



# Ενέργεια από Φωτοβολταϊκά

## Εφαρμογή σε μοντέλο σιδηροδρόμου

Επιβλέπων Καθηγητής :  
Δρ. Κολοκοτσά Διονυσία  
Επίκουρος Καθηγήτρια



Επιμέλεια Πτυχιακής Χρήστος  
Πετρόχειλος

Τίτλος Πτυχιακής: “ Ενέργεια από Φωτοβολταϊκά  
Εφαρμογή σε μοντέλο σιδηροδρόμου ”

Επιμέλεια Πτυχιακής Χρήστος Πετρόχειλος  
Ιδιότητα Φοιτητής  
Τεχνολογικό Ίδρυμα Κρήτης  
Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος  
Τόπος εκπόνησης : Κ.Α.Π.Ε (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών  
Ενέργειας)  
Έτος : 2005

Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. Κολοκοτσά Διονυσία  
Επίκουρος Καθηγήτρια

## **Ευχαριστίες**

*Στον Δρ. Χρήστο Πρωτογερόπουλο για την συνεχή υποστήριξη, τις πολύτιμες συμβουλές του , την καθοδήγησή του και την εμπιστοσύνη του.*

*Στους Δρ. Κολοκοτσά Διονυσία, Δρ Αριστομένη Αντωνιάδη για την καθοδήγησή τους στην πραγματοποίηση αυτής της πτυχιακής εργασίας και την άψογη συνεργασία τους.*

*Στο Κ.Α.Π.Ε (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας) για την παροχή χώρου που χρειάστηκα για την κατασκευή της μακέτας.*

*Στην Δρ. Φανή Καλαϊτζή για την πολύτιμη βοήθεια της πάνω στο προγραμματισμό.*

*Στον Σπουδαστή του Τ.Ε.Ι Μηχανολογίας Παναγίωτη Πετρόχειλο για την πολύτιμη βοήθεια του πάνω στην κατασκευή της μακέτας*

*Στην οικογένεια μου για την συμπαράστασή της κατά όλη την διάρκεια της πτυχιακής εργασίας.*

## Περιεχόμενα

1.	Ηλεκτρισμός από τον Ήλιο	3
1.1.	Γιατί χρειαζόμαστε τα φωτοβολταϊκά στοιχεία	3
2.	Ηλιακή Ακτινοβολία	6
2.1.	Εισαγωγή	6
2.2.	Ενέργεια από τον ήλιο	7
2.2.1.	Εισαγωγή	7
2.2.2.	Λίγη αστρονομία	11
2.2.3.	Ακτινοβολία πάνω σε κεκλιμένη επιφάνεια	13
3.	Ηλιακά Στοιχεία	17
3.1.	Εισαγωγή	17
3.2.	Τι είναι τα ηλιακά στοιχεία	17
3.3.	Πως εργάζονται τα ηλιακά στοιχεία	18
3.3.1.	Εισαγωγή	18
3.3.2.	Ηλεκτρονική δομή των ημιαγωγών	18
3.3.3.	Το ηλιακό ηλεκτρικό στοιχείο	26
3.3.4.	Τυπικές δομές διάταξης	29
4.	Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία	37
4.1.	Εισαγωγή	38
4.2.	Δομή ενός φωτοβολταϊκού συστήματος	39
4.3.	Η Φωτοβολταϊκή γεννήτρια	40
4.3.1.	Εισαγωγή	40
4.3.2.	Φωτοβολταϊκές βασικές μονάδες	40
4.3.3.	Εσωτερική σύνδεση των Φ.Β. βασικών μονάδων	45
4.3.4.	Συλλογή του ηλιακού φωτός	47
4.4.	Αποθήκευση ενέργειας	48
4.4.1.	Εισαγωγή	48
4.4.2.	Λειτουργία μπαταρίας μέσα στα Φ.Β. Συστήματα	48
4.4.3.	Μπαταρίες μολύβδου-οξέος	49
4.5.	Καθορισμός ισχύος και έλεγχος	52
4.5.1.	Δίοδος φραγής	52
4.5.2.	Αυτορυθμιζόμενα συστήματα	53
4.5.3.	Ρυθμιστής φόρτισης	54

4.5.4.	Μετατροπέας DC/DC	54
4.5.5.	Μετατροπέας (αναστροφέας) DC/AC	55
5.	Μακέτα	56
5.1.	Τεχνικά Χαρακτηριστικά	56
5.2.	Κατασκευή μακέτας	60
6.	Προσομοίωση	66
7.	Αποτελέσματα	69
8.	Συμπεράσματα	75
9.	Summary	77
10.	Παράρτημα 1	78
11.	Βιβλιογραφία	81

