

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΑΡΙΘΜΟΣ 1191**

# **ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ TRACKER**

*ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:*

**ΑΥΓΕΡΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ (Α.Μ. 5412)**

**ΜΠΟΓΑΤΣΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ (Α.Μ. 5439)**

*ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ:*

**ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ**

**ΝΤΑΛΑΠΕΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΡΑΠΤΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**

**ΠΑΤΡΑ ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2012**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας είναι η κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού ηλιοστάτη. Ο φωτοβολταϊκός ηλιοστάτης είναι μία διάταξη που ακολουθεί την πορεία του ήλιου στον ορίζοντα και χρησιμοποιείται σε συστήματα παραγωγής ενέργειας με φωτοβολταϊκούς συλλέκτες με σκοπό την αύξηση της απόδοσης τους.

Ο ηλιοστάτης αποτελείται από μία βάση η οποία έχει την δυνατότητα κίνησης σε δύο άξονες (αζιμουθιακή κίνηση και ανύψωση) με την βοήθεια δύο ηλεκτρικών κινητήρων. Το σύστημα ελέγχου αποτελείται από έναν προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή (PLC) ο οποίος χρησιμοποιείται για την συλλογή σημάτων από τα αισθητήρια που βρίσκονται τοποθετημένα στα trackers, στους ηλιακούς συλλέκτες όπως και για την κίνηση των trackers σύμφωνα με ενσωματωμένο αστρικό αλγόριθμο για την παρακολούθηση της πορείας του ήλιου χωρίς αισθητήρια φωτεινότητας.

Η εργασία θα περιέχει περιγραφή του κυκλώματος συνεχούς τάσης (DC) και του κυκλώματος εναλλασσόμενης τάσης (AC) μέχρι τον μετρητή ενέργειας διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος. Δηλαδή περιγραφή των διατάξεων προστασίας από υπερτάσεις και βραχυκυκλώματα των κυκλωμάτων αυτών, όπως επίσης και περιγραφή του inverter

***Ευχαριστούμε θερμά:***

*Τον κ. Νταλαπέρα Γεώργιο , Εργαστηριακό Συνεργάτη του ΤΕΙ Πάτρας για την πολύτιμη βοήθεια του και τις υποδείξεις του στην κατασκευή.*

*Τον κ. Λυρή Αναστάσιο, Εργαστηριακό Συνεργάτη του ΤΕΙ Πάτρας για την πολύτιμη βοήθεια του στον προγραμματισμό του PLC.*

*Τέλος ευχαριστούμε την εταιρία ATELCO για την βοήθεια στην επιλογή υλικών.*

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	σελίδα
Πρόλογος.....	6
Κεφάλαιο 1 – Η ηλιακή ενέργεια.....	7
1.1 Η σύσταση του ηλιακού φάσματος.....	7
1.2 Οι συμβατικές ηλιακές ακτινοβολίες .....	8
1.3 Η ακτινοβολία του «ενός ήλιου».....	10
1.4 Ηλιακή Γεωμετρία.....	11
1.5 Ηλιακός Χάρτης.....	20
1.6 Ο προσανατολισμός του συλλέκτη.....	22
1.7 Η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη .....	23
1.8 Ροή και ένταση της ακτινοβολίας .....	25
1.9 Ηλιακή Ακτινοβολία.....	26
1.10 Διέλευση Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	29
Κεφάλαιο 2 - Ημιαγωγοί & Είδη Φωτοβολταϊκών Στοιχείων.....	33
2.1 Εισαγωγή.....	33
2.2 Ημιαγωγοί πρόσμειξης.....	35
2.3 Χαρακτηριστικά Ημιαγωγών.....	37
2.4 Δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων αγωγών.....	38
2.5 Δημιουργία της επαφής (του ηλεκτρικού πεδίου).....	39
2.6 Τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου .....	39
2.7 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Πυριτίου.....	41
2.8 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου.....	41
2.9 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου.....	41
2.10 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Ταινίας.....	42
2.11 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Άμορφου Πυριτίου.....	42
2.12 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Άλλων Υλικών.....	43
2.13 Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες .....	43
Κεφάλαιο 3 - Φωτοβολταϊκή Μετατροπή.....	45

3.1 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	45
3.2 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών Πλαισίων.....	46
3.3 Χαρακτηριστική Καμπύλη Φωτοβολταϊκού Στοιχείου.....	47
3.4 Σημείο Λειτουργίας Φωτοβολταϊκού Στοιχείου.....	48
3.5 Βαθμός Απόδοσης Φωτοβολταϊκού Στοιχείου .....	51
3.6 Ισχύς Αιχμής Φωτοβολταϊκού Στοιχείου.....	51
3.7 Συνδεσμολογία Φ/Β συστοιχίας – Απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των συλλεκτών.....	52
3.8 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των Φ/Β πλαισίων.....	52
3.9 Συνθήκες λειτουργίας Φ/Β στοιχείων.....	53
Κεφάλαιο 4 - Φωτοβολταϊκό πλαίσιο.....	56
4.1 Εισαγωγή.....	56
4.2 Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες.....	57
Κεφάλαιο 5 - Προστασία Φ/Β Συστημάτων.....	61
5.1 Εξοπλισμός για την προστασία του κυκλώματος συνεχούς τάσης των Φ/Β συστημάτων.....	61
5.2 Εξοπλισμός για την προστασία του κυκλώματος εναλλασσόμενης τάσης των Φ/Β συστημάτων.....	62
5.3 Υλικά προστασίας.....	63
5.4 Πίνακες εναλλασσομένου ρεύματος.....	75
5.5 Πίνακες συνεχούς ρεύματος.....	77
Κεφάλαιο 6 - Η Κατασκευή.....	80
6.1 Περιγραφή κατασκευής.....	80
6.2 Σχέδια της κατασκευής.....	83
6.3 Φωτογραφίες της κατασκευής.....	87
6.4 Περιγραφή του προγράμματος .....	97
Βιβλιογραφία.....	99

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή αναφέρεται στην κατασκευή ενός κινούμενου φωτοβολταϊκού ηλιοστάτη. Στην αρχή της εργασίας αναφέρονται γενικές πληροφορίες για τα φωτοβολταϊκά συστήματα και της ηλιακής ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφονται βασικές αρχές για την ηλιακή ενέργεια. Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφερόμαστε στους ημιαγωγούς και τα είδη των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρουμε τις βασικές αρχές της φωτοβολταϊκής μετατροπής, ενώ στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφουμε τα διάφορα είδη των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά των υλικών που χρησιμοποιούνται για την προστασία και την ασφαλή λειτουργία των Φ/Β συστημάτων.

Τέλος στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφουμε την κατασκευή, όπου παρουσιάζουμε βήμα-βήμα με εικόνες όλα τα στάδια της, αναλύουμε την αρχή λειτουργίας του αυτοματισμού που χρησιμοποιήθηκε και την λογική του προγράμματος του προγραμματιζόμενου ελεγκτή και τέλος παραθέτουμε όλα τα αναγκαία σχέδια του κυκλώματος αυτοματισμού της κατασκευής μας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Η Ηλιακή Ενέργεια

### 1.1 Η σύσταση του ηλιακού φάσματος

Η διαμόρφωση του φάσματος του φωτός που εκπέμπει ο ήλιος προσομοιάζεται συνήθως με την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος θερμοκρασίας περίπου 5800 K, όση είναι, κατά μέσο, η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας του ήλιου. Η προσέγγιση αυτή είναι επαρκής για τη μελέτη των θερμικών εφαρμογών της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως π.χ. η θέρμανση νερού («ηλιακοί θερμοσίφωνες»). Στις περιπτώσεις αυτές ενδιαφέρει συνήθως η συνολική θερμική ισχύς της ακτινοβολίας και ο μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας π.χ. στους ηλιακούς συλλέκτες του «θερμοσίφωνα» ή τους θερμοσυσσωρευτικούς τοίχους του κτιρίου κλπ. Δεν είναι όμως το ίδιο και για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ενέργειας αφού αυτή, καθορίζεται από τη λεπτομερειακή φωτονική σύσταση της ακτινοβολίας. Άλλωστε, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι κατασκευασμένα από ημιαγωγούς, και όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η δυνατότητα της απορρόφησης των φωτονίων της ακτινοβολίας σε έναν ημιαγωγό εξαρτάται ουσιαστικά από τη σύγκριση της τιμής της ενέργειάς τους, σε σχέση με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού.

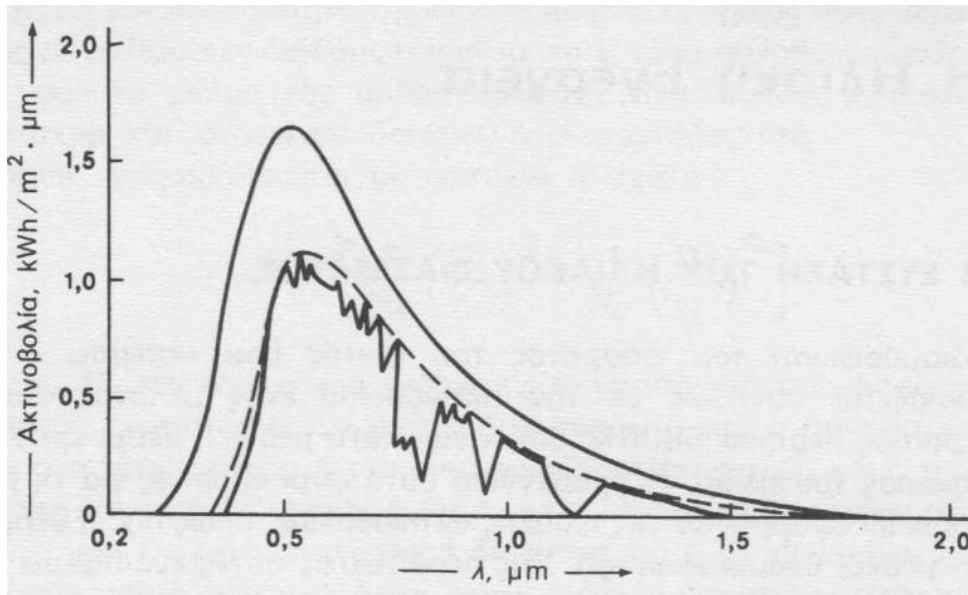
Εκτός από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ο ήλιος εκπέμπει και μια ασθενή σωματιδιακή ακτινοβολία, που αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, κυρίως ηλεκτρόνια και πρωτόνια, και ονομάζεται ηλιακός άνεμος. Σε περιπτώσεις ηλιακών εκρήξεων η ένταση του ηλιακού ανέμου αυξάνει σημαντικά και μπορεί να φτάσει π.χ. τα  $10^8$  πρωτόνια ανά  $\text{cm}^2$  και sec, στην απόσταση που βρίσκεται η γη. Πάντως, η μορφή αυτή της ηλιακής ακτινοβολίας δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον από πλευράς ενεργειακής εκμετάλλευσης.

Η ανάγκη για τη λεπτομερειακή εξέταση της φασματικής σύστασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές γίνεται φανερή στο σχήμα , που δείχνει τη μεγάλη διαφοροποίηση του πραγματικού φάσματος του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια της γης, σε σχέση με την προσέγγιση που αναφέρθηκε παραπάνω. Βλέπουμε ότι το ηλιακό φως αποκτά τελικά μία πολύ ανώμαλη φασματική κατανομή, που οφείλεται σε εκλεκτικές απορροφήσεις και σκεδάσεις στα συστατικά της ατμόσφαιρας που διασχίζει.

Ενδεικτική άλλωστε της επίδρασης της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία είναι η εξάρτηση της έντασής της από το υψόμετρο της τοποθεσίας της γης, που δέχεται την ακτινοβολία. Έτσι, έχει μετρηθεί ότι ενώ στη στάθμη της θάλασσας η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει μέχρι περίπου  $900-1000 \text{ W/m}^2$ , η τιμή της αυξάνεται κατά περίπου  $7 \text{ W/m}^2$  για κάθε 100m ύψους της τοποθεσίας, επειδή μειώνεται αντίστοιχα το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας που διασχίζουν οι ηλιακές ακτίνες.

Το όζον, που είναι άφθονο στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, απορροφά έντονα την υπεριώδη ακτινοβολία, και ειδικότερα στην περιοχή 0,2-0,35 μμπ, το μοριακό οξυγόνο απορροφά κυρίως στην περιοχή του ερυθρού (π.χ. 0,63 και 0,69μπι), το διοξείδιο του άνθρακα στο υπέρυθρο (2,7 και 4,3 μπι) και οι υδρατμοί

στο ερυθρό και στο υπέρυθρο. Επίσης, από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης, συνήθως λιγότερο από το 60% είναι άμεση, σε μορφή δέσμης ακτίνων, που μπορούν π.χ. να εστιαστούν με κάτοπτρα ή φακούς. Η υπόλοιπη είναι διάχυτη, διότι έχει προηγουμένως σκεδαστεί και ανακλαστεί στα διάφορα σωματίδια και σταγονίδια που αιωρούνται στον αέρα, ανάλογα βέβαια με τη σύσταση της ατμόσφαιρας και το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας μέσα σ' αυτήν.

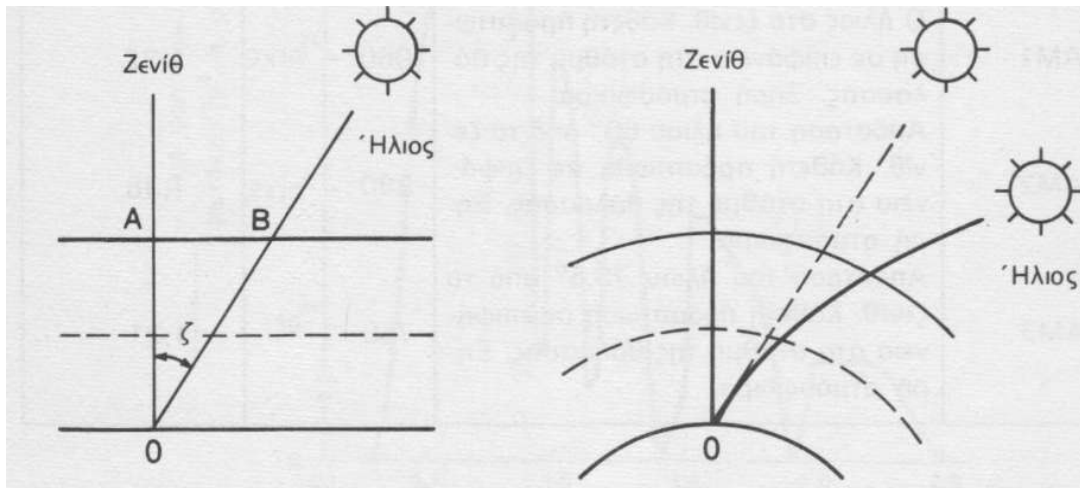


**Σχήμα 1.1:** Το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην εκπομπή μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5800 K (εξωτερική συνεχής γραμμή), το φάσμα της ίδιας πηγής ύστερα από απορροφήσεις από το όζον και από σκεδάσεις από τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας (ασυνεχής γραμμή), και το πραγματικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης σε συνθήκες μέτριας υγρασίας (εσωτερική συνεχής γραμμή).

## 1.2 Οι συμβατικές ηλιακές ακτινοβολίες

Πέρα από τη γεωγραφική θέση και το υψόμετρο, η τελική μορφή και η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης, διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες, και κυρίως τη θέση του ήλιου στον ουρανό και την περιεκτικότητα της υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Συμβατικά, το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα μέχρι τη στάθμη της θάλασσας, που είναι άμεση συνέπεια της θέσης του ήλιου, χαρακτηρίζεται από μία κλίμακα μάζας αέρα AM (air mass, ονομάζεται επίσης οπτική αέρια μάζα) βαθμολογημένης με την τέμνουσα (το αντίστροφο του συνημίτονου) της ζενιθιακής απόστασης ( $\zeta$ ), δηλαδή της γωνίας ανάμεσα στη θέση του ήλιου και στην κατακόρυφο. Δηλαδή η κλίμακα της μάζας αέρα δείχνει ουσιαστικά πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της





**Σχήμα 1.2:** Η εξάρτηση της κλίμακας μάζας αέρα (AM) από τη θέση του ήλιου, (α) Απλοποιημένη απεικόνιση, με την ατμόσφαιρα να έχει επίπεδη ανάπτυξη σε άπειρη έκταση. Εξ ορισμού είναι  $AM = OB/OA = 1 / \cos \zeta$ . (β) Η πραγματική διαμόρφωση της γήινης ατμόσφαιρας, με τα στρώματά της να ορίζονται από σφαιρικές επιφάνειες, και η αντίστοιχη ατμοσφαιρική διάθλαση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της μέσα από τα στρώματα αυτά.

Συγκεκριμένα, ως AM1 συμβολίζεται η συνθήκη για τη θέση του ήλιου στην κατακόρυφο, στο ζενίθ, που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Όμοια, ως AM1,5 συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον ήλιο σε γωνία  $45^\circ$  από το ζενίθ, ως AM2 με τον ήλιο σε γωνία  $60^\circ$  κ.λπ. Το μηδέν της κλίμακας (AM0) συμβολίζει την πλήρη απουσία ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, σε θέση που να απέχει όση είναι η μέση απόσταση της γης από τον ήλιο. Στον πίνακα γράφονται οι πυκνότητες της ισχύος και η μέση ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες πρότυπες συνθήκες στην κλίμακα μάζας αέρα.

Τιμή μάζας αέρα	Συμβατικές συνθήκες	Ισχύς	Μέση ενέργεια των φωτονίων
AM0	Στο διάστημα, έξω από την ατμόσφαιρα.	1350 W/m <sup>2</sup>	1,48eV
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	1060	1,32
AM2	Απόσταση του ήλιου $60^\circ$ από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	880	1,38
AM3	Απόσταση του ήλιου $70,5^\circ$ από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	750	1,21

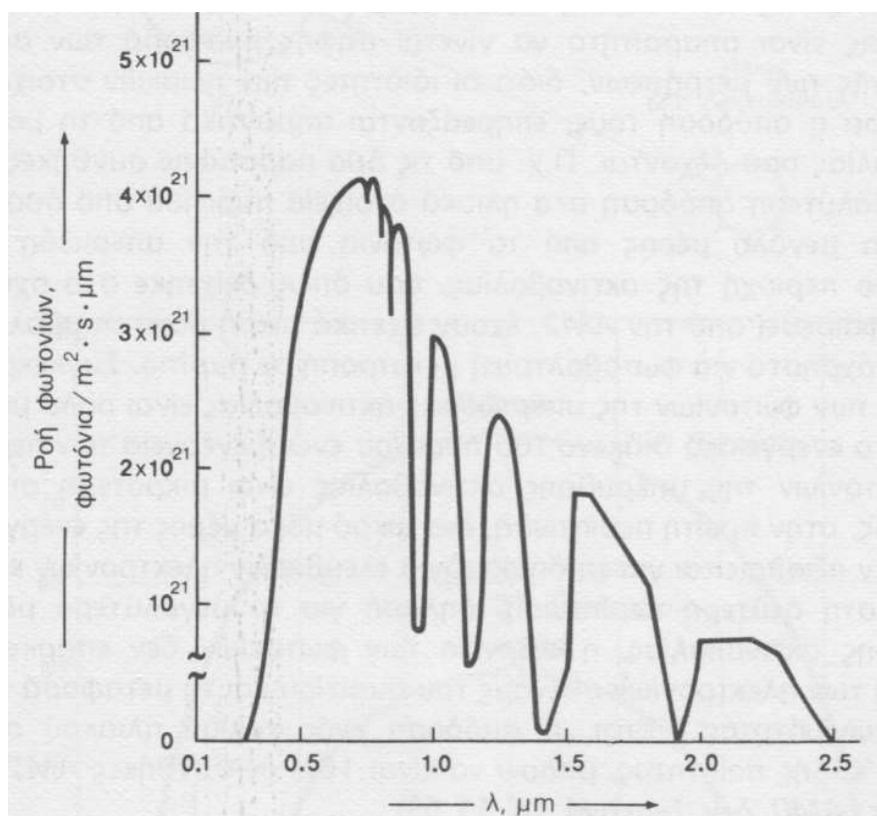
**ΠΙΝΑΚΑΣ:** Οι πρότυπες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα.

Ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας της διαμόρφωσης των μετεωρολογικών συνθηκών, δηλαδή η ατμοσφαιρική υγρασία, χαρακτηρίζεται από το ύψος  $w$  της στήλης του νερού (μετρημένης σε cm), που σχηματίζεται από την υποθετική συμπύκνωση του συνόλου των υδρατμών της ατμόσφαιρας, στον συγκεκριμένο τόπο και χρόνο.

Πάντως, έτσι και αλλιώς, το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας συγκεντρώνεται στη φασματική περιοχή του κυανού και του πράσινου, και ειδικότερα σε μήκη κύματος από 0,45 μέχρι 0,6  $\mu\text{m}$ , που αντιστοιχεί σε φωτόνια ενέργειας περίπου 2,1 -2,8 eV. Για την αντιστοιχία μήκους κύματος και ενέργειας των φωτονίων, υπενθυμίζεται ότι από τη σχέση  $\nu = c/\lambda$ , που συνδέει τη συχνότητα  $\nu$  και το μήκος κύματος  $\lambda$  μιας ακτινοβολίας με την ταχύτητα του φωτός  $c$ , βρίσκουμε ότι η ενέργεια του φωτονίου  $h\nu$ , σε eV, συνδέεται με το αντίστοιχο μήκος της ακτινοβολίας  $\lambda$ , σε  $\mu\text{m}$ , με τη σχέση  $h\nu = 1,238/\lambda$ .

### 1.3 Η ακτινοβολία του «ενός ήλιου»

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τη ροή των φωτονίων που αντιστοιχεί στα διάφορα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας AM 1,5, όταν φτάνει στη γη, στη στάθμη της θάλασσας. Η καμπύλη έχει βγει υπολογιστικά, δηλαδή έχουν αφαιρεθεί από το διαστημικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας τα φωτόνια που εκτιμήθηκε ότι απορροφούνται ή σκεδάζονται από το όζον, τους υδρατμούς και τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας.



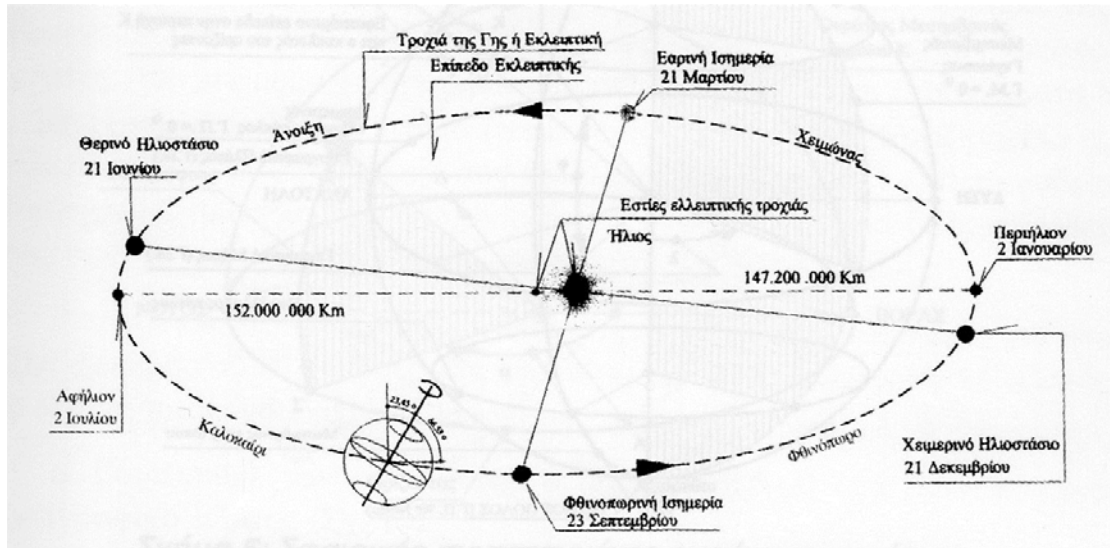
**Σχήμα 1.3:** Η συμβατική φωτονική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες AM 1,5.

Η ηλιακή ακτινοβολία *AMI,5* έχει πυκνότητα  $935\text{W/m}^2$  και αποτελεί, χονδρικά μια αρκετά αντιπροσωπευτική προσέγγιση της μέσης μέγιστης ισχύος που περίπου δέχεται σε επιφάνεια κάθετη προς την ακτινοβολία και στις ευνοϊκότερες δυνατές συνθήκες αιχμής (καλοκαίρι, μεσημέρι, καθαρός ουρανός κ.λπ.) ένα μεγάλο μέρος από τις περισσότερο κατοικημένες και αναπτυγμένες περιοχές της γης. Για απλοποίηση, η παραπάνω πυκνότητα ισχύος στρογγυλεύεται στα  $1000\text{W/m}^2$ , ονομάζεται συμβατικά ακτινοβολία ενός ήλιου (ή ενός πλήρους ήλιου) και παίρνεται συχνά σαν βάση σύγκρισης της ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Η μονάδα αυτή χρησιμοποιείται επίσης για την αναφορά της ισχύος αιχμής των φωτοβολταϊκών διατάξεων, καθώς και για την πυκνότητα της ακτινοβολίας στις συγκεντρωτικές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν φακούς ή κάτοπτρα. Π.χ. η συγκεντρωμένη δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας με πυκνότητα ισχύος  $100\text{kW/m}^2$  ονομάζεται «100 ήλιου».

Οι συνθήκες *AM0* και *AM2* χρησιμοποιούνται συχνά ως πρότυπες για τον έλεγχο και την αξιολόγηση των ηλιακών στοιχείων που προορίζονται για διαστημικές και επίγειες εφαρμογές, αντίστοιχα. Για αντικειμενικές συγκρίσεις είναι απαραίτητο να γίνεται σαφής αναφορά των συνθηκών διεξαγωγής των μετρήσεων, διότι οι ιδιότητες των ηλιακών στοιχείων, και γενικότερα η απόδοσή τους, επηρεάζονται σημαντικά από τη μορφή της ακτινοβολίας που δέχονται. Π.χ. από τις δύο παραπάνω συνθήκες, η *AM2* δίνει μεγαλύτερη απόδοση στα ηλιακά στοιχεία πυριτίου από όσο η *AM0*, διότι ένα μεγάλο μέρος από τα φωτόνια από την υπεριώδη και την υπέρυθρο περιοχή της ακτινοβολίας, που όπως δείχτηκε στο σχήμα, έχουν αφαιρεθεί από την *AM2*, έχουν σχετικά μικρή μόνο συμβολή ή είναι εντελώς άχρηστα για φωτοβολταϊκή μετατροπή με πυρίτιο. Συγκεκριμένα, η ενέργεια των φωτονίων της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι πολύ μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου ενώ η ενέργεια των περισσότερων φωτονίων της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι μικρότερη από αυτό. Επομένως, στην πρώτη περίπτωση, ένα μικρό μόνο μέρος της ενέργειας των φωτονίων αξιοποιείται για τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Επίσης, στη δεύτερη περίπτωση, δηλαδή για το μεγαλύτερο μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας, η ενέργεια των φωτονίων δεν επαρκεί για τη διέγερση των ηλεκτρονίων σθένους του πυριτίου και τη μεταφορά τους στη ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι, η απόδοση ενός κοινού ηλιακού στοιχείου πυριτίου καλής ποιότητας, μπορεί να είναι 16% σε συνθήκες *AM2*, ενώ σε συνθήκες *AM0* δεν ξεπερνά το 11,5%.

#### 1.4 Ηλιακή Γεωμετρία

Η Γη, ένας από τους 9 μεγάλους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος, περιφέρεται γύρω από τον ήλιο με περίοδο 365,25 ημερών σε ελαφρώς ελλειπτική τροχιά. Το επίπεδο της τροχιάς της Γης γύρω από τον ήλιο τέμνει την ουράνια σφαίρα, που είναι μια σφαίρα με κέντρο τον εκάστοτε παρατηρητή και αυθαίρετα μεγάλη ακτίνα, κατά ένα μέγιστο κύκλο, που ονομάζεται εκλειπτική. Η διάμετρος της ουράνιας σφαίρας, που είναι κάθετη προς την εκλειπτική ονομάζεται άξονας της εκλειπτικής και σχηματίζει γωνία  $23,45^\circ$  με τον άξονα περιστροφής της γης. Η γωνία αυτή ονομάζεται λόξωση της εκλειπτικής ή απόκλιση.

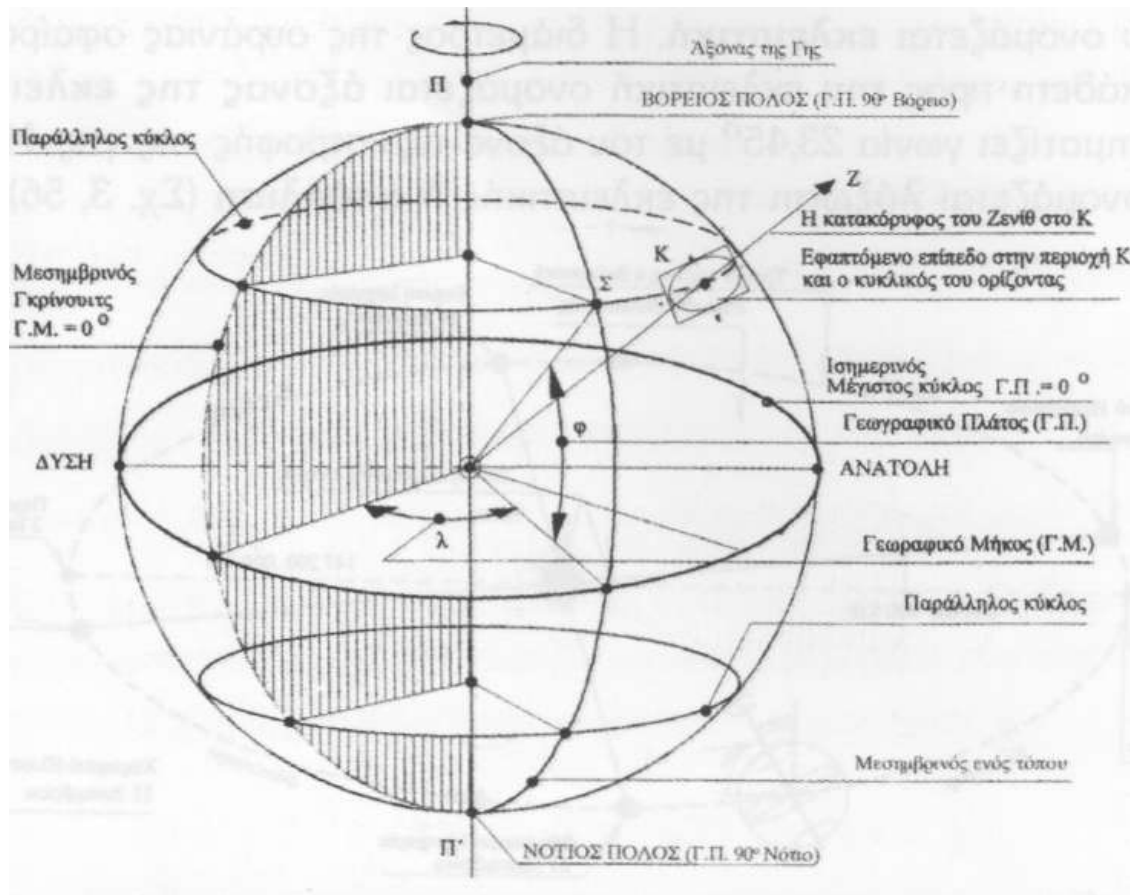


*Σχήμα 1.4: Περιφορά της γης γύρω από τον ήλιο.*

Εκτός από την περιφορά της γύρω από τον ήλιο, η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της με σχεδόν σταθερή γωνιακή ταχύτητα, εκτελώντας μία πλήρη περιστροφή σε 24 ώρες περίπου. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι η περιφορά της Γης γύρω από τον ήλιο εξασφαλίζει τη διαδοχή των εποχών και η περιστροφή γύρω από τον άξονά της εξασφαλίζει τη διαδοχή ημέρας και νύχτας.

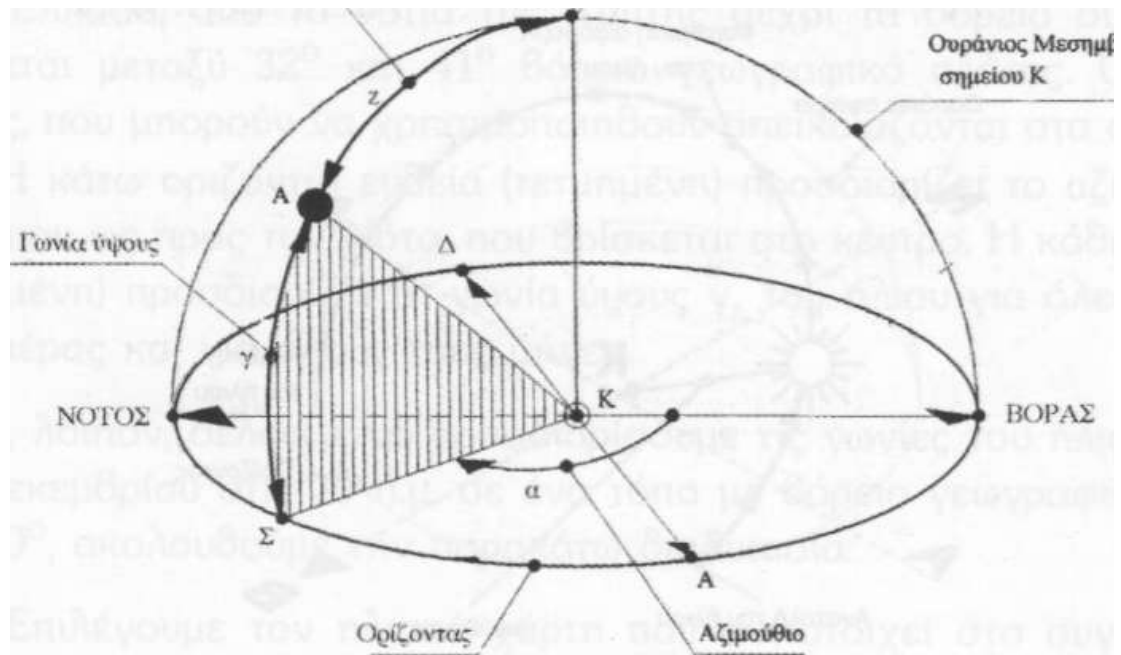
**Ορίζοντας** ενός τόπου είναι το επίπεδο, που εφάπτεται της σφαιρικής Γης στο σημείο του τόπου. Η κατακόρυφη διεύθυνση σε ένα τόπο είναι πάντοτε κάθετη προς τον ορίζοντα του τόπου και τέμνει την ουράνια σφαίρα σε δύο σημεία. Το σημείο, που βρίσκεται πάνω από τον ορίζοντα του τόπου ονομάζεται **Ζενίθ** και είναι πάντοτε ορατό, ενώ το αντιδιαμετρικά αντίθετο ονομάζεται **Ναδίρ** και βρίσκεται κάτω από τον ορίζοντα.

