεται καλώδιο διατομής έως 10mm<sup>2</sup>.

Επιλέγεται να γίνει χρήση καλωδίου H07RN-F διατομής 10 mm<sup>2</sup> βάση των τεχνικών προδιαγραφών του αντιστροφέα.

Το καλώδιο παρόλο που καλύπτει απόσταση περίπου ίση με 9m υπερκαλύπτει τις ανάγκες της εγκατάστασης και επιλέγεται λόγω πρόβλεψης μελλοντικής επέκτασης του συστήματος

**Cable Requirements**



Position	Description	Value
A	Cable diameter	14 mm ... 25 mm
B	Conductor cross-section	1.5 mm <sup>2</sup> ... 16 mm <sup>2</sup> , with bootlace ferrule maximum 10 mm <sup>2</sup>
C	Stripping length	approx. 12 mm
The PE wire must be 5 mm longer than the L and N wires.		

Σχήμα 4.20: καλωδίωση STP 8000TL

### Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος – Πίνακας ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους :

Το ρεύμα ανά φάση του κλάδου θα είναι ίσο με 31,88A και η απόσταση την οποία θα καλύψει το καλώδιο θα είναι ίση με 4m.

Από τους σχετικούς πίνακες του ΕΛΟΤ HD384 επιλέγεται αρχικός να εξετασθεί ως προς την πτώση τάσης καλώδιο διατομής 10mm<sup>2</sup>. Επομένως:

$$\begin{aligned}\Delta U &= 2\rho \cdot (I \cdot L) / S \\ \Delta U &= (2 \cdot 0,0219 (\Omega \text{ mm}^2/\text{m}) \cdot (31,88\text{A} \cdot 4\text{m})) / 10\text{mm} \\ \Delta U &= 0,55\text{V Πτώση τάσης στην γραμμή.}\end{aligned}$$

Το καλώδιο μας καλύπτει την απαίτηση για πτώση τάσης μικρότερη του 1% (Ονομαστικής τάση λειτουργίας 230V). Συνεπώς επιλέγεται καλώδιο H07RN-F 5X10mm<sup>2</sup>.

### Πίνακας ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους – Multicluster box :

Επιλέγεται καλώδιο ίδιο με την ανωτέρω περίπτωση λόγω ίδιων χαρακτηριστικών της γραμμής.

### Multicluster box – Αντιστροφείς Sunny island 8.0H :

Από κάθε αντιστροφή μπορεί να περάσει ρεύμα ίσο με 34,78A. Επίσης οι απόσταση των αντιστροφών από το Multicluster box δεν ξεπερνάει τα 5m.

Επιλέγεται καλώδιο H07RN-F 3X10mm<sup>2</sup> βάση του τεχνικού εγχειριδίου του κατασκευαστή.

### Αντιστροφείς Sunny island 8.0H – Batfuse B.03 :

Από τον κάθε αντιστροφή φεύγει καλώδιο το οποίο συνδέεται στον κοινό κόμβο ασφάλισης συσσωρευτών (Batfuse) σε απόσταση περίπου 2m. Το dc ρεύμα φόρτισης του κάθε αντιστροφή ισούται με 166A και το καλώδιο είναι επιτοίχιο.

Από τον πίνακα 52 K1 του ΕΛΟΤ HD 384 καλώδιο διατομής 70mm<sup>2</sup> είναι ικανό να καλύψει το ονομαστικό ρεύμα της γραμμής.

Το καλώδιο εξεταζόμενο ως προς την πτώση τάσης θα εμφανίζει πτώση τάσης ίση με:

$$\begin{aligned}\Delta U &= (2 \cdot 0,0219 (\Omega \text{ mm}^2/\text{m}) \cdot (166\text{A} \cdot 2\text{m})) / 70\text{mm} \\ \Delta U &= 0,20\text{V Πτώση τάσης στην γραμμή.}\end{aligned}$$

Επιλέγεται καλώδιο H07RN-F 1X70mm<sup>2</sup>.

### Batfuse B.03 – Συστοιχίες ηλεκτρικών συσσωρευτών :

Στον κοινό κόμβο ασφάλισης των συσσωρευτών θα συνδεθούν και οι δύο συστοιχίες των συσσωρευτών. Συνεπώς το ρεύμα το οποίο θα εισέρχεται/εξέρχεται από τον κόμβο ασφάλισης προς την κάθε συστοιχία συσσωρευτών θα είναι το ρεύμα και των τριών αντιστροφών διαιρεμένο δια δύο. Συνεπώς το ονομαστικό ρεύμα της γραμμής θα είναι ίσο με:

$$(24000\text{W}/48\text{V})/2 = 250\text{A}$$

Η γραμμή έχει μήκος 3m. Από τον πίνακα 52 K2 του ΕΛΟΤ HD 384 καλώδιο διατομής 95mm<sup>2</sup> είναι ικανό να καλύψει το ονομαστικό ρεύμα της γραμμής.