# 1. Ηλεκτρισμός από τον Ήλιο

## 1.1. Γιατί χρειαζόμαστε τα φωτοβολταϊκά στοιχεία

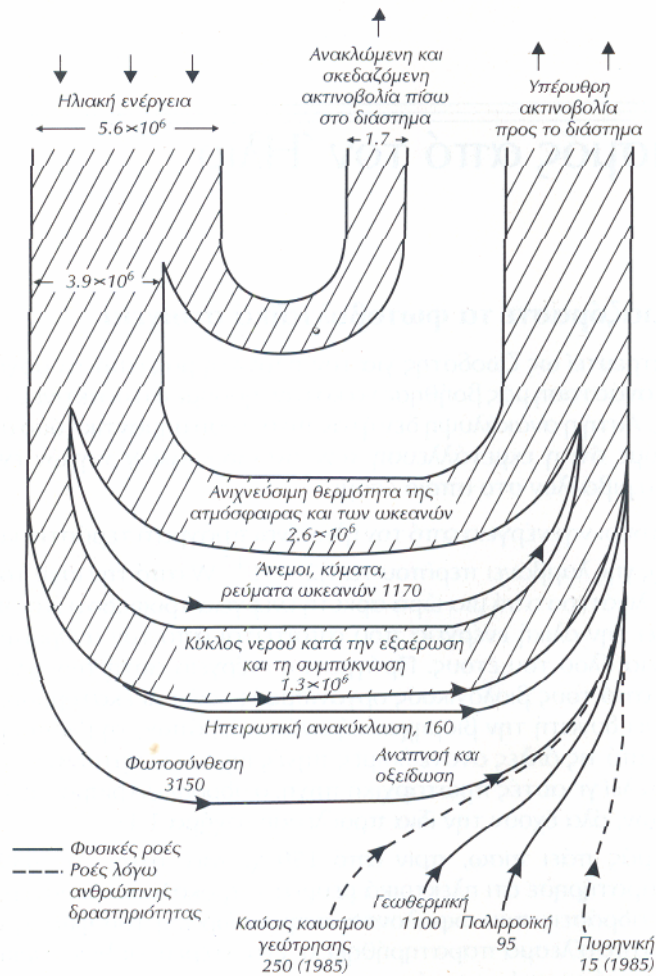
Ο ήλιος έχει λατρευτεί ως ζωοδότης για τον πλανήτη μας από τα αρχαία χρόνια. Η βιομηχανική επανάσταση μάς βοήθησε να κατανοήσουμε ότι οι ακτίνες του ήλιου είναι πηγή ενέργειας. Αυτή η ανακάλυψη δεν ήταν ποτέ τόσο σημαντική όσο σήμερα καθώς συνειδητοποιούμε ότι η εκμετάλλευση των παραδοσιακών πηγών ενέργειας ίσως επηρεάσει το περιβάλλον στο οποίο ζούμε.

Η τροφοδοτούμενη ενέργεια από τον ήλιο είναι πράγματι τεράστια κατά μέσο όρο, η επιφάνεια της γης λαμβάνει περίπου τα  $1.2 \times 10^{17}$  W από την ισχύ του ήλιου. Αυτό σημαίνει ότι σε λιγότερο από μια ώρα αρκετή ενέργεια τροφοδοτείται προς τη γη για να ικανοποιήσει την ολική ενέργεια που απαιτείται από τον ανθρώπινο πληθυσμό κατά τη διάρκεια όλου του έτους. Πράγματι η ενέργεια αυτή των ηλιακών ακτίνων αφομοιώνεται από τους βιολογικούς οργανισμούς εδώ και εκατομμύρια χρόνια έχοντας καταστήσει δυνατή την βιομηχανική ανάπτυξη όπως τη βλέπουμε σήμερα. Οι περισσότερες από τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ισχύος εξαρτώνται επίσης από τον ήλιο, που αποτελεί γι' αυτές πρωταρχική πηγή, ο υδροηλεκτρισμός, η ισχύς του αέρα και των κυμάτων, όλα έχουν την ίδια προέλευση (Σχήμα 1-1).

Η ιστορία μάς πάει πίσω, πριν από 150 χρόνια, όταν το 1839 ο EDMUND BECQUEREL παρατήρησε ότι ηλεκτρικά ρεύματα προκαλούνται ύστερα από ορισμένες χημικές αντιδράσεις που οφείλονται στην επίδραση του φωτός (Πίνακας 1-1). Ένα παρόμοιο αποτέλεσμα παρατηρήθηκε σ' ένα στερεό (σελήνιο) αρκετές δεκαετίες αργότερα. Η μερική αρχικά κατανόηση αυτών των φαινομένων, έπρεπε να περιμένει πρόοδο της επιστήμης προς την κβαντική θεωρία στις αρχές αυτού του αιώνα. Η ανάπτυξη των πρώτων διατάξεων στερεάς κατάστασης στη δεκαετία του σαράντα άνοιξε τον δρόμο προς την αναγγελία ενός ηλιακού ηλεκτρικού στοιχείου πυριτίου με 6% απόδοση (Charin K 1954) - Το πρώτο χρησιμοποιήσιμο ηλιακό στοιχείο.

Τα ηλιακά ηλεκτρικά στοιχεία δεν χρειάστηκε να περιμένουν πολύ για να βρουν εφαρμογή. Το 1958 γίναμε μάρτυρες της εκτόξευσης του VANGUARD 1 του πρώτου δορυφόρου που χρησιμοποίησε ηλεκτρισμό από τον ήλιο. Η τεχνολογία από τότε έχει αναπτυχθεί σημαντικά. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στον ηλιακό ηλεκτρισμό εκδηλώθηκε συγκεκριμένα σε περιόδους κρίσης των πετρελαίων, στην πρόσφατη δεκαετία του εβδομήντα. Σήμερα, η άμεση μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρισμό χάρη στα φωτοβολταϊκά στοιχεία αρχίζει να γίνεται αποδεκτή ως μια σημαντική μορφή παραγωγής ισχύος.

Περισσότερα από 50 megawatts ισχύος παρήχθησαν το 1991 με φωτοβολταϊκές μονάδες (σχήμα 1.2). Η αναλογία παραγωγής έχει αυξηθεί σχεδόν στο 20% ετησίως, κατά τα τελευταία χρόνια και αυτή η τάση είναι πιθανό να συνεχιστεί. Μια μετριοπαθής εκτίμηση ανεβάζει την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών μονάδων σε εκατοντάδες megawatts, προς το τέλος του αιώνα, και σε μερικά gigawatts στα επόμενα 40 - 50 χρόνια.



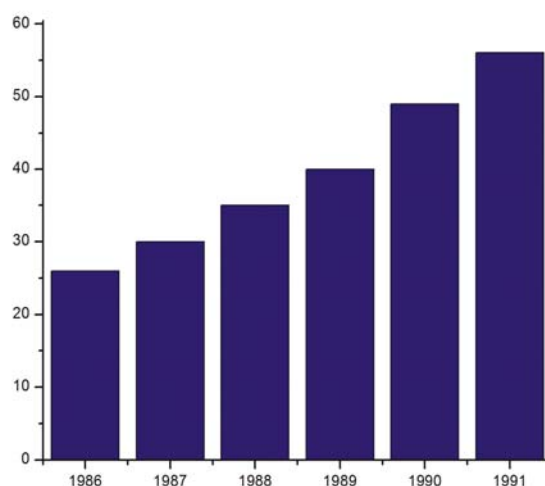
Σχήμα 1-1 Ενεργειακό ισοζύγιο της Γης

Πίνακας 1-1 Μερικές ημερομηνίες σχετικές με τη μετατροπή της φωτοβολταϊκής ηλιακής ενέργειας.