Για τον προσδιορισμό της θέσης σημείων πάνω στην επιφάνεια της Γης χρησιμοποιούνται οι γεωγραφικές συντεταγμένες. Στο σύστημα αυτό ως βασικοί κύκλοι λαμβάνονται ο ισημερινός της Γης και ο μεσημβρινός, που διέρχεται από την πόλη Γκρήνουιτς κοντά στο Λονδίνο. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες ενός τόπου είναι το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος. Γεωγραφικό πλάτος φ ονομάζεται η διέδρη γωνία που σχηματίζεται από τη διεύθυνση της κατακόρυφου του τόπου και το γήινο ισημερινό. Μετριέται πάνω στο μεσημβρινό του τόπου και παίρνει τιμές από  $90^\circ$  βόρεια έως  $90^\circ$  νότια του ισημερινού. Γεωγραφικό μήκος  $\lambda$  ονομάζεται η γωνία, που σχηματίζεται από το μεσημβρινό του τόπου και το μεσημβρινό του Γκρήνουιτς. Μετριέται πάνω στον ισημερινό και παίρνει τιμές από  $-180^\circ$  ανατολικά έως  $+180^\circ$  δυτικά του μεσημβρινού του Γκρήνουιτς.



**Σχήμα 1.5:** Γεωγραφικές συντεταγμένες ενός τόπου

Για τον προσδιορισμό της θέσης των ουράνιων σωμάτων χρησιμοποιούνται οι σφαιρικές συντεταγμένες, που είναι το αζιμούθιο και η γωνία ύψους. Αζιμούθιο α ονομάζεται η γωνία, που σχηματίζεται από την προβολή της θέσης του ουράνιου σώματος στο επίπεδο του ορίζοντα και το Βορά. Μετριέται πάνω στον ορίζοντα και παίρνει τιμές από  $0 - 180^\circ$  ανατολικά και  $0 - 180^\circ$  δυτικά του Βορά. Γωνία ύψους  $\gamma$  ονομάζεται η γωνία μεταξύ του ουράνιου σώματος και του επιπέδου του ορίζοντα. Μετριέται πάνω στον κατακόρυφο του ουράνιου σώματος και παίρνει θετικές τιμές ( $0^\circ$  έως  $90^\circ$ ) από το επίπεδο του ορίζοντα προς το Ζενίθ και αρνητικές τιμές ( $0^\circ$  έως  $-90^\circ$ ) από το επίπεδο του ορίζοντα προς το Ναδίρ. Αντί της γωνίας ύψους, πολλές φορές χρησιμοποιείται η ζενιθία απόσταση  $\zeta$ , που είναι η συμπληρωματική της γωνία ( $\zeta = 90^\circ - \gamma$ ) και μετριέται επίσης πάνω στην κατακόρυφο του ουράνιου σώματος από  $0^\circ$  έως  $180^\circ$ , με αρχή το ζενίθ του παρατηρητή.

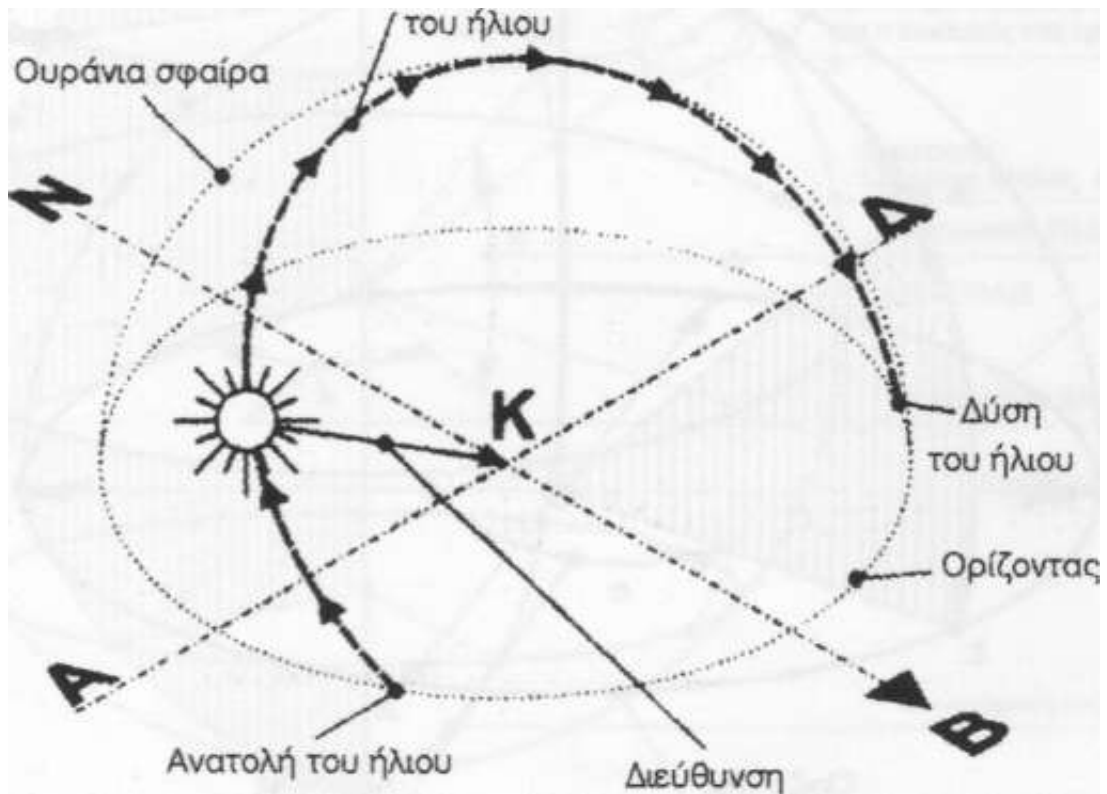


**Σχήμα 1.6:** Σφαιρικές συντεταγμένες ουράνιων σωμάτων.

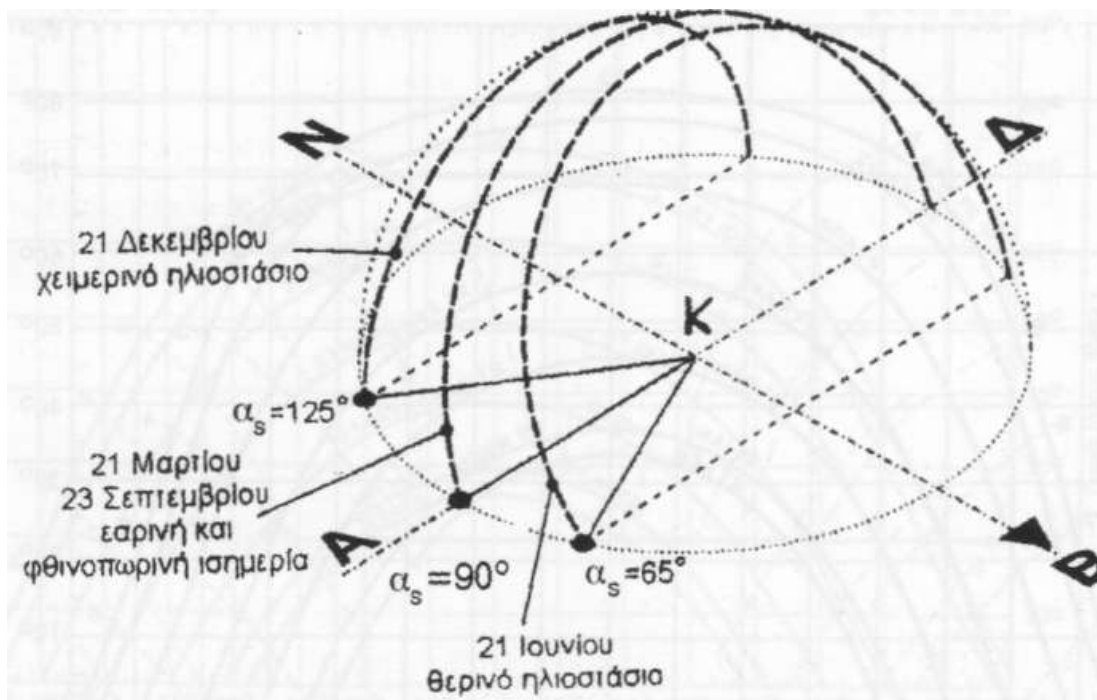
Η διερεύνηση των συνθηκών ηλιασμού ενός κτιρίου, προϋποθέτει τη γνώση της διεύθυνσης των ηλιακών ακτίνων σε διαφορετικές ώρες και ημέρες του έτους, ως προς ένα σημείο Κ στο οποίο υποτίθεται ότι βρίσκεται το κτίριο.

Σύμφωνα με τα όσα αναπτύξαμε παραπάνω, η διεύθυνση των ηλιακών ακτίνων μπορεί να βρεθεί και να αποτυπωθεί στα αρχιτεκτονικά σχέδια με τη βοήθεια του αζιμούθιου και της γωνίας ύψους του ήλιου, που συμβολίζονται με  $\alpha_5$  και  $\gamma_3$  αντίστοιχα.

Επειδή η φαινόμενη διαδρομή του ήλιου πάνω από τον ορίζοντα αλλάζει κάθε ημέρα, η διεύθυνση των ηλιακών ακτίνων, ως προς το σημείο Κ, είναι διαφορετική για κάθε ημέρα και ώρα του έτους. Στο βόρειο ημισφαίριο της Γης στις 21 Ιουνίου γίνεται η μεγαλύτερη φαινόμενη διαδρομή, οπότε έχουμε τη μεγαλύτερη ημέρα του έτους (θερινό ηλιοστάσιο). Αντίθετα, στις 21 Δεκεμβρίου γίνεται η μικρότερη φαινόμενη διαδρομή και έχουμε τη μικρότερη ημέρα του έτους (χειμερινό ηλιοστάσιο). Τέλος, στις 21 Μαρτίου και 23 Σεπτεμβρίου η φαινόμενη διαδρομή του ήλιου ξεκινά\_ακριβώς από την Ανατολή και καταλήγει\_ακριβώς στη Δύση, οπότε η ημέρα και η νύχτα έχουν την ίδια διάρκεια (ισημερίες). Ο ήλιος λοιπόν\_δεν ανατέλλει πάντοτε από την Ανατολή και δεν δύει πάντοτε στη Δύση, γιατί στην πραγματικότητα, η διαδρομή Ανατολή - Δύση ισχύει μόνο για δύο ημέρες κάθε έτος.

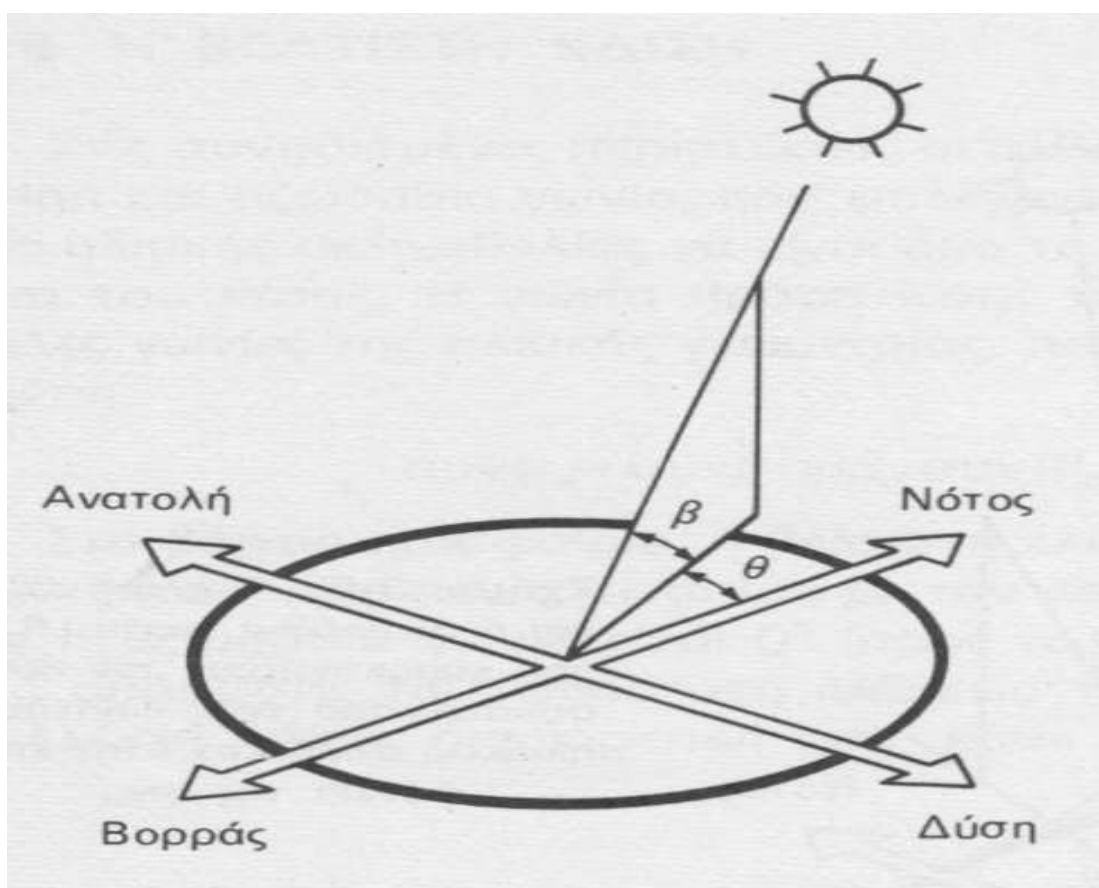


**Σχήμα 1.7:** Φαινόμενη διαδρομή του ήλιου κατά τη διάρκεια μίας ημέρας.



**Σχήμα 1.8:** Φαινόμενες διαδρομές του ήλιου κατά τη διάρκεια τεσσάρων χαρακτηριστικών ημερών του έτους.

Η θέση του ήλιου στον ουρανό ενός τόπου περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες: το ύψος και το αζιμούθιο. Το ύψος του ήλιου ( $\beta$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στον ορίζοντα. Αντί για το ύψος, χρησιμοποιείται επίσης συχνά η συμπληρωματική της γωνία, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, που όπως είδαμε ονομάζεται ζενιθιακή απόσταση (ή ζενιθιακή γωνία) του ήλιου. Ζενίθ είναι το σημείο του ουρανού που συναντά η κατακόρυφος ενός τόπου. Η δεύτερη χαρακτηριστική γωνία του ήλιου, το ηλιακό αζιμούθιο ( $\theta$ ), είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά - νότου. Προς τα δεξιά από τον νότο, το ηλιακό αζιμούθιο παίρνει θετικές τιμές, και προς τα αριστερά αρνητικές. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το ύψος του ήλιου και το αζιμούθιο μεταβάλλονται συνεχώς, καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό.



**Σχήμα 1.9:** Οι γωνίες του ύψους ( $\beta$ ) και του αζιμούθιου ( $\theta$ ) που περιγράφουν κάθε στιγμή τη θέση του ήλιου.

Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά φτάνει στην επιφάνεια της Γης, βασίζεται σε διάφορες τριγωνομετρικές σχέσεις μεταξύ της θέσης του ήλιου στον ουράνιο θόλο και τις συντεταγμένες μίας επιφάνειας πάνω στη Γη.

Παρακάτω δίνονται οι κυριότερες παράμετροι:



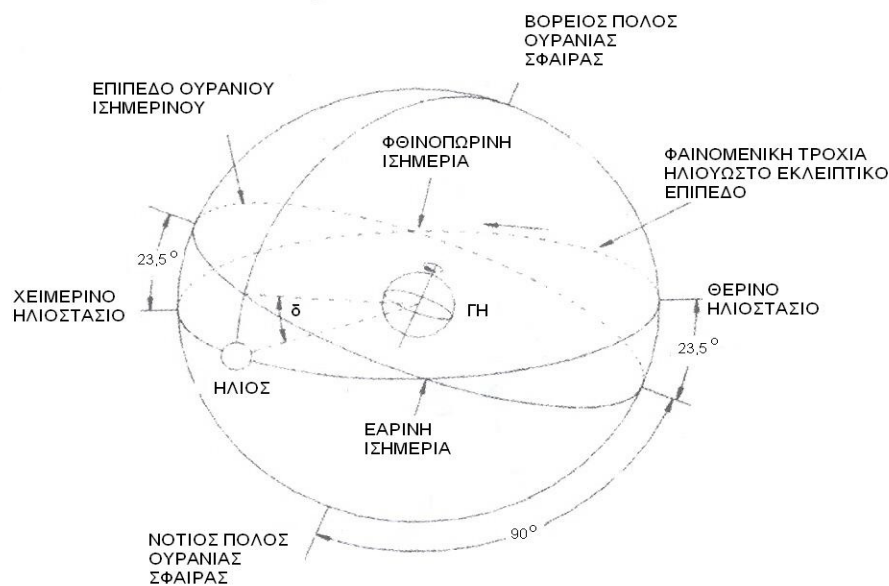
Ωριαία γωνία ( $\omega$ ). Η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού (θέση του ήλιου στις 12 το μεσημέρι είναι η μεσημβρία δηλαδή το μέσο της ημέρας σε πραγματικό ηλιακό χρόνο) εκφράζεται με την ωριαία γωνία. Η ωριαία γωνία είναι μηδέν την μεσημβρία και έχει αρνητικές τιμές το πρωί και θετικές το απόγευμα.

Ζενιθιακή γωνία ( $\theta_z$ ). Είναι η γωνία που σχηματίζουν οι ακτίνες του ήλιου με την κάθετο σε μία οριζόντια επιφάνεια σε ένα σημείο πάνω στην επιφάνεια της Γης. Η ζενιθιακή γωνία υπολογίζεται από την σχέση:

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\omega) = \sin(\alpha_x)$$

όπου  $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής,  $\omega$  η ωριαία γωνία για την δεδομένη χρονική στιγμή, και  $\delta$  η ηλιακή απόκλιση η οποία υπολογίζεται για κάθε μέρα του χρόνου (D).

Ηλιακή απόκλιση ( $\delta$ ). Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που ενώνει τα κέντρα Γης και Ήλιου με το εκλειπτικό επίπεδο του Ισημερινού. Η γωνία αυτή μεταβάλλεται συνεχώς και είναι μηδενική στις Ισημερίες ενώ παίρνει τις μέγιστες κατ' απόλυτο τιμές της στο θερινό (+23,5°) και στο χειμερινό ηλιοστάσιο (-23,5°).



Κατά την διάρκεια ενός 24ώρου, η μέγιστη μεταβολή της ( $\delta$ ) είναι μικρότερη από 0,5°. Συνεπώς, εάν η ηλιακή απόκλιση θεωρηθεί σταθερή για 24 ώρες, έχουμε ένα μέγιστο σφάλμα στους υπολογισμούς των άλλων ηλιακών γωνιών μεγέθους 0,5°.

Ο υπολογισμός του ( $\delta$ ) μπορεί να γίνει με την εξίσωση του Spencer:

$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cdot \cos(r) + 0,70257 \cdot \sin(r) - 0,006758 \cdot \cos(r) - 0,002697 \cdot \cos(3r) + 0,00148 \cdot \sin(3r)) \cdot (180/\pi)$$

Απλούστερες σχέσεις, επιτυγχάνοντας ικανοποιητική ακρίβεια υπολογισμών, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν όπως αυτές των Cooper όπου:

$(D - 1)/365$  (rad)

$$\delta = 23.45 \cdot \sin[360 \cdot (D + 284)/365]$$

και Perrin de Brichambaut:

$$\delta = \sin^{-1}\{0.4 \cdot \sin[360 \cdot (D - 82)/365]\}$$

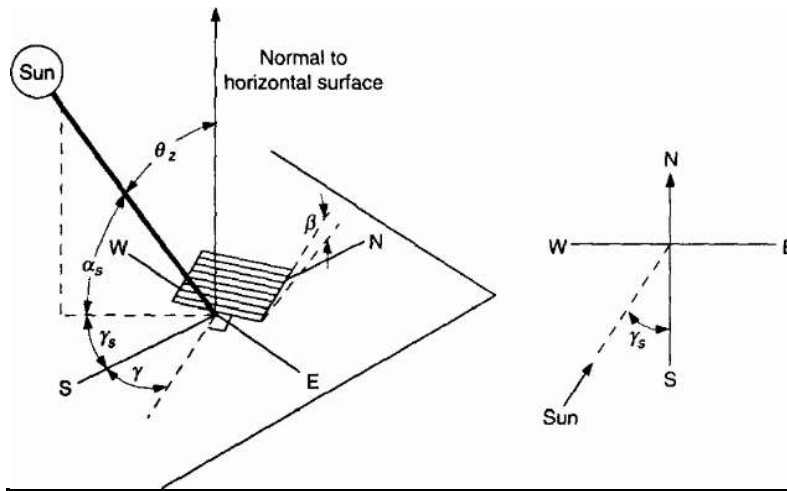
Ηλιακό ύψος ( $a_s$ ). Είναι το γωνιακό ύψος του ήλιου πάνω από τον ορίζοντα του παρατηρητή ( $0^\circ < a_s < 90^\circ$ ) και ισχύει ότι:  $a_s = 90 - \theta_z$

Αέρια μάζα (m). Η αέρια μάζα της ατμόσφαιρας την οποία πρέπει να διατρέξει η ηλιακή ακτινοβολία κατά την πορεία της μέσα από την ατμόσφαιρα είναι μια βασική παράμετρος που καθορίζει την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης. Η αέρια μάζα (m) είναι το πηλίκο του οπτικού πάχους της ατμόσφαιρας διαμέσου του οποίου περνά η άμεση ακτινοβολία ως προς το οπτικό πάχος της ατμόσφαιρας όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ. Εάν υποθέσουμε ότι η Γη είναι ένα επίπεδο με μία ομοιογενή και με χωρίς διάθλαση ατμόσφαιρα, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την αέρια μάζα σε σχέση με το ύψος του ήλιου ως εξής:

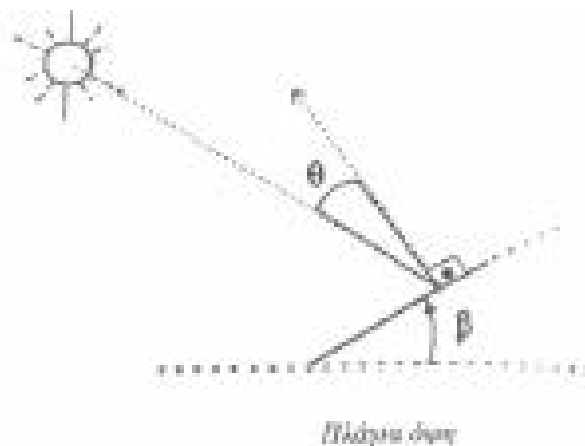
$$m = 1 / \sin a_s$$

Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος της ατμόσφαιρας διαμέσου της οποίας πρέπει να περάσει η ηλιακή ακτινοβολία, τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες λόγω της εξασθένισης της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν ο ήλιος είναι χαμηλά στον ορίζοντα, το πάχος της ατμόσφαιρας είναι μεγαλύτερο, συνεπώς η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι μικρότερη. Το σφάλμα του υπολογισμού της αέριμης μάζας με την παραπάνω σχέση είναι 0,25% μέχρι  $\theta_z < 60^\circ$  και φτάνει το 10% για  $\theta_z = 85^\circ$ . Όταν η καμπυλότητα της ατμόσφαιρας είναι σημαντική, δηλαδή σε χαμηλά ηλιακά ύψη ( $a_s$ ), τότε προτιμάται ο υπολογισμός από πίνακες.

Αζιμούθια γωνία ήλιου ( $y_s$ ). Ορίζεται μεταξύ του επιπέδου του μεσημβρινού και του παρατηρητή (δηλ. τον νότιο προσανατολισμό) και του επιπέδου της προβολής του ήλιου πάνω στην επιφάνεια της γης ( $0^\circ < y_s < 180^\circ$ ) με αρνητικές τιμές στα ανατολικά και με θετικές τιμές στα δυτικά, ενώ ισούται με μηδέν όταν ο ήλιος βρίσκεται ακριβώς στον νότο.



Η μέχρι τώρα παρουσίαση αναφέρεται σε οριζόντιες επιφάνειες. Σε πολλές περιπτώσεις όμως, οι εφαρμογές αναφέρονται σε κεκλιμένες επιφάνειες και με συγκεκριμένο προσανατολισμό. Η κλίση της επιφάνειας σε σχέση με την οριζόντια επιφάνεια ορίζεται από την γωνία κλίσης ( $\beta$ ), ενώ ο προσανατολισμός της καθορίζεται με το αζιμούθιο ( $\gamma$ ) που είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της καθέτου στην επιφάνεια του τοπικού μεσημβρινού (νότιος προσανατολισμός) πάνω στο οριζόντιο επίπεδο. Το αζιμούθιο είναι μηδέν στον νότιο προσανατολισμό, με αρνητικές τιμές προς την ανατολή και θετικές προς την δύση. Η γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ) της ηλιακής ακτινοβολίας, πάνω σε μία κεκλιμένη επιφάνεια, καθορίζει την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



Η γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία που ορίζεται μεταξύ της καθέτου στην επιφάνεια και την διεύθυνση της ακτινοβολίας και υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \cdot \sin \phi \cdot \cos \beta \\ &\quad - \sin \delta \cdot \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \\ &\quad + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega \\ &\quad + \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega \\ &\quad + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \end{aligned}$$

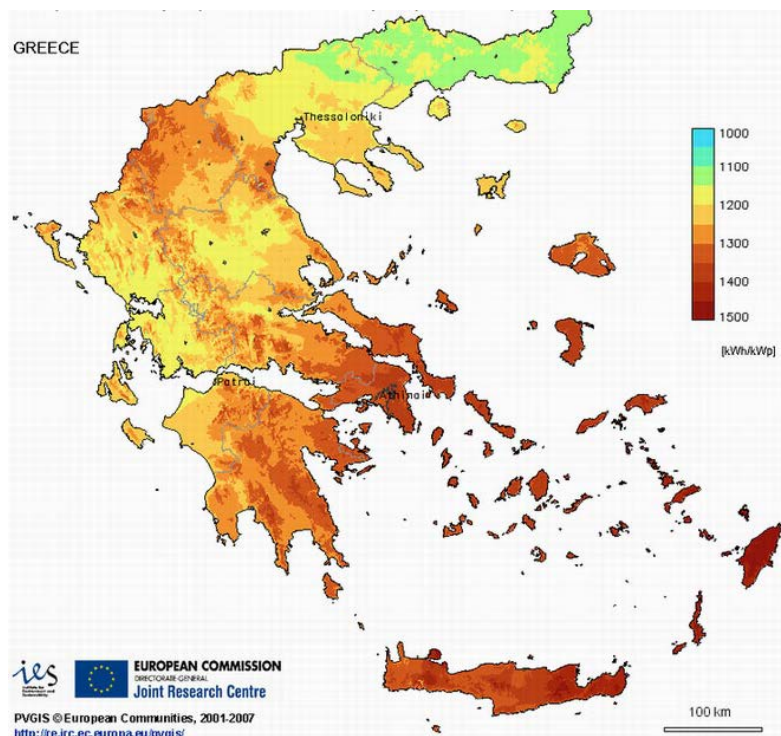
$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \cos \alpha_s \cdot \sin \gamma_s \\ &\quad - \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \sin \alpha_s \cdot \cos \gamma_s \\ &\quad + \cos \beta \cdot \sin \alpha_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \cos \beta \cdot \sin \theta_z \\ &\quad + \sin \beta \sin \theta_z \cos(\gamma_s - \gamma) \end{aligned}$$

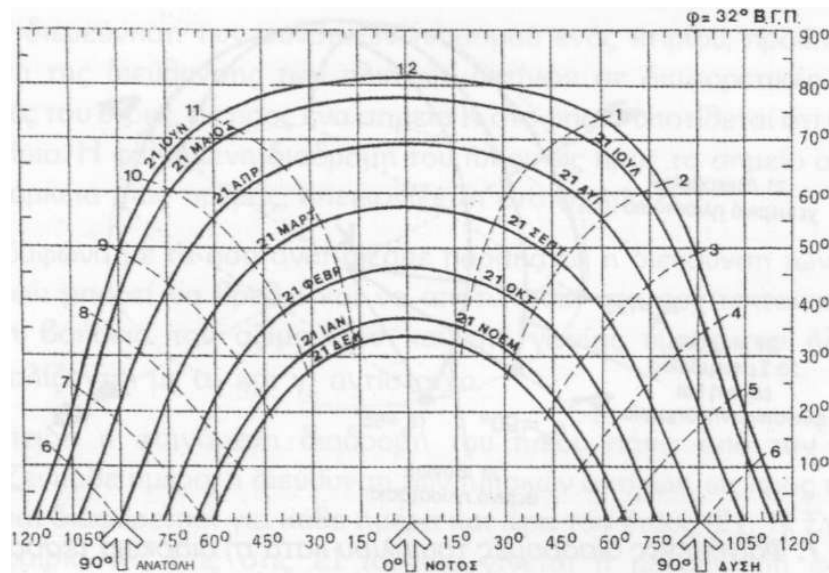
$$\begin{aligned} \cos \theta &= \cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \\ &\quad + \sin(\phi - \beta) \sin \delta \end{aligned}$$

## 1.5 Ηλιακός Χάρτης

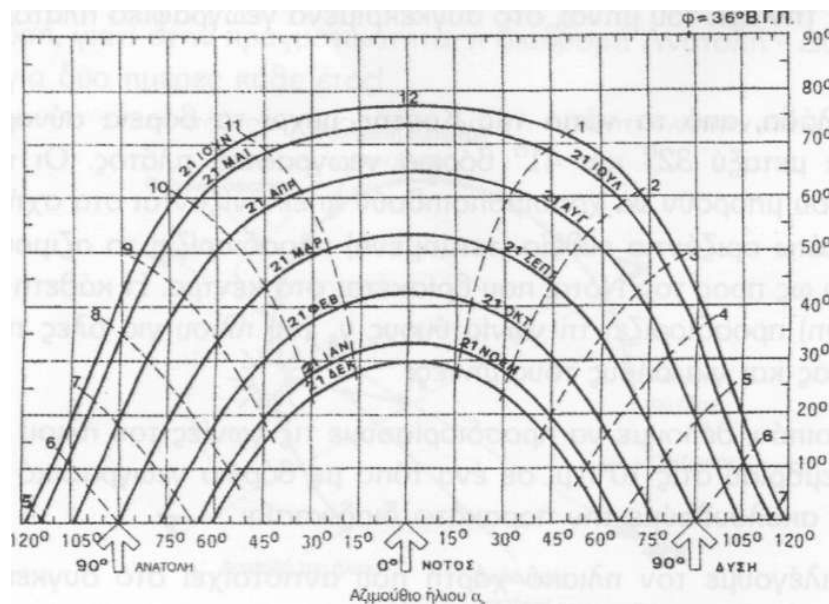
Η ορδή προβολή της τροχιάς του ήλιου στη διάρκεια ενός έτους, όπως φαίνεται από τη Γη, ονομάζεται ηλιακός χάρτης. Ο χάρτης αυτός προσδιορίζει τη θέση του ήλιου οποιαδήποτε ώρα της ημέρας κάθε μήνα (συνήθως την 21η του μήνα), στο συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος φ του τόπου.



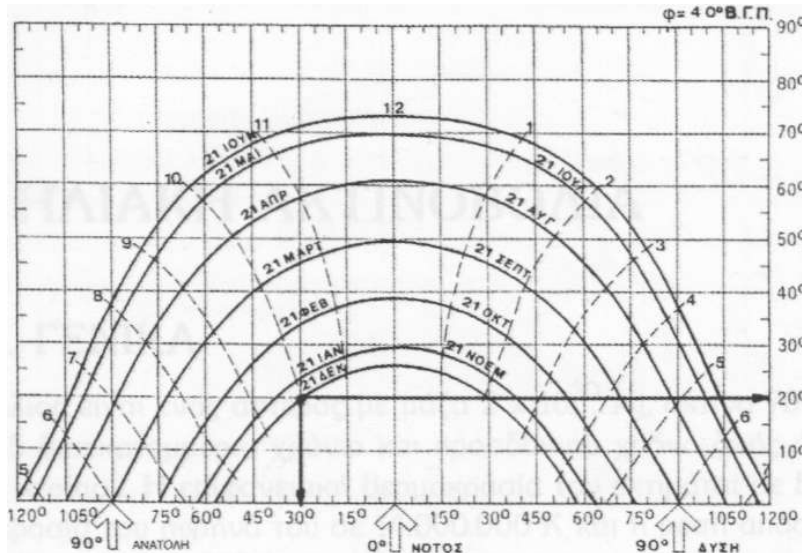
Η Ελλάδα, από τα νότια της Κρήτης μέχρι τα βόρεια σύνορά της, βρίσκεται μεταξύ  $32^\circ$  και  $41^\circ$  βόρειο γεωγραφικό πλάτος. Οι ηλιακοί χάρτες, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν απεικονίζονται στα σχήματα. Η κάτω οριζόντια ευθεία (τετμημένη) προσδιορίζει το αζιμούθιο  $\alpha_3$  του ήλιου ως προς τον Νότο, που βρίσκεται στο κέντρο. Η κάθετη ευθεία (τεταγμένη) προσδιορίζει τη γωνία ύψους  $\gamma_5$  του ήλιου για όλες τις ώρες της ημέρας και για όλους τους μήνες.



Σχήμα 1.10: Ηλιακός χάρτης για  $32^\circ$  βόρειο γεωγραφικό πλάτος.



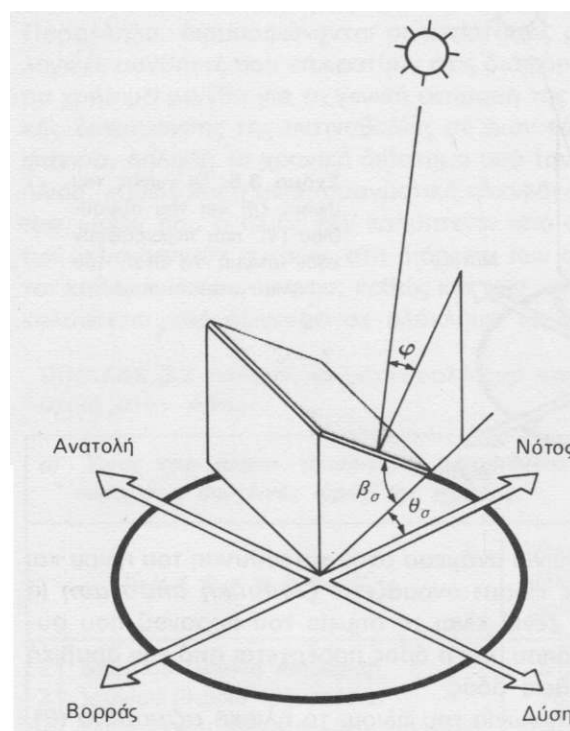
Σχήμα 1.11: Ηλιακός χάρτης για  $36^\circ$  βόρειο γεωγραφικό πλάτος.



Σχήμα 1.12: Ηλιακός χάρτης για 40° βόρειο γεωγραφικό πλάτος.