Το καλώδιο εξεταζόμενο ως προς την πτώση τάσης θα εμφανίζει πτώση τάσης ίση με:

$$\Delta U = (2 \cdot 0,0219 (\Omega \text{ mm}^2/\text{m}) \cdot (250\text{A} \cdot 3\text{m})) / 95\text{mm}^2$$

$$\Delta U = 0,34\text{V Πτώση τάσης στην γραμμή.}$$

Επιλέγεται καλώδιο H07RN-F 1X95mm<sup>2</sup>.

#### Multicluster box – Πίνακας εξόδου Multicluster :

Το ονομαστικό ρεύμα της γραμμής είναι ίσο με 34,78A και η γραμμή είναι επιτοίχια με μήκος 5m. Από τον πίνακα 52 K1 του ΕΛΟΤ HD 384 καλώδιο διατομής 10mm<sup>2</sup> είναι ικανό να καλύψει το ονομαστικό ρεύμα της γραμμής.

Το καλώδιο εξεταζόμενο ως προς την πτώση τάσης θα εμφανίζει πτώση τάσης ίση με:

$$\Delta U = (2 \cdot 0,0219 (\Omega \text{ mm}^2/\text{m}) \cdot (34,78\text{A} \cdot 5\text{m})) / 10\text{mm}^2$$

$$\Delta U = 0,76\text{V Πτώση τάσης στην γραμμή.}$$

Επιλέγεται καλώδιο H07RN-F 5X10mm<sup>2</sup>.

#### Πίνακας εξόδου multicluster – Πίνακας ηλεκτρικής εγκατάστασης οικίας

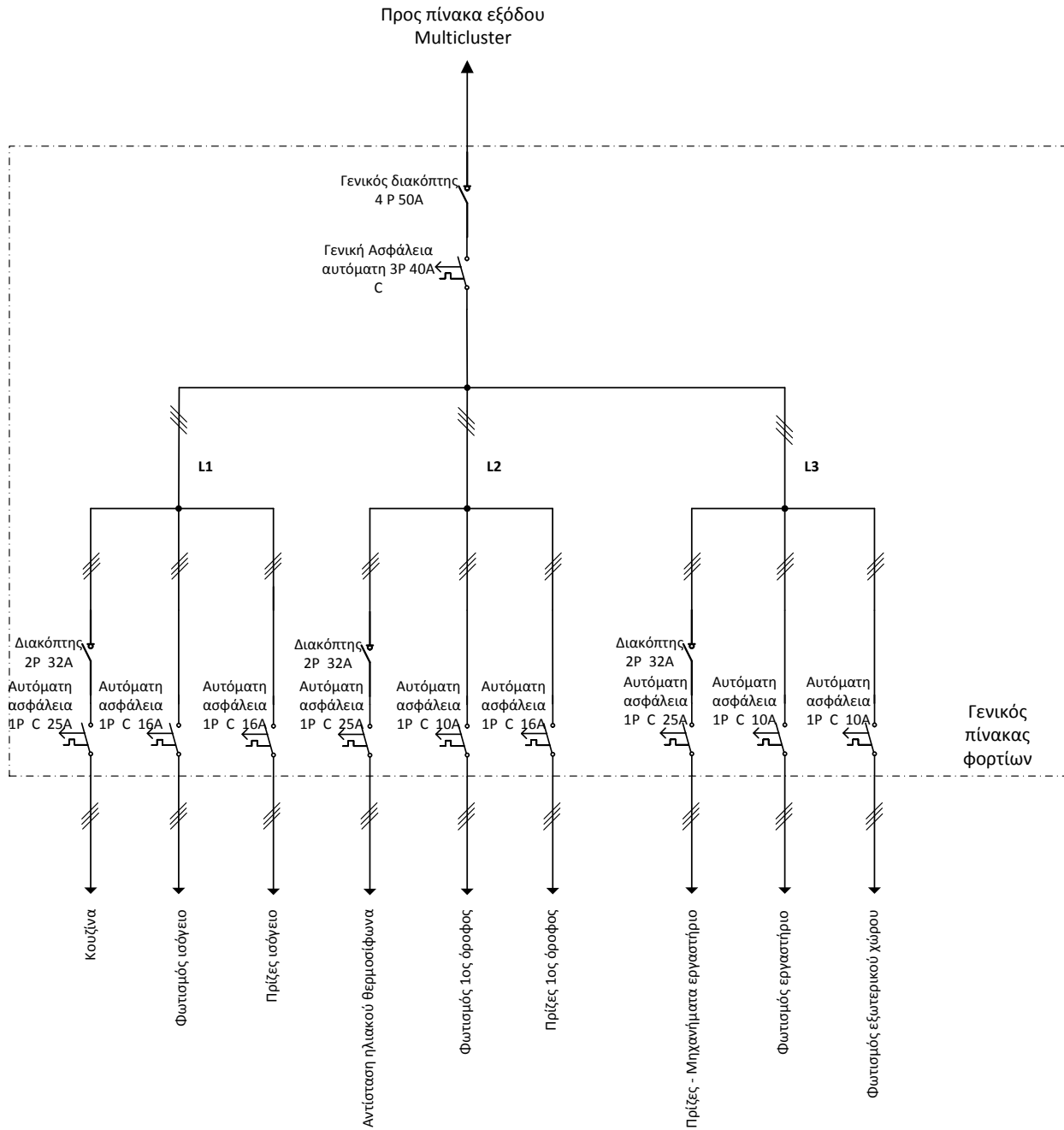
Επιλέγεται καλώδιο ίδιο με την ανωτέρω περίπτωση λόγω ίδιων χαρακτηριστικών της γραμμής.