- 1839 Ο BECQUEREL ανακαλύπτει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο
- 1876 Οι ADAMS και DAY παρατηρούν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο στο σελήνιο
- 1900 Ο PLANCK διατυπώνει το αξίωμα της κβαντικής φύσης του φωτός
- 1930 Προτείνεται η κβαντική θεωρία των στερών από τον WILSON
- 1940 Οι MOT και SCHOPKY διατυπώνουν τη θεωρία του ανορθωτού στερεάς κατάστασης (διόδου)
- 1949 Οι BARDEEN, BRAIPAIN και SCHOCKLEY εφευρίσκουν το τρανζίστορ
- 1954 Οι CHAPIN, FULLER και PEARSON αναγγέλλουν 6% απόδοση για το ηλιακό στοιχείο πυριτίου.
- 1954 Οι REYNOLDS et al αναφέρουν την κατασκευή ηλιακού στοιχείου βασισμένου στο θειούχο κάδμιο.
- 1958 Πρώτη χρήση ηλιακού ηλεκτρικού στοιχείου πάνω στον δορυφόρο τροχιάς VANGUARD 1

Σύμφωνα με τις σημειώσεις παραδόσεων που έδωσαν οι P. T. LANDSBERG και F. C. TREBLE στο μικρής διάρκειας του Σαουθάμπτον πάνω στη μετατροπή και τις εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας.

Παγκόσμιες P<sub>v</sub> μονάδες (MWp)



Σχήμα 1-2 Παγκόσμιες πωλήσεις φωτοβολταϊκών μονάδων (σε MWp).

Η παραγωγή της φωτοβολταϊκής ισχύος είναι αξιόπιστη, δεν εμπλέκει κινητά τμήματα και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι πολύ μικρό. Η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι αθόρυβη και δεν δημιουργεί ατμοσφαιρική ρύπανση. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν εύκολα. Η ισχύς μπορεί να παραχθεί όπου απαιτείται, χωρίς να υπάρχει ανάγκη ξεχωριστών γραμμών μεταφοράς.

Υπάρχει ήδη ένας αριθμός επίγειων εφαρμογών σήμερα, που τα φωτοβολταϊκά παρέχουν ένα αξιόπιστο μέσο παραγωγής ισχύος. Πολλές από αυτές τις εγκαταστάσεις λειτουργούν σε θέσεις, που άλλα μέσα ηλεκτρικής τροφοδοσίας θα ήταν ανεπαρκή, παρέχοντας σημαντικά κοινωνικά πλεονεκτήματα στις επαρχιακές κοινότητες σε όλο τον κόσμο.

Ο ηλιακός ηλεκτρισμός έχει προς το παρόν ένα κύριο μειονέκτημα και αυτό είναι η υψηλή τιμή της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Παρά ταύτα καθώς η παραγωγή τμημάτων συνεχίζει να αυξάνεται και η έρευνα φέρνει νέες εξελίξεις, η επίδραση των φωτοβολταϊκών στην παραγωγή ισχύος έχει αρχίσει να αυξάνεται με ταχύτερους ρυθμούς. Η οικονομική σύγκριση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας είναι σίγουρο ότι ενισχύεται περαιτέρω καθώς το περιβαλλοντικό και κοινωνικό κόστος της παραγωγής ισχύος συμπεριλαμβάνονται μέσα στο σχήμα.

### Περίληψη Κεφαλαίου

Σκιαγραφείτε η ιστορία, η παρούσα κατάσταση και το μέλλον των φωτοβολταϊκών.



## 2. Ηλιακή Ακτινοβολία

Σύμβολα και μονάδες μέτρησης

- B** Ημερήσια ακτινοβολία δέσμης πάνω σ' ένα οριζόντιο  $J/m^2$  επίπεδο (μέση μηνιαία)
- B ( $\beta$ )** Ημερήσια ακτινοβολία δέσμης πάνω σ' ένα επίπεδο  $J/m^2$  υπό γωνία  $\beta$  (μέση μηνιαία)
- B<sub>o</sub>** Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία πάνω σε οριζόντιο  $J/m^2$  επίπεδο
- D** Ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία πάνω σ' ένα οριζόντιο επίπεδο  $J/m^2$  (μέση μηνιαία)
- D( $\beta$ )** Ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία πάνω σ' ένα επίπεδο  $J/m^2$  γωνία  $\beta$  (μέση μηνιαία)
- G** Ημερήσια παγκόσμια ακτινοβολία πάνω σ' ένα οριζόντιο επίπεδο  $J/m^2$  (μέση μηνιαία)
- G( $\beta$ )** Ημερήσια παγκόσμια ακτινοβολία πάνω σ' ένα οριζόντιο επίπεδο  $J/m^2$  υπό γωνία  $\beta$  (μέση μηνιαία)
- S** Ηλιακή σταθερά
- KT** Δείκτης διαφάνειας
- R ( $\beta$ )** Ημερήσια ανακλώμενη ακτινοβολία από το έδαφος  $J/m^2$  σε επίπεδο υπό γωνία  $\beta$
- $\alpha$**  Ηλιακή ανύψωση
- B** Κλίση κατόπτρου προς το οριζόντιο πεδίο
- $\delta$**  Ηλιακή απόκλιση
- $\Theta_z$**  Γωνία ζενίθ
- $\lambda$**  Μήκος κύματος
- $\Phi$**  Γεωγραφικό πλάτος
- $\rho$**  Ανακλαστικότητα του εδάφους Αζιμούθιο
- $\omega$**  Ωριαία γωνία
- $\omega_s$**  Ωριαία γωνία ανατολής ηλίου Ακτινοβολία  
Φασματική ακτινοβολία