### 1.6 Ο προσανατολισμός του συλλέκτη

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως η θέση του ήλιου στον ουρανό, έτσι και ο προσανατολισμός ενός επιπέδου στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από δύο γωνίες: την κλίση και την αζιμούθια γωνία. Η κλίση του συλλέκτη ( $\beta_{\sigma}$ ) είναι η διεδρική γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα. Δείχνει πόσο γέρνει ο συλλέκτης και μπορεί να πάρει τιμές από 0 μέχρι 180°. Για γωνίες  $\beta_{\sigma} > 90^{\circ}$  το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω.



Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη ( $\theta_\sigma$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από  $-180^\circ$  μέχρι  $+180^\circ$ . Η γωνία  $-180^\circ$  (που συμπίπτει με την  $+180^\circ$ ) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς τον βορρά, η γωνία  $-90^\circ$  προς την ανατολή, η γωνία  $0^\circ$  προς τον νότο και η γωνία  $+90^\circ$  προς τη δύση. Προφανώς, η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε έναν επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνειά του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης ( $\varphi$ ) είναι  $0^\circ$ . Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έχουν κατασκευαστεί μηχανικές διατάξεις που επαναπροσανατολίζουν συνεχώς τον συλλέκτη (π.χ. με τη βοήθεια υπολογιστή ή φωτοκυττάρων) ώστε η επιφάνειά του να αντικρίζει πάντα κάθετα τον ήλιο. Οι διατάξεις όμως αυτές είναι πολύπλοκες και δαπανηρές. Έτσι, η χρήση τους δικαιολογείται μόνον σε ειδικές περιπτώσεις εφαρμογών, όπως στα συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας με φακούς ή κάτοπτρα.

### 1.7 Η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη

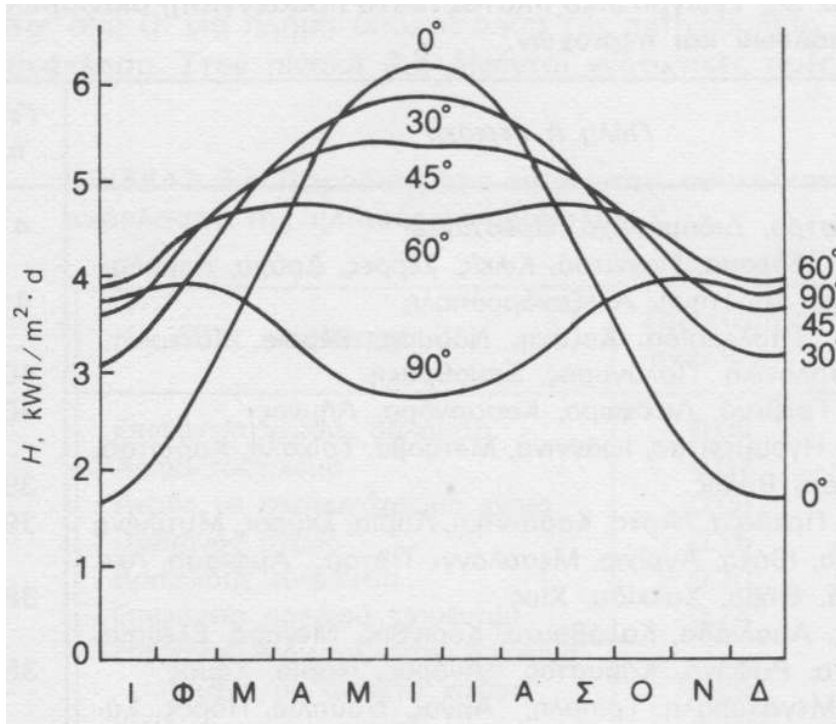
Στις συνηθισμένες περιπτώσεις οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, κατά τη διάρκεια του έτους. Η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας συνδέεται με τις άλλες γωνίες της ηλιακής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

$$\sin(\varphi) = \sin(\beta) \cos(\beta_\sigma) \sin(\theta_\alpha - \theta) + \cos(\beta) \sin(\beta_\sigma)$$

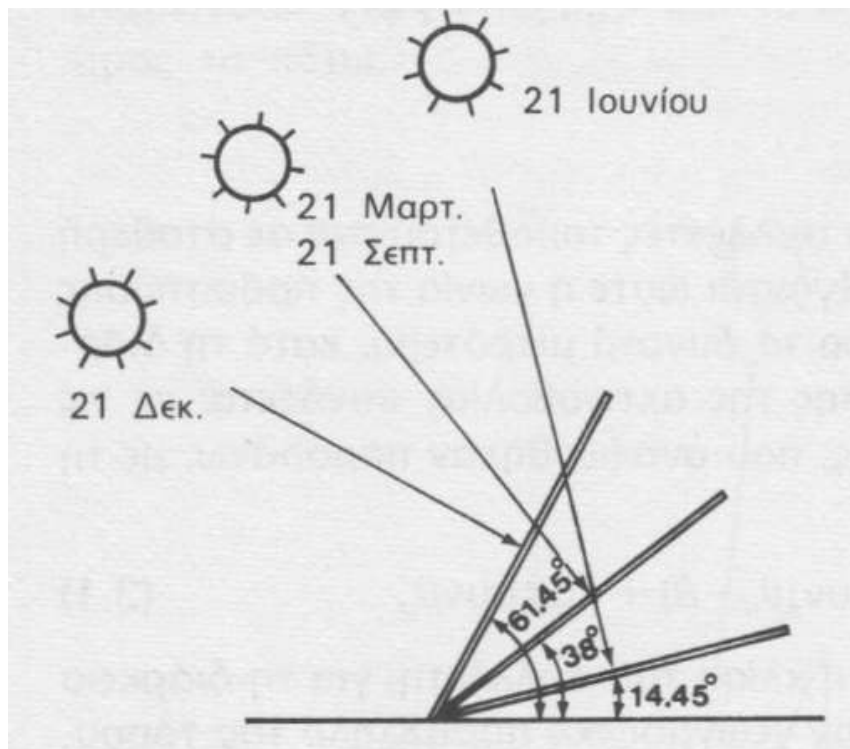
Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου, και η αζιμούθια γωνία είναι  $0^\circ$  (προς το νότο). Αλλά λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή.

Έτσι, αν επιδιώκεται να παράγει το σύστημα όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου  $10^\circ$  ως  $15^\circ$  μικρότερη από την παράλληλο του τόπου, ενώ για τον χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου  $10^\circ$  ως  $15^\circ$  μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου. Στο σχήμα 3.8 δίνεται ένα παράδειγμα της βέλτιστης κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη στις χαρακτηριστικότερες ημερομηνίες του έτους.

Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα της εξάρτησης της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας  $H$  που δέχεται μία επίπεδη επιφάνεια κατά την διάρκεια των διαφόρων μηνών του έτους σε συνάρτηση με την κλίση της. Τα ο παράδειγμα είναι για τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $45$  μοίρες και αφορά σε κλίσεις του ηλιακού συλλέκτη ( $\beta$ ) ίσες με  $0$  μοίρες (οριζόντιο επίπεδο),  $30, 45, 60$  και  $90$  μοίρες αντίστοιχα (κατακόρυφο επίπεδο).



Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη στο θερινό (21 Ιουλίου) και το χειμερινό (21 Δεκεμβρίου) ηλιοστάσιο και στην Εαρινή (21 Μαρτίου) και τη φθινοπωρινή (21 Σεπτεμβρίου) ισημερία, σε μία τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος 38 μοίρες όπως η Αθήνα. Τα ύψη του ήλιου που απεικονίζονται αφορούν στα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια.





## 1.8 Ροή και ένταση της ακτινοβολίας

Κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα τροφοδοτείται με ηλιακή ενέργεια και παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Ένα βασικό όμως μειονέκτημα του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ότι, σε αντίθεση με πολλά άλλα συστήματα μετατροπής, η τροφοδοσία του δεν είναι καθόλου σταθερή αλλά αυξομειώνεται μεταξύ μιας μέγιστης και της μηδενικής τιμής, ακολουθώντας συχνά απρόβλεπτες και απότομες διακυμάνσεις. Είναι λοιπόν χρήσιμο να εξετάσουμε με περισσότερες λεπτομέρειες πώς μεταβάλλεται χρονικά η ενέργεια που δέχεται ένας ηλιακός συλλέκτης.

Αρχικά, πρέπει να γίνει μια διευκρίνιση ως προς την ορολογία. Το ποσό της ενέργειας που περιέχεται στο φως του ήλιου, ονομάζεται συνήθως *ένταση* της ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς να συγκεκριμενοποιείται η έννοια της λέξης. Η «ένταση» είναι ένας πολύ γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το μέγεθος ή την αποτελεσματικότητα διαφόρων φαινομένων. Π.χ. μιλάμε για ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, του ηλεκτροστατικού πεδίου, του ήχου, του ανέμου, της βροχής κ.λπ. Σε αυστηρότερη ορολογία, το μέγεθος που χαρακτηρίζει την ποσότητα της ενέργειας, την οποία μεταφέρει σε έναν τόπο μια ακτινοβολία που μεταδίδεται προς μια κατεύθυνση στο χώρο, ονομάζεται *ροή ακτινοβολίας* ( $H$ ). Ορίζεται, συγκεκριμένα, ως το ποσό της ενέργειας της ακτινοβολίας που περνά στη μονάδα του χρόνου από τη μονάδα του εμβαδού μιας επιφάνειας, τοποθετημένης κάθετα στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας εκφράζεται συνήθως σε  $\text{kW/m}^2$ .

Ακριβολογώντας παραπέρα, βλέπουμε ότι ο όρος «ροή ακτινοβολίας» έχει έννοια όταν πρόκειται μόνο για ακτινοβολία που αποτελείται από δέσμη παράλληλων ακτινών. Όταν όμως η ακτινοβολία είναι διάχυτη και διαδίδεται προς διάφορες κατευθύνσεις, όπως συμβαίνει συχνά με ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, τότε ως μέτρο του ποσού της ενέργειας που περνά στη μονάδα του χρόνου από τη μονάδα μιας επιφάνειας, χρησιμοποιείται περισσότερο ο γενικότερος όρος *ένταση ακτινοβολίας*. Συνώνυμη, για οποιαδήποτε χρήση, είναι η *πυκνότητα ισχύος* της ακτινοβολίας.

Με τον ίδιο όρο, «ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας», χαρακτηρίζεται και η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που δέχεται μια επιφάνεια σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Π.χ. στον σχεδιασμό των φωτοβολταϊκών συστημάτων χρησιμοποιείται συχνά ως μετεωρολογικό δεδομένο η μέση ηλιακή ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο οριζόντιας επιφάνειας και ανά ημέρα, και εκφράζεται συνήθως σε  $\text{kWh/m}^2\text{-day}$ .

Μια ανάλογη ασάφεια στη φωτοβολταϊκή ορολογία υπάρχει και σε άλλες γλώσσες. Π.χ. στα αγγλικά οι όροι solar irradiance, intensity of radiation, insolation (στην Αμερική), solar power, solar radiation χρησιμοποιούνται σχεδόν αδιάκριτα για να χαρακτηρίσουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ως πυκνότητα ισχύος ή ως πυκνότητα ενέργειας.

Συχνά, δεν μας ενδιαφέρει τόσο η συνολική ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας, όσο η κατανομή της μέσα στο ηλιακό φάσμα. Ως *φασματική ροή ακτινοβολίας* ( $H_\lambda$ ) ορίζεται το ποσό της ενέργειας με μήκη κύματος μεταξύ  $\lambda$  και  $\lambda + cM$ , που περνά στη μονάδα του χρόνου από τη μονάδα του εμβαδού μιας επιφάνειας τοποθετημένης κάθετα στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Συνήθως εκφράζεται σε μονάδες  $\text{kW/m}^2 * \mu\text{m}$ .

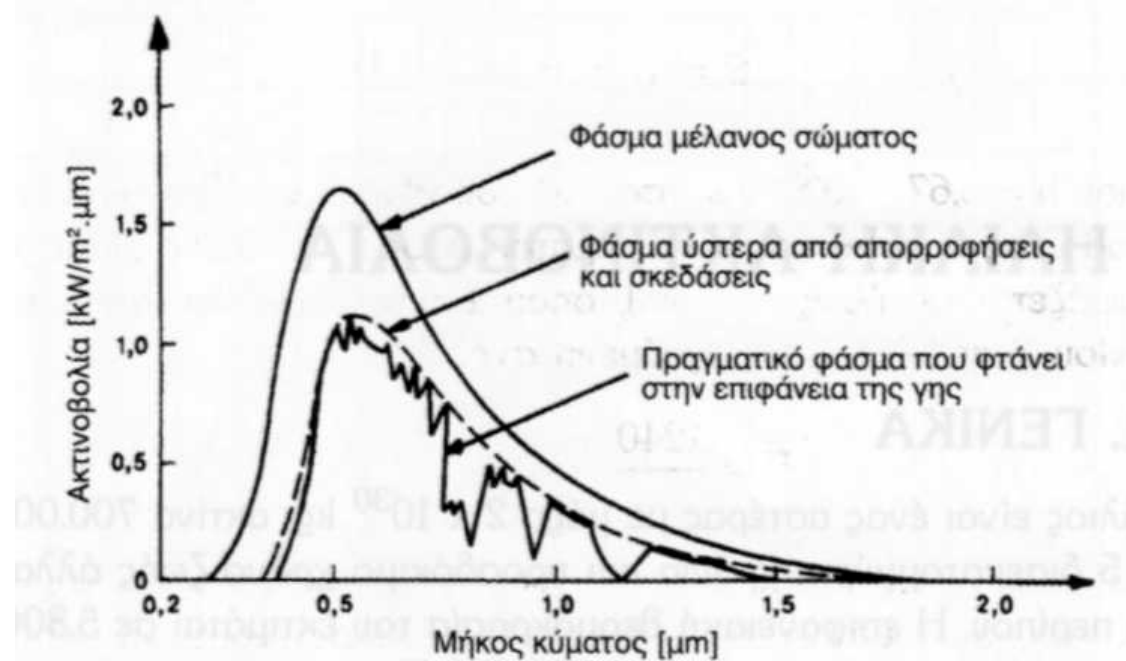
## 1.9 Ηλιακή Ακτινοβολία

Ο ήλιος είναι ένας αστέρας με μάζα  $2 \times 10^{30}$  kg, ακτίνα 700.000 km, ηλικία 5 δισεκατομμύρια χρόνια και προσδόκιμο χρόνο ζωής άλλα τόσα χρόνια περίπου. Η επιφανειακή θερμοκρασία του εκτιμάται σε 5.800 K, η θερμοκρασία του πυρήνα του σε 14.000.000 K και η μέση απόσταση από τη γη είναι 150.000.000 km.

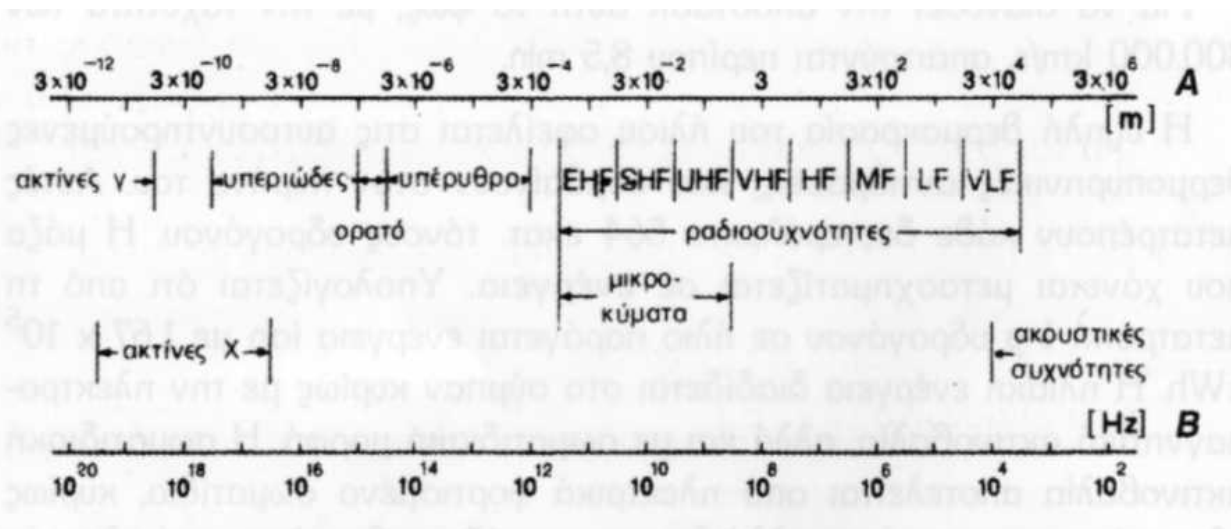
Για να διανύσει την απόσταση αυτή το φως, με την ταχύτητα των 300.000 km/s, απαιτούνται περίπου 8,5 min.

Η υψηλή θερμοκρασία του ήλιου οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες θερμοπυρηνικές αντιδράσεις, που συμβαίνουν στον πυρήνα του. Αυτές μετατρέπουν κάθε δευτερόλεπτο 564 εκατ. τόνους υδρογόνου. Η μάζα που χάνεται μετασχηματίζεται σε ενέργεια. Υπολογίζεται ότι από τη μετατροπή 1 g υδρογόνου σε ήλιο παράγεται ενέργεια ίση με  $1,67 \times 10^5$  kWh. Η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται στο σύμπαν κυρίως με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αλλά και με σωματιδιακή μορφή. Η σωματιδιακή ακτινοβολία αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, κυρίως ηλεκτρόνια και πρωτόνια, αλλά δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον από πλευράς ενεργειακής εκμετάλλευσης. Τέλος, η ηλιακή ενέργεια που εκπέμπεται σε 20 min είναι ίση με την ενέργεια που καταναλώνει ο πληθυσμός της γης σε έναν ολόκληρο χρόνο!

Η διαμόρφωση του φάσματος του φωτός που εκπέμπει ο ήλιος, προσομοιάζεται συνήθως με την ακτινοβολία ενός μελανού σώματος θερμοκρασίας 5.800 K. Στην επιφάνεια της γης το ηλιακό φως αποκτά τελικά μία πολύ ανώμαλη φασματική κατανομή, η οποία οφείλεται σε εκλεκτικές απορροφήσεις και σκεδάσεις στα συστατικά της ατμόσφαιρας που διασχίζει. Οι διάφορες περιοχές του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας φαίνονται στο σχήμα.



**Σχήμα 1.13:** Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας (γράφημα κατανομής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στα διάφορα μήκη κύματος)



**Σχήμα 1.14:** Περιοχές φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (A: κλίμακα μήκους κύματος, B: κλίμακα συχνότητας).

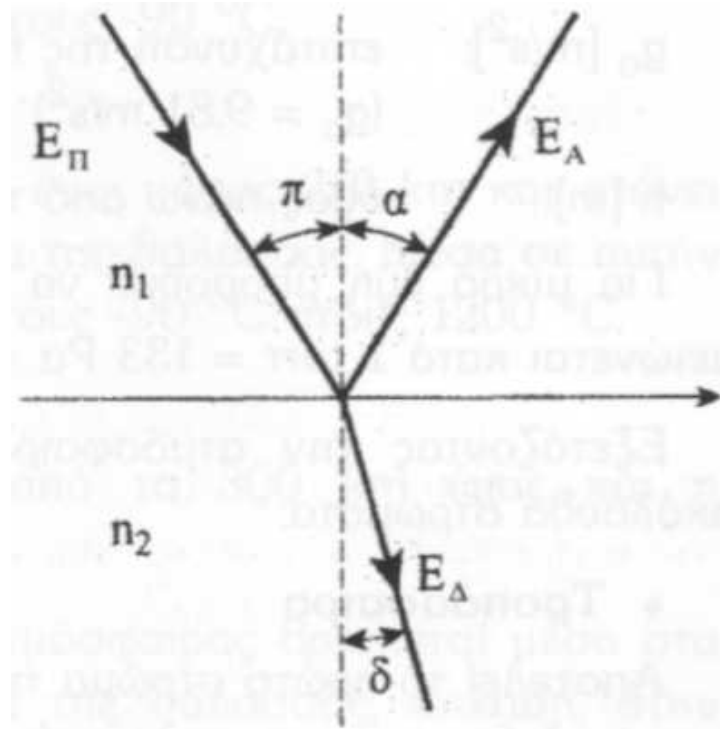
Η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που αντιστοιχεί στη μέση απόσταση πλανήτη - ήλιου σε ένα ηλιακό σύστημα, ονομάζεται ηλιακή σταθερά του πλανήτη. Στο ηλιακό μας σύστημα η ηλιακή σταθερά της γης είναι  $1367 \text{ W/m}^2$ . Η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεταδίδεται με τη μορφή διακεκριμένων ποσοτήτων ενέργειας, που ονομάζονται φωτόνια ή κβάντα φωτός. Τα φωτόνια κινούνται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός ( $c = 300.000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ) και κάθε ένα από αυτά μεταφέρει ενέργεια  $E$ .

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda \text{ [ J ]}$$

όπου  $h = 6,67 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$  (σταθερά του Planck),  $\nu$  [s<sup>-1</sup>] η συχνότητα της ακτινοβολίας και  $\lambda$  [m] το μήκος κύματος. Δεδομένου ότι το μήκος κύματος  $\lambda$  εκφράζεται συνήθως σε [nm], όπου  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$  και η ενέργεια φωτονίου  $E$  σε [eV], η προηγούμενη σχέση γράφεται

$$E = 1240 / \lambda \text{ [ eV ]} \quad \lambda \text{ [ nm ]}$$

Γενικά, η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσα σε ένα υλικό, οφείλεται στη διέγερση των ταλαντευόμενων ηλεκτρικών φορτίων του υλικού (ηλεκτρόνια - πυρήνες ατόμων) σε ανώτερες ενεργειακές καταστάσεις. Αν  $E_{\Pi}$  είναι η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός σώματος (Σχ. 2.3),  $E_A$  είναι το μέρος της που ανακλάται,  $E_{\Delta}$  είναι το μέρος της που διαπερνά την επιφάνεια πρόσπτωσης και  $E_{\Delta\Pi}$  το μέρος της  $E_{\Delta}$  που απορροφάται από το υλικό του σώματος, μπορούμε να ορίσουμε τα παρακάτω μεγέθη:



*Σχήμα 1.15: Πορεία ακτίνας που προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων.*

$$n = c_0/c : \text{Δείκτης διάθλασης υλικού}$$

$$c_0/c : \text{Ταχύτητα φωτός στο κενό και στο μέσο αντίστοιχα (} c_0 > c \text{)}$$

Απορροφητικότητα σώματος:

$$\alpha = E_{ΑΠ} / E_{\Pi}$$

Ανακλαστικότητα σώματος:

$$\rho = E_{Α} / E_{\Pi}$$

Διαπερατότητα σώματος:

$$\tau = E_{\Delta} / E_{\Pi}$$

Σύμφωνα με τη διατήρηση της ενέργειας:  $\alpha + \rho + \tau = 1$

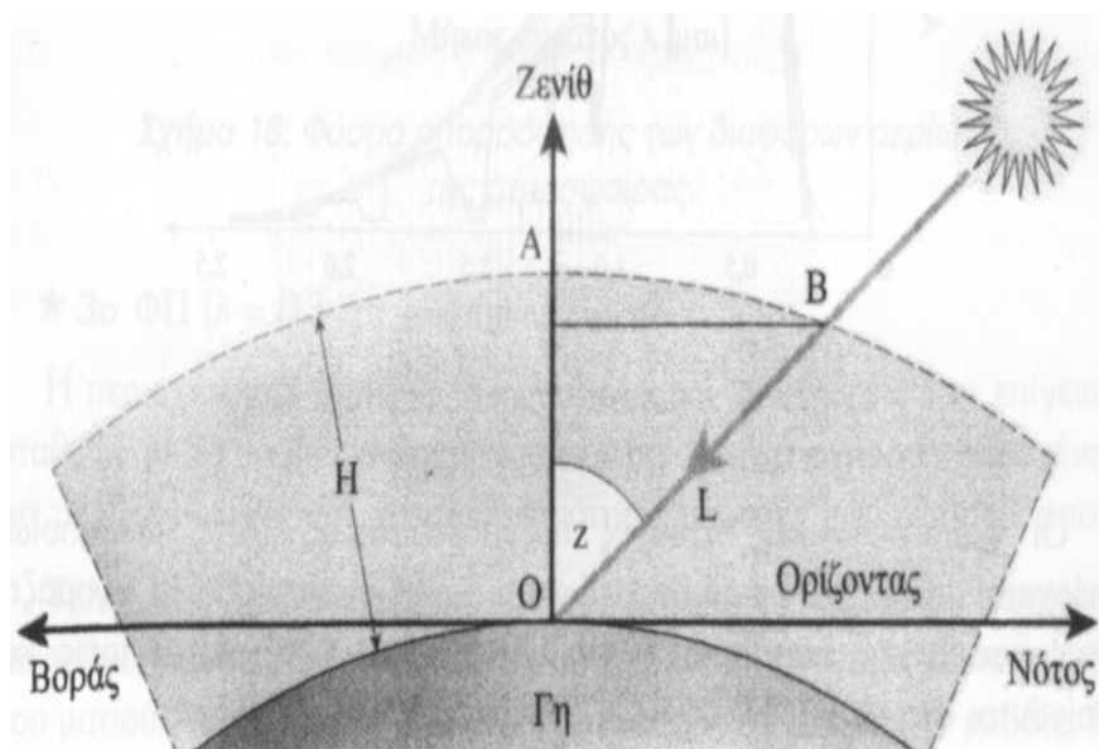
Η συχνότητα της ακτινοβολίας δεν αλλάζει κατά τη διάδοση του φωτός από ένα υλικό μέσο σε ένα άλλο, καθώς επίσης και κατά την ανάκλαση του στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων. Τέλος, η ταχύτητα του φωτός ορισμένου μήκους κύματος μέσα σε ένα μέσο, καθορίζεται από τη φύση του μέσου αυτού.

## 1.10 Διέλευση Ηλιακής Ακτινοβολίας

Η τελική μορφή και η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας, που φτάνει στην επιφάνεια της γης, εξαρτάται από το υψόμετρο, τη γεωγραφική θέση, την περιεκτικότητα της υγρασίας στην ατμόσφαιρα, τις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες και τη θέση του ήλιου στον ουρανό. Συμβατικά, το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα μέχρι το επίπεδο της θάλασσας, χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό που ονομάζεται μάζα αέρα AM (air mass) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$AM = 1 / \cos(z)$$

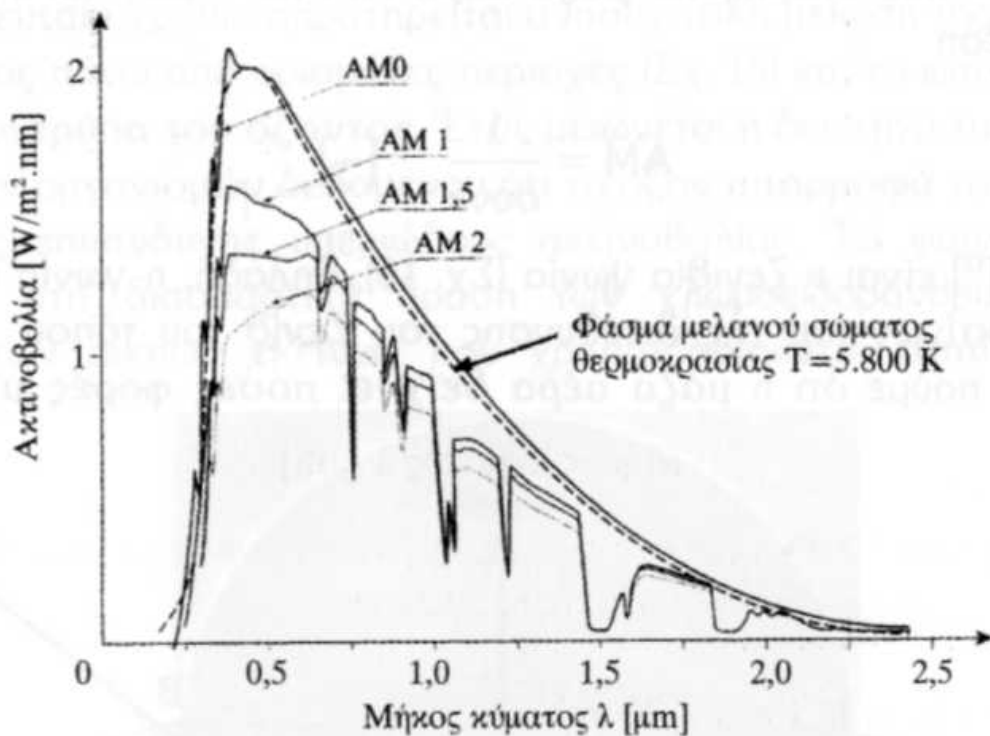
όπου  $z$  [°] είναι η ζενιθία γωνία, δηλαδή, η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και της διεύθυνσης του Ζενίθ του τόπου. Μπορούμε, λοιπόν, να πούμε ότι η μάζα αέρα δείχνει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της. Ορισμένες ενδεικτικές τιμές της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας δίνονται στον Πίνακα 1, ενώ τα αντίστοιχα φάσματα ακτινοβολίας φαίνονται στο σχήμα 2.4.



**Σχήμα 1.16:** Πάχος ατμόσφαιρας  $H$  και μήκος διαδρομής ακτίνων ήλιου  $L$  μέσα σε αυτήν.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ**

ΜΑΖΑ ΑΕΡΑ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ	ΙΣΧΥΣ [W/m <sup>2</sup> ]
AM0	Στο διάστημα, σε απόσταση ίση με την απόσταση γης - ήλιου	1367
AM1	0 ήλιος στο ζενίθ ( $\zeta = 0^\circ$ )	1000
AM1.5	Ζενιθία γωνία $\zeta = 48,19^\circ$	830
AM2	Ζενιθία γωνία $\zeta = 60^\circ$	700



*Σχήμα 1.17: Φάσματα ηλιακής ακτινοβολίας.*

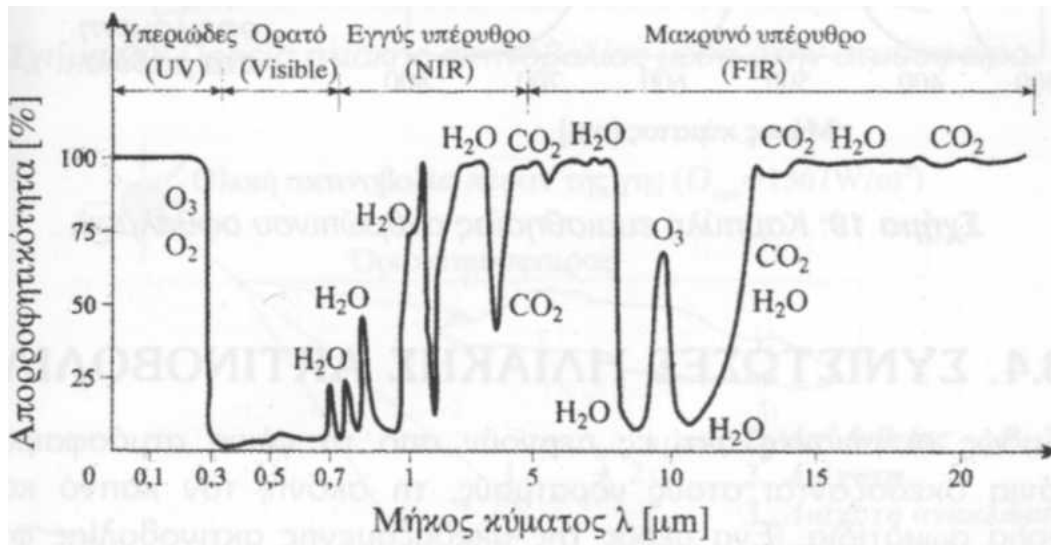
Οι χαρακτηριστικές περιοχές της ατμόσφαιρας μέσω των οποίων διέρχεται με σχετικά μικρή απορρόφηση η ηλιακή ακτινοβολία, ονομάζονται φασματικά παράθυρα (ΦΠ). Οι περιοχές αυτές είναι τρεις και φαίνονται στο σχήμα 2.6.

- 1ο ΦΠ ( $\lambda = 0,4 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$ )

Στην περιοχή αυτή η απορροφητική δράση των αερίων της ατμόσφαιρας είναι μειωμένη, οπότε έχουμε την είσοδο του ηλιακού φωτός (ορατή περιοχή του φάσματος).

- 2ο ΦΠ ( $\lambda=8\mu\text{m} - 14\mu\text{m}$ )

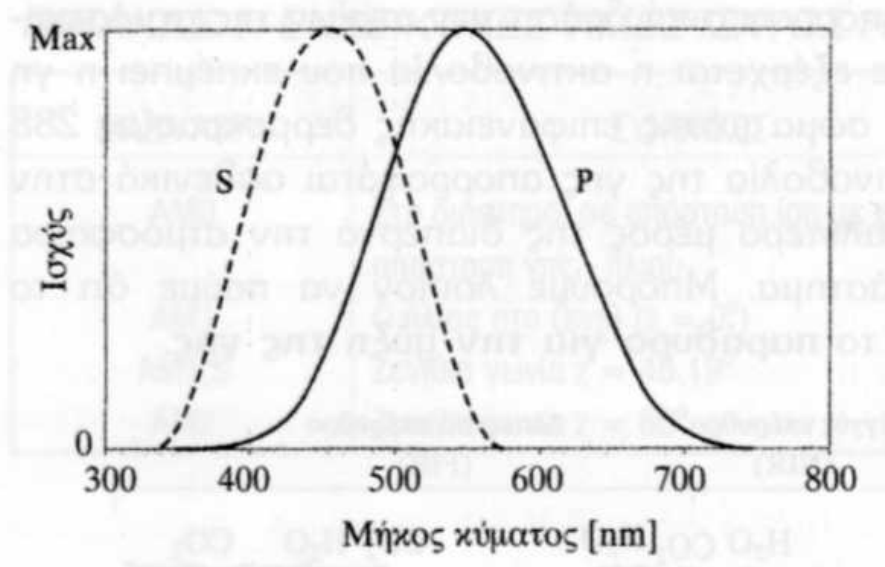
Στην περιοχή αυτή η απορροφητική δράση των αερίων της ατμόσφαιρας είναι μειωμένη, οπότε εξέρχεται η ακτινοβολία που εκπέμπει η γη προς την ατμόσφαιρα, ως σώμα μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας 288 K (15 °C). Δηλαδή, η ακτινοβολία της γης απορροφάται ασθενικά στην περιοχή αυτή και το μεγαλύτερο μέρος της διαπερνά την ατμόσφαιρα ακτινοβολούμενο στο διάστημα. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι το διάστημα 8 - 14  $\mu\text{m}$  είναι το παράθυρο για την ψύξη της γης.