Το μέγεθος του κάθε αγωγού του οποίου θα χρησιμοποιηθεί στην εγκατάσταση παρουσιάζεται στον συγκεντρωτικό πίνακα που ακολουθεί:

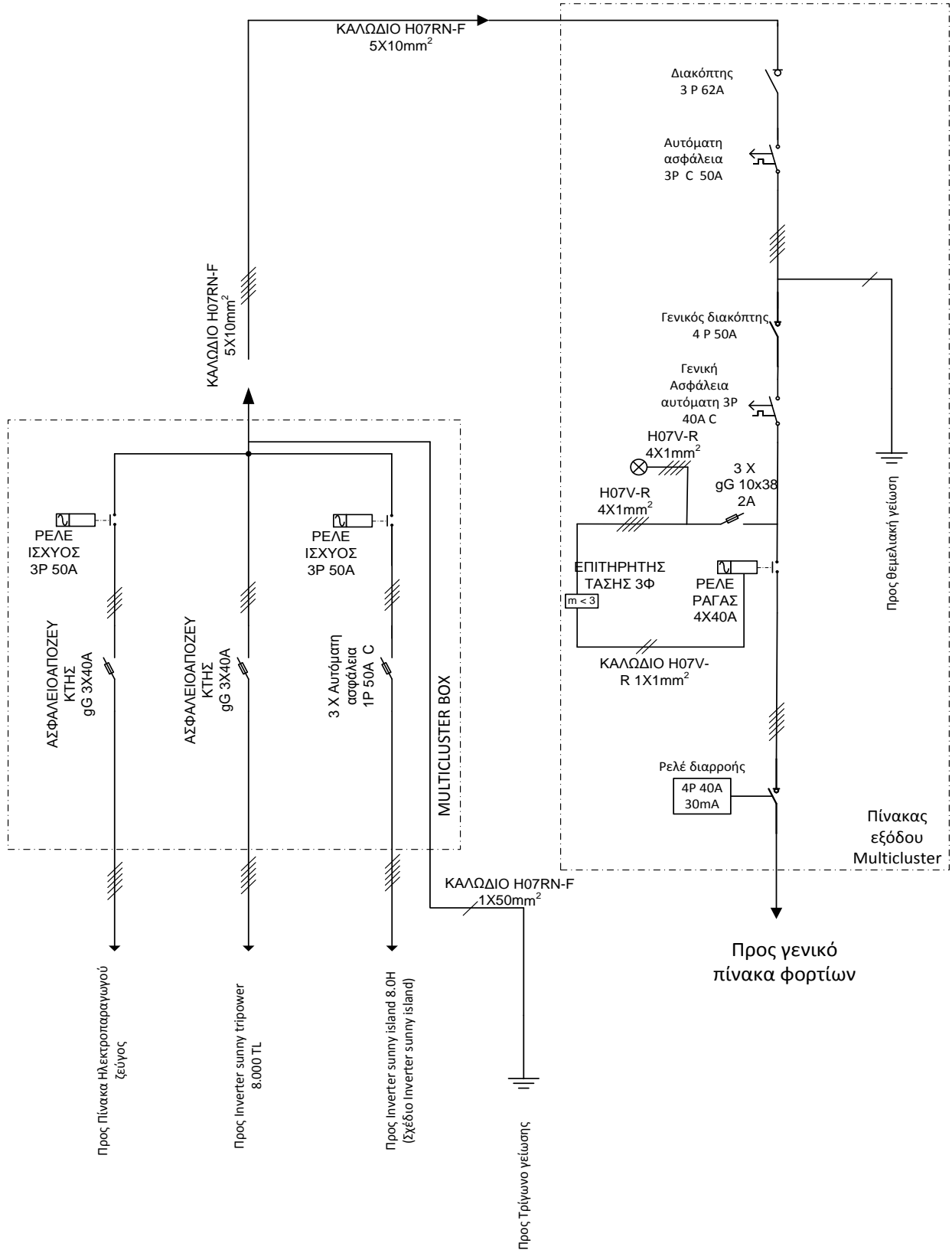
A/A	Διαδρομή	Απόσταση	Είδος καλωδίου	Ρεύμα / Φάση	Κατασκευή	Διατομή
1	Πλαίσια → Π.Φ/Β	9 m	SOLAR ZZ-F	Isc= 9,07A	Στον αέρα	1x4mm <sup>2</sup>
2	Π.Φ/Β → STP 8000TL	3 m	SOLAR ZZ-F	Isc= 9,07A	Επιτοίχιο	1x4mm <sup>2</sup>
3	STP 8000TL → M.C.BOX 6.3	9 m	H07RN-F	11,59 A	Επιτοίχιο	5x10mm <sup>2</sup>
4	Γεννήτρια → Γ.Π.Γεννήτριας	4 m	H07RN-F	31,88 A	Στον αέρα	5x10mm <sup>2</sup>
5	Γ.Π.Γεννήτριας → M.C.BOX 6.3	5 m	H07RN-F	31,88 A	Επιτοίχιο	5x10mm <sup>2</sup>
6	M.C.BOX ↔ Sunny island	5 m	H07RN-F	34,78 A	Επιτοίχιο	5x10mm <sup>2</sup>
7	Sunny island ↔ Batfuse	2 m	H07RN-F	166,67 A	Επιτοίχιο	1x70mm <sup>2</sup>
8	Batfuse ↔ Συσσωρευτές	3 m	H07RN-F	250 A	Στον αέρα	1x95mm <sup>2</sup>
9	M.C.BOX 6.3 → Π.Εξ.Multicluster	5 m	H07RN-F	34,78 A	Επιτοίχιο	5x10mm <sup>2</sup>
10	Π.Εξ.Multicluster → Γ.Π.Φορτίων	7 m	H07RN-F	34,78 A	Επιτοίχιο	5x10mm <sup>2</sup>
11	Αντικεραυνικές ακίδες Φ/Β → Θεμελιαική γείωση	6,5 m	Cu		Στον αέρα	1x16mm <sup>2</sup> 1x50mm <sup>2</sup>