*Για να μετατρέψετε μια ποσότητα που δίνεται σε  $Wh/m^2$  σε  $J/m^2$  θα πρέπει να την πολλαπλασιάσετε με το 3.600.*

### 2.1. Εισαγωγή

Η σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζεται πάνω σ' έναν προσεκτικό υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Παρ' όλο που η ηλιακή ακτινοβολία έχει ήδη καταγραφεί σε διάφορες τοποθεσίες σε ολόκληρο τον κόσμο, πρέπει να αναλυθεί και να επεξεργαστεί πριν πραγματοποιηθεί ένας ακριβής υπολογισμός της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας για το φωτοβολταϊκό σύστημα που θα δημιουργηθεί.

Αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στη γη και περιγράφει τους υπολογισμούς οι οποίοι πρέπει να γίνουν σε γενικές γραμμές και οι οποίοι πρέπει να εκτελεστούν για να καθοριστεί η ποσότητα της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στις βασικές μονάδες ΦΒ.

Αρχικά θα παρουσιαστούν διαφορετικές συνιστώσες της ακτινοβολίας και θα αναπτυχθεί ένας ευρύς υπολογισμός της παγκόσμιας διαθεσιμότητας της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η αστρονομική σχέση μεταξύ του ήλιου και της γης θα περιγραφεί στη συνέχεια. Θα ορίσουμε τα σχετικά μεγέθη, με τα οποία χαρακτηρίζεται η φαινόμενη κίνηση του ήλιου.

Τελικά παρατηρούμε καλύτερα τη διαδικασία που καθιστά δυνατό τον προσδιορισμό της διαθέσιμης ποσότητας της ακτινοβολίας στις μονάδες ΦΒ, σε μια θέση με κλίση χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε μια οριζόντια επιφάνεια.

## 2.2. Ενέργεια από τον ήλιο

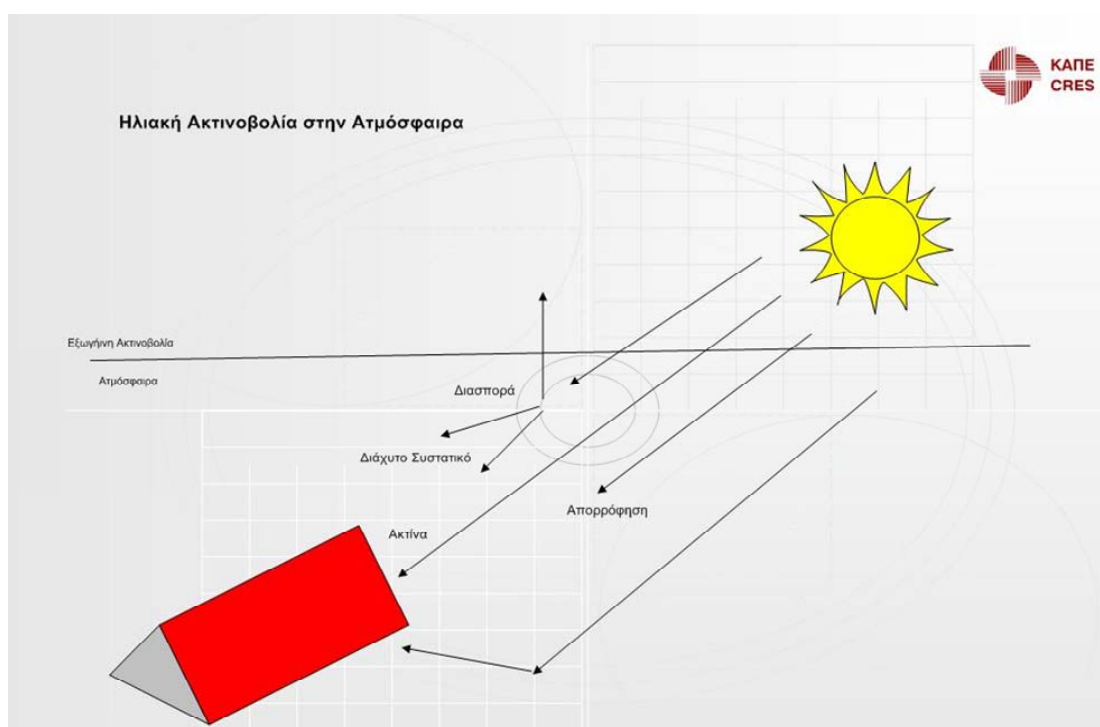
### 2.2.1. Εισαγωγή

Με μια καλή προσέγγιση, ο ήλιος ενεργεί ως μια τέλεια πηγή ακτινοβολίας (μέλαν σώμα) σε μια θερμοκρασία κοντά στους 5.800 Κ. Η προσπίπτουσα (κατά μέσο όρο) ροή ενέργειας πάνω σε μια μονάδα επιφάνειας κάθετη προς τη διεύθυνση της δέσμης έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα είναι γνωστή ως η ηλιακή σταθερά:

$$S = 1367\text{W/m}^2 \quad (2.1)$$

Γενικότερα, η ολική ισχύς από μια πηγή ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στη μονάδα επιφάνειας ονομάζεται **ένταση ακτινοβολίας**.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα (Σχήμα 2-1) ένα μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας αναιρείται λόγω της σκέδασης ή της απορρόφησης από τα μόρια του αέρα, τα σύννεφα και το υλικό που συνήθως αναφέρεται ως αερολύματα (aerosols).