**Σχήμα 1.18:** Φάσμα απορρόφησης των διαφόρων αερίων της ατμόσφαιρας.

- 3ο ΦΠ ( $\lambda = 0,3 \text{ cm} - 30 \text{ m}$ )

Η περιοχή αυτή επιτρέπει την ηλεκτρονική επικοινωνία των επίγειων σταθμών με το υπόλοιπο σύμπαν και τα διαστημικά οχήματα, δεδομένου ότι τα μικροκύματα και οι ραδιοσυχνότητες περνούν χωρίς απορρόφηση. Τέλος, η ανθρώπινη όραση προκαλείται από τη δράση του φωτός σε μικροσκοπικά αισθητήρια όργανα, που βρίσκονται στον αμφιβληστροειδή του ματιού. Τα όργανα αυτά διακρίνονται στους κώνους και τα ραβδία. Οι κώνοι ευαισθητοποιούνται στην περιοχή μηκών κύματος 380 - 770 nm και το αποτέλεσμα χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητα διάκρισης των χρωμάτων (Σχ. 2.7). Τα ραβδία ευαισθητοποιούνται σε συνθήκες πολύ χαμηλού φωτισμού και η καμπύλη ευαισθησίας τους είναι μετατοπισμένη προς τα μικρότερα μήκη κύματος. Έτσι, η όραση με λίγο φως χαρακτηρίζεται από μειωμένη χρωματική απόδοση, ενώ η όραση στο σκοτάδι από σκούρο μπλε χρώμα για όλα τα αντικείμενα.



*Σχήμα 1.19: Καμπύλη ευαισθησίας ανθρώπινου οφθαλμού.*

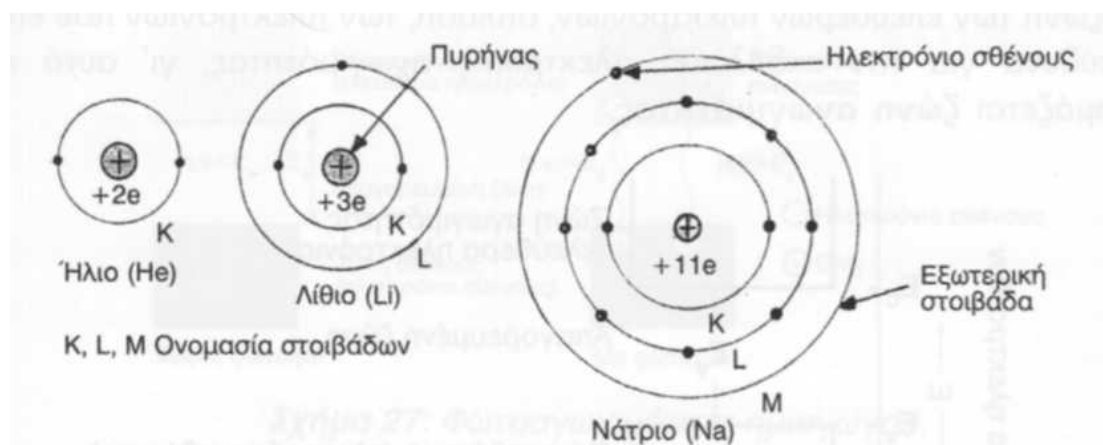


## Κεφάλαιο 2

### Ημιαγωγοί & Είδη Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

#### 2.1 Εισαγωγή

Κάθε στερεό σώμα αποτελείται από άτομα και κάθε άτομο περιλαμβάνει έναν πυρήνα και έναν αριθμό ηλεκτρονίων, που περιφέρονται γύρω από αυτόν. Ο πυρήνας φέρει θετικό ηλεκτρικό φορτίο και τα ηλεκτρόνια αρνητικό. Το θετικό ηλεκτρικό φορτίο του πυρήνα είναι ίσο και αντίθετο με το αρνητικό φορτίο των ηλεκτρονίων, τα οποία διατάσσονται γύρω από τον πυρήνα σε συγκεντρικούς φλοιούς ή στοιβάδες (Σχ. 2.1). Τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας ονομάζονται ειδικότερα ηλεκτρόνια σθένους. Κάθε ηλεκτρόνιο σθένους έχει μία συγκεκριμένη ενέργεια, δηλαδή, βρίσκεται σε μία συγκεκριμένη στάθμη ενέργειας.



**Σχήμα 2.1:** Σχηματική παράσταση ατόμων.

Ηλεκτρική αγωγιμότητα ονομάζεται η κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα σε ένα σώμα. Ανάλογα με την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα, τα στερεά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: α) μονωτές, β) αγωγούς και γ) ημιαγωγούς. Από την άποψη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς, τα ηλεκτρόνια των ημιαγωγών είναι τριών ειδών:

- Ηλεκτρόνια εσωτερικών στοιβάδων

Τα ηλεκτρόνια αυτά είναι τα λιγότερο ενεργά και δεν συμμετέχουν σε μηχανισμούς αγωγιμότητας.

- Ελεύθερα ηλεκτρόνια

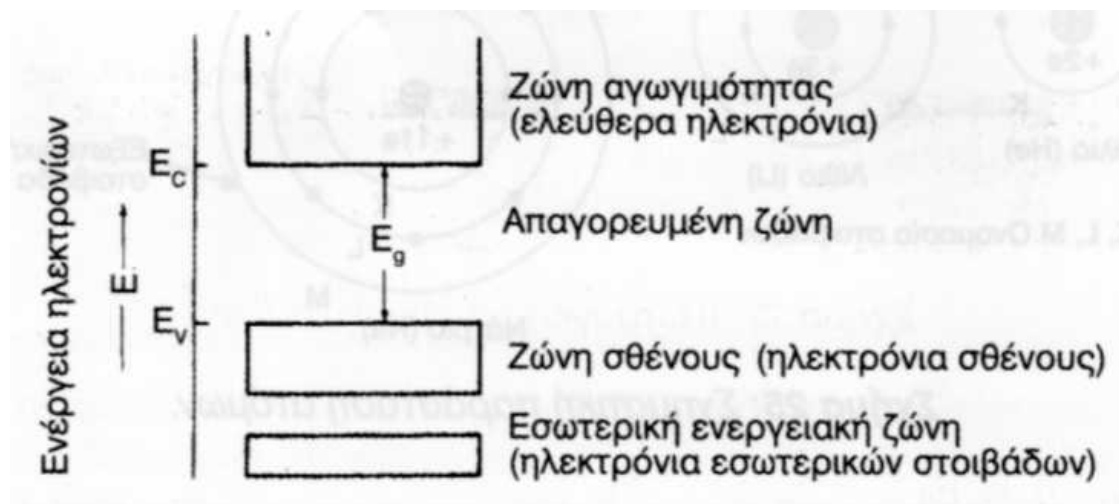
Είναι τα ηλεκτρόνια, που διαθέτουν αρκετή ενέργεια για να αποσπαστούν από τους δεσμούς του σώματος.

- Ηλεκτρόνια σθένους

Είναι τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας των ατόμων, τα οποία μπορούν να κινηθούν προς τις οπές γειτονικών δεσμών, που δημιουργήθηκαν επειδή τα εκεί

ηλεκτρόνια σθένους εγκατέλειψαν τη θέση τους, ή να ανταλλάξουν θέσεις με άλλα ηλεκτρόνια σθένους γειτονικών δεσμών.

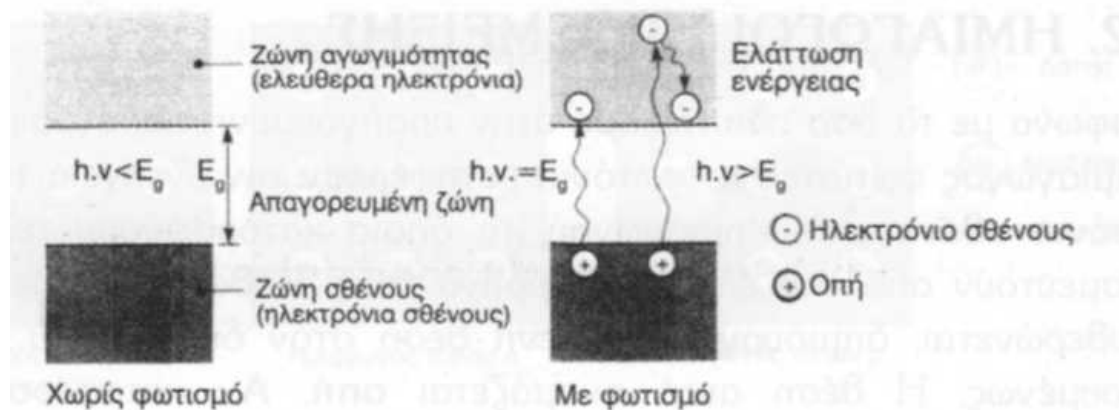
Οι διάφορες ζώνες ενέργειας σε ένα ημιαγωγό φαίνονται στο σχήμα 2.2. Στο κάτω μέρος βρίσκεται η ενεργειακή ζώνη των ηλεκτρονίων των εσωτερικών στοιβάδων των ατόμων. Στο μέσον βρίσκεται η ενεργειακή ζώνη των ηλεκτρονίων σθένους των ατόμων του ημιαγωγού, η οποία ονομάζεται ζώνη σθένους. Τέλος, στο πάνω μέρος έχουμε την ενεργειακή ζώνη των ελεύθερων ηλεκτρονίων, δηλαδή, των ηλεκτρονίων που είναι υπεύθυνα για την εκδήλωση ηλεκτρικής αγωγιμότητας, γι' αυτό και ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών σε ημιαγωγός.

Η απόσταση ανάμεσα στις δύο πάνω ζώνες ονομάζεται ενεργειακό διάκενο  $E_g$  ή ενεργειακό χάσμα. Η ενέργεια της κορυφής της ζώνης σθένους συμβολίζεται με  $E_v$  και η ενέργεια του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας με  $E_c$ . Έτσι, το ενεργειακό χάσμα  $E_g$  είναι η διαφορά μεταξύ της ενέργειας του λιγότερο ενεργού από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας, και της ενέργειας του περισσότερο ενεργού από τα ηλεκτρόνια σθένους, στην κορυφή της ζώνης σθένους ( $E_g = E_c - E_v$ ). Είναι προφανές ότι το ενεργειακό χάσμα εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους και τη μετατροπή του σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Σε ένα απολύτως καθαρό σώμα, χωρίς προσμίξεις και με τέλειο κρυσταλλικό πλέγμα, η περιοχή μεταξύ  $E_v$  και  $E_c$  ονομάζεται απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη για τα ηλεκτρόνια. Κοντά στο απόλυτο μηδέν ( $t = 0$  K) το ενεργειακό χάσμα των ημιαγωγών κυμαίνεται από κλάσμα του eV έως 2,5 eV. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $t = 300$  K), το ενεργειακό χάσμα για διάφορους κρυσταλλικούς ημιαγωγούς είναι: 0,66 eV για το Γερμάνιο (Ge), 1,12 eV για το Πυρίτιο (Si), 1,42 eV για το Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs).

Τα ηλεκτρόνια σθένους των ημιαγωγών μπορούν να απορροφήσουν σημαντική ποσότητα φωτός. Η απορρόφηση καθορίζεται από το μέγεθος της ενέργειας των φωτονίων σε σχέση με το ενεργειακό χάσμα  $E_g$  του ημιαγωγού (Σχ. 2.3). Διακρίνουμε, λοιπόν, τρεις περιπτώσεις:



**Σχήμα 2.3:** Φωτοαγωγιμότητα ημιαγωγού

- $h \cdot \nu < E_g$

Η ενέργεια του φωτονίου  $h \cdot \nu$  είναι μικρότερη από αυτή του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού, οπότε το φωτόνιο δεν απορροφάται.

- $h \cdot \nu = E_g$

Η ενέργεια του φωτονίου είναι ίση με αυτή του ενεργειακού χάσματος, οπότε το φωτόνιο απορροφάται από ένα ηλεκτρόνιο σθένους του ημιαγωγού. Έτσι, το ηλεκτρόνιο αυτό δέχεται ενέργεια και ανεβαίνει ενεργειακά στη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στη ζώνη σθένους μια οπή.

- $h \cdot \nu > E_g$

Η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από αυτή του ενεργειακού χάσματος, οπότε δημιουργείται ξανά ένα ζεύγος ηλεκτρονίου - οπής. Η περίσσεια ενέργεια  $h \cdot \nu - E_g$  μεταφέρεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας ως κινητική ενέργεια, συμβάλλοντας στην αύξηση της θερμοκρασίας του ημιαγωγού.

Από τα παραπάνω προκύπτει πως όταν ένας ημιαγωγός φωτιστεί, τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας και οι οπές στη ζώνη σθένους, που ονομάζονται και φορείς ρεύματος, αυξάνονται, οπότε τότε αυξάνεται και η αγωγιμότητα του. Η αύξηση της αγωγιμότητας ενός ημιαγωγού με την επίδραση του φωτός, ονομάζεται φωτοαγωγιμότητα. Τέλος, η διακοπή του φωτισμού του ημιαγωγού συνεπάγεται την επαναφορά της αγωγιμότητας στα αρχικά επίπεδα.

## 2.2 Ημιαγωγοί πρόσμειξης

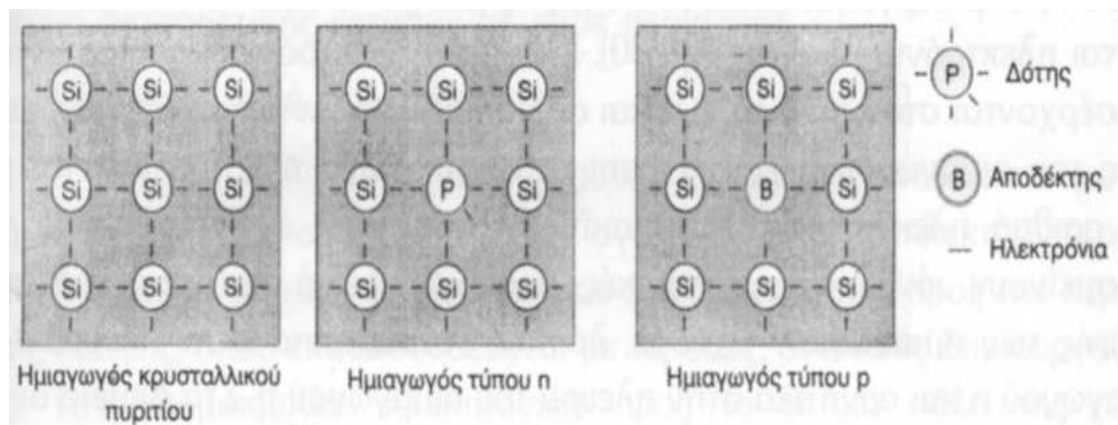
Σύμφωνα με τα όσα αναπτύξαμε στην προηγούμενη παράγραφο, όταν ένας ημιαγωγός φωτιστεί, τα φωτόνια μεταφέρουν την ενέργεια τους στα ηλεκτρόνια σθένους του ημιαγωγού, τα οποία κατορθώνουν τελικά να αποδεσμευτούν από την έλξη του πυρήνα τους. Καθώς ένα ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται, δημιουργεί μία κενή θέση στον δεσμό, που κατείχε προηγουμένως. Η θέση αυτή ονομάζεται οπή. Αν καταφέρουμε να αποσπάσουμε το ηλεκτρόνιο αυτό έξω από τον ημιαγωγό, τότε ένα ηλεκτρόνιο γειτονικού ατόμου θα καταλάβει τη θέση του. Στη συνέχεια, τη θέση του

τελευταίου ηλεκτρονίου θα καταλάβει ένα άλλο ηλεκτρόνιο από γειτονικό άτομο και ο μηχανισμός αυτός θα συνεχιστεί. Θα έχουμε, δηλαδή, μία κίνηση ηλεκτρονίων προς μία κατεύθυνση και μία κίνηση οπών προς την άλλη.

Η κίνηση των ηλεκτρονίων έξω από τον ημιαγωγό, δηλαδή, η παραγωγή ρεύματος, εξασφαλίζεται με τους ημιαγωγούς πρόσμειξης. Οι αγωγοί αυτοί περιέχουν μέσα στο κρυσταλλικό τους πλέγμα διασπαρμένα άτομα από επιλεγμένο διαφορετικό υλικό. Διακρίνουμε δύο τύπους τέτοιων ημιαγωγών:

- Ημιαγωγός τύπου n

Προκύπτει από τον αντίστοιχο καθαρό ημιαγωγό, αν αντικατασταθούν μερικά από τα άτομα του με άτομα άλλου υλικού μεγαλύτερου σθένους. Για παράδειγμα, αν μερικά άτομα κρυσταλλικού πυριτίου (Si) με σθένος 4 αντικατασταθούν με άτομα φωσφόρου (P) σθένους 5, δημιουργείται ο ημιαγωγός τύπου n. Στον ημιαγωγό αυτό ένα ηλεκτρόνιο ανά άτομο πρόσμειξης δεν συμμετέχει σε δεσμό και είναι ελεύθερο (Σχ. 2.4). Έτσι, ο ημιαγωγός τύπου n περιέχει περισσότερα ηλεκτρόνια από τον καθαρό αγωγό και τα άτομα της πρόσμειξης ονομάζονται δότες.

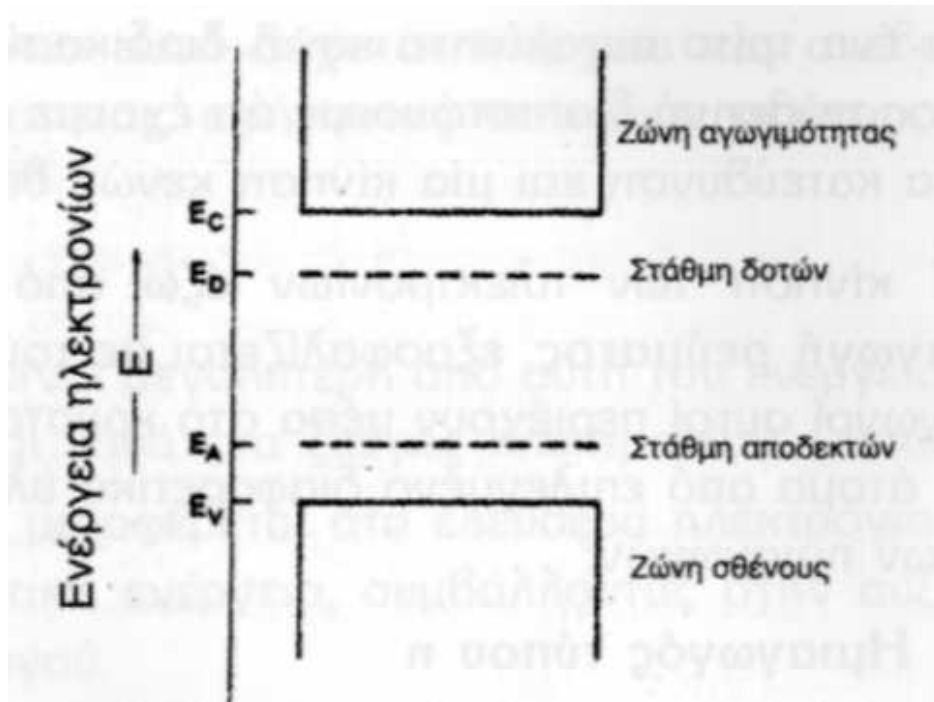


**Σχήμα 2.4:** Σχηματισμός ημιαγωγών πρόσμειξης

- Ημιαγωγός τύπου p

Προκύπτει από τον αντίστοιχο καθαρό ημιαγωγό αν αντικατασταθούν μερικά από τα άτομα του, με άτομα άλλου υλικού μικρότερου σθένους. Για παράδειγμα, αν μερικά άτομα κρυσταλλικού πυριτίου (Si) με σθένος 4 αντικατασταθούν με άτομα Βορίου (B) σθένους 3, δημιουργείται ο ημιαγωγός τύπου p. Στον ημιαγωγό αυτό τα άτομα πρόσμειξης μπορούν να δεχτούν ένα ηλεκτρόνιο για να συμπληρωθεί ο ελεύθερος δεσμός (Σχ. 2.4) και ονομάζονται αποδέκτες.

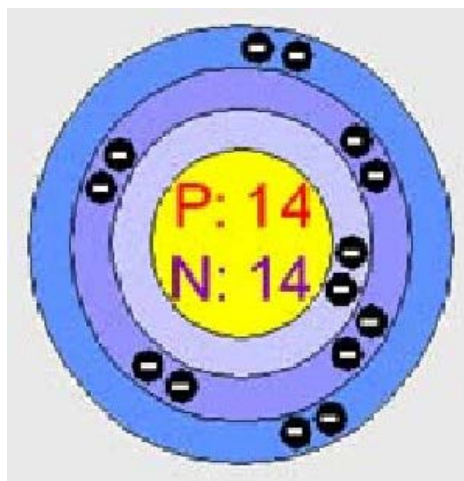
Τέλος, το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών των ημιαγωγών πρόσμειξης συμπληρώνεται με τις στάθμες δοτών και αποδεκτών (Σχ. 2.5), που τοποθετούνται μέσα στην απαγορευμένη ζώνη και σε αποστάσεις από τις ζώνες αγωγιμότητας και σθένους, όσες είναι οι αντίστοιχες ενέργειες για τη διέγερση των προσμειξεων.



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών σε ημιαγωγός πρόσμειξης.

### 2.3 Χαρακτηριστικά Ημιαγωγών

Το χαρακτηριστικό στοιχείο ενός ημιαγωγού που το διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα υλικά είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων ενός ατόμου που βρίσκεται στην εξωτερική του στοιβάδα (σθένους). Ο περισσότερο γνωστός ημιαγωγός είναι το πυρίτιο (Si) για αυτό θα επικεντρωθούμε σε αυτό.



Εικόνα 2.6: Δομή του πυριτίου.

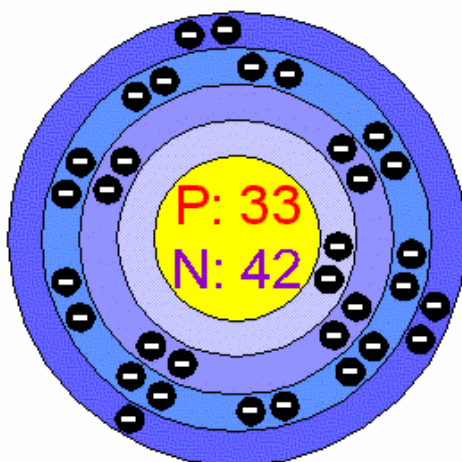
Το πυρίτιο έχει ατομικό αριθμό 14 και έχει στην εξωτερική του στοιβάδα 4 ηλεκτρόνια. Όλα τα άτομα τα οποία έχουν λιγότερα ή περισσότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα (είναι “γενικά” συμπληρωμένη με  $8 e^-$ ) ψάχνουν άλλα άτομα προκειμένου να ανταλλάξουν ηλεκτρόνια ή να μοιραστούν κάποια με σκοπό τελικά να αποκτήσουν συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα σθένους.

Σε αυτήν την τάση οφείλεται και η κρυσταλλική δομή του πυριτίου αφού όταν συνυπάρχουν πολλά άτομα μαζί διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συνεισφέρουν ηλεκτρόνια με όλα τα γειτονικά τους άτομα και τελικά με αυτόν τον τρόπο να αποκτούν μια συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα και κρυσταλλική δομή. Αυτή είναι και η καθοριστική ιδιότητα την οποία έχουν τα κρυσταλλικά υλικά.

Στην κρυσταλλική του μορφή όμως το πυρίτιο είναι σταθερό. Δεν έχει ανάγκη ούτε να προσθέσει ούτε να διώξει ηλεκτρόνια κάτι το οποίο ουσιαστικά του δίνει ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πολύ κοντά σε αυτά ενός μονωτή αφού δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια για την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό του.

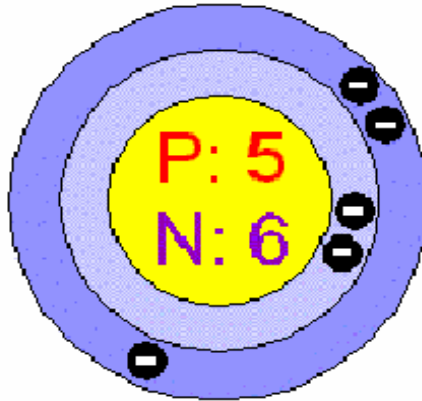
#### 2.4 Δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων αγωγών

Τις ημιαγωγές ιδιότητες το πυρίτιο τις αποκτά με τεχνικό τρόπο. Αυτό πρακτικά γίνεται με την πρόσμειξη με άλλα στοιχεία τα οποία είτε έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο είτε ένα λιγότερο στη στοιβάδα σθένους των. Αυτή η πρόσμειξη τελικά κάνει τον κρύσταλλο δεκτικό, είτε σε θετικά φορτία (υλικό τύπου p), είτε σε αρνητικά φορτία (υλικό τύπου n). Για να φτιαχτεί λοιπόν ένας ημιαγωγός τύπου n ή αλλιώς ένας αρνητικά φορτισμένος κρύσταλλος πυριτίου θα πρέπει να γίνει πρόσμειξη ενός υλικού με  $5e^-$  στην εξωτερική του στοιβάδα όπως για παράδειγμα το Αρσένιο (As).



*Εικόνα 2.7: Δομή του Αρσενίου.*

Αντίστοιχα, για να δημιουργήσουμε έναν ημιαγωγό τύπου p ή αλλιώς ένας θετικά φορτισμένος κρύσταλλος πυριτίου χρειάζεται να γίνει πρόσμειξη στον κρύσταλλο κάποιου υλικού όπως το βόριο (B) που έχει  $3e^-$  στην εξωτερική του στοιβάδα.



*Εικόνα 2.8: Δομή του βορίου.*

## 2.5 Δημιουργία της επαφής (του ηλεκτρικού πεδίου)

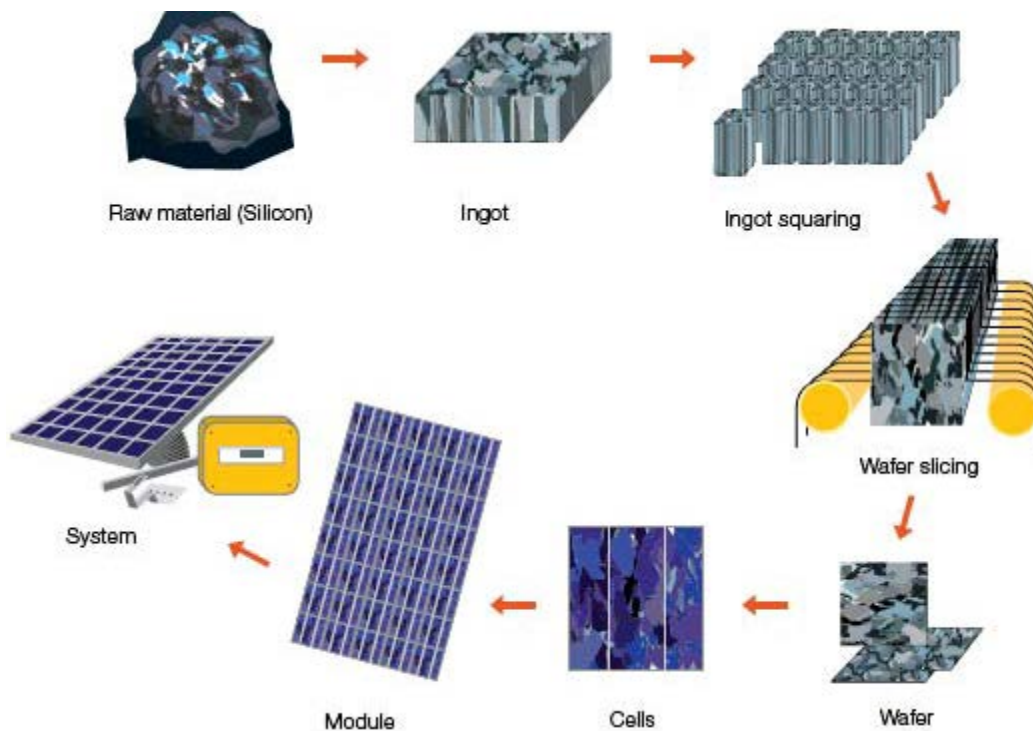
Εάν φέρουμε σε επαφή δύο κομμάτια πυριτίου τύπου n και τύπου p το ένα απέναντι από το άλλο, δημιουργείται μια δίοδος η αλλιώς ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή των δύο υλικών, το οποίο επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση μόνο. Τα επιπλέον ηλεκτρόνια της επαφής n έλκονται από τις «οπές» τις επαφής p. Αυτό το ζευγάρι των δύο υλικών αποτελεί το δομικό στοιχείο του φωτοβολταϊκού κελιού και τη βάση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

## 2.6 Τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου

Η ηλιακή κυψέλη, εγκλείεται με θερμική διεργασία μέσα σε διαφανή ερμητικά σφραγισμένη πολυμερή μεμβράνη και στην εμπρός πλευρά προσαρμόζεται ανθεκτικό γυαλί ειδικών προδιαγραφών.

Όπως αναφέραμε, το πάχος της όλης κατασκευής μαζί με το γυαλί δεν ξεπερνά τα 5 χιλιοστά και συνήθως τοποθετείται σε πλαίσιο αλουμινίου για εύκολη τοποθέτηση και για να αποκτήσει μηχανική αντοχή.

Η διαδικασία παραγωγής του κρυσταλλικού πυριτίου έχει πολλά και ενεργοβόρα βήματα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο κύκλος παραγωγής ενός Φ/Β συστήματος. Η πρώτη ύλη που είναι το πυρίτιο που πρέπει να είναι υψηλής καθαρότητας και προέρχεται, κυρίως, από τα υπολείμματα της βιομηχανίας ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η πρώτη ύλη μετατρέπεται με θερμική διεργασία του πυριτίου σε μονοκρυσταλλικούς κυλίνδρους ή πολυκρυσταλλικές χελώνες. Ακολουθεί η διαδικασία κοπής των μονοκρυσταλλικών κυλίνδρων και των πολυκρυσταλλικών χελωνών σε λεπτά δισκία (φέτες) πυριτίου. Στη συνέχεια γίνεται η μετατροπή των δισκίων πυριτίου σε ηλιακά στοιχεία κατάλληλα για να παράγουν ενέργεια. Τέλος, έχουμε τη συναρμολόγηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων από τα ηλιακά στοιχεία τεχνολογίες Φ/Β λεπτών υμενίων, όπως το άμορφο πυρίτιο, το Τελουριούχο κάδμιο και ο δισελινιούχο Ινδικό χαλκό.



*Εικόνα 2.9: Διαδικασία παραγωγής του κρυσταλλικού πυριτίου.*

Όσο αφορά τη τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου, οι κυψέλες που κατασκευάζονται από μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, έχουν απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 12 και 17% . Ενώ το μερίδιο αγοράς αυτής της τεχνολογίας είναι 90%. Τα βασικά είδη της τεχνολογίας κρυσταλλικού πυριτίου είναι:

- Μονοκρυσταλλικό (sc-Si)
- Πολυκρυσταλλικό(mc-Si)
- Ταινίας πυριτίου (Ribbon sheets c-Si)

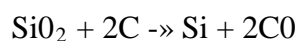


*Εικόνα 2.10: Κυψέλες Φωτοβολταϊκών πλαισίων.*

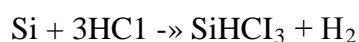


## 2.7 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Πυριτίου

Το πυρίτιο (Si) είναι από τα πιο διαδεδομένα στοιχεία στη φύση, αφού αποτελεί το 25% του γήινου φλοιού. Το καθαρό πυρίτιο παράγεται από την άμμο, της οποίας το κύριο συστατικό είναι το οξείδιο του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>). Η πρώτη φάση του καθαρισμού γίνεται με την ανάτηξη από την οποία προκύπτει πυρίτιο μεταλλουργικής ποιότητας:



Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει τη μετατροπή του μεταλλουργικού πυριτίου, με τη βοήθεια υδροχλωρικού οξέος, σε αέριο τριχλωροσιλάνιο:



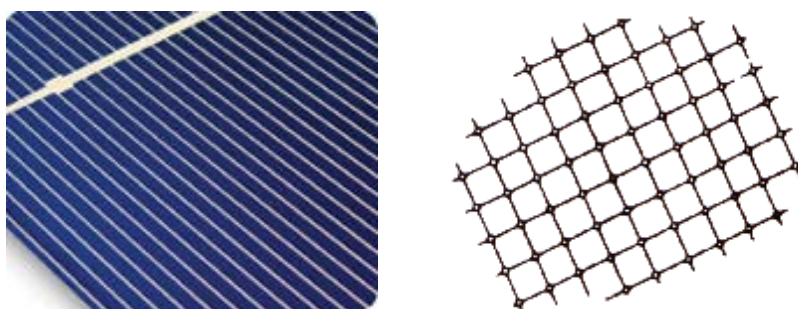
Στην τρίτη φάση γίνεται ο καθαρισμός του τριχλωροσιλανίου με κλασματική απόσταξη και η αναγωγή του με υδρογόνο, οπότε παράγεται πυρίτιο ηλεκτρονικής ποιότητας.

Στην τελευταία φάση το ηλεκτρονικό πυρίτιο τήκεται και ανακρυσταλλώνεται με ακόμη μεγαλύτερη καθαρότητα σε *κυλινδρική* μονοκρυσταλλική μορφή διαμέτρου 10 cm περίπου.

Στη συνέχεια από τον κύλινδρο κόβονται δίσκοι πάχους 0,5 mm, οι οποίοι αφού λειανθούν διαμορφώνονται σε διόδους επαφής p-n με διάχυση ή εμφύτευση των κατάλληλων προσμείξεων. Το ΦΒ στοιχείο αποκτά την τελική του μορφή με την συγκόλληση των ηλεκτροδίων στις δύο οικείες του δίσκου, την κάλυψη της εμπρός επιφανείας με αντανακλαστικό επίστρωμα και την στεγανοποίηση.

## 2.8 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου

Αποτελούνται από μεγάλους κρυστάλλους, το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (-300 μm) και έχουν χρώμα σκούρο μπλε. Σε εργαστηριακή μορφή το ΦΒ στοιχείο έχει απόδοση 21 - 24%, ενώ σε μορφή ΦΒ πλαισίων η απόδοση είναι 13 - 16%.

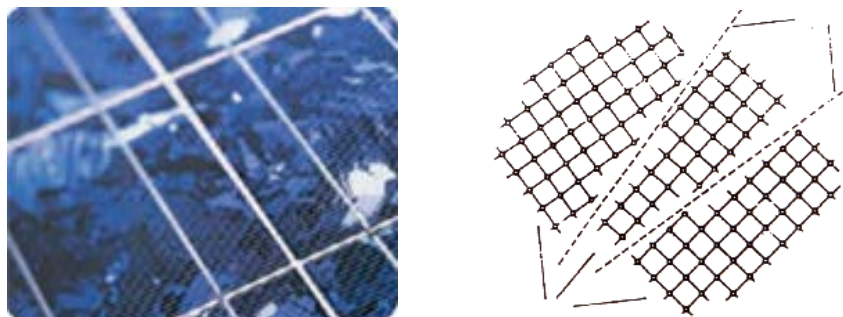


*Εικόνα 2.11: α) Δομή Κρυσταλλικού πυριτίου- β) κυψέλη κρυσταλλικού πυριτίου.*

## 2.9 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου

Κόβονται σε στοιχεία τετραγωνικής μορφής και αποτελούνται από λεπτά επιστρώματα πάχους 10 - 50 μm. Έχουν χρώμα γαλάζιο και στην επιφάνεια του

στοιχείου διακρίνονται διαφορετικές μονοκρυσταλλικές περιοχές. Σε εργαστηριακή μορφή το ΦΒ στοιχείο έχει απόδοση 17 - 20%, ενώ σε μορφή ΦΒ πλαισίων η απόδοση είναι 12 - 14%. Τέλος, το κόστος κατασκευής τους είναι μικρότερο από το αντίστοιχο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου.