Σχήμα 4.3: πίνακας τύπων και διατομών καλωδίων

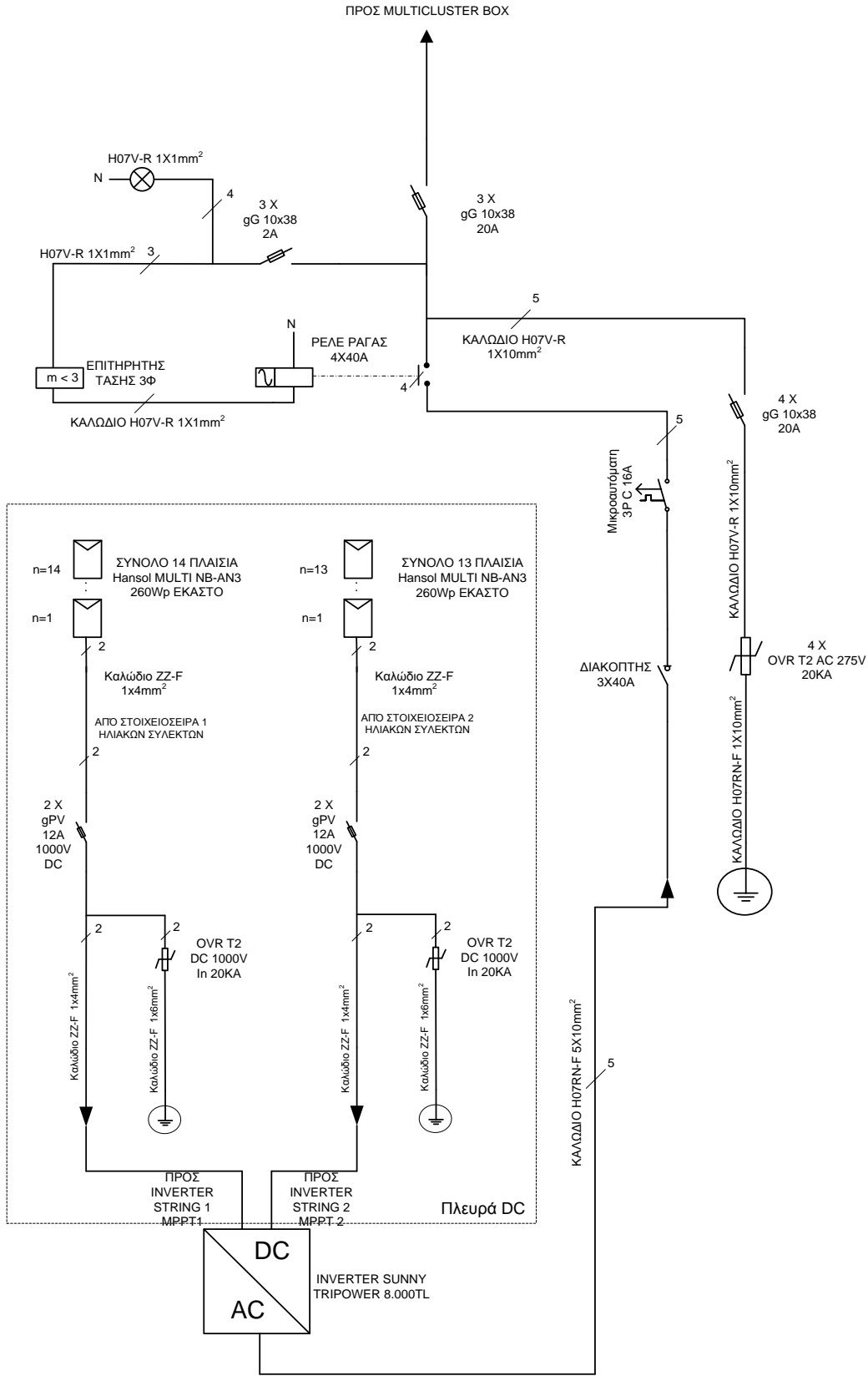
### 4.10 Τα μονογραμμικά σχέδια της καλωδίωσης του υβριδικού συστήματος