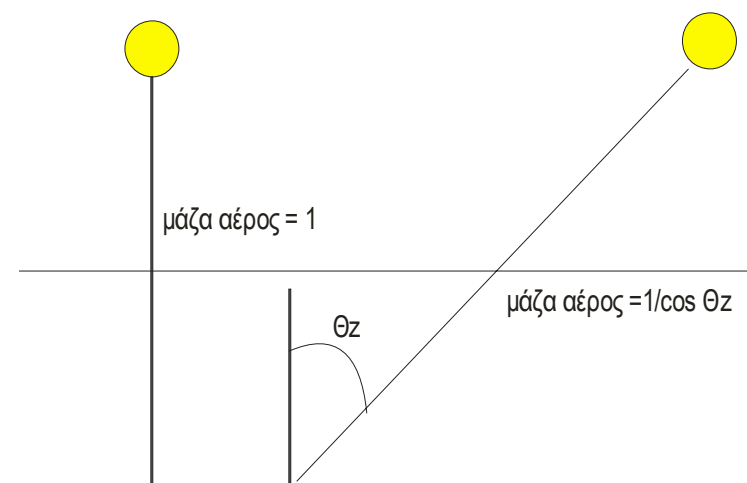


Σχήμα 2-1 Ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα.

Η ακτινοβολία, η οποία δεν ανακλάται ή διασκορπίζεται και προσεγγίζει την επιφάνεια της γης άμεσα σε ευθεία γραμμή από τον ηλιακό δίσκο, ονομάζεται άμεση ή ακτινοβολία δέσμης. Η διασκορπισμένη ακτινοβολία η οποία προσεγγίζει το έδαφος ονομάζεται διαχεόμενη ακτινοβολία. Κάποια από τις ακτινοβολίες αυτές ίσως προσεγγίσει ένα δέκτη μετά την ανάκλασή της στο έδαφος, οπότε και ονομάζεται ανακλώμενη ισχύς από το έδαφος. Η ολική ακτινοβολία η οποία αποτελείται από αυτά τα τρία στοιχεία ονομάζεται σφαιρική.

Η ποσότητα της ακτινοβολίας η οποία φτάνει στο έδαφος είναι φυσικά άκρως μεταβλητή. Επιπλέον πέρα από την όποια κανονική ημερήσια και ετήσια μεταβολή λόγω της φαινόμενης κίνησης του ήλιου, ακατάστατες μεταβολές (κάλυψη από σύννεφα) προκαλούνται από τις κλιματολογικές συνθήκες καθώς επίσης και τη γενικότερη σύνθεση της ατμόσφαιρας. Γι' αυτό το λόγο, η σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος βασίζεται στη λήψη μετρούμενων δεδομένων που λαμβάνονται κοντά στην τοποθεσία της εγκατάστασης.

Ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την επίδραση της καθαρής ατμόσφαιρας πάνω στο ηλιακό φως είναι η μάζα αέρος (Σχήμα 2-2) ίση προς το σχετικό μήκος της διαδρομής της απευθείας δέσμης διαμέσου της ατμόσφαιρας. Στη διάρκεια μιας ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας στο επίπεδο της θάλασσας, η ακτινοβολία από τον ήλιο, όταν βρίσκεται στο Ζενίθ, αντιστοιχεί σε μάζα αέρος 1 (συντετημένο σε AM 1), σε άλλες περιπτώσεις, η μάζα αέρος είναι κατά προσέγγιση ίση προς το  $1/\cos\theta_z$ , όπου  $\theta_z$  είναι η γωνία του Ζενίθ η οποία θα αναλυθεί περισσότερο στη συνέχεια.