*Εικόνα 2.6 α) Δομή πολυκρυσταλλικού πυριτίου- β) κυψέλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου.*

## 2.10 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Ταινίας

Είναι λεπτή ταινία πολυκρυσταλλικού πυριτίου, η οποία δημιουργείται από τηγμένο υλικό. Το ΦΒ στοιχείο έχει απόδοση 13% και περιορισμένη χρήση λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής.

## 2.11 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Άμορφου Πυριτίου

Το άμορφο πυρίτιο διαφέρει από το κρυσταλλικό πυρίτιο. Το ενεργειακό χάσμα του κυμαίνεται από 1,2 eV έως 1,6 eV, ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής του, ενώ το ενεργειακό χάσμα του κρυσταλλικού πυριτίου έχει σταθερή τιμή 1,1 eV. Το μεγάλο του πλεονέκτημα είναι ότι έχει πολύ μεγαλύτερο συντελεστή απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να αρκεί ένα λεπτό στρώμα πάχους λίγων μπτ για την κατασκευή των ΦΒ στοιχείων. Η μικρή ποσότητα χρησιμοποιούμενου υλικού μειώνει το κόστος παραγωγής. Το άμορφο πυρίτιο έχει στρεβλωμένους χημικούς δεσμούς, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μέτριες ηλεκτρικές ιδιότητες. Η βελτίωση τους εξασφαλίζεται με την προσθήκη ατόμων υδρογόνου, που συμπληρώνουν τους ατελείς χημικούς δεσμούς. Το ΦΒ στοιχείο από υδρογονούχο άμορφο πυρίτιο α-Si: H έχει απόδοση 6 - 8%. Σήμερα κατασκευάζονται διατάξεις από δύο ή τρία ΦΒ στοιχεία, που τοποθετούνται το ένα πίσω από το άλλο, τα οποία είναι διαφορετικά κράματα άμορφου πυριτίου (a-Si: Ge, a-Si: C κ.λπ). Τα ΦΒ στοιχεία έχουν διαφορετικό ενεργειακό χάσμα και εμπρός τοποθετείται εκείνο που έχει το μεγαλύτερο. Τελευταίο τοποθετείται το ΦΒ στοιχείο με το μικρότερο ενεργειακό χάσμα. Έτσι, τα φωτόνια μικρής ενέργειας που διέρχονται από το πρώτο στοιχείο, απορροφούνται από το δεύτερο ή το τρίτο περιορίζοντας τη θερμική μετατροπή. Μία τέτοια διάταξη έχει απόδοση 10 - 12%.

Τέλος, στον Πίνακα 3 δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά ΦΒ συστημάτων, που αποτελούνται από διαφορετικά είδη ΦΒ στοιχείων πυριτίου.

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΜΟΝΟ-ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ	ΠΟΛΥ-ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ	ΑΜΟΡΦΟ
Απόδοση [%]	13 - 16	12 - 14	6 - 8
Μέση ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα για σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση [kWh/kWp] [kWh/m <sup>2</sup> ]	1300 160 - 185	1300 130 - 160	1300 - 1400 65 - 140
Απαιτούμενη επιφάνεια [m <sup>2</sup> ]	7 - 8	8 - 10	10 - 20
Ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [kgCO <sub>2</sub> /kWp]	1300	1300	1300 - 1400

**Πίνακας:** Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών συστημάτων για διαφορετικά είδη φωτοβολταϊκών συστημάτων.

## 2.12 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Άλλων Υλικών

Εκτός από τα *ΦΒ* στοιχεία πυριτίου, τα οποία αποτελούν και τα πιο διαδεδομένα σήμερα στον κόσμο, κατασκευάζονται *ΦΒ* στοιχεία και από άλλα υλικά, τα οποία προς το παρόν εμφανίζουν μειονεκτήματα που περιορίζουν τη χρήση τους. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι τα ακόλουθα:

- *ΦΒ* στοιχείο αρσενικούχου γαλλίου (GaAs)

Παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόδοση (25%) και το υψηλότερο κόστος κατασκευής και χρησιμοποιείται σε διαστημικές εφαρμογές.

- *ΦΒ* στοιχείο δισεληνοϊνδίουχου χαλκού (CuInSe<sub>2</sub>)

Έχει χαμηλό κόστος κατασκευής και μικρή απόδοση σε μορφή *ΦΒ* πλαισίου, η οποία μπορεί να φτάσει το 8 -10% με την προσθήκη γαλλίου Ga.

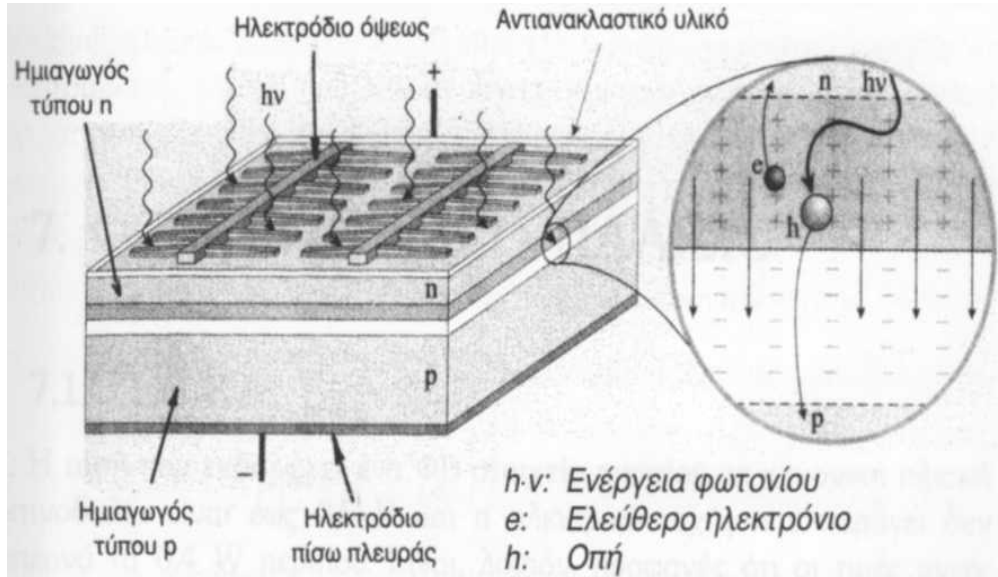
- *ΦΒ* στοιχείο θειούχου χαλκού - θειούχου καδμίου (Cu<sub>2</sub>S/CdS)

Έχει χαμηλό κόστος κατασκευής αλλά όχι σταθερή απόδοση, η οποία φτάνει το 10%.

## 2.13 Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες

Κάθε *ΦΒ* στοιχείο έχει ένα ηλεκτρόδιο στην εμπρός οψη και ένα στην πίσω πλευρά. Το ηλεκτρόδιο της όψεως είναι μία μεταλλική σχάρα με μορφή χτενιού ή σκελετού ψαριού, που καλύπτει το 15% περίπου της επιφάνειας του στοιχείου και συνήθως κατασκευάζεται από κράματα αργύρου. Το πίσω ηλεκτρόδιο καλύπτει όλο το στοιχείο και αποτελείται από λεπτό και πυκνό μεταλλικό πλέγμα. Τέλος, η οψη του *ΦΒ* στοιχείου καλύπτεται από ένα στρώμα, που κατασκευάζεται από κατάλληλο

αντιανακλαστικό υλικό (π.χ.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ), το οποίο περιορίζει την ανάκλαση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο 5% περίπου.



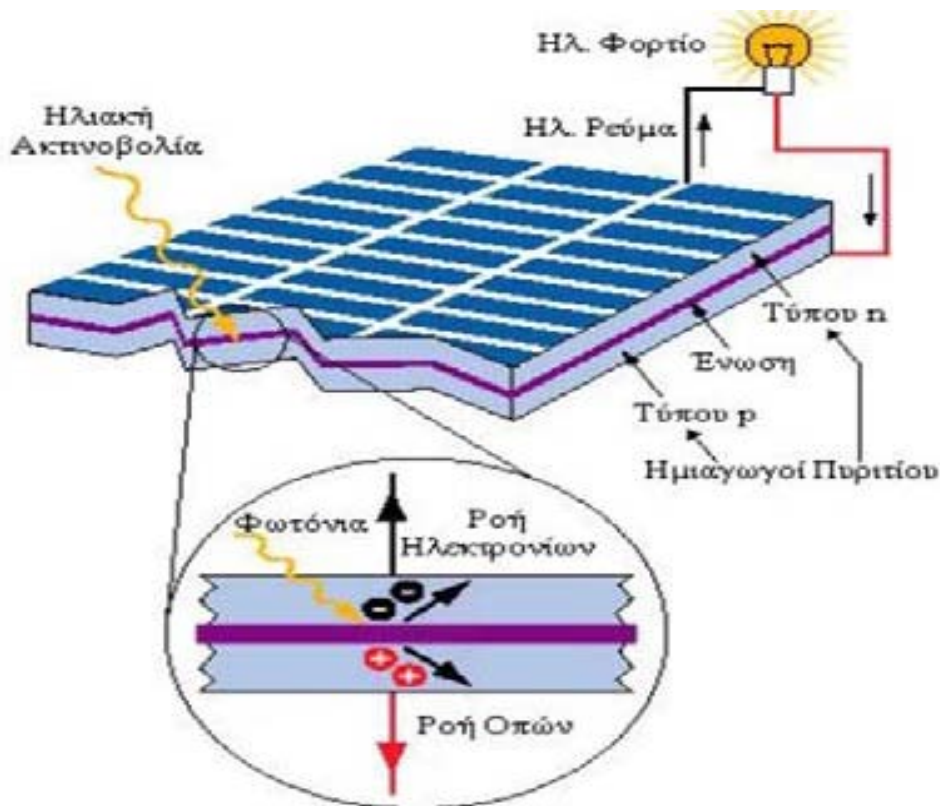
Σχήμα 2.7: Τρισδιάστατη απεικόνιση ΦΒ στοιχείου.

## Κεφάλαιο 3

### Φωτοβολταϊκή Μετατροπή

#### 3.1 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Όταν μία δίοδος επαφής δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια  $h\nu$  μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό χάσμα  $E_g$  του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Όσο, λοιπόν, διαρκεί η ακτινοβολία δημιουργείται μία περίσσεια από ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Όταν τα ζεύγη αυτά βρεθούν στην περιοχή της επαφής των ημιαγωγών, έχουμε εκτροπή των ηλεκτρονίων προς τον ημιαγωγό  $n$  και εκτροπή των οπών προς τον ημιαγωγό  $p$ . Δημιουργείται, δηλαδή, μία διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών των δυο τμημάτων της δίοδου, η οποία διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτήν και το γεγονός αυτό ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η διάταξη αυτή, η οποία αποτελεί πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, ονομάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο (PVcell) και για λόγους ευκολίας γράφεται  $\Phi B$  στοιχείο. Τέλος, το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα λέγεται φωτόρευμα. Το φωτόρευμα είναι ευθέως ανάλογο της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας  $P[\text{W/m}^2]$ , που προσπίπτει στο  $\Phi B$  στοιχείο και του εμβαδού της επαφής των δύο ημιαγωγών.

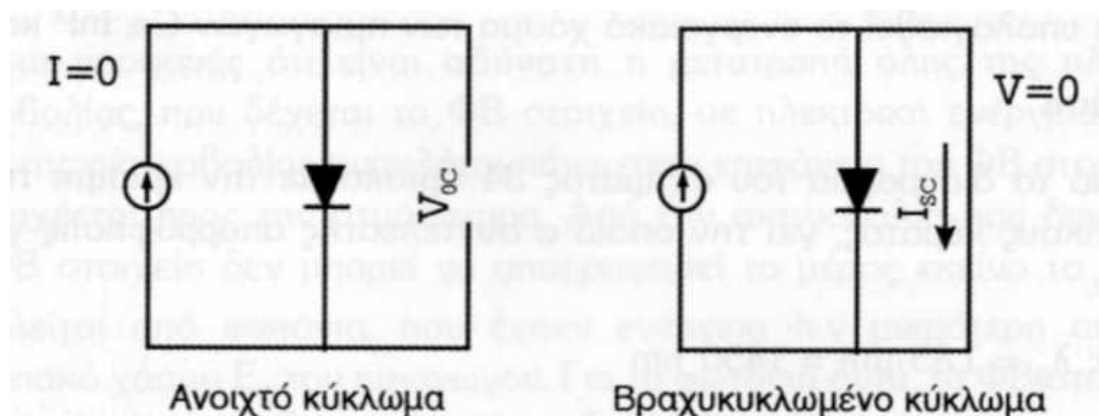


Εικόνα 3.1: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Είναι προφανές ότι είναι αδύνατη η μετατροπή όλης της ηλιακής ακτινοβολίας, που δέχεται το ΦΒ στοιχείο, σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του ΦΒ στοιχείου και διαχέεται προς την ατμόσφαιρα. Από την ακτινοβολία που διεισδύει στο ΦΒ στοιχείο δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος εκείνο το οποίο αποτελείται από φωτόνια, που έχουν ενέργεια  $h \cdot \nu$  μικρότερη από το ενεργειακό χάσμα  $E_g$  του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά, το ΦΒ στοιχείο, συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα, δηλαδή, η αντίστοιχη ακτινοβολία το διαπερνά και απλά θερμαίνει το μεταλλικό ηλεκτρόδιο, που καλύπτει την πίσω όψη του. Ούτε όμως και το μέρος της ακτινοβολίας, που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού αξιοποιείται, γιατί μετατρέπεται σε θερμότητα). Τελικά, μόνο το μέρος της ακτινοβολίας της οποίας τα φωτόνια έχουν ενέργεια  $h \cdot \nu = E_g$  αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Γιατί τα φωτόνια αυτά απορροφώνται και αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του ΦΒ στοιχείου να μετακινηθούν σε άλλη θέση. Και ως γνωστόν, ηλεκτρισμός σημαίνει κίνηση ηλεκτρονίων. Κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από ένα συντελεστή απορρόφησης  $\alpha_\lambda$ , ο οποίος εξαρτάται από το μήκος κύματος  $\lambda$  της ηλιακής ακτινοβολίας και το υλικό. Είναι προφανές ότι ο συντελεστής απορρόφησης μηδενίζεται για μία κρίσιμη τιμή  $\lambda_0$  του μήκους κύματος ( $\lambda_0 = h \cdot c / E_g$ ), πάνω από την οποία το υλικό γίνεται διαπερατό (διαφανές), δηλαδή, τα φωτόνια δεν απορροφώνται από τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους.

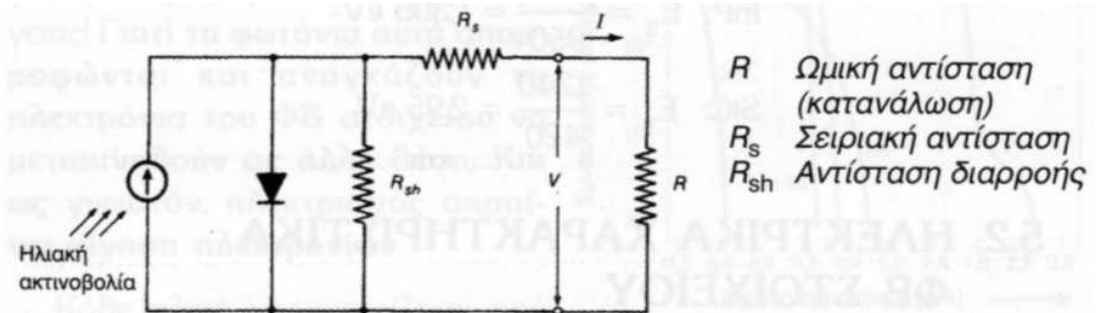
### 3.2 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Προκειμένου να μελετήσουμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός ΦΒ στοιχείου, που δέχεται σταθερή ηλιακή ακτινοβολία, θεωρούμε ότι αποτελεί μία πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από μία δίοδο επαφής. Αν στο απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα τα άκρα της επαφής συνδεθούν με χάλκινο σύρμα μεγάλης διατομής, άρα πρακτικά μηδενικής αντίστασης, το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο και διαρρέεται από ρεύμα ίσο με το φωτόρευμα, που ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  του ΦΒ στοιχείου (short-circuit current). Αν τα άκρα της επαφής δεν συνδέονται μεταξύ τους, δηλαδή, έχουμε ανοιχτό κύκλωμα, η τάση στα άκρα ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  του ΦΒ στοιχείου (open-circuit voltage).



Σχήμα 3.2: Απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ΦΒ στοιχείου.

Στην πραγματικότητα το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου περιλαμβάνει ακόμα δύο αντιστάσεις: α) Τη σειριακή αντίσταση  $R_s$  (series resistance), η οποία συνδέεται σε σειρά με τη δίοδο επαφής και αφορά στις αντιστάσεις κατά το πέρασμα του ρεύματος μέσα από τη δίοδο και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια, β) Την αντίσταση διαρροής  $R_{sh}$  (shunt resistance), η οποία συνδέεται παράλληλα με τη δίοδο επαφής και αφορά στη διαρροή ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής. Τα ΦΒ στοιχεία του εμπορίου έχουν συνήθως  $R_s < 5 \Omega$  και  $R_{sh} > 500$



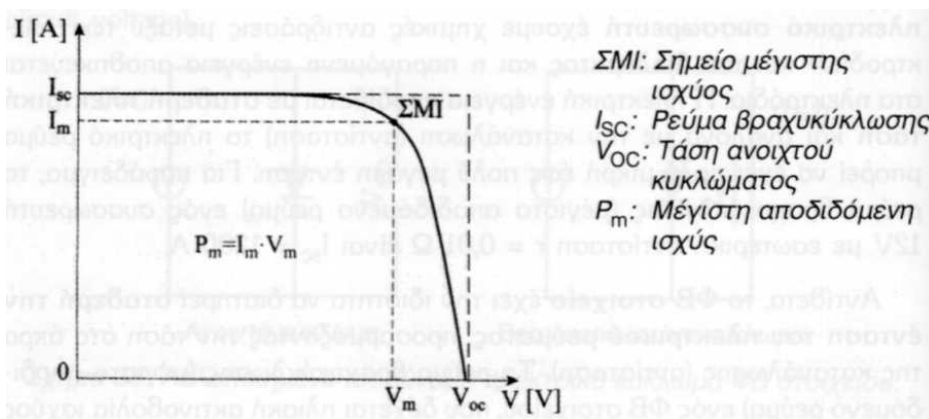
Σχήμα 3.3: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ΦΒ στοιχείου.

Ω.

### 3.3 Χαρακτηριστική Καμπύλη Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Η τάση των ΦΒ στοιχείων μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν παραμένει σταθερή η ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται. Όταν το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος παίρνει τη μέγιστη τιμή και η ηλεκτρική τάση μηδενίζεται ( $V = 0$ ). Αντίθετα, όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό, η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται ( $I = 0$ ) και η τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή  $V_{OC}$ .

Οι μεταβολές έντασης και τάσεως φαίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 3.4 με μία καμπύλη γραμμή, που αποτελεί τη χαρακτηριστική καμπύλη του ΦΒ στοιχείου. Η καμπύλη αυτή ισχύει σε συνθήκες σταθερής ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για μεταβαλλόμενη αντίσταση του κυκλώματος από μηδέν (βραχυκύκλωμα) μέχρι άπειρη (ανοιχτό κύκλωμα). Είναι προφανές ότι ανάμεσα στις παραπάνω ακραίες καταστάσεις, η τάση και η ένταση του ρεύματος παίρνουν ενδιάμεσες τιμές.

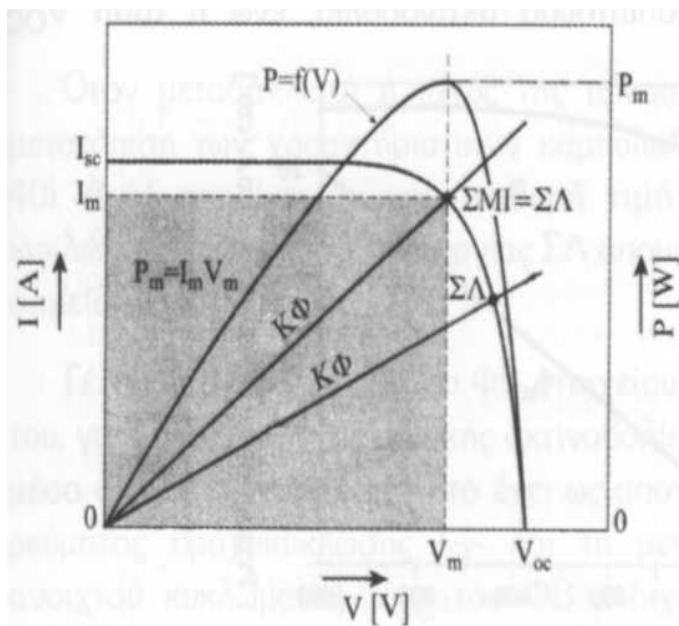


**Σχήμα 3.4:** Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος  $I$  - τάσεως ρεύματος  $V$  ενός ΦΒ στοιχείου.

### 3.4 Σημείο Λειτουργίας Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Στις ακραίες καταστάσεις του Βραχυκυκλωμένου και ανοιχτού κυκλώματος, όπου  $V = 0$  και  $I = 0$  αντίστοιχα, η παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς από το ΦΒ στοιχείο είναι μηδενική ( $P = 0$ ). Άρα, η μεταβολή της ισχύος με την τάση, που φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 38, παρουσιάζει μία μέγιστη τιμή κοντά στο σημείο όπου αρχίζει η έντονη πτώση της τιμής του ρεύματος.

**Σχήμα 3.5:** Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος  $I$  - τάσεως ρεύματος  $V$  ενός ΦΒ στοιχείου, μεταβολή της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος του  $P$  σε συνάρτηση με την τάση  $V$  και καμπύλη φορτίου ΚΦ.



ΣΜΙ: Σημείο μέγιστης ισχύος

ΣΛ: Σημείο λειτουργίας του συστήματος

ΣΜΙ = ΣΛ Σύμπτωση σημείου λειτουργίας του συστήματος με το σημείο μέγιστης ισχύος.

ΚΦ: Καμπύλη φορτίου ωμικής αντίστασης

Συνεπώς, η αντίσταση του κυκλώματος, που τροφοδοτείται από ένα ΦΒ στοιχείο, πρέπει να έχει κατάλληλη τιμή για να παράγεται η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς από το ΦΒ στοιχείο. Δηλαδή, η τάση και το ρεύμα της αντίστασης πρέπει να αντιστοιχούν στο σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ.

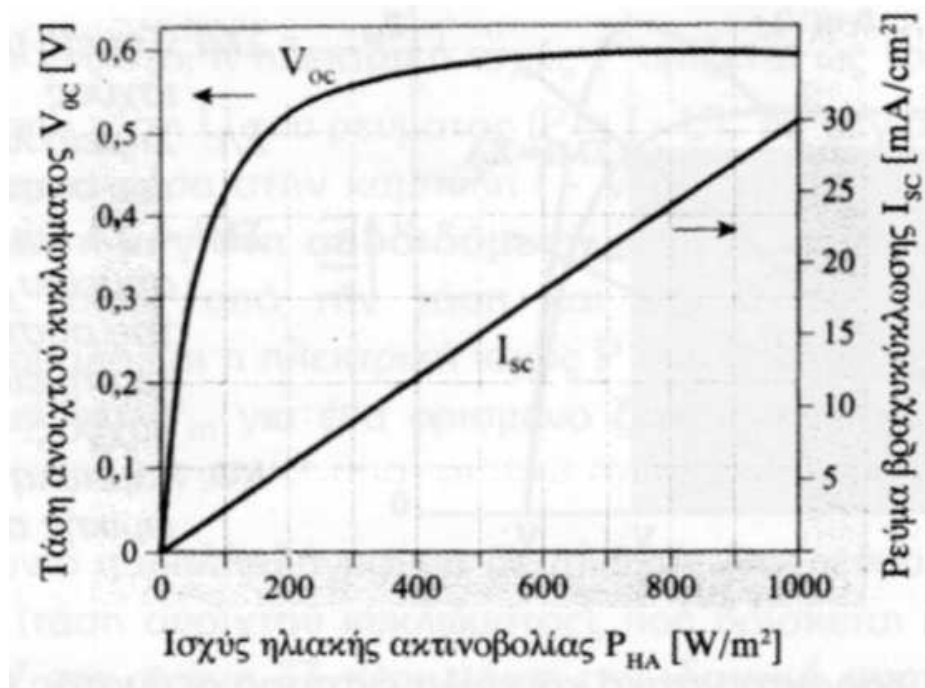
Θεωρώντας ότι ένα ΦΒ στοιχείο τροφοδοτεί μία ωμική αντίσταση, μπορούμε να απεικονίσουμε στο διάγραμμα  $I-V$  του ΦΒ στοιχείου την καμπύλη φορτίου ΚΦ της αντίστασης (ευθεία γραμμή), η οποία δείχνει τη μεταβολή του ρεύματος  $I$  που τη διαρρέει σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη στα άκρα της ηλεκτρική τάση  $V$  (Σχ. 3.5). Το σημείο τομής της χαρακτηριστικής καμπύλης και της καμπύλης φορτίου ονομάζεται σημείο λειτουργίας ΣΛ του συστήματος και καθορίζει το ρεύμα και την τάση στην αντίσταση.

Με τη χρήση ειδικών ηλεκτρονικών διατάξεων παρακολούθησης του ΣΜΙ όταν οι συνθήκες αλλάζουν, επιδιώκουμε τη συνεχή σύμπτωση του ΣΛ του συστήματος με το εκάστοτε ΣΜΙ, ώστε να αποδίδεται η μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύς από το ΦΒ



στοιχείο. Η προσπάθεια αυτή είναι απαραίτητη γιατί η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας δεν παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας.

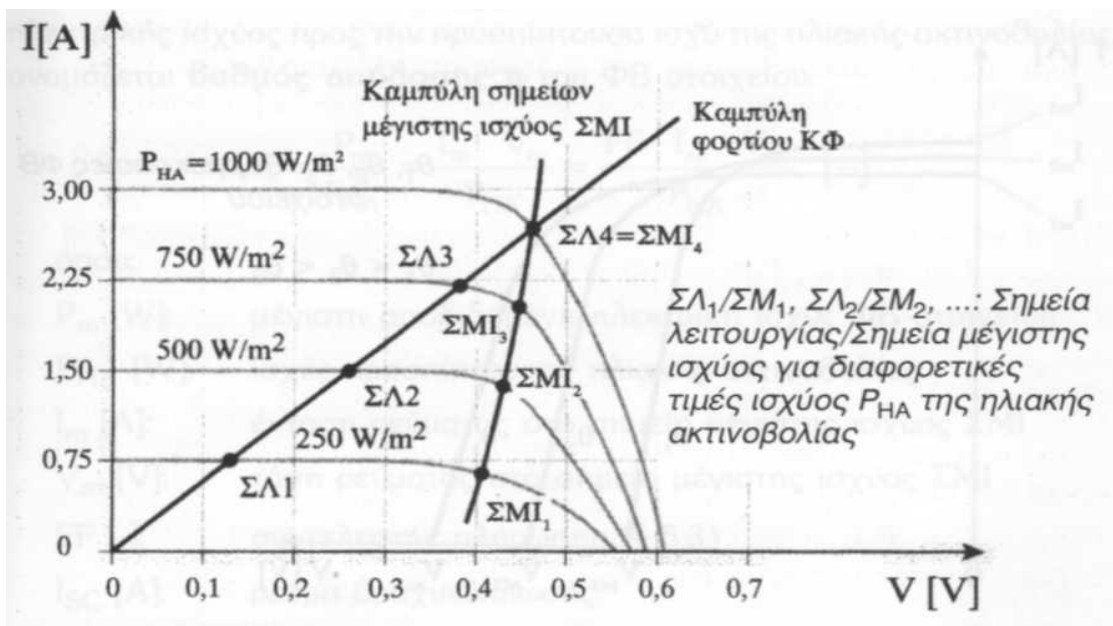
Στο διάγραμμα του σχήματος 3.6 φαίνεται η μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{gc}$  και της τάσεως ανοιχτού κυκλώματος  $V_{OC}$  συνάρτηση με την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας. Το ρεύμα  $I_{gc}$  μεταβάλλεται ανάλογα με την προσπίπτουσα ακτινοβολία, ενώ η τάση  $V_{OC}$  αυξάνεται απότομα στην αρχή (κατά την ανατολή του ήλιου) και μετά παραμένει σχεδόν σταθερή για το υπόλοιπο διάστημα μιας αίθριας ημέρας (μέχρι τη δύση του ήλιου).



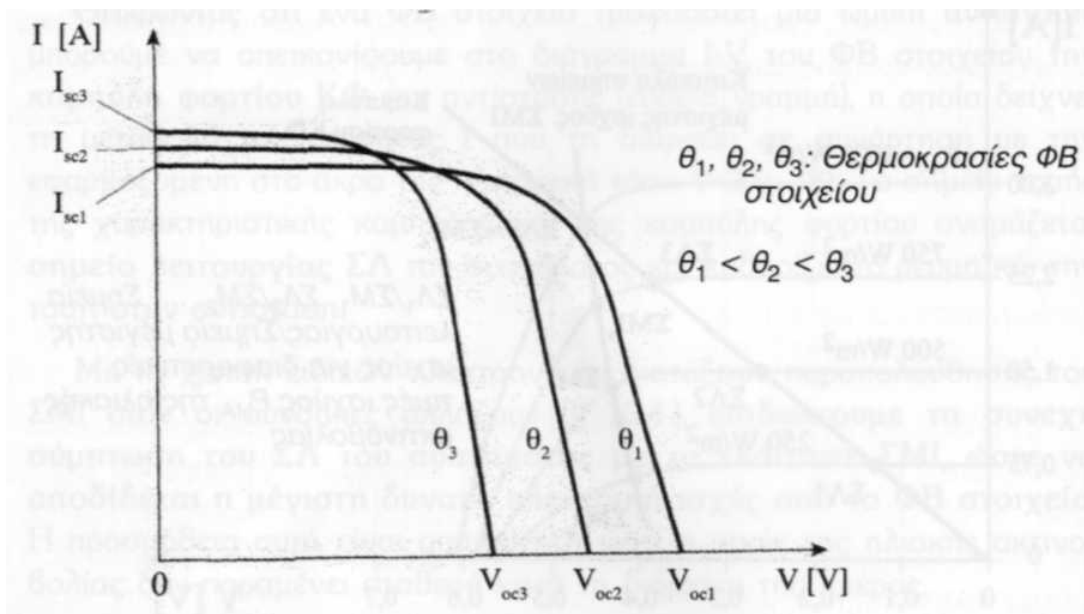
**Σχήμα 3.5:** Μεταβολή τάσεως ανοιχτού κυκλώματος και ρεύματος βραχυκύκλωσης σε συνάρτηση με την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας.

Όταν μεταβάλλεται η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας, έχουμε και μετατόπιση των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V του ΦΒ στοιχείου (Σχ. 3.6). Αυτό σημαίνει ότι για **σταθερή τιμή** της ωμικής αντίστασης του κυκλώματος, τα σημεία λειτουργίας ΣΛ απομακρύνονται από τα αντίστοιχα σημεία μέγιστης ισχύος ΣΜΙ.

Τέλος, η θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου αυξάνεται κατά τον φωτισμό του, γιατί ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμότητα μέσα στο στοιχείο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μικρή αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{C,0}$  και τη μεγάλη ελάττωση της τάσεως ανοιχτού κυκλώματος  $V_{OC}$  του ΦΒ στοιχείου (Σχ. 3.7). Είναι, λοιπόν, προφανές ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του ΦΒ στοιχείου προκαλεί μείωση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος του  $P_m$ . Η μείωση αυτή είναι περίπου 0,4% για κάθε βαθμό Κελσίου πάνω από τους 25 °C. Δεδομένου ότι η μέση θερμοκρασία των ΦΒ στοιχείων είναι 30 °C μεγαλύτερη από τη μέση θερμοκρασία  $t_a$  του αέρα, ορίζουμε τον παρακάτω συντελεστή θερμοκρασίας  $s_\theta$ , ο οποίος χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του Βαθμού απόδοσης των ΦΒ πλαισίων .



**Σχήμα 3.6:** Μετατόπιση των χαρακτηριστικών καμπυλών έντασης ρεύματος  $I$  - τάσεως ρεύματος  $V$  ΦΒ στοιχείου όταν μεταβάλλεται η ισχύς  $P_{HA}$  της ηλιακής ακτινοβολίας.



**Σχήμα 3.7:** Μεταβολή της χαρακτηριστικής καμπύλης έντασης ρεύματος  $I$  - τάσεως ρεύματος  $V$  ενός ΦΒ στοιχείου με την αύξηση της θερμοκρασίας του.

$$\sigma_8 = 1 - [(t_a + 30) - 25] \cdot 0,004$$

όπου

$t_a$  [°C]: μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα.

Άρα η λειτουργία ενός ΦΒ στοιχείου και κατά συνέπεια η ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, εξαρτώνται από τρεις μεταβλητούς παράγοντες: α) την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, β) τη θερμοκρασία του στοιχείου και γ) την αντίσταση του κυκλώματος. Θα πρέπει, λοιπόν, να επιδιώκεται οι παράγοντες αυτοί να παίρνουν όσο γίνεται πιο ευνοϊκές τιμές.

### 3.5 Βαθμός Απόδοσης Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Ένα ΦΒ στοιχείο αποδίδει μέγιστη ηλεκτρική ισχύ  $P_M$  και δέχεται ηλιακή ακτινοβολία ισχύος  $P_{HA}$ . Το ηλικό της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την προσπίπτουσα ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας, ονομάζεται βαθμός απόδοσης η του ΦΒ στοιχείου.

$$\eta = P_m / P_{HA} = I_m * V_m / P_{HA} = FF * I_{SC} * V_{OC} / P_{HA}$$

όπου:

$P_m$ [W]	μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς ΦΒ στοιχείου
$P_{HA}$ [W]:	ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας
$I_m$ [A]:	ένταση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ
$V_m$ [V]:	τάση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ
FF [-]:	συντελεστής πλήρωσης
$I_{sc}$ [A]:	ρεύμα βραχυκύκλωσης
$V_{oc}$ [V]:	τάση ανοιχτού κυκλώματος

### 3.6 Ισχύς Αιχμής Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Σε ένα ΦΒ στοιχείο ελέγχονται τέσσερα Βασικά χαρακτηριστικά: α) ο βαθμός απόδοσης  $\eta$ , β) ο συντελεστής πλήρωσης FF, γ) το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  και δ) η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$ .

Οι πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC (Standard Test Conditions), που έχουν καθοριστεί διεθνώς, είναι οι ακόλουθες:

- Θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου ίση με  $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ισχύος  $P_{STC} = 1 \text{ kW/m}^2$  και φάσματος αντίστοιχου του ηλιακού με μάζα αέρα  $AM = 1,5$ .
- Κάθετη πρόσπτωση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Με βάση τις πρότυπες συνθήκες εισάγεται η έννοια της ισχύος αιχμής ως χαρακτηριστικό του ΦΒ στοιχείου. Ισχύς αιχμής  $P_p$  (pick power) ονομάζεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που αποδίδεται από το ΦΒ στοιχείο κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC και έχει μονάδα μέτρησης το  $W_p$  (Watt αιχμής).