Σχήμα 4.21: πίνακας ηλεκτρολογικής εγκατάστασης οικίας



Σχήμα 4.22: Multicuster Box - πίνακας εξόδου Multicuster



Σχήμα 4.23: ΦB συστοιχία - πίνακας ΦB συστοιχίας

#### 4.11 Οι παρατηρήσεις για τις διατάξεις του υπό μελέτη υβριδικού συστήματος

---

Σύμφωνα με την θεωρητική μελέτη το σύστημα θα είναι σε θέση να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες της οικίας για όλη την διάρκεια του έτους, με περιθώριο αυτονομίας σε περιόδους συννεφιάς τις τρεις ημέρες.

Στην πραγματικότητα μπορεί να εμφανιστεί περίοδος συννεφιάς μεγαλύτερη των τριών ημερών η οποία θα αναγκάσει το σύστημα να εκκινήσει την γεννήτρια.

Για την προσομοίωση αυτών των περιόδων και την λήψη πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων θα γίνει και πάλι χρήση της εφαρμογής PVGIS από την οποία μπορούμε να εξάγουμε αποτελέσματα και για αυτόνομα συστήματα, (χωρίς την χρήση ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους), εισάγοντας τις παραμέτρους των βασικών στοιχείων που τα αποτελούν.

Αντικειμενικός μας στόχος είναι να καταφέρουμε να προσδιορίσουμε τις ώρες λειτουργίας του ζεύγους μέσα σε ένα έτος.

Η εφαρμογή κατά την επεξεργασία των δεδομένων λαμβάνει υπόψιν της όλα τα δεδομένα τα οποία αναφέρθηκαν και κατά την προηγούμενη χρήση της, επιπροσθέτως λαμβάνει υπόψιν της απώλειες κατά την φόρτιση των συσσωρευτών και εκμεταλλεύεται τα δεδομένα ακτινοβολίας από μια βάση δεδομένων 1827 ημερών.

Επειδή η εφαρμογή υπολογίζει τις ημέρες κατά τις οποίες οι συσσωρευτές θα φτάσουν στο κατώφλι S.O.C. μέσα στο σύνολο των 1827, πρέπει να βρεθεί ο συντελεστής ο οποίος θα διαιρεθούν οι ημέρες για να γνωρίζουμε τις ημέρες κατά τις οποίες οι συσσωρευτές θα φτάσουν στο 50% μέσα σε ένα έτος.

$$1827 / 365 = 5$$

Στους πίνακες που ακολουθούν είναι εμφανές πως το σύστημα θα βρεθεί σε οριακή κατάσταση για 31 ημέρες, δηλαδή διαιρώντας με τον συντελεστή 5 για 6 ημέρες.

Το ζεύγος θα χρειαστεί να λειτουργήσει για 2 ώρες αυτές τις 6 ημέρες ώστε να επιτευχθεί αύξηση ποσοστού S.O.C. κατά 20% το οποίο συνεπάγεται αυτονομία του συστήματος για μία ακόμα ημέρα.

Δηλαδή το ζεύγος θα λειτουργήσει σύνολο περίπου για 12 ώρες μέσα σε ένα έτος.

12 ώρες λειτουργίας x 4,4λίτρα κατανάλωση ανά ώρα = 52,8 λίτρα πετρελαίου θα καταναλώνονται ετησίως από το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος του συστήματος.

Κάτι άλλο το οποίο παρατηρείται από τα αποτελέσματα της εφαρμογής είναι πως οι συσσωρευτές τις περισσότερες ημέρες του έτους πραγματοποιούν κύκλους εκφόρτισης σε D.O.D. 10%-15%. Το στοιχείο αυτό υποδεικνύει την διάρκεια των συσσωρευτών ως προς τον χρόνο.