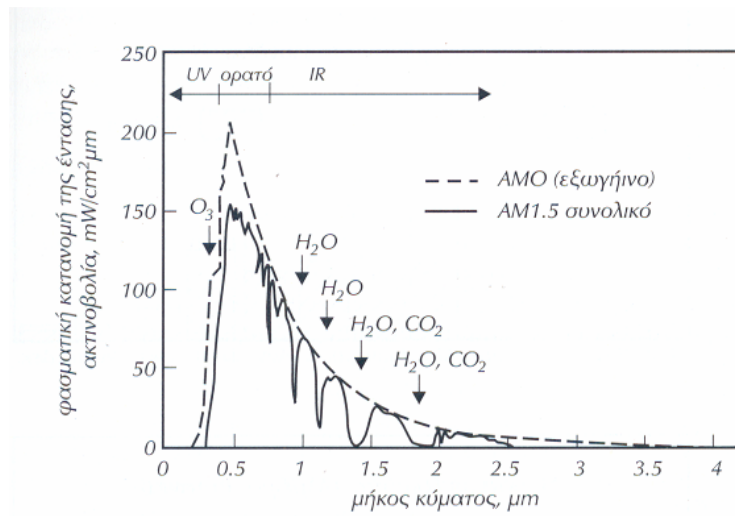


Σχήμα 2-2

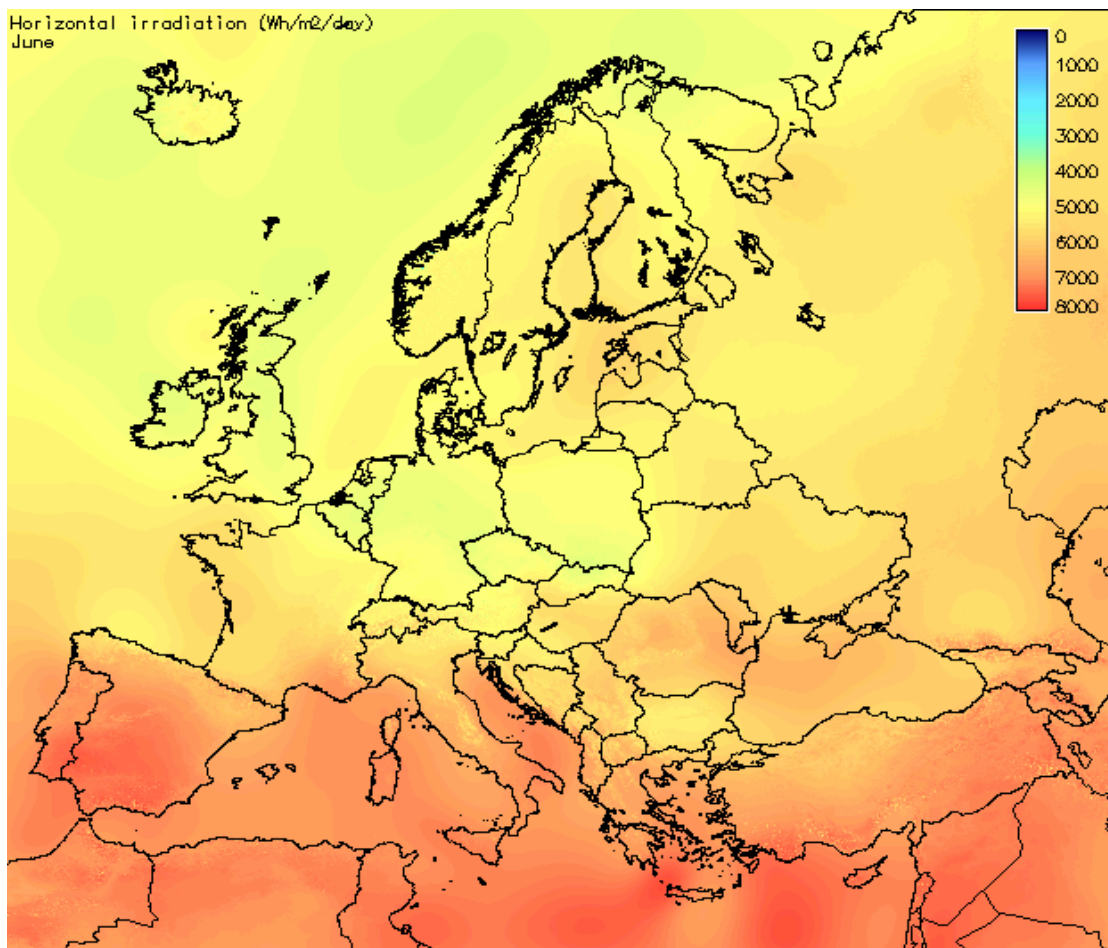
Η επίδραση της ατμόσφαιρας (όπως εκφράζεται από τη μάζα αέρος) πάνω στο ηλιακό φάσμα φαίνεται στο Σχήμα 2-3. Το εξωγήινο φάσμα δηλώνεται ως AMO, αυτό είναι σημαντικό για δορυφορικές εφαρμογές των ηλιακών ηλεκτρικών στοιχείων. Το AM1.5 είναι ένα τυπικό ηλιακό φάσμα πάνω στην επιφάνεια της γης σε μια καθαρή ημέρα, με ολική ένταση του  $1 \text{ KW/m}^2$ , η οποία χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση των ηλιακών ηλεκτρικών στοιχείων και συστημάτων. Στο Σχήμα 2-3 φαίνονται επίσης οι κύριες ζώνες απορρόφησης των μορίων του αέρα.

Μολονότι η ένταση μπορεί να φτάσει την τιμή του  $1 \text{ KW/m}^2$ , η διαθέσιμη ένταση είναι συνήθως σημαντικά μικρότερη απ' αυτή της μέγιστης τιμής λόγω της περιστροφής της γης και των αντίξων καιρικών συνθηκών. Το Σχήμα 2-4 δείχνει τη μέση ετήσια ένταση της ακτινοβολίας σε διαφορετικά μέρη του κόσμου. Η μέγιστη μέση ακτινοβολία σημειώνεται κοντά στο γεωγραφικό πλάτος των τροπικών του Καρκίνου και του Αιγόκερω, ενώ είναι μικρότερη στις περιοχές του ισημερινού λόγω της κάλυψης του από σύννεφα. Σε υψηλότερα