### 3.7 Συνδεσμολογία Φ/Β συστοιχίας – Απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των συλλεκτών.

Κατά την τοποθέτηση των Φ/Β πλαισίων της συστοιχίας απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, γιατί δεν πρέπει η μια σειρά πλαισίων να σκιάζει αισθητά την επόμενη. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο γειτονικών σειρών Φ/Β πλαισίων υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\varepsilon = \alpha + \gamma * \text{συν}\beta = 3.20 \text{ (m)}$$

Η ελεύθερη απόσταση  $\alpha$  προκύπτει από το λόγο  $\alpha/\nu$ , που υπολογίζεται από το διάγραμμα του σχήματος 1 με βάση το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής εγκατάστασης της Φ/Β συστοιχίας και ο υπολογισμός της επικάλυψης του ύψους της κατασκευής στήριξης γίνεται από τη σχέση:

$$\nu = \gamma * \eta\mu\beta - \delta = 0.79 \text{ (m)}$$

όπου:

$\gamma$  = μήκος Φ/Β πλαισίων σε (m)

$\beta$  = γωνία κλίσης Φ/Β πλαισίων σε (°)

$\delta$  = υψομετρική διαφορά ανάμεσα στα στηρίγματα δύο σειρών Φ/Β πλαισίων ( $\delta = 0$  για στήριξη στο ίδιο επίπεδο σε m).

### 3.8 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των Φ/Β πλαισίων

#### *Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας*

Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας ή διαφορετικά η μεταβολή της έντασης ή πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια το Φ/Β πλαίσιο, κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά και του έτους, καθιστά την τροφοδοσία του μη σταθερή η οποία αυξομειώνεται μεταξύ μιας μέγιστης και της μηδενικής τιμής. Επομένως η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του πλαισίου εξαρτάται από τη χρονική μεταβολή της έντασης της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια του.

#### *Θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου – Θερμοκρασία περιβάλλοντος*

Τα Φ/Β στοιχεία λειτουργούν καλύτερα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, όταν δηλαδή η θερμοκρασία τους δεν υπερβαίνει την συμβατικά σχεδιαζόμενη θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία είναι 25° C. Η θερμοκρασία τους όμως αυξάνεται και λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, αλλά και εξαιτίας της μετατροπής μέσα σε αυτά μέρους της ηλιακής ενέργειας σε θερμική ενέργεια. Έτσι έχει αποδειχθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του Φ/Β στοιχείου ελαττώνει τελικά την αποδιδόμενη από αυτό μέγιστη ισχύ κατά περίπου 0.3%° C.

#### *Επίδραση της σκόνης*

Η επίδραση της απόδοσης των Φ/Β στοιχείων από τη ρύπανση και τη σκόνη του περιβάλλοντος δεν είναι καθόλου αμελητέα. Αντίθετα με την χρήση ενός αδιάστατου

συντελεστή υπαισέρχεται και αυτή η παράμετρος στον υπολογισμό της μέγιστης απόδοσης. Ο παραπάνω συντελεστής παίρνει την τιμή 1 για περιβάλλον χωρίς ρύπανση και την τιμή 0.8 για περιβάλλον με υψηλό επίπεδο ρύπανσης. Πάντως η κλίση με τη οποία τοποθετούνται τα Φ/Β πλαίσια ευνοεί τον καθαρισμό της επιφάνειας τους από την βροχή και τον αέρα και έτσι περιορίζεται η επίδραση του συγκεκριμένου παράγοντα. Στις περιπτώσεις όμως, που τα Φ/Β πλαίσια τοποθετούνται με οριζόντια κλίση, συν ίσταται ο περιοδικός καθαρισμός τους.

### ***Δίοδος αντεπιστροφής***

Η δίοδος αντεπιστροφής ΔΑ, που εμποδίζει την εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή διαμέσου του Φ/Β πλαισίου, όταν αυτό δε φωτίζεται, προκαλεί απώλειες ενέργειας της τάξης του 1%. Οι απώλειες αυτές λαμβάνονται υπόψη με τον συντελεστή απωλειών διόδου  $\sigma_{\delta} = 0.99$ .

### ***Οι ηλεκτρικές απώλειες***

Απώλειες ισχύος παρατηρούνται στους αγωγούς που συνδέουν τα Φ/Β πλαίσια στις Φ/Β συστοιχίες, καθώς και στις συνδέσεις τους με τα άλλα μέρη του Φ/Β συστήματος (διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, συσσωρευτές κλπ). Πρόσθετες και μάλιστα σημαντικότερες απώλειες μπορεί να οφείλονται στη λειτουργία αυτών των άλλων μερών του συστήματος και κυρίως στη φόρτιση και εκφόρτιση των συσσωρευτών. Εξάλλου, όπως είδαμε, η τιμή του συντελεστή απόδοσης των Φ/Β πλαισίων που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς, αφορά στις συνθήκες τάσης – έντασης που αντιστοιχούν στη μέγιστη δυνατή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ( $V_m, I_m$ ). Είναι όμως πολύ πιθανό, ιδίως όταν το σύστημα δεν έχει αξιόπιστο ρυθμιστή ισχύος, ότι κατά την λειτουργία του θα υπάρχει μια αξιολογη απόκλιση από τις ιδανικές αυτές συνθήκες, με αποτέλεσμα την έμφαση αντίστοιχης απώλειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να είναι της τάξης περίπου του 20% ως 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και περισσότερο.

### ***Η φθορά του πλαισίου με το χρόνο***

Τέλος, λόγω της φθοράς στα Φ/Β πλαίσια και στα άλλα μέρη του συστήματος, αναμένεται ότι με τη πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται μια μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, που συνήθως υπολογίζεται στο 1% ως 2% για κάθε έτος.

## **3.9 Συνθήκες λειτουργίας Φ/Β στοιχείων**

Τα συνδεδεμένα Φ/Β στοιχεία αποδίδουν την μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν δέχονται την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας, αρκεί να πληρούνται οι εξής προϋποθέσεις:

- Να υπάρχει επαρκής ελεύθερος και ασκίαστος χώρος. Αυτή η απαίτηση είναι μείζονος σημασίας, καθώς η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι ευθέως ανάλογη του ποσού της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου. Σε διαφορετική περίπτωση, το Φ/Β σύστημα θα λειτουργεί με μειωμένη απόδοση.
- Να τίθενται σε νότιο προσανατολισμό, διότι δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία με τη μέγιστη πυκνότητά της για μεγαλύτερο χρονικό

διάστημα στη διάρκεια της ημέρας. Αποκλίσεις από το νότο ως  $45^\circ$  είναι αποδεκτές, μειώνουν προφανώς, όμως, την απόδοση.

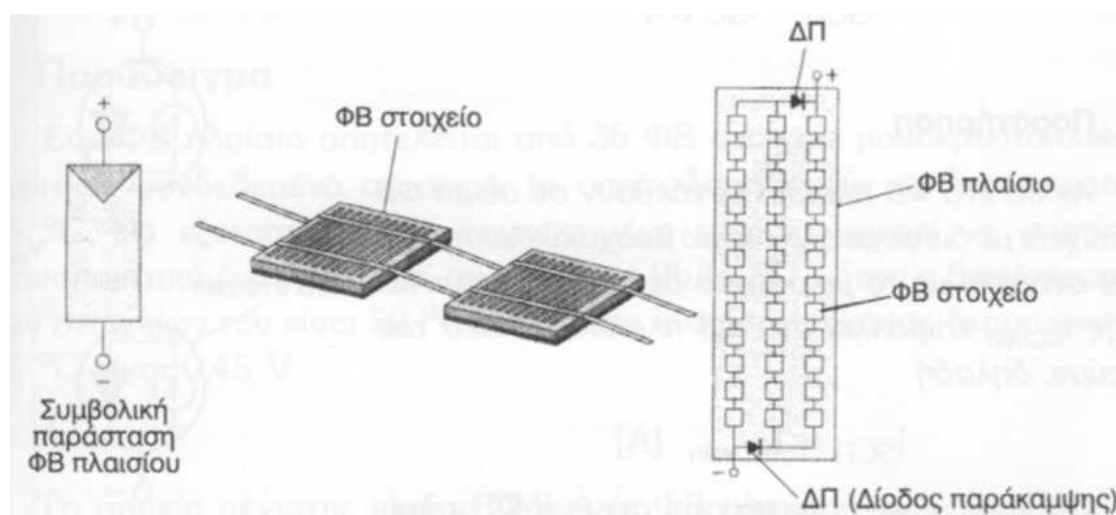
- Να επιλέγεται η σωστή κλίση του Φ/Β πλαισίου σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Όταν το Φ/Β πλαίσιο τοποθετείται πάνω σε σταθερή βάση στήριξης τότε η βέλτιστη γωνία κλίσης του πλαισίου για μέγιστη ετήσια ενεργειακή απολαβή, σε το[πους με μέσα ή μεγάλα γεωγραφικά πλάτη,  $\lambda$ , (πέραν των  $20^\circ$ ), βρίσκεται μέσα στην περιοχή  $\lambda \pm (10^\circ - 15^\circ)$ . Συγκεκριμένα, αν επιδιώκεται να παράγεται περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του πλαισίου επιλέγεται  $15^\circ$  μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, ενώ για το χειμώνα επιλέγεται κλίση  $15^\circ$  μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Όλα τα παραπάνω προκύπτουν σε συνδυασμό βέβαια με τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στον τόπο εγκατάστασης του πλαισίου. Τέλος αν δεν υπάρχουν διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα, τότε το καλύτερο που μπορεί να γίνει είναι η επιλογή της κλίσης του πλαισίου κατά  $10^\circ$  χαμηλότερα από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, η οποία σύμφωνα με θεωρητικούς υπολογισμούς προσεγγίζει τη θέση καλύτερης δυνατής εκμετάλλευσης της ημερήσιας ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας. Ακόμη, αναφέρεται ότι για την καλύτερη παρακολούθηση της κίνησης του ήλιου, το Φ/Β πλαίσιο δύναται να τοποθετείται πάνω σε κινητή βάση στήριξης με δυνατότητα εποχικής ή συχνότερης ρύθμισης της κλίσης του πλαισίου. Τονίζεται ότι ένα Φ/Β στοιχείο δέχεται τη μέγιστη ισχύ της ακτινοβολίας όταν η κλίση του είναι τέτοια που η πρόσπτωση των ακτινών του ήλιου είναι κάθετη στην επιφάνειά του.

## Κεφάλαιο 4

### Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

#### 4.1 Εισαγωγή

Η τάση που εκδηλώνει ένα ΦΒ στοιχείο πυριτίου σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία είναι έως 0,5 V και η ηλεκτρική ισχύς που παράγει δεν ξεπερνά τα 0,4 W περίπου. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι οι τιμές αυτές θεωρούνται πολύ μικρές για την τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων. Λύση στο πρόβλημα αποτελεί η σύνδεση των ΦΒ σε σειρά, κατά τρόπο ανάλογο της σύνδεσης των ηλεκτρικών πηγών. Ένα σύνολο ΦΒ στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά (Σχ. 4.1), έτσι ώστε να αποτελούν εύχρηστη σε μέγεθος μονάδα, ονομάζεται φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module) και για λόγους ευκολίας γράφεται ΦΒ πλαίσιο.



*Σχήμα 4.1: Σύνδεση ΦΒ στοιχείων σε σειρά για τη δημιουργία του ΦΒ πλαισίου.*

Η μονάδα αυτή πρέπει να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Δυνατότητα συνδυασμού με ηλεκτρικό συσσωρευτή τυπικής ονομαστικής τάσεως 12 V, για να είναι δυνατή η αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ευκολία μεταφοράς, ενσωμάτωσης σε μεγαλύτερα σύνολα και αντικατάστασης στην περίπτωση βλάβης.

Η σύνδεση των ΦΒ στοιχείων σε σειρά γίνεται με τη σύνδεση του θετικού ηλεκτροδίου του ενός στοιχείου με το αρνητικό ηλεκτρόδιο του επόμενου (Σχ. 4.2). Κατά τη σύνδεση N όμοιων ΦΒ στοιχείων σε σειρά ισχύουν οι αντίστοιχοι κανόνες συνδεσμολογίας των ηλεκτρικών πηγών:

1. Το ΦΒ πλαίσιο έχει ανάλογα πολλαπλάσια τάση ανοιχτού κυκλώματος

$$V_{OCP} = N * V_{OC}$$

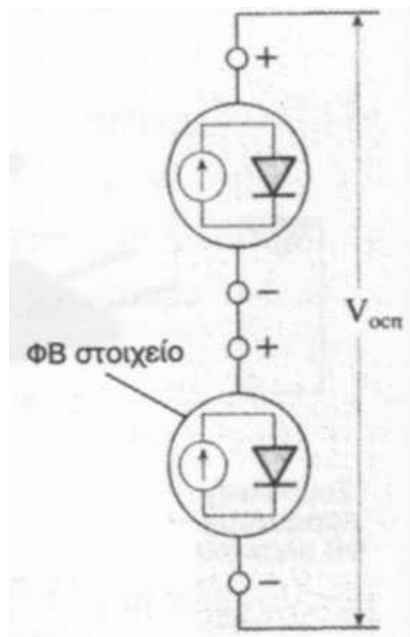
όπου:

$N [-]$ : αριθμός όμοιων ΦΒ στοιχείων

$V_{oc}$  [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος ενός ΦΒ στοιχείου

2. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{scπ}$  ίσο με το αντίστοιχο  $I_{sc}$  του ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

$$I_{scπ} = I_{sc} [A]$$



**Σχήμα 4.2 :** Παραστατικό διάγραμμα σύνδεσης ΦΒ στοιχείων σε σειρά.

Προηγουμένως αναφέραμε ότι ένα ΦΒ πλαίσιο πρέπει να καλύπτει την τυπική ονομαστική τάση 12 V, που υπάρχει στους πόλους ενός ηλεκτρικού. Για την φόρτιση ενός συσσωρευτή μολύβδου - θειικού οξέος, οι οποίοι κατέχουν την πρώτη θέση στην παγκόσμια αγορά, απαιτείται τάση 14,4 V περίπου. Στο σύστημα αυτό πρέπει οπωσδήποτε να προβλέπουμε α) μία ηλεκτρονική διάταξη για τον έλεγχο των ορίων φόρτισης - εκφόρτισης του συσσωρευτή και β) μία δίοδο αντεπιστροφής, που εμποδίζει την εκφόρτιση του συσσωρευτή διαμέσου του ΦΒ πλαισίου, όταν αυτό δεν φωτίζεται. Οι παραπάνω ηλεκτρονικές διατάξεις και οι γραμμές μεταφοράς απαιτούν επί πλέον τάση 1 - 2 V. Άρα το σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ ενός ΦΒ πλαισίου, που φωτίζεται με ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας 1 kW/m<sup>2</sup>, πρέπει να αντιστοιχεί σε συνολική τάση 14,4 + 2 = 16,4 V. Διαιρώντας την τιμή αυτή με την τάση ενός ΦΒ στοιχείου πυριτίου ίση με 0,45 V περίπου, βρίσκουμε ότι απαιτούνται 36 στοιχεία (16,4/0,45 = 36) στη σειρά για τη δημιουργία ενός ΦΒ πλαισίου.

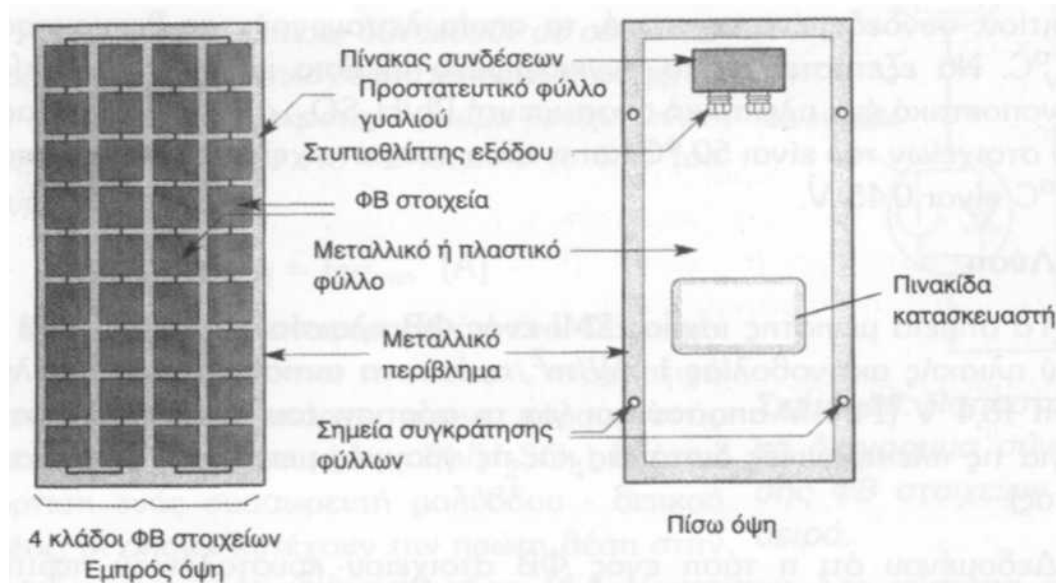
Τα περισσότερα ΦΒ πλαίσια του εμπορίου για ηλεκτρικό συσσωρευτή 12 V περιλαμβάνουν 32 - 44 ΦΒ στοιχεία, ανάλογα με την ακριβή τάση του στοιχείου και τη θερμοκρασία του. Να σημειωθεί ότι η τάση ενός ΦΒ στοιχείου πυριτίου μειώνεται



κατά 2 - 2,5 mV/°C αν είναι κρυσταλλικό και κατά 1,5 - 1,9 mV/°C αν είναι άμορφο. Τέλος, είναι ευνόητο ότι τα ΦΒ πλαίσια για ηλεκτρικό συσσωρευτή 24 V περιλαμβάνουν διπλάσιο αριθμό ΦΒ στοιχείων.

## 4.2 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες

Τα ΦΒ πλαίσια κατασκευάζονται σε μορφή σάντουιτς. Πάνω σε ένα φύλλο από μέταλλο (συνήθως αλουμίνιο) ή από ενισχυμένο πλαστικό, στερεώνονται τα ΦΒ στοιχεία με κατάλληλη κολλητική ουσία. Το φύλλο αυτό αποτελεί την πλάτη του πλαισίου. Η εμπρός όψη των στοιχείων καλύπτεται από προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού. Τα δύο φύλλα, εμπρός και πίσω, συγκρατούνται μεταξύ τους με τη βοήθεια ταινίας από συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται με περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα. Είναι προφανές ότι η κατασκευή αυτή εξασφαλίζει την απαραίτητη μηχανική αντοχή, τις υποδοχές στήριξης και την αυξημένη στεγανότητα για προστασία από την υγρασία.


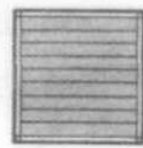



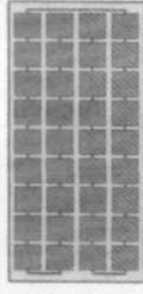


**Σχήμα 4.3:** Φωτοβολταϊκό πλαίσιο κρυσταλλικού πυριτίου.

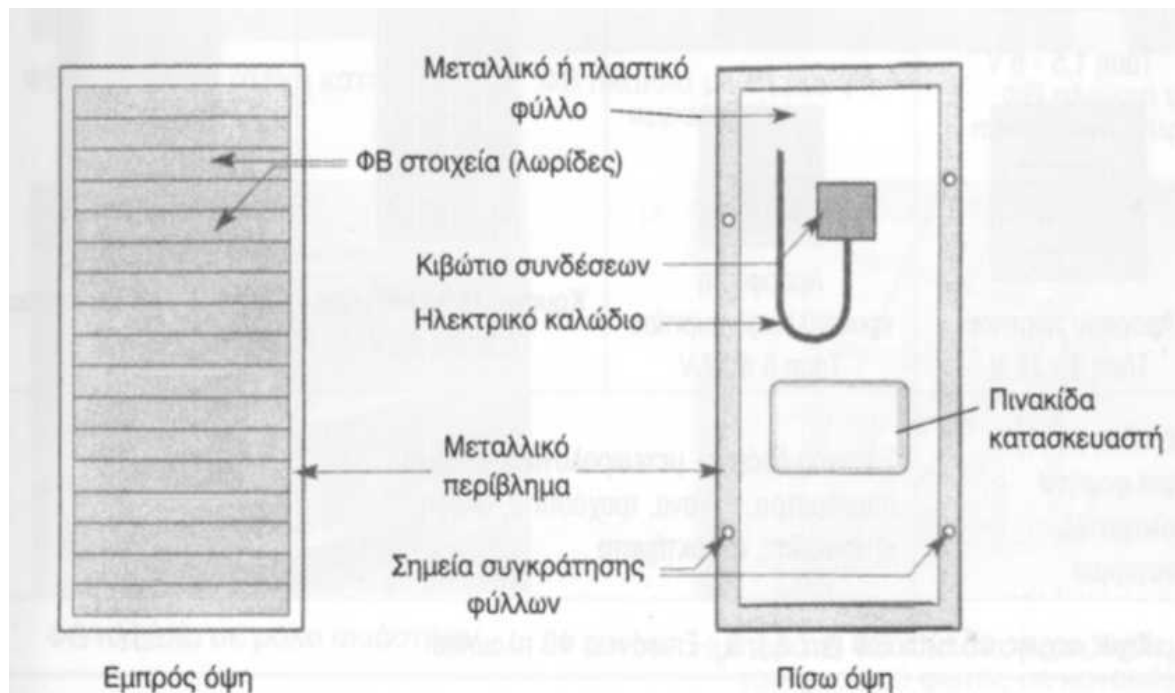
Τα ΦΒ στοιχεία συνδέονται σε σειρά και διατάσσονται σε κλάδους στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου), όπως φαίνεται στα σχήματα 4.3 και 4.4 αντίστοιχα.

Παρακάτω στον Πίνακα 1 δίνονται διάφορα είδη ΦΒ πλαισίων. Με στόχο την όσο το δυνατόν καλύτερη προσαρμογή των ΦΒ πλαισίων στα κτίρια, οι εταιρίες κατασκευής τους προτείνουν πολλές ενδιαφέρουσες λύσεις. Στις στέγες των παραδοσιακών κτιρίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ΦΒ πλαίσια με τη μορφή κεραμιδιών. Στις πλευρές μπορούν να τοποθετηθούν πλαίσια με τη μορφή ζωγραφικών πινάκων. Σε διαδρόμους μεγάλων κτιριακών συγκροτημάτων προτείνεται η χρήση ημιπερατών ΦΒ πλαισίων, τα οποία συνδυάζουν τον ημερήσιο

φυσικό φωτισμό των διαδρόμων και τον τεχνητό φωτισμό από φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια.

$P_{ρπ} = 0 - 2 W_p$ $S_π = 0 - 500 cm^2$	$P_{ρπ} = 2 - 10 W_p$ $S_π = 500 cm^2 - 0,2 m^2$	$P_{ρπ} = 20 - 50 W_p$ $S_π = 0,2 - 0,5 m^2$	$P_{ρπ} = 50 - 200 W_p$ $S_π > 0,5 m^2$
 Τάση 1,5 - 6 V  Αμόρφου πυριτίου Τάση 4 - 12 V	   Αμόρφου ή κρυσταλλικού πυριτίου Τάση 6 ή 12 V	 Κρυσταλλικού πυριτίου Τάση 6 ή 12 V	 Κρυσταλλικού πυριτίου Τάση 12 V, 24 V
Παιχνίδια, ρολόγια, μικροί φορητοί υπολογιστές, συναγερμοί	Σήμανση δρόμων, μετεωρολογικοί σταθμοί, παρκόμετρα, όργανα, τροχόσπιτα, σκάφη ιστιοπλοΐας, αγροκτήματα		Κατοικίες, εμπορικά κτίρια, βιομηχανίες
$P_{ρπ}$ : Ισχύς αιχμής ΦΒ πλαισίου (§ 7.3.), $S_π$ : Επιφάνεια ΦΒ πλαισίου			

**Πίνακας 1:** Είδη φωτοβολταϊκών πλαισίων



**Σχήμα 4.4:** Φωτοβολταϊκό πλαίσιο άμορφου πυριτίου.

Τέλος, θα πρέπει να αναφέρουμε δύο πολύ σοβαρά προβλήματα, τα οποία μπορούν ακόμα και να καταστρέψουν ένα ΦΒ πλαίσιο. Πρόκειται για την υγρασία και την υπερθέρμανση ενός ΦΒ στοιχείου, η οποία ονομάζεται κατάσταση θερμικής κηλίδας.

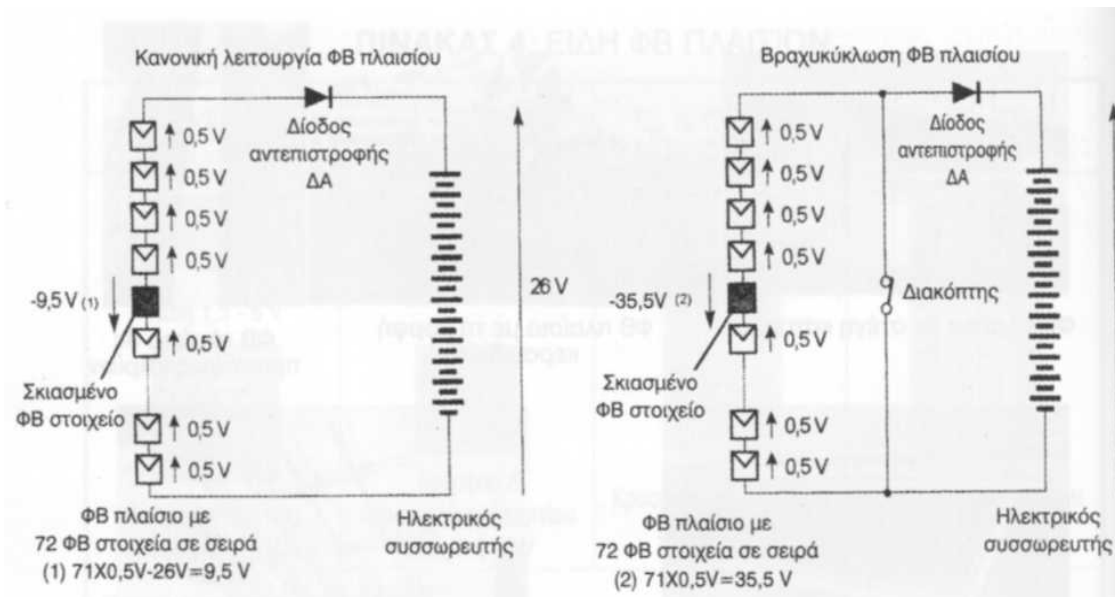
- **Υγρασία**

Επειδή η απόλυτη στεγανοποίηση ενός ΦΒ πλαισίου είναι πολύ δύσκολη, οι περισσότεροι κατασκευαστές πιστεύουν ότι είναι προτιμότερο να μπορεί να "αναπνέει" το πλαίσιο, έτσι ώστε να μην παγιδεύεται στο εσωτερικό του η υγρασία. Είναι προφανές ότι όσοι υδρατμοί εισέρχονται στο πλαίσιο συμπυκνώνονται σε νερό. Έτσι, για την απομάκρυνση του νερού προβλέπουν μία οπή στον πίνακα συνδέσεων, την οποία καλύπτουν με σίτα προκειμένου να αποτρέψουν την είσοδο μικρών ζώων

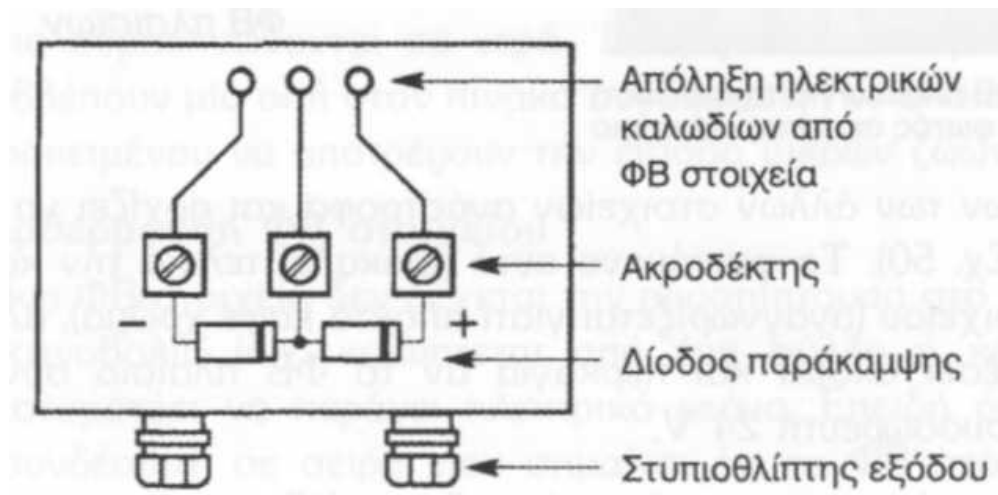
- **Υπερθέρμανση ΦΒ στοιχείου**

Όταν ένα ΦΒ στοιχείο δεν δέχεται την προσπίπτουσα στο ΦΒ πλαίσιο ηλιακή ακτινοβολία (π.χ. καλύπτεται από ένα φύλλο ή κάποιο άλλο εμπόδιο), σταματάει να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Επειδή όμως τα ΦΒ στοιχεία συνδέονται σε σειρά, που σημαίνει ότι το ΦΒ στοιχείο με το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης επιβάλλει στο ΦΒ πλαίσιο το δικό του ρεύμα, το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα από το πλαίσιο τείνει στο μηδέν. Παράλληλα, το σκιασμένο ΦΒ στοιχείο δέχεται το άθροισμα των τάσεων όλων των άλλων στοιχείων ανάστροφα και αρχίζει να υπερθερμαίνεται (Σχ. 4.5). Το φαινόμενο αυτό προκαλεί τελικά την καταστροφή του ΦΒ στοιχείου (αναγνωρίζεται γιατί αποκτά καφέ χρώμα), αλλά μπορεί να προκαλέσει ακόμα και πυρκαγιά αν το ΦΒ πλαίσιο συνδέεται με ηλεκτρικό συσσωρευτή 24 V.

Η προστασία της εγκατάστασης εξασφαλίζεται με την παράλληλη σύνδεση μίας διόδου παράκαμψης ΔΠ (by-pass diode) σε κάθε ομάδα ΦΒ στοιχείων. Συνδέοντας μία δίοδο ανά 18 στοιχεία σε ένα ΦΒ πλαίσιο με 36 στοιχεία σε σειρά (Σχ. 4.6), διατηρούμε την ανάστροφη τάση, που θα δεχτεί το σκιασμένο ΦΒ στοιχείο μικρότερη από 10 V. Έτσι αποφεύγουμε την υπερθέρμανση του, αλλά και το ΦΒ πλαίσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα κι αν κάποιο ΦΒ στοιχείο του καταστραφεί. Οι δίοδοι παράκαμψης τοποθετούνται στο κιβώτιο συνδέσεων, που βρίσκεται στο πίσω μέρος του ΦΒ πλαισίου.



Σχήμα 4.6: Κατασκευή θερμής κηλίδας (υπερθέρμανση σκιασμένου ΦΒ πλαισίου) σε ΦΒ πλαίσιο χωρίς διόδους παράκαμψης.



Σχήμα 4.7: Τοποθέτηση διόδων παράκαμψης στο κιβώτιο συνδέσεων του ΦΒ πλαισίου.

## Κεφάλαιο 5

### Προστασία Φ/Β Συστημάτων

#### **5.1 Εξοπλισμός για την προστασία του κυκλώματος συνεχούς τάσης των Φ/Β συστημάτων**

*Μικροαυτόματοι (MCB's)*

*Αυτόματοι διακόπτες ισχύος ανοιχτού ή κλειστού τύπου (ACB's ή MCCB's)*

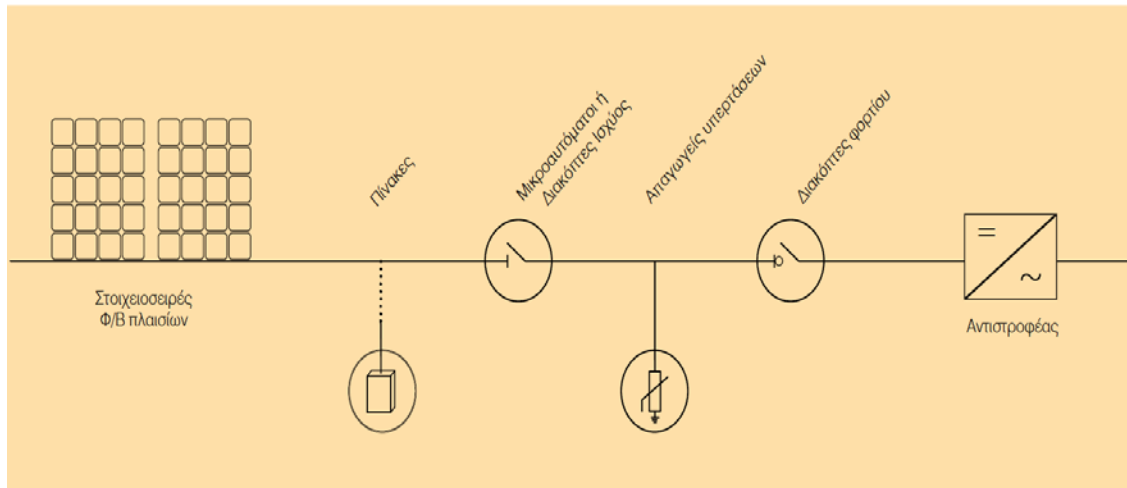
Οι μικροαυτόματοι και οι αυτόματοι διακόπτες ισχύος προστατεύουν μια ηλεκτρική εγκατάσταση από υπερφόρτιση ή βραχυκύκλωμα. Στο κύκλωμα συνεχούς τάσης του Φ/Β συστήματος (DC πλευρά), οι μικροαυτόματοι προστατεύουν κάθε στοιχειοσειρά Φ/Β πλαισίων (string) από ρεύματα ανάστροφης φοράς καθώς επίσης και από την έγχυση εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) στο κύκλωμα συνεχούς σε πιθανή βλάβη του αντιστροφέα (inverter). Κάθε στοιχειοσειρά Φ/Β πλαισίων (ηλιακοί συλλέκτες) πρέπει να προστατεύεται ξεχωριστά ώστε να εξασφαλίζεται ο περιορισμός του σφάλματος μόνο σ'εκείνη τη στοιχειοσειρά που αντιμετωπίζει το πρόβλημα, επιτρέποντας την κανονική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την υπόλοιπη εγκατάσταση. Μετά τη διόρθωση του σφάλματος είναι εφικτή η επαναλειτουργία της στοιχειοσειράς, είτε χειροκίνητα είτε με τηλεχειρισμό. Η ευκολία με την οποία μπορεί να απομονωθεί ηλεκτρικά, για λόγους συντήρησης ή επέκτασης, κάποιο μέρος του συστήματος, αποτελεί ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα.