Υποθέτοντας πως οι συσσωρευτές έχουν εγκατασταθεί σε περιβάλλον του οποίου οι θερμοκρασία δεν αναμένεται να ξεπερνάει τους 25<sup>0</sup>C και επίσης πως η συντήρηση τους (συμπλήρωση απιονισμένου νερού στον ηλεκτρολύτη, σύσφιξη καλωδίων, καθαρισμός βαλβίδων στοιχείων κ.λ.π.) πραγματοποιείται ανά εξάμηνο, οι συσσωρευτές αναμένεται να πραγματοποιήσουν 5.000 κύκλους εκφόρτισης ή αλλιώς να αντέξουν στον χρόνο για 13,5 έτη.

### Performance of solar home system

Location: 37°56'44" North, 23°30'53" East, Elevation: 61 m a.s.l.,

Nominal power of the PV system: 7020 W

Inclination of modules: 35 deg.

Battery size : 48 V, 1800 Ah

Discharge cutoff limit (%) 50 %

Consumption per day: 15040 Wh

Number of days used for the calculation: 1827

Percentage of days with fully charged battery 77.07%

Average energy not captured due to full battery: 16915.97Wh

Percentage of days the battery became fully discharged: 3%

Average energy missing: 4476Wh

Month	Ed	Ff	Fe
Jan	14100.0	38	14
Feb	15100.0	56	5
Mar	15100.0	79	3
Apr	15100.0	88	0
May	15000.0	96	0
Jun	15000.0	99	0
Jul	15000.0	100	0
Aug	15000.0	100	0
Sep	15000.0	92	0
Oct	14800.0	75	1
Nov	15000.0	66	0
Dec	14300.0	32	8

Ed: Average energy production per day (Wh/day)

Ff: Percentage of days when battery became full (%)

Fe: Percentage of days when battery became empty (%)

Σχήμα 4.24: μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την φωτοβολταϊκή συστοιχία και μηνιαία εμφάνιση ημερών όπου οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές κάνουν εκφόρτιση στο κατώφλι ενέργειας

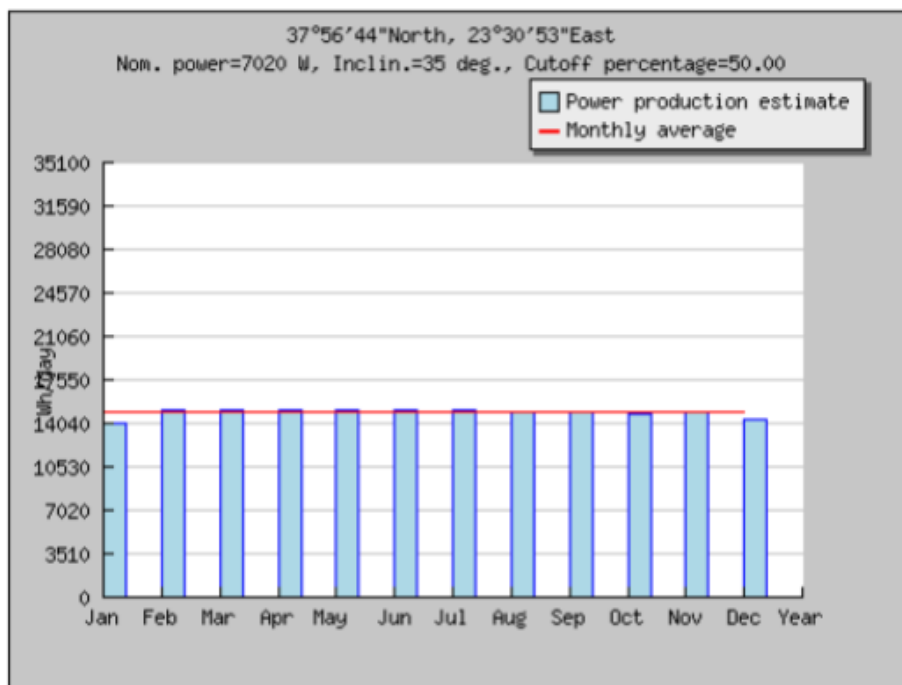
Cs	Cb
50-55	1
55-60	1
60-65	1
65-70	2
70-75	2
75-80	3
80-85	3
85-90	22
90-95	18
95-100	42

Cs: Charge state at end of each hour (%)

Cb: Percentage of days with this charge state (%)