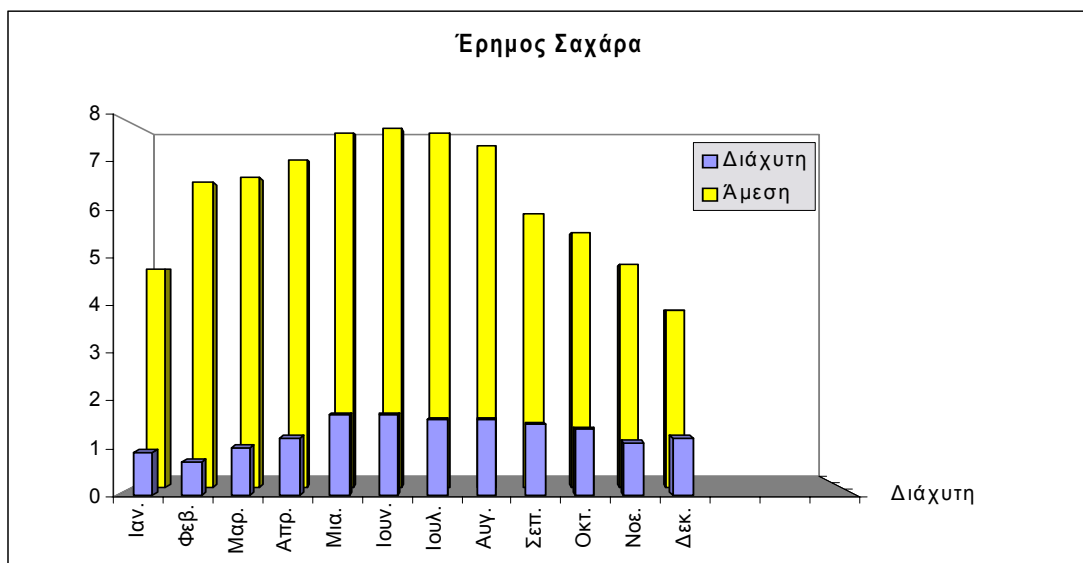
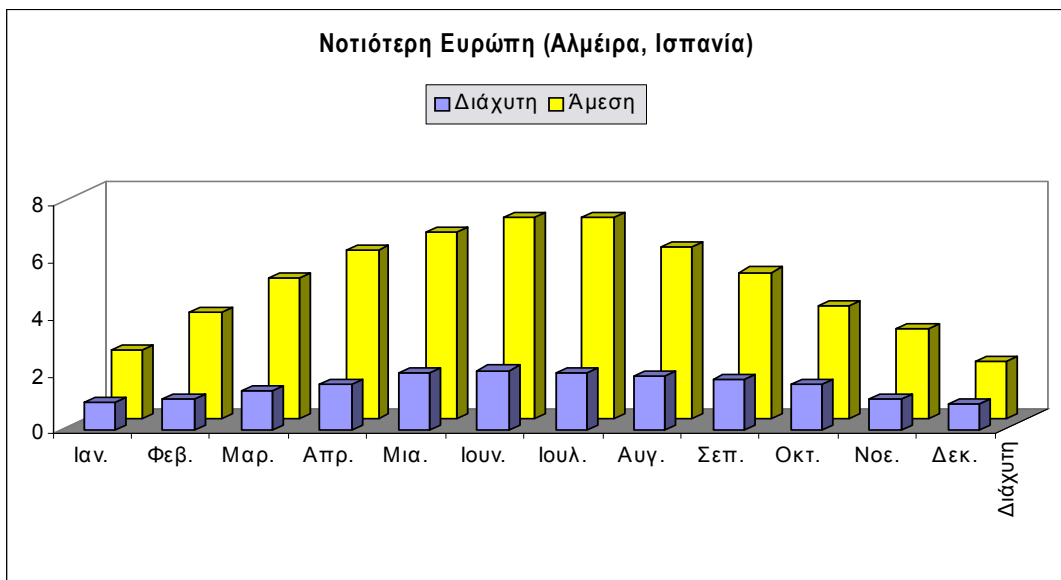
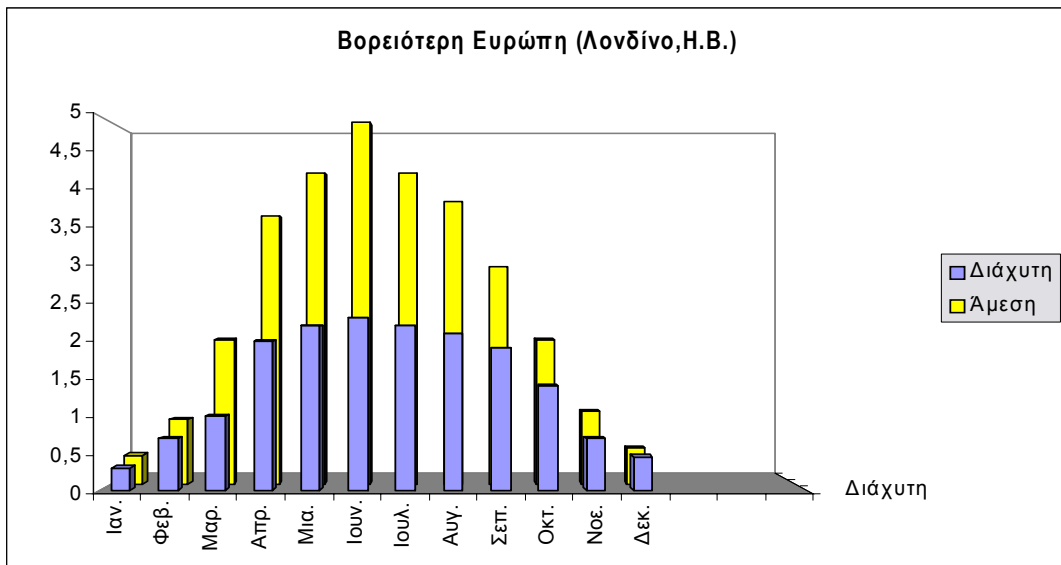
γεωγραφικά πλάτη η ηλιακή ακτινοβολία είναι φυσικά ασθενέστερη λόγω της μικρής ηλιακής ανύψωσης.



Σχήμα 2-3 Το ηλιακό φάσμα.



Σχήμα 2-4 Η μέση ετήσια ακτινοβολία πάνω σ' ένα οριζόντιο επίπεδο (σε W/m2) κατά μήκος του κόσμου

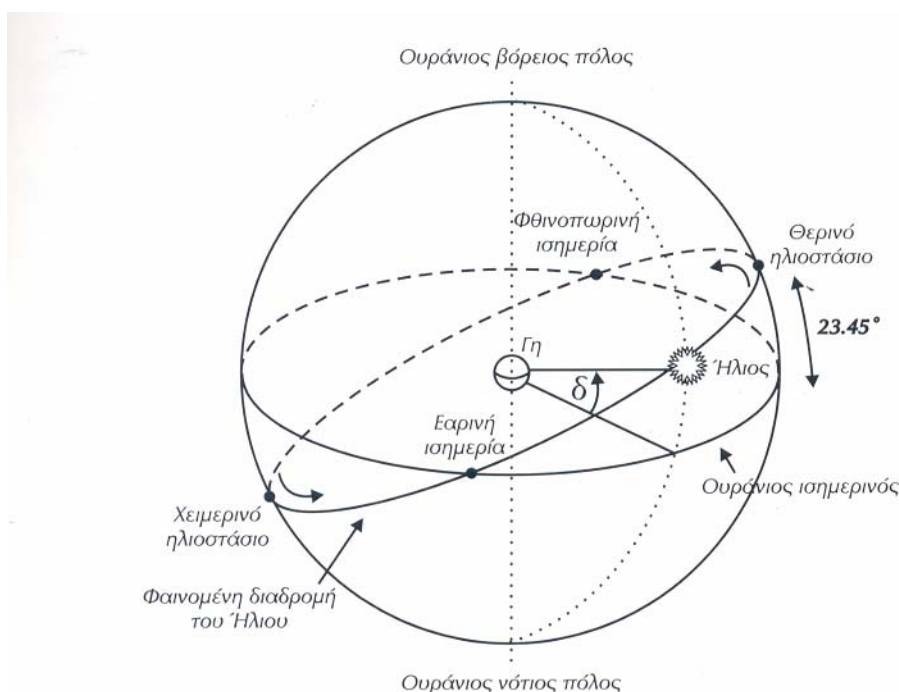


Σχήμα 2-5 Η ετήσια κατανομή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τις γεωγραφικές θέσεις.