*Απαγωγείς υπερτάσεων (SPD's)*

Τα Φ/Β πλαίσια και οι αντιστροφείς (inverters) είναι πολύ ευαίσθητα σε μεταβατικές υπερτάσεις και κρουστικά ρεύματα που προκαλούνται από κεραυνούς ή χειρισμούς μεγάλων διακοπών. Οι απαγωγείς υπερτάσεων (αντικεραυνικά), για κυκλώματα συνεχούς τάσης, περιορίζουν αυτές τις υπερτάσεις, προστατεύοντας τον εξοπλισμό και αποτρέποντας περαιτέρω ζημιές στην εγκατάσταση. Για το λόγο αυτό θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη, κατά τη διάρκεια σχεδιασμού μιας τέτοιας επένδυσης, ο κίνδυνος οικονομικών απωλειών λόγω ανεπαρκούς προστασίας.

*Διακόπτες φορτίου κυκλωμάτων συνεχούς τάσης (DC)*

Οι διακόπτες φορτίου κυκλωμάτων συνεχούς τάσης χρησιμοποιούνται για τη ζεύξη ή απόζευξη ενός κυκλώματος υπό φορτίο, με ονομαστική τάση λειτουργίας έως και 1.200 VDC σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 60364-7-712, IEC 60947 για εγκαταστάσεις Φ/Β συστημάτων. Ο εύκολος χειρισμός τους διευκολύνει τις εργασίες συντήρησης ή επέκτασης ενός κυκλώματος, αυξάνοντας τη χρηστικότητα της εγκατάστασης και καθιστώντας τους μια άριστη επένδυση.



*Εικόνα 5.1: Κύκλωμα συνεχούς τάσης (DC)*

## 5.2 Εξοπλισμός για την προστασία του κυκλώματος εναλλασσόμενης τάσης των Φ/Β συστημάτων

### *Διακόπτες φορτίου κυκλωμάτων εναλλασσόμενης τάσης (AC)*

Και οι διακόπτες φορτίου κυκλωμάτων εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιούνται για τη ζεύξη ή απόζευξη ενός κυκλώματος υπό φορτίο. Ο εύκολος χειρισμός τους διευκολύνει τις εργασίες συντήρησης ή επέκτασης ενός κυκλώματος εναλλασσόμενης τάσης.

### *Διακόπτες διαρροής (RCD's)*

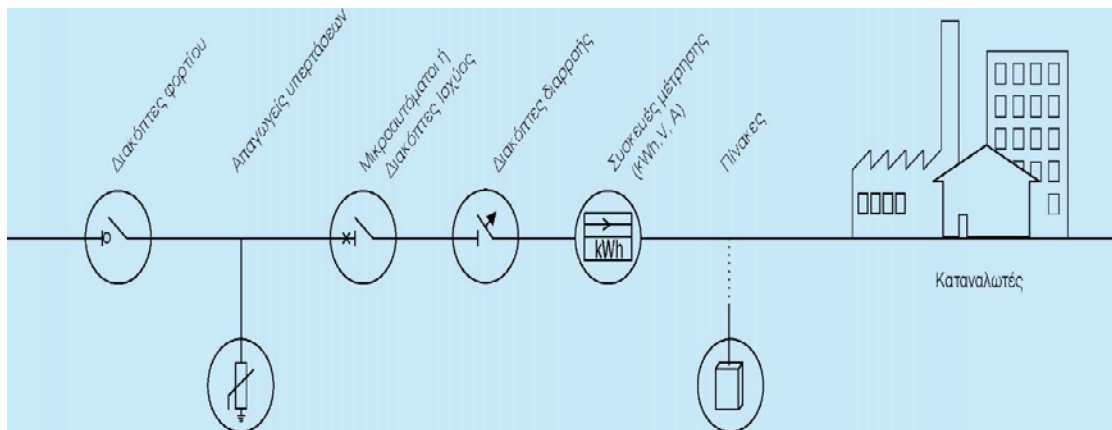
Οι διακόπτες διαρροής προστατεύουν το προσωπικό και τον εξοπλισμό μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης από ηλεκτροπληξία ή εκδήλωση πυρκαγιάς. Η ύπαρξη των διακοπών διαρροής στους πίνακες διανομής μιας εγκατάστασης είναι επιβεβλημένη. Οι διακόπτες διαρροής κατηγορίας B της ABB προσφέρουν προστασία από παλμικά ρεύματα με συνεχείς συνιστώσες και εξαιρετικά μικρούς χρόνους αντίδρασης σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62423, καθιστώντας τους ιδανικούς για εγκαταστάσεις Φ/Β συστημάτων.

### *Μετρητές ενέργειας*

Μετρούν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει ένα Φ/Β σύστημα. Οι μετρητές ενέργειας μπορούν εύκολα να εγκατασταθούν σε πίνακες με ράγα DIN και να ενσωματωθούν σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής και μεταφοράς δεδομένων μέσω κατάλληλων σειριακών μονάδων επικοινωνίας (serial communication adapters). Είναι κατασκευασμένοι σύμφωνα με την οδηγία οργάνων μέτρησης (MID) και την ευρωπαϊκή οδηγία 2004/22/EC.

## Πίνακες

Οι πίνακες χρησιμοποιούνται τόσο στο κύκλωμα συνεχούς (DC) όσο και στο κύκλωμα εναλλασσόμενης (AC) τάσης. Συνιστάται να είναι κλάσης II και να διαθέτουν βαθμό προστασίας έναντι εισερχομένων σωματιδίων και υγρασίας IP 65, όταν τοποθετούνται σε εξωτερικούς χώρους. Ο εξοπλισμός εγκαθίσταται στο εσωτερικό τους είτε σε ράγες DIN είτε σε μεταλλικές βάσεις στήριξης.



**Εικόνα 5.2:** Κύκλωμα εναλλασσόμενης τάσης (AC)

### 5.3 Υλικά προστασίας

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα διάφορα υλικά προστασίας που τοποθετούνται για την προστασία των Φ/Β συστημάτων.



**Εικόνα 5.3:** Διπολικός διακόπτης συνεχούς τάσης 1000V- 50A. Χρησιμοποιείται σε πίνακες DC μέχρι 20KVA ως Γενικός διακόπτης.

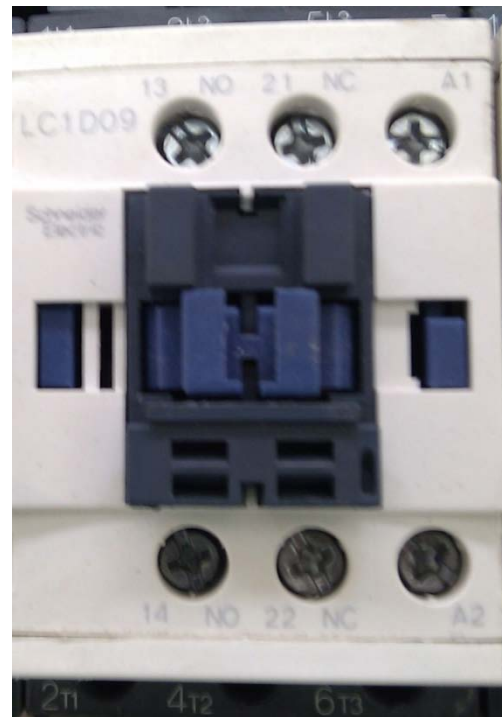


*Εικόνα 5.4: Αντικεραυνικό βαρέως τύπου DC 140KA. Όταν η τάση ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια του αντικεραυνικού γίνεται διάσπαση διακένου και το ρεύμα κατευθύνεται προς την γη.*





*Εικόνα 5.5: Ακροδέκτες DC διασύνδεσης φωτοβολταϊκών .*



*Εικόνα 5.6: Ηλεκτρονόμοι για τον αυτοματισμό των φωτοβολταϊκών.*



**Εικόνα 5.7:** Αυτόματος διακόπτης ισχύος 25 A.

Μπορεί να διακόψει ρεύμα μέχρι 25A και αντέχει ρεύμα βραχυκύκλωσης 18 KA. Ο αυτόματος διακόπτης ισχύος χρησιμοποιείται σε Φ/Β συστήματα άνω των 10 KW



**Εικόνα 5.8:** Ασφαλειοαποξεύκτης AC τετραπολικός, τρεις φάσεις και ουδέτερος.



*Εικόνα 5.9: Τριπολικός και μονοπολικός ασφαλειοαποζεύκτης AC.*



*Εικόνα 5.10: Ασφαλειοαποζεύκτες DC PV 1000V 32A*



*Εικόνα 5.11: Φυσίγγι DC 10 A*



*Εικόνα 5.12: Ασφαλειοαποζεύκτης τριπολικός ανοιχτός.*



*Εικόνα 5.13: Μικροαντόματι 3 x 32A και 2 x 25A*



*Εικόνα 5.14: Τετραπολικός μικροαντόματος 32 A και μονοπολικός 16 A αντίστοιχα.*



*Εικόνα 5.15: Ηλεκτρονόμοι 4 x 40A 4 x 63A και 4 x 24A αντίστοιχα.*

Οι ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τον επιτηρητή τάσης σε περίπτωση που γίνει διακοπή κάποιας φάσης της ΔΕΗ η δεν υπάρχει σωστή διαδοχή φάσεων ώστε να κόψει το κύκλωμα του inverter (όλα τα inverter έχουν τέτοιου είδους προστασία αλλά το βάζουμε σαν επιπλέον προστασία).



*Εικόνα 5.16: Ρυθμιζόμενοι επιτηρητές τάσης όπου μπορούμε να ρυθμίσουμε το ποσοστό ανώτερης τάσης ποσοστό κατώτερης τάσης και την καθυστέρηση επαναφοράς τροφοδοσίας μετά από διακοπή ρεύματος.*

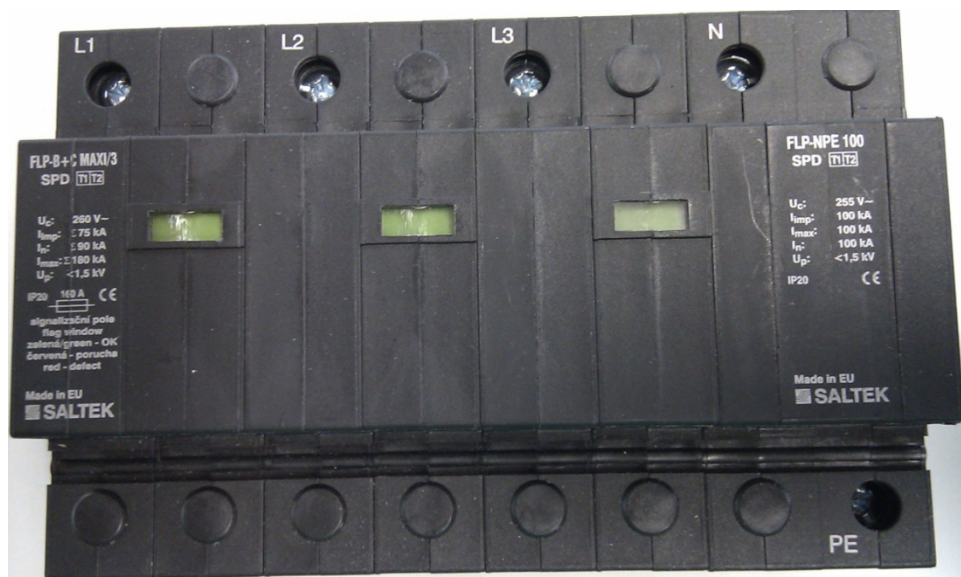


*Εικόνα 5.17: Επιτηρητής τάσης χωρίς ρύθμιση που ελέγχει την διαδοχή φάσεων και την έλλειψη κάποιας φάσης.*



*Εικόνα 5.18: Αντικεραυνικό της phoenix 1000V DC με μέγιστο ρεύμα 30KA και μέγιστη τιμή τάσης 2,5KV.*

Οι απαγωγείς υπερτάσεων κλάσης T1+2 συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των δύο κατηγοριών T1 και T2. Δηλαδή διαθέτουν υψηλό  $I_{imp}$ , χαρακτηριστικό της κλάσης T1, και χαμηλό  $V_P$ , χαρακτηριστικό της κλάσης T2. Μόνος περιορισμός στην επιλογή είναι το  $I_f$  (ικανότητα σβέσης ακόλουθου ρεύματος).



*Εικόνα 5.19: Αντικεραυνικό τριφασικό (τρεις φάσεις και ουδέτερος) της Saltek κλάσης T1+2.*



*Εικόνα 5.20: Μονοφασικό αντικεραυνικό της Saltek κλάσης T1+2.*



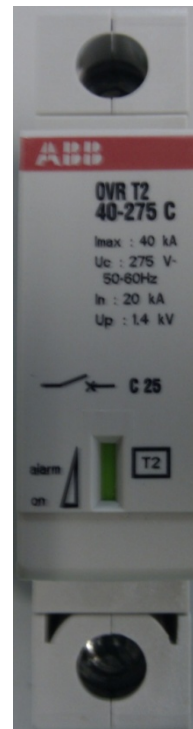
*Εικόνα 5.21: Μονοφασικό αντικεραυνικό της Saltek κλάσης T3.*

*Χρησιμοποιούνται για την προστασία των επιμέρους κυκλωμάτων όπως συναγερμός κλπ.*





*Εικόνα 5.22: Αντικεραυνικό DC 580V 40kA  $V_p = 1.8kV$  κλάσης T2.*



*Εικόνα 5.23: Αντικεραυνικά της ABB κλάσης T1+2 και T2 αντίστοιχα.*

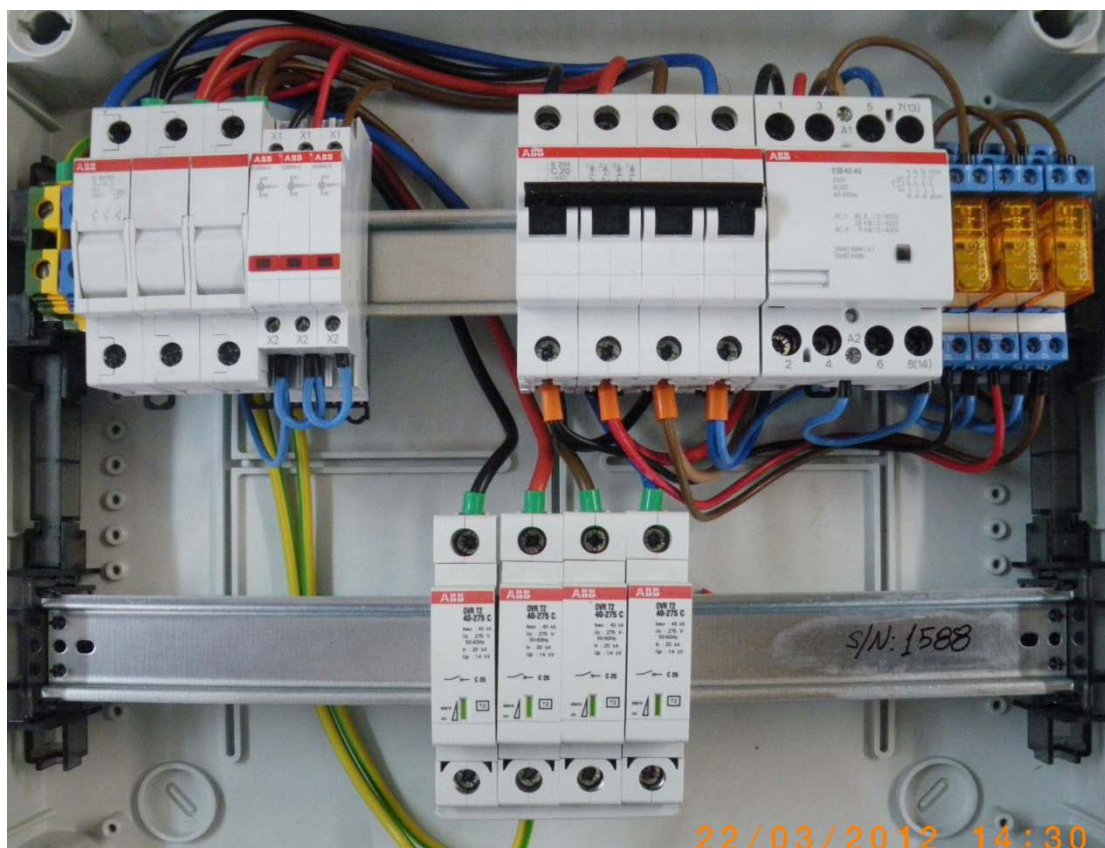


*Εικόνα 5.24: Θερμομαγνητικά telemecanique και ABB τα οποία τα τοποθετούμε πριν τους ηλεκτρονόμους των κινητήρων για την προστασία τους.*

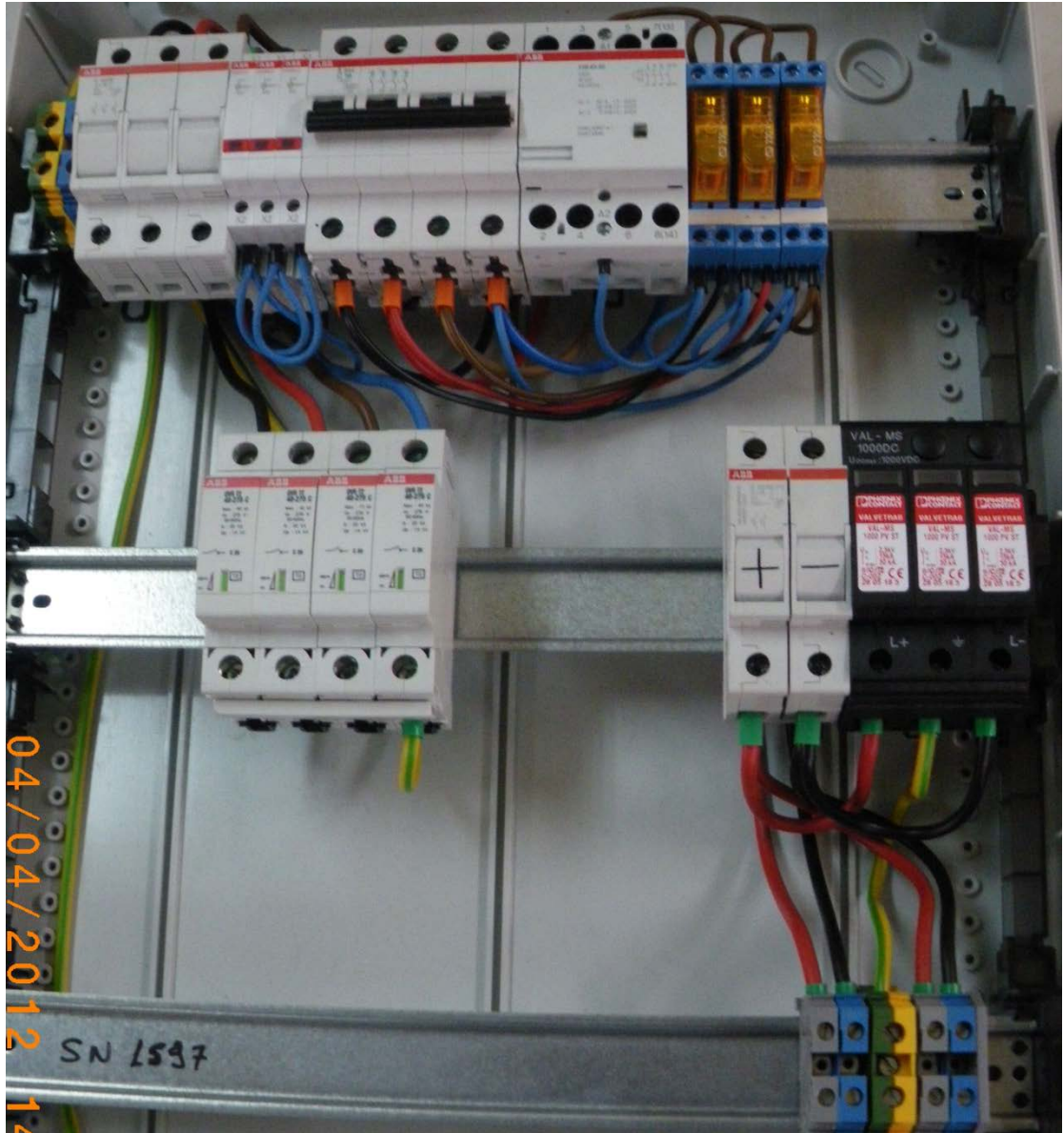


*Εικόνα 5.25: Αυτόματι διακόπτες ισχύος ή θερμομαγνητικοί διακόπτες όπου μπορούν να διακόψουν υπό φορτίο και λειτουργούν και ως μικροαυτόματι.*

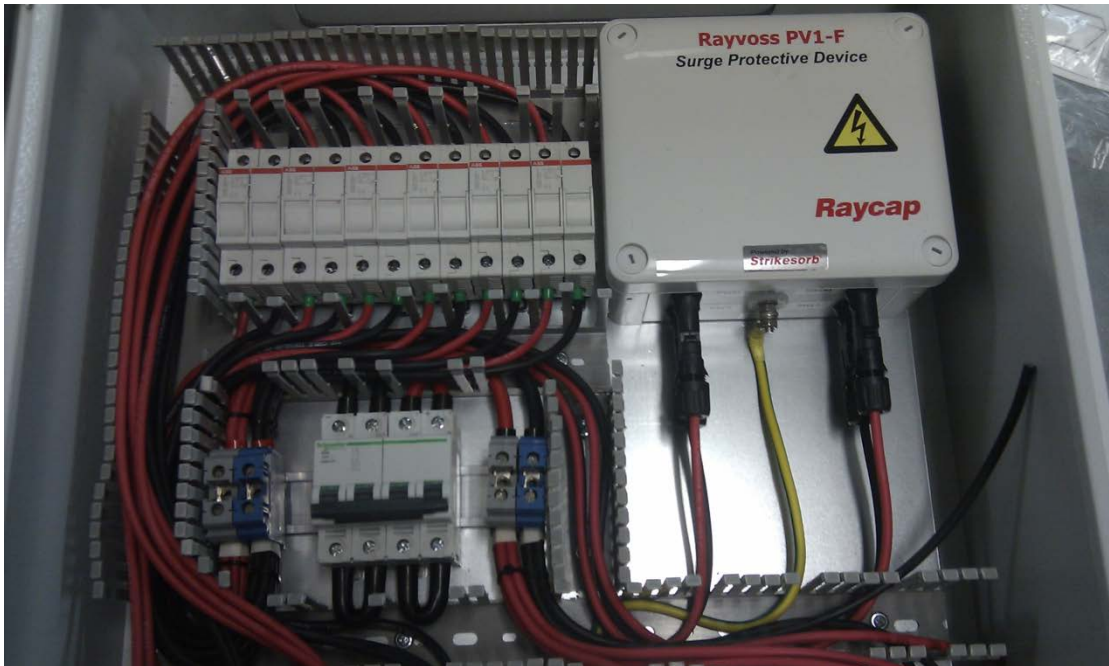
## 5.4 Πίνακες εναλλασσομένου ρεύματος



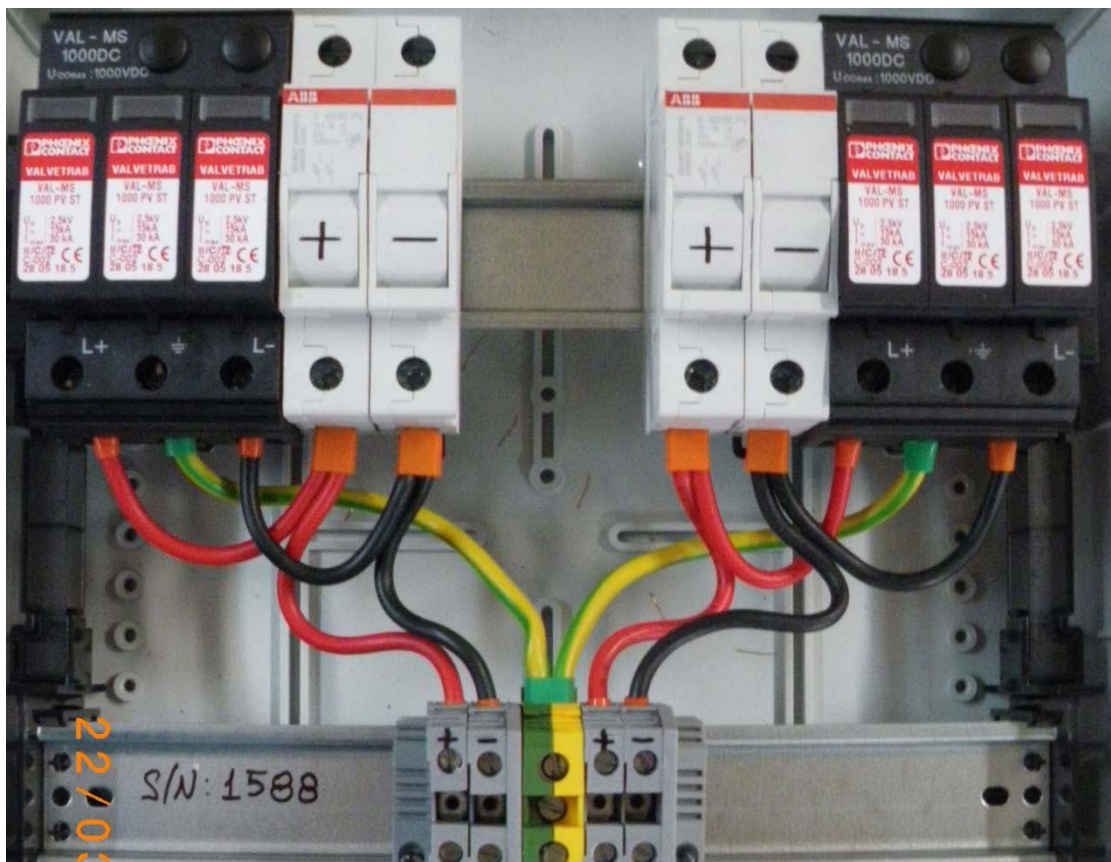
*Εικόνα 5.26: Πίνακας για Φ/Β πάρκο 10 KVA με ασφαλειοποξεύκτη 3x25A, ενδεικτικά Led, γενικό διακόπτη, μικροαυτόματο 20 A, ρελέ διαφυγής 40 A, 4 αντικεραυνικά ABB κλάσης T2 και τρεις βοηθητικούς ηλεκτρονόμους που λειτουργούν ως επιτηρητές τάσης.*



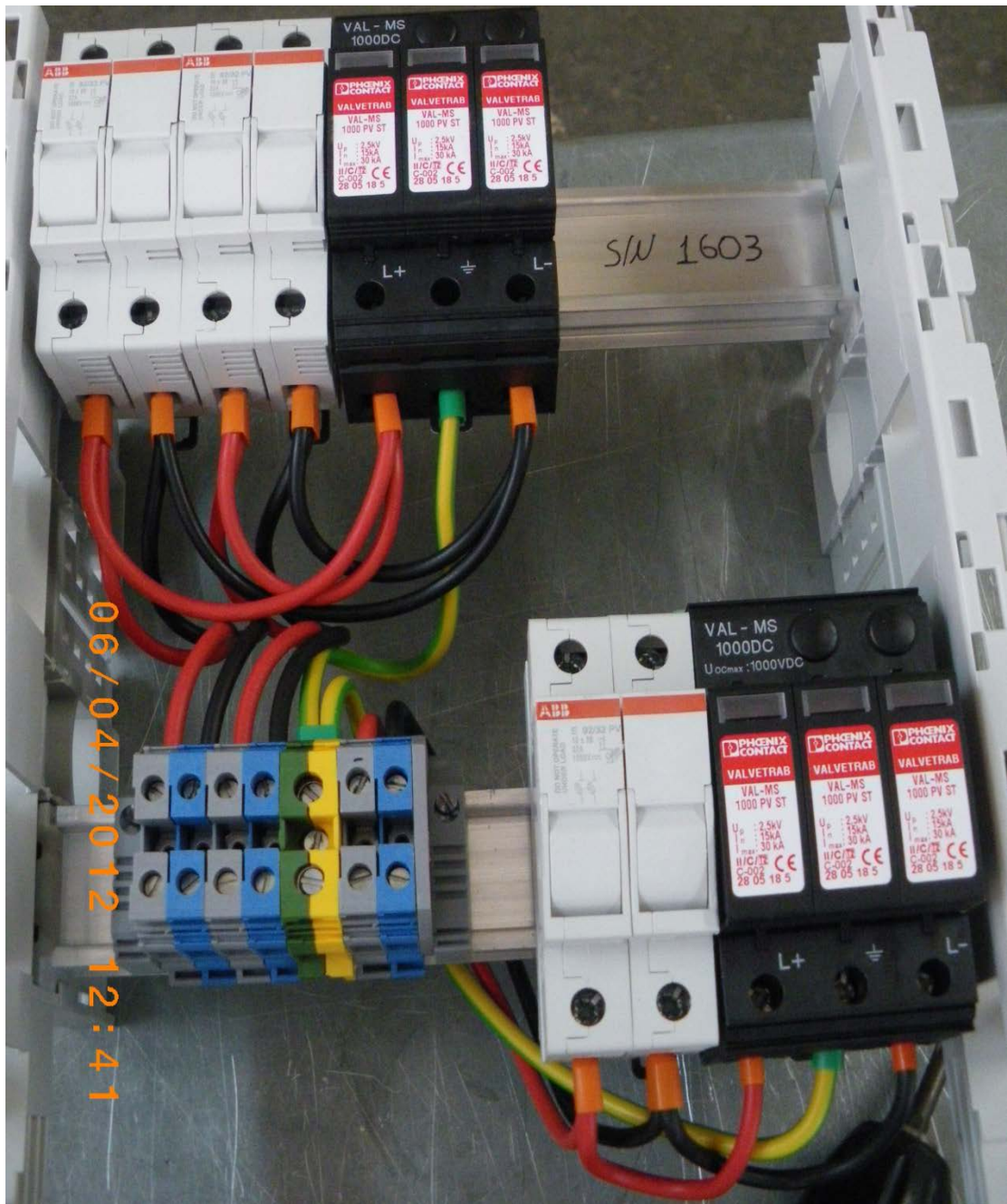
## 5.5 Πίνακες συνεχούς ρεύματος



Εικόνα 5.27: Πίνακας με 6 string, γενικό διακόπτη και αντικεραυνικό βαρέως τύπου.



Εικόνα 5.28: Πίνακας με δύο string και δύο αντικεραυνικά.



*Εικόνα 5.29: Πίνακας με δύο αντικεραυνικά, ένα κύκλωμα με δύο string και ένα με ένα string.*



## Κεφάλαιο 6

### Η Κατασκευή

#### 6.1 Περιγραφή υλικών

Η εργασία μας αφορά την κατασκευή ενός solar tracker δύο κινήσεων (επάνω, κάτω, ανατολή, δύση). Για την υλοποίηση αυτής απαιτήθηκε πολύς χρόνος και έρευνα.

Αρχικά, παρακολουθήσαμε από κοντά την λειτουργία ενός πραγματικού tracker και προσπαθήσαμε να το αποτυπώσουμε όσο το δυνατόν πιο καλά λόγω του μικρού μεγέθους της κατασκευής μας και του μεγάλου κόστους των υλικών. Ξεκινώντας το κατασκευαστικό μέρος αφιερώσαμε πολύ χρόνο σε δοκιμές ώστε να ταιριάζουν απόλυτα τα μηχανολογικά μέρη της κατασκευής τα οποία εμείς φτιάξαμε.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε επιμέρους κομμάτι της εργασίας δίνονται παρακάτω:

Μία σιδηροσωλήνα 1,5”

Μία φλάντζα

Δύο άξονες 13mm

Τρία κόμπλερ

Ένα φωτοβολταϊκό πάνελ 20W

Δύο μοτέρ 12V DC με μειωτήρα 5rpm

Δύο παλμογεννήτριες (Encoder) 100 παλμών ανά περιστροφή

Τέσσερις επαγωγικοί διακόπτες NC 24V

Τέσσερις κύριοι ηλεκτρονόμοι Telemecanique

Τέσσερις βοηθητικοί ηλεκτρονόμοι finder 40.51 24V DC

Ένα διακόπτη Φ22 1-0-2

Δύο διακόπτες Φ22 1-0-2 με επαναφορά

Ένα τροφοδοτικό DC του οίκου DELTA 24V 2A

Ένα PLC του οίκου DELTA με 8 εισόδους και 4 εξόδους

Μία επιπλέον κάρτα για το PLC του οίκου DELTA με 8 πρόσθετες εισόδους



Στον αυτοματισμό χρησιμοποιήσαμε τα δύο μοτέρ για την κίνηση του πάνελ, τους τέσσερεις ηλεκτρονόμους (Telemecanique ) για αλλαγή της φοράς περιστροφής και τους τέσσερεις βοηθητικούς ηλεκτρονόμους finder για να έχουμε τέρματα στο χειροκίνητο χειρισμό. Τους διακόπτες 1-0-2 με επαναφορά τους χρησιμοποιήσαμε για τις κινήσεις μας και τον 1-0-2 για την επιλογή αυτόματου ή χειροκίνητου χειρισμού. Τους επαγωγικούς διακόπτες τους χρησιμοποιήσαμε για τερματικούς διακόπτες (ανατολής, δύσης, πάνω, κάτω) . Οι παλμογεννήτριες (encoder) περιστρέφονται μαζί με το tracker και μας δίνουν παλμούς.

Επειδή θέλαμε λιγότερες στροφές στα μοτέρ μειώσαμε την τάση τροφοδοσίας τους από 12V σε 3V. Για να το πετύχουμε αυτό μετατρέψαμε το τροφοδοτικό του PLC και τοποθετήσαμε μία ρυθμιζόμενη έξοδο 1,2 – 24 V χρησιμοποιώντας ένα LM317T, ένα ποτενσιόμετρο 4,7KΩ και μία αντίσταση 220Ω.

Στο PLC θέσαμε τις παρακάτω **εισόδους** :

- X0 – encoder 1 θετικοί παλμοί
- X1 – encoder 1 αρνητικοί παλμοί
- X4 – encoder 2 θετικοί παλμοί
- X5 – encoder 2 αρνητικοί παλμοί
- X6 – ανεμόμετρο
- X10 – θερμοστάτης
- X11 – επαγωγικός διακόπτης (πάνω κίνηση)
- X12 – επαγωγικός διακόπτης (κάτω κίνηση)
- X13 – επαγωγικός διακόπτης (κίνηση προς την δύση)
- X14 – επαγωγικός διακόπτης (κίνηση προς την ανατολή)
- X15 – auto

Στις **εξόδους του PLC** συνδέσαμε:

- Y0 – ηλεκτρονόμο για την πάνω κίνηση
- Y1 – ηλεκτρονόμο για την κάτω κίνηση
- Y2 – ηλεκτρονόμο για την κίνηση προς την δύση
- Y3 – ηλεκτρονόμο για την κίνηση προς την ανατολή

Ο σχεδιασμός της εργασίας και του αυτοματισμού υλοποιήθηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα e-plan.