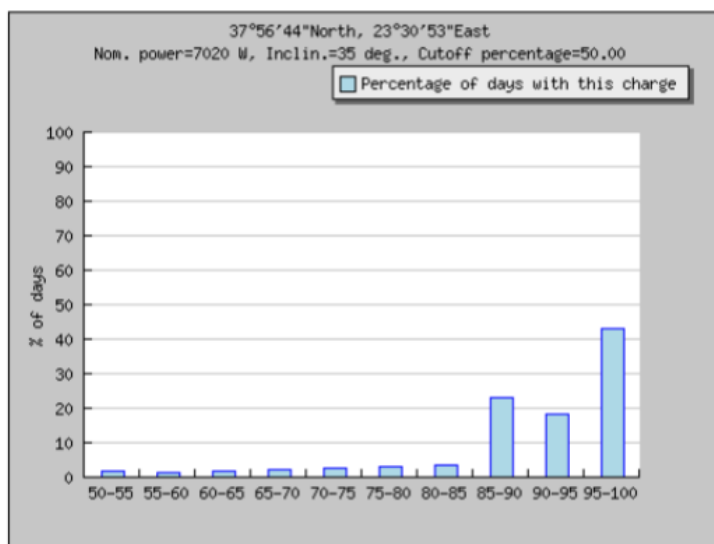
Σχήμα 4.25: ποσοστιαία χρονική κατανομή του επίπεδου φόρτισης των ηλεκτρικών συσσωρευτών





Monthly energy output from SHS system

Σχήμα 4.26: γραφική απεικόνιση μηνιαίας ηλεκτρικής παραγωγής του φωτοβολταϊκού συστήματος



Probabilities of battery charge state at the end of each hour

Σχήμα 4.27: γραφική απεικόνιση ποσοστιαίας χρονικής κατανομής του επίπεδου φόρτισης ηλεκτρικών συσσωρευτών

#### 4.12 Η εκτίμηση του οικονομικού κόστους του υπό μελέτη υβριδικού συστήματος

---

ΕΙΔΟΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ
Φωτοβολταϊκά πλαίσια Hs 260	27	4.450€
Βάσεις στήριξης	-	600€
Inverter STP 8000	1	2.000€
Inverter sunny island	3	9.600€
Multicluster Box 6	1	4.200€
Παρελκόμενα των inverters	-	2.300€
Συσσωρευτές Enersys TYS 8	48	13.700€
Ηλεκτρ. ζεύγος 17,2KW	1	6.400€
Καλώδια - Πίνακες	-	1.250€
ΣΥΝΟΛΟ		44.500€

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Β.Δ. Μπιτζιώνης, Δ.Β. Μπιτζιώνης, "Εναλλακτικές Μορφές Ενέργειας", Εκδόσεις Τζιόλα (2011).
- [2] Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, "Φωτοβολταϊκά Συστήματα", Εκδόσεις Ζήτη (2009).
- [3] Σ. Περδίδος, "Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις", Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ-4Μ (2010).
- [4] Ι. Καλδέλλης, Κ. Καβαδιάς, "Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας", Εκδόσεις Σταμούλη (2001).
- [5] Σ.Ν. Καπλάνης, "Ήπιες Μορφές Ενέργειας ΙΙΙ, Μηχανική των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων. Τεχνολογία, Μελέτες, Εφαρμογές", Εκδόσεις ΙΩΝ (2004).
- [6] Σ. Μανιάς, "Ηλεκτρονικά Ισχύος", Εκδόσεις Συμεών (2007).
- [1] Ι. Κ. Καλδέλης, Γ. Χ. Σπυρόπουλος, Κ. Α. Καβαδιάς, 'Υπολογιστικές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας', Εκδόσεις Σταμούλη, 2007.
- [2] Ι. Κ. Καλδέλης, Κ. Α. Καβαδιάς, 'Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας', Εκδόσεις Σταμούλη, 2001.
- [3] Βασίλης Μαλαμής, 'Αυτόνομες Εφαρμογές Ηλιακής Ενέργειας Μικρού & Μεσαίου Μεγέθους', Εκδόσεις ΙΩΝ, 1999.
- [4] Δρ. Αικ. Α. Μπαξεβάνου, 'Μετάδοση Θερμότητας ΙΙ – Ηλιακή Τεχνική', Σημειώσεις Προπτυχιακού Μαθήματος, Απρίλιος 2007.
- [5] Α. Νεοκλέους, Σ. Π. Κωνσταντινίδη, 'Μετατροπή της Ηλιακής Ενέργειας σε Ηλεκτρική με Φωτοβολταϊκά Συστήματα', Εκδόσεις ΙΩΝ, 1991.
- [6] Δρ. Π. Αζαόπουλος, 'Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Ι', Σημειώσεις Μαθήματος.
- [7] Κ. Α. Καρύμπακα, 'Γενική Ηλεκτρονική', Τόμος Α, Θεσσαλονίκη 2001
- [8] Αντωνίου Ι. Τσακίρη, 'Φωτοτεχνία', Αθήνα 2004
- [9] Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιριακού Τομέα (ΚΕΝΑΚ), Ν.3661/08
- [10] Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών, Α' Τεύχος, Αθήνα Ιούνιος 2010
- [11] Γεώργιος Κ. Γουναρίδης, 'Προστασία Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων από Υπερτάσεις'
- [12] Μιγάλης Δ. Θεοδοσίου, 'Ανάπτυξη Λογισμικού Για Αντικεραυνική Προστασία Κτηρίων', Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Ιούλιος 2009
- [13] ΕΛΟΤ 1197, 'Προστασία Κατασκευών Από Κεραυνούς - Μέρος 1: Γενικές Αρχές', Εκδόσεις ΕΛΟΤ, Αθήνα, Ιουλιός 2002