Για την κατασκευή του φωτοβολταϊκού tracker αντιμετωπίσαμε πολλές δυσκολίες λόγω του μικρού μεγέθους του, ειδικά στην προσαρμογή και κατασκευή μικρότερης κλίμακας εξαρτημάτων σε σχέση με ένα πραγματικό Φ/B tracker. Στην αρχή χρησιμοποιήσαμε τερματικούς διακόπτες επαφής αλλά καταλήξαμε σε επαγωγικούς διακόπτες (Εικόνα 6.18) επειδή έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Μετά από μεγάλη

έρευνα στο διαδίκτυο βρήκαμε τους κατάλληλους κινητήρες για την κατασκευή μας γιατί χρειαζόμασταν κινητήρες με μεγάλο μειωτήρα και μικρό μέγεθος. Έτσι χρησιμοποιήσαμε 2 κινητήρες 12V DC με 5 rpm (Εικόνα 6.7) τους οποίους παραγγείλαμε από Ιαπωνία, ενώ μειώσαμε την τάση τροφοδοσίας στα 3V ώστε να πετύχουμε περιστροφή με επιπλέον λιγότερες στροφές. Τα υπόλοιπα εξαρτήματα όπως οι άξονες (Εικόνα 6.11 και 6.12), τα κόμπλερ (Εικόνα 6.10) και οι βάσεις (Εικόνα 6.13) του tracker κατασκευάστηκαν από εμάς με την χρήση τροχού και ηλεκτροσυγκόλλησης.

Αφού τοποθετήσαμε όλα τα εξαρτήματα στη θέση τους υπήρξε πρόβλημα στο πώς θα μεταδώσουμε την κίνηση στο encoder (ανατολής-δύσης), το οποίο λύσαμε με δύο άξονες και ένα λαστιγάκι. Θέλαμε να χρησιμοποιήσουμε και ανεμόμετρο για να οριζοντιώνεται το πλαίσιο σε περίπτωση μεγάλου αέρα, αλλά δεν βρήκαμε κάποιο ανάλογο στο μέγεθος της κατασκευής. Για την παρουσίαση τοποθετήσαμε έναν διακόπτη που έχει συνδεθεί στην είσοδο του PLC ο οποίος προσομοιάζει το ανεμόμετρο. Το ίδιο κάναμε και για τον ελεγκτή θερμοκρασίας τον οποίο δεν τοποθετήσαμε για τον ίδιο λόγο.

#### *Επαγωγικοί διακόπτες 24V DC NC PNP*

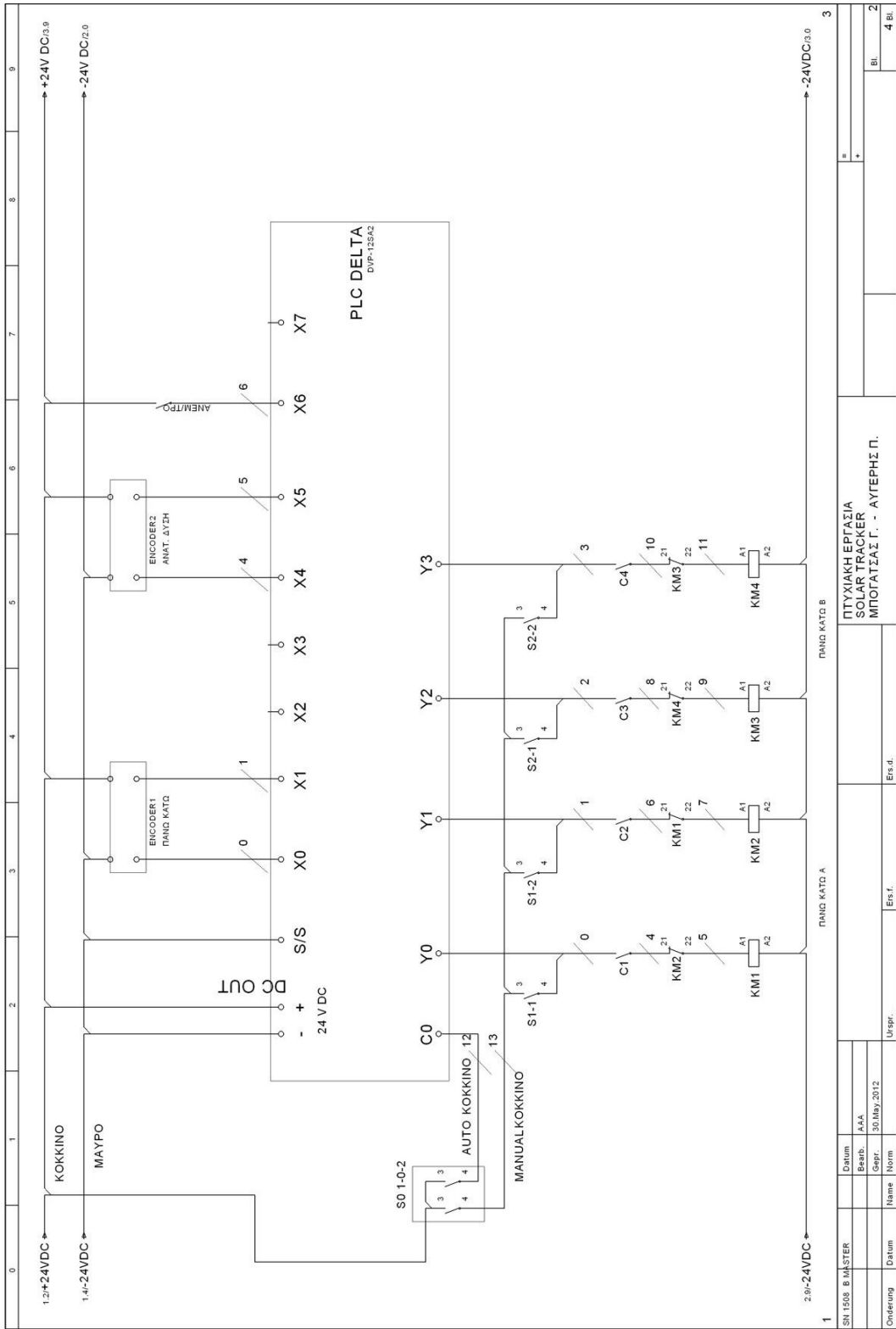
Χρησιμοποιήσαμε επαγωγικούς διακόπτες (Εικόνα 6.9) για μεγαλύτερη ακρίβεια, οι οποίοι έχουν τρία καλώδια, δύο για την τροφοδοσία τους 24V DC και ένα που είναι η έξοδος transistor PNP (+24V σε περίπτωση εντολής) που είναι και η είσοδος στο PLC. Χρησιμοποιούμε πάντα στα τερματικά επαφές NC για ασφάλεια, ώστε ακόμα και αν σπάσει ή χαλάσει η επαφή θα μείνει ανοιχτή, δηλαδή σε κατάσταση ηρεμίας η έξοδος του είναι ενεργοποιημένη. Όταν φτάσει μπροστά του η μεταλλική βάση του πάνελ η έξοδος απενεργοποιείται οπότε δίνει εντολή ότι φτάσαμε στο τέρμα. Για να έχουμε τερματισμό και στην χειροκίνητη λειτουργία πέρα από την αυτόματη, συνδέσαμε τις εξόδους των επαγωγικών διακοπών να τροφοδοτούν τα πηνία τεσσάρων βοηθητικών ρελέ. Ύστερα μέσω της κανονικά ανοικτής επαφής (NO) των βοηθητικών ρελέ, τροφοδοτούμε τα πηνία των κύριων ρελέ που ευθύνονται για τις κινήσεις του tracker. Δηλαδή ο επαγωγικός διακόπτης της ανατολής συνδέεται με το πηνίο ενός βοηθητικού ρελέ και παράλληλα με την αντίστοιχη είσοδο του PLC, ενώ μέσω της κανονικά ανοικτής επαφής του βοηθητικού ρελέ τροφοδοτούμε το πηνίο του ρελέ της ανατολής. Συνεπώς όταν δώσουμε εντολή μέσω του μπουτόν ανατολής, το tracker ξεκινά και πηγαίνει προς την ανατολή και όταν φθάσει κοντά στον επαγωγικό διακόπτη και αυτός ενεργοποιηθεί, απενεργοποιείται το βοηθητικό ρελέ και έτσι σταματάει να κινείται το tracker, ακόμα και αν εμείς εξακολουθούμε να δίνουμε εντολή μέσω του μπουτόν.

#### *Παλμογεννήτριες (Encoder)*

Χρησιμοποιήσαμε τα πιο μικρά σε μέγεθος encoder που βρήκαμε στο εμπόριο και είναι της εταιρίας Autonics με 100 παλμούς ανά περιστροφή. Τα encoder έχουν τέσσερα καλώδια, δύο για την τροφοδοσία τους 24V DC και δύο για τους παλμούς, ένα για θετικούς και ένα για αρνητικούς. Δηλαδή αν ο άξονας του encoder κάνει μία δεξιόστροφη περιστροφή θα μας δώσει 100 θετικούς παλμούς, αν κάνει μία αριστερόστροφη περιστροφή θα μας δώσει 100 αρνητικούς παλμούς.







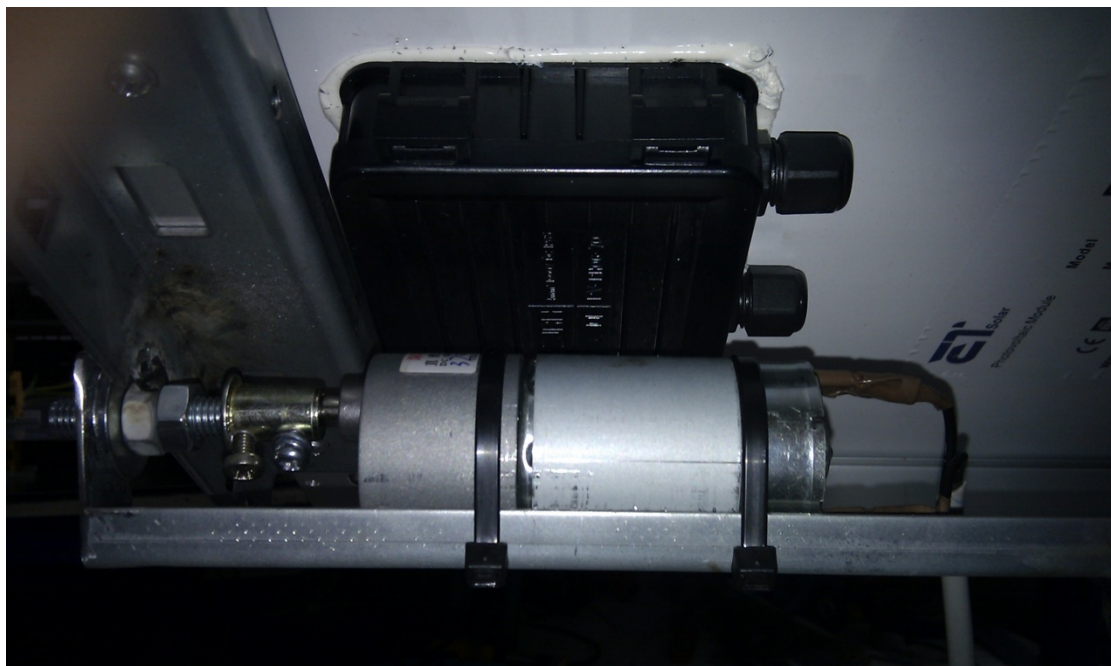
Εικόνα 6.5: Καλωδίωση της επιπλέον κάρτας του PLC.



### 6.3 Φωτογραφίες της κατασκευής



*Εικόνα 6.6: Πίσω όψη του πάνελ με τις βάσεις του.*



*Εικόνα 6.7: Μοτέρ υπεύθυνο για την κίνηση πάνω – κάτω.*



*Εικόνα 6.8: Η βάση του πάνελ με το κόμπλερ της.*

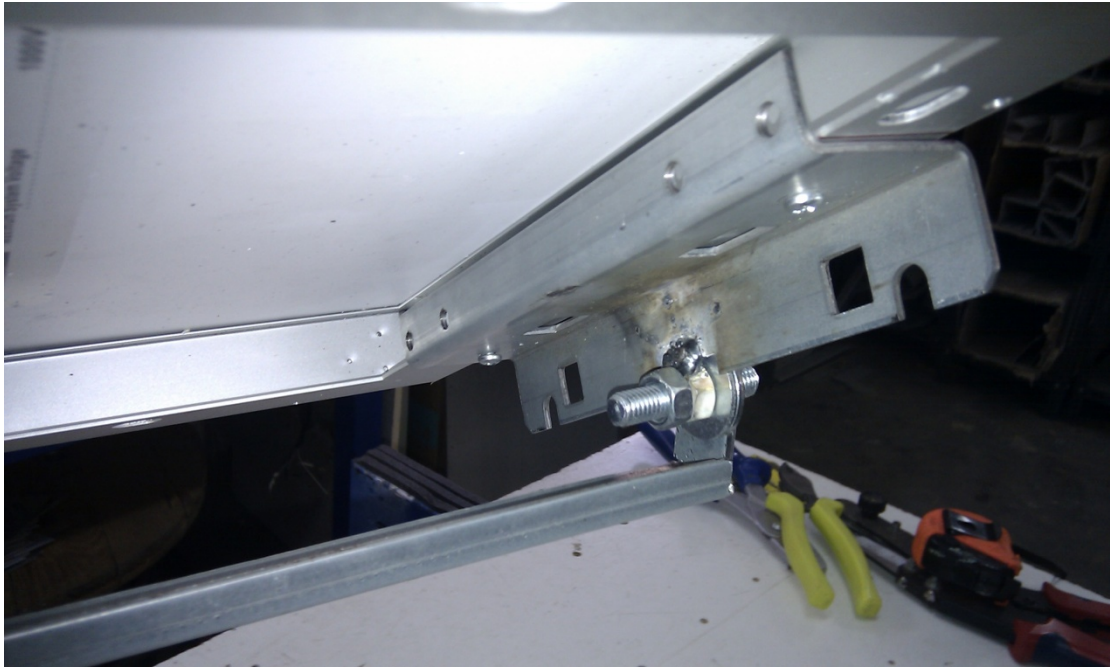


*Εικόνα 6.9: Επαγωγικοί διακόπτες για την κίνηση πάνω – κάτω.*



*Εικόνα 6.10: Το κόμπλερ και οι άξονες για την κίνηση πάνω - κάτω.*





*Εικόνα 6.11: Προσαρμογή του άξονα στη βάση του Φ/Β.*



*Εικόνα 6.12: Ο άξονας για την κίνηση ανατολή-δύση και η βάση των χειριστηρίων.*



*Εικόνα 6.13: Προσαρμογή των βάσεων των επαγωγικών και του encoder στην κεντρική βάση του.*



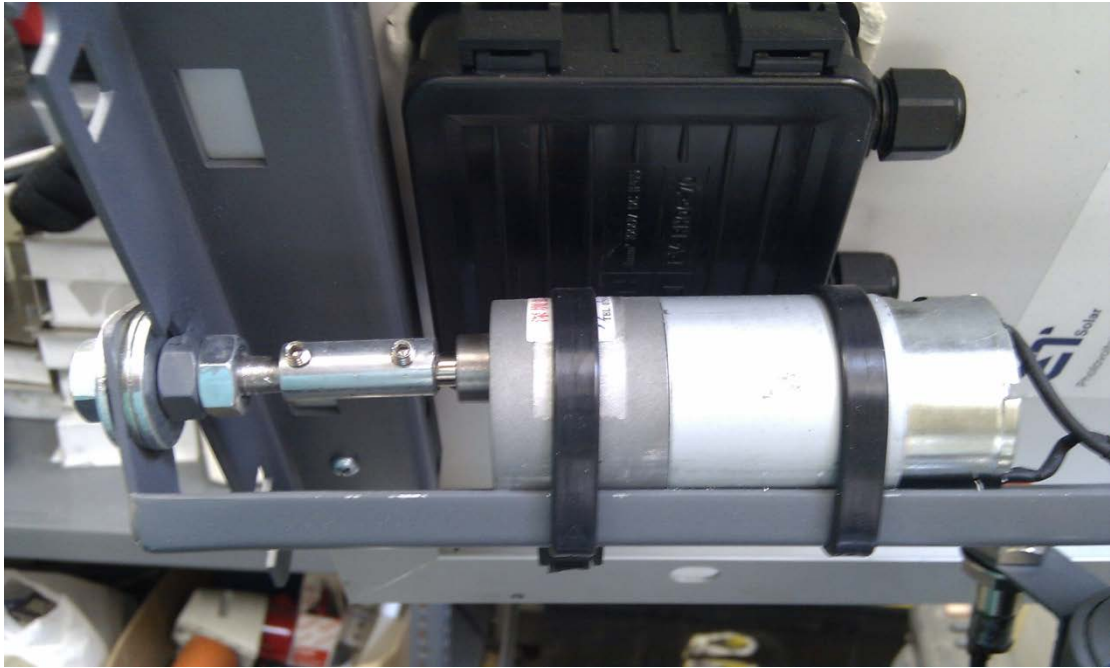
*Εικόνα 6.14: Τοποθέτηση των επαγωγικών και του encoder στην κεντρική βάση του Φ/Β.*



*Εικόνα 6.15: Τοποθέτηση του Φ/Β πάνελ στην κεντρική βάση.*



*Εικόνα 6.16: Επαγωγικοί διακόπτες και encoder.*



*Εικόνα 6.17: Τοποθέτηση του κόμπλερ στον κινητήρα και προσαρμογή του άξονα για την περιστροφή πάνω - κάτω.*



*Εικόνα 6.18: Τοποθετημένος επαγωγικός διακόπτης και encoder.*



*Εικόνα 6.19: Τοποθέτηση επαγωγικών και του encoder για το τέρμα του Φ/Β πάνελ της κίνησης ανατολής – δύσης.*



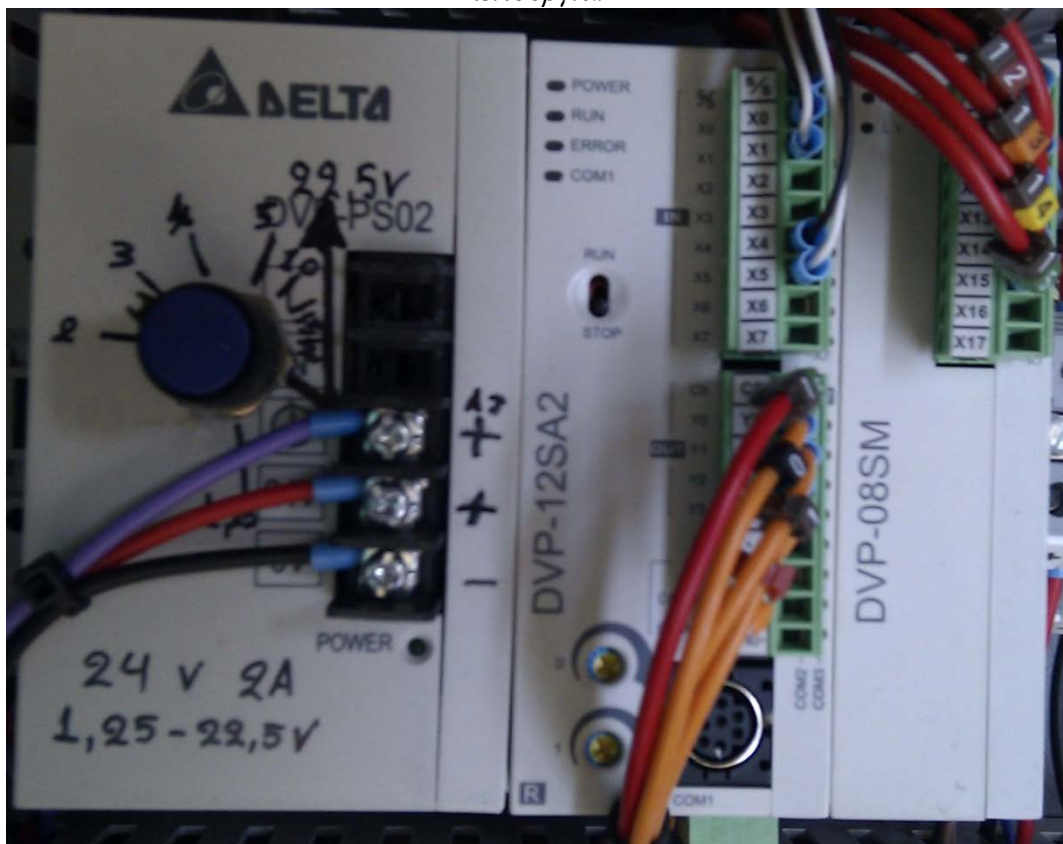
*Εικόνα 6.20: Ολοκληρωμένο το σύστημα κίνησης δύο αξόνων.*



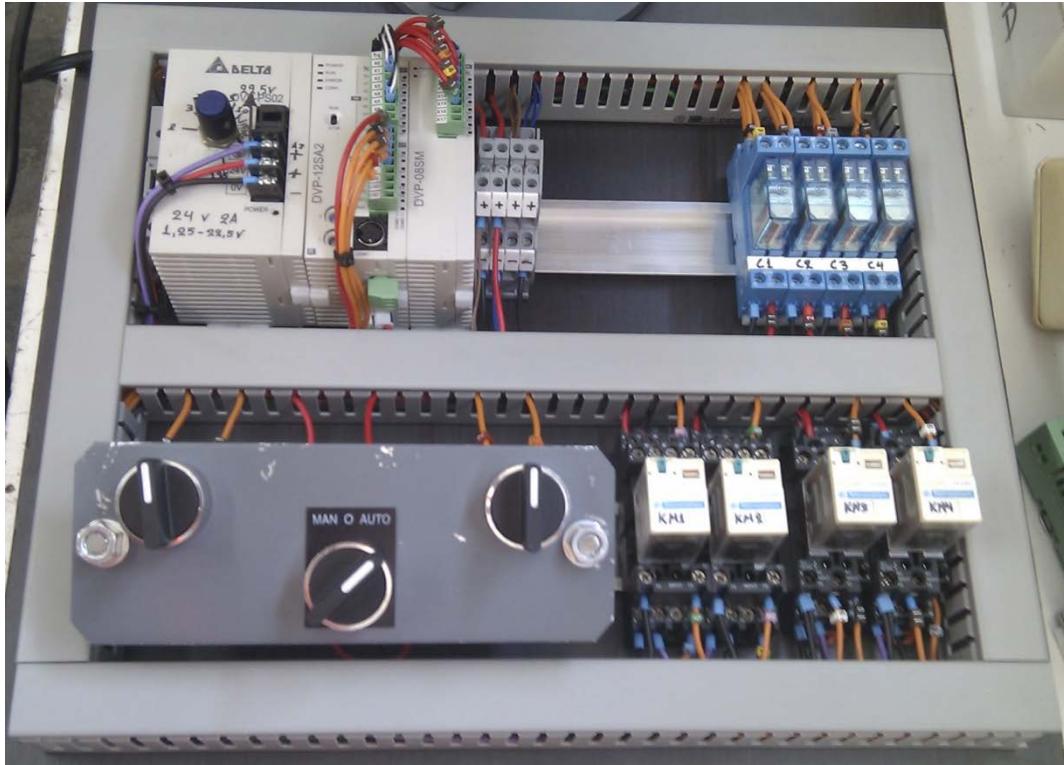
*Εικόνα 6.21: Ηλεκτρονόμοι υπεύθυνοι για την κίνηση των μοτέρ.*



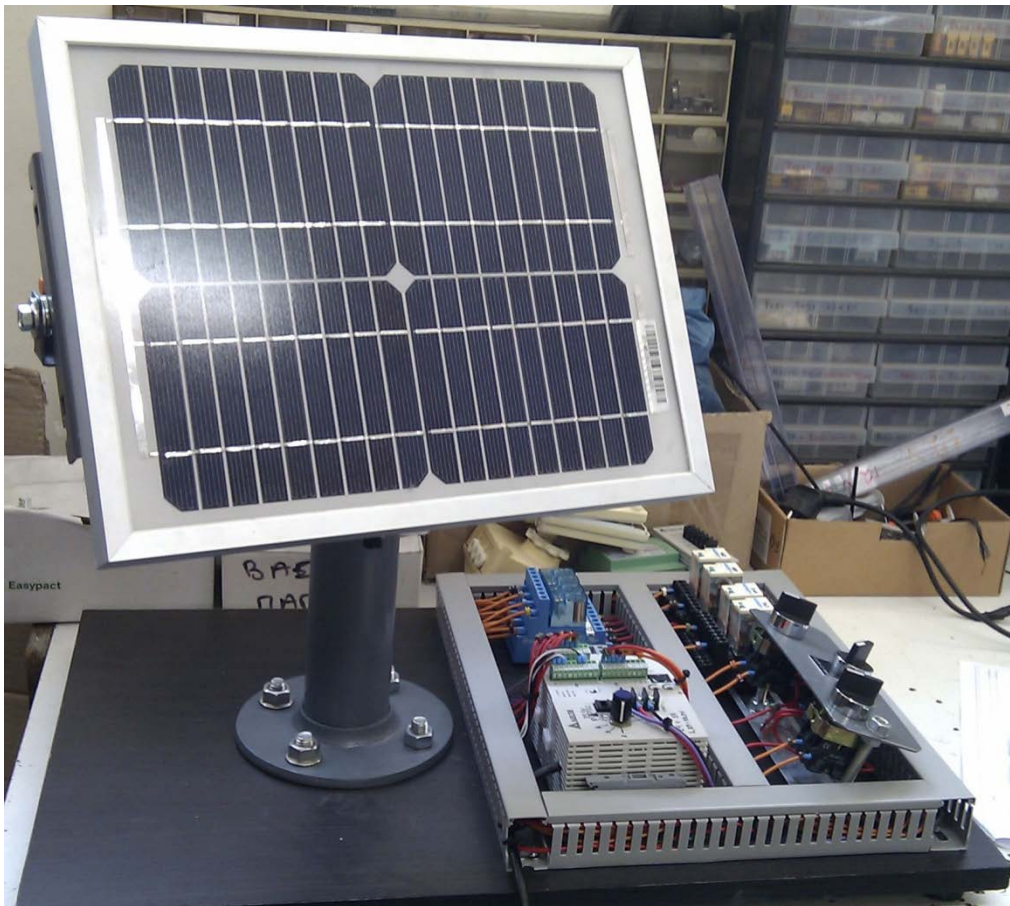
Εικόνα 6.22: Βοηθητικοί ηλεκτρονόμοι για τον τερματισμό του πάνελ στην χειροκίνητη λειτουργία.



Εικόνα 6.23: Ολοκληρωμένη καλωδίωση του PLC.



*Εικόνα 6.24: Πίνακας αυτοματισμού για τον αυτόματο και χειροκίνητο έλεγχο του συστήματος κίνησης.*



*Εικόνα 6.25: Τελική εικόνα κατασκευής solar tracker.*



## 6.4 Περιγραφή του προγράμματος

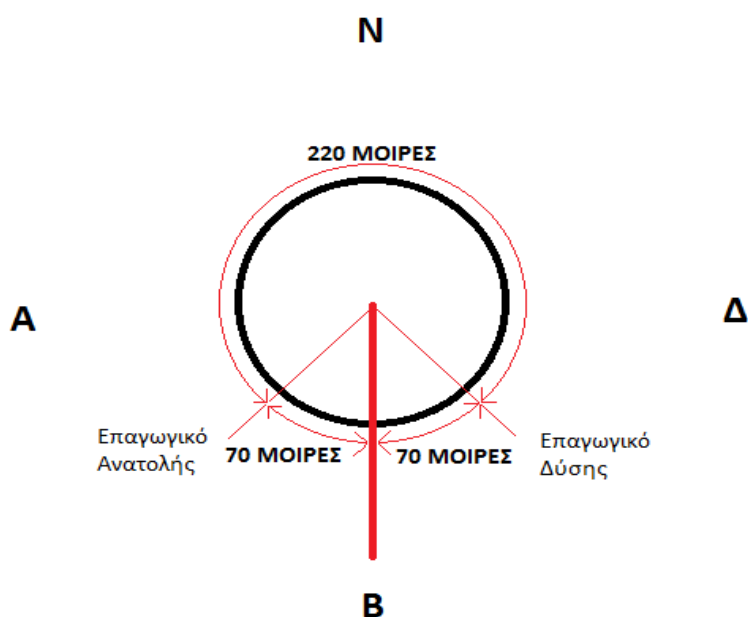
Για τον αυτόματο έλεγχο του Φ/Β tracker χρησιμοποιήσαμε ειδικό PLC (Εικόνα 6.23) που δέχεται γωνίες αζιμούθιου και ζενίθ και έχει και ενσωματωμένο ρολόι και μπαταρία για να μην χάνει την ώρα όταν κοπεί η τροφοδοσία του. Οι αρχικές συνθήκες του πάνελ είναι τέρμα ανατολή και τέρμα πάνω.

Ξεκινώντας την λειτουργία της μονάδας θέτουμε το χρόνο δειγματοληψίας, το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της περιοχής που βρισκόμαστε και τέλος την ημερομηνία και την ώρα Γκρήνουιτς. Για παράδειγμα αν ο χρόνος δειγματοληψίας ορισθεί 10 min, τότε το Φ/Β πλαίσιο ανά δέκα λεπτά θα κινείται προς τη δύση βρίσκοντας την ακριβή γωνία αζιμούθιο και ζενίθ που βρίσκεται ο ήλιος τη συγκεκριμένη ώρα, ημέρα και ημερομηνία στη συγκεκριμένη περιοχή.

Όταν το πάνελ κινείται, ταυτόχρονα περιστρέφονται και τα encoder δίνοντας παλμούς στο PLC, οι οποίοι μεταφράζονται σε γωνίες για να γνωρίζουμε την ακριβή θέση του πάνελ. Το πάνελ μπορεί να κινείται ανάμεσα στους τερματικούς διακόπτες ανατολής-δύσης και πάνω-κάτω. Μετά τη δύση του ηλίου το πάνελ έχει προγραμματιστεί να λαμβάνει με την βοήθεια των τερματικών (επαγωγικοί διακόπτες) τις αρχικές συνθήκες όπως έχουν ορισθεί παραπάνω. Στην συγκεκριμένη θέση παραμένει μέχρι την ανατολή του ηλίου για να ξεκινήσει πάλι τη λειτουργία του.

Στο PLC θέσαμε ως εισόδους όλα τα τερματικά (επαγωγικούς διακόπτες), τους παλμούς από το encoder, το ανεμόμετρο, την έξοδο του ελεγκτή θερμοκρασίας και την είσοδο από τον διακόπτη auto. Επίσης υπάρχουν τέσσερις εξοδοί (+24V) που τροφοδοτούν τα πηνία των τεσσάρων ρελέ που είναι υπεύθυνα για τις κινήσεις πάνω-κάτω, ανατολή-δύση (Εικόνα 6.5).

Ο επαγωγικός διακόπτης της ανατολής τοποθετήθηκε σε γωνία 70 μοίρες από το βορρά προς την ανατολή, ενώ ο επαγωγικός διακόπτης της δύσης σε γωνία 70 μοίρες από το βορρά προς τη δύση. Άρα η διαδρομή που κάνει το tracker είναι 220 μοίρες όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχεδιάγραμμα.



Η διαδρομή που κάνει το πλαίσιο από πάνω έως κάτω είναι 50 μοίρες. Για να γνωρίζουμε την ακριβή θέση του τράκερ κάνουμε την κίνηση χειροκίνητα από ανατολή έως δύση και από πάνω έως κάτω και μετράμε τις περιστροφές που κάνουν τα encoder. Ο υπολογισμός της γωνίας περιστροφής ανά παλμό έγινε ως εξής :

Για την κίνηση ανατολή-δύση μετρήσαμε 1,25 περιστροφές του άξονα του encoder, αυτό αντιστοιχεί σε  $1,25 * 100$  παλμοί που είναι η κάθε περιστροφή άρα είναι 125 παλμοί. Η διαδρομή που κάνει είναι : 220 μοίρες, άρα  $220 \text{ μοίρες} / 125 \text{ παλμούς} = 1,76 \text{ μοίρες}$  ( 1 παλμός = 1,76 μοίρες). Η κίνηση πάνω – κάτω είναι 50 μοίρες και ο λόγος του encoder 1:1, επομένως έχουμε 50 μοίρες/ 13,8 παλμούς, δηλαδή ο ένας παλμός αντιστοιχεί σε 3,6 μοίρες.

Όπως προαναφέρθηκε κατά την πρώτη λειτουργία του προγράμματος θέτουμε το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της περιοχής που βρισκόμαστε, την ημερομηνία και την ώρα Γκρήνουιτς και τέλος το χρόνο δειγματοληψίας. Μόλις δοθούν τα παραπάνω στοιχεία το πάνελ ξεκινάει να κινείται μέχρι να βρει τη σωστή θέση από το πρόγραμμα. Η σωστή θέση βρίσκεται από το πρόγραμμα μέσω της σύγκρισης της επιθυμητής τιμής και της πραγματικής θέσης που υπολογίζεται από τα στοιχεία που δίνουν οι encoder. Επειδή η κίνηση που κάνει ο ήλιος είναι πολύ αργή, ορίζουμε συνήθως τον χρόνο που θα κινείται το πάνελ (χρόνος δειγματοληψίας) περίπου στα 10 λεπτά.

Συνεπώς με την τοποθέτηση του διακόπτη στην θέση auto ξεκινάει η λειτουργία του προγράμματος και το τράκερ βρίσκει την θέση του για την συγκεκριμένη χρονική στιγμή και σταματά. Η επόμενη κίνηση του θα είναι όσο χρόνο έχουμε δώσει δειγματοληψία. Για να μην λειτουργεί το σύστημα τις νυκτερινές ώρες, καθώς και για να μεταβεί το πάνελ στην αρχική του θέση (ανατολή του ηλίου) ορίζουμε μια ώρα που θα σταματάει η λειτουργία του προγράμματος ( π.χ. 10 μ.μ. που καμία ημέρα του χρόνου δεν έχει ήλιο εκείνη την ώρα) και το τράκερ θα πάει στις αρχικές συνθήκες, δηλαδή ανατολή και πάνω, όπου περιμένει μέχρι το επόμενο πρωί για να ξεκινήσει πάλι την λειτουργία του. Σε περίπτωση δυνατού αέρα έχουμε ανεμόμετρο που όταν δώσει σήμα το πάνελ οριζοντιώνεται για να μην σπάσει η κατασκευή. Σε περίπτωση υψηλής θερμοκρασίας των πάνελ έχουμε ελεγκτή θερμοκρασίας που τον ρυθμίζουμε και μας δίνει έξοδο πάνω από  $60^{\circ}\text{C}$  και πηγαίνει το πάνελ προς ανατολή.

## Βιβλιογραφία:

- Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, "Φωτοβολταϊκά Συστήματα", Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2007.
- ΣΕΝΕΡΣ ΕΠΕ "Ένας Πρακτικός οδηγός για Φωτοβολταϊκά", ΕΚΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 2007 που πραγματοποιήθηκε στην Αθήνα
- Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις του Σταμάτη Δ.Πέρδιου Β' Έκδοση ΤΣΕΛΚΑ-4Μ ΕΚΔΟΤΙΚΗ
- Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία του Κ. Καγκαράκη, Εκδόσεις Συμμετρία
- Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Από Ανανεώσιμες Πηγές, Μ.Π.Παπαδόπουλος , Εκδόσεις ΕΜΠ, 1997

## Από internet :

- [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
- [www.photovoltaiacs.com](http://www.photovoltaiacs.com)
- <http://energypoint.gr>
- [www.texnikoi.gr](http://www.texnikoi.gr)
- [www.michanikos.gr](http://www.michanikos.gr)