- [14] Δημήτριος Κόντου, ‘Αντικεραυνικός Κώδικας – Τόμος 1: Προστασία Κτισμάτων & Κατασκευών με την αρχή Κλωβού Faraday & Ακίδα Franklin’, Εκδόσεις ΕΛΕΜΚΟ, Αθήνα, Φεβρουάριος 1987
- [15] Δημήτριος Κόκκινος, ‘Θεμελιακή Γείωση – Πλεονεκτήματα – Εφαρμογές – Υλικά’, Εκδόσεις ΕΛΕΜΚΟ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2006
- [16] ‘Αντικεραυνικός Κώδικας – Ισοδυναμική Προστασία & Θεμελιακή Γείωση – Τόμος II’, Εκδόσεις ΕΛΕΜΚΟ, Αθήνα
- [17] ‘Εγχειρίδιο Εφαρμογής του Προτύπου ΕΛΟΤ HD 384’, Εκδόσεις ΕΛΟΤ, Αθήνα, 2004

#### **ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

- [18] [www.cres.gr](http://www.cres.gr) (ΚΑΠΕ)
- [19] [www.rae.gr](http://www.rae.gr) (ΡΑΕ)
- [20] [www.hellasres.gr](http://www.hellasres.gr) (Ελληνικός Σύνδεσμος Ηλεκτροπαραγωγών από Α.Π.Ε.)
- [21] [www.noa.gr](http://www.noa.gr) (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)
- [22] [www.helapco.gr](http://www.helapco.gr) (Σύνδεσμος εταιριών φωτοβολταϊκών)
- [23] [www.eurec.be](http://www.eurec.be) (European Renewable Energy Centres Agency)
- [24] [www.eletaen.gr](http://www.eletaen.gr) (Ελληνική επιστημονική ένωση αιολικής ενέργειας)
- [25] [www.energypoint.gr](http://www.energypoint.gr) (Περιοδικό της Ενέργειας)
- [26] [www.dei.gr](http://www.dei.gr) (ΔΕΗ)
- [27] [www.deddie.gr](http://www.deddie.gr) (ΔΕΔΔΗΕ)
- [28] [www.kepka.org](http://www.kepka.org) (Κέντρο προστασίας καταναλωτών)
- [29] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> (Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS))
- [02] [www.rae.gr](http://www.rae.gr)
- [03] [www.ypeka.gr](http://www.ypeka.gr)
- [04] [www.hlektrologia.gr](http://www.hlektrologia.gr)
- [05] [www.world-electricity-generation.findthedata.org/](http://www.world-electricity-generation.findthedata.org/)
- [06] [www.cie.org.cy](http://www.cie.org.cy)
- [07] [www.energia.gr](http://www.energia.gr)
- [08] [www.renewablegreece.wikispaces.com](http://www.renewablegreece.wikispaces.com)
- [09] [www.allaboutenergy.gr](http://www.allaboutenergy.gr)

- [10] [www.users.sch.gr](http://www.users.sch.gr)
- [11] [www.cres.gr](http://www.cres.gr)
- [12] [www.aenaon.net/gr](http://www.aenaon.net/gr)
- [13] [www.anemogennitria.gr](http://www.anemogennitria.gr)
- [14] [www.eletaen.gr](http://www.eletaen.gr)
- [15] [www.zeroenergybuildings.org](http://www.zeroenergybuildings.org)
- [16] [www.selasenergy.gr](http://www.selasenergy.gr)
- [17] [www.batteryuniversity.com](http://www.batteryuniversity.com)
- [18] [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov)
- [19] [www.allaboutbatteries.com](http://www.allaboutbatteries.com)
- [20] [www.mit.edu](http://www.mit.edu)
- [21] [www.inventors.about.com](http://www.inventors.about.com)
- [22] [www.cocoon.gr](http://www.cocoon.gr)
- [23] [www.energymatters.com.au](http://www.energymatters.com.au)
- [24] [www.docstoc.com](http://www.docstoc.com)
- [25] [www.altestore.com](http://www.altestore.com)
- [26] [www.prismsolar.co.uk](http://www.prismsolar.co.uk)
- [27] [www.bimblesolar.com](http://www.bimblesolar.com)
- [28] [www.cablel.gr](http://www.cablel.gr)
- [29] [www.windipedia.info](http://www.windipedia.info)
- [30] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)