Η ένταση της ακτινοβολίας, η ολοκληρωμένη σε μια χρονική περίοδο, ονομάζεται ηλιακή ακτινοβολία. Ιδιαίτερη σημασία για τη σχεδίαση των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει η ακτινοβολία μιας ημέρας. Η ετήσια μεταβολή της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας, τόσο της απ' ευθείας όσο και της διαχεόμενης, πάνω σ' ένα οριζόντιο επίπεδο για τρεις περιοχές, που εκτείνονται από την έρημο της Σαχάρας έως τη βορειότερη Ευρώπη φαίνεται στο Σχήμα 2-5. Σημειώστε ότι η εποχιακή μεταβολή γίνεται περισσότερο προβλέψιμη με την αύξηση του γεωγραφικού πλάτους.

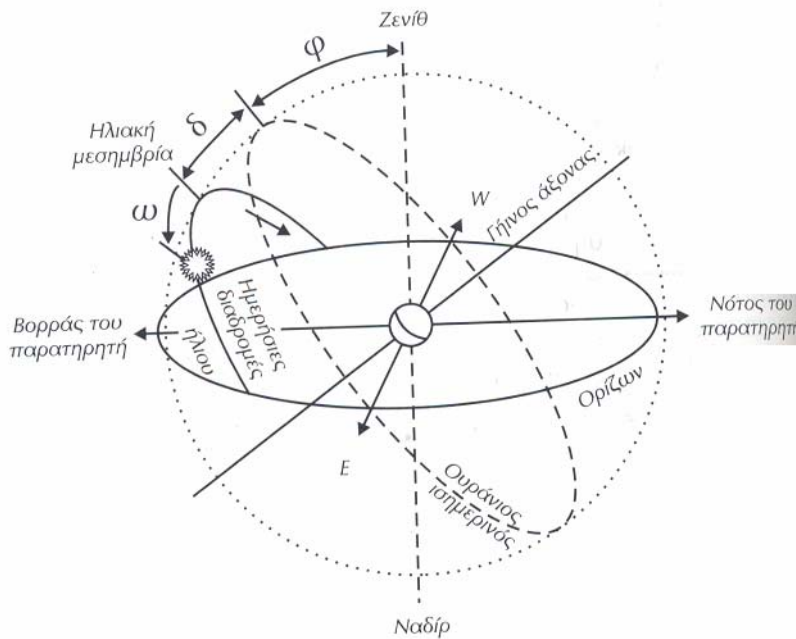
### 2.2.2. Λίγη αστρονομία

Η γη περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο σε μια ελλειπτική τροχιά (που προσεγγίζει πολύ την κυκλική) με τον ήλιο σε μια από τις εστίες της. Το επίπεδο αυτής της τροχιάς ονομάζεται εκλειπτική. Ο χρόνος που απαιτείται για να συμπληρώσει η γη αυτή την τροχιά ορίζεται ως ένα έτος. Η σχετική θέση του ήλιου και της γης για ευκολία παρουσιάζεται υπό την μορφή μιας ουράνιας σφαίρας γύρω από τη γη (Σχήμα 2-6). Το επίπεδο του ισημερινού τέμνει την ουράνια σφαίρα στον ουράνιο ισημερινό και ο πολικός άξονας στους ουράνιους πόλους. Η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο μπορεί τότε να αναπαρασταθεί μέσα από μια φαινομένη κίνηση του ήλιου στην ελλειπτική η οποία είναι κεκλιμένη κατά  $23.45^\circ$  ως προς τον ουράνιο ισημερινό. Η γωνία μεταξύ της γραμμής που συνδέει τα κέντρα του ήλιου και της γης και του επιπέδου του (σημερινού ονομάζεται ηλιακή απόκλιση και δηλώνεται ως  $\delta$ .



Σχήμα 2-6 Η ουράνια σφαίρα με τη φαινομένη ετήσια κίνηση του ήλιου.

Αυτή η γωνία είναι μηδέν κατά τις Ισημερίες : τη φθινοπωρινή (22/23 Σεπτεμβρίου) και την εαρινή (20/21 Μαρτίου). Αυτές τις ημέρες ο ήλιος ανατέλλει ακριβώς από την ανατολή και δύει ακριβώς στη δύση. Κατά το θερινό ηλιοστάσιο (21/22 Ιουνίου) η γωνία είναι  $\delta = 23.45^\circ$  και κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (21/23 Δεκεμβρίου)  $\delta = -23.45^\circ$



**Σχήμα 2-7 Το τοπικό σύστημα συντεταγμένων Ζενίθ - Ναδίρ το οποίο δεικνύει τη φαινόμενη ημερήσια κίνηση του ήλιου .**

Η γη περιστρέφεται με ρυθμό μιας περιστροφής την ημέρα γύρω από τον άξονά της. Η ημερήσια περιστροφή της γης περιγράφεται από την περιστροφή της ουράνιας σφαίρας γύρω από τον πολικό άξονα ενώ η στιγμιαία θέση του ήλιου περιγράφεται από την ωριαία γωνία  $\omega$ , τη γωνία μεταξύ του μεσημβρινού, που διέρχεται από τον ήλιο, και του μεσημβρινού της συγκεκριμένης τοποθεσίας. Η ωριαία γωνία είναι μηδέν κατά την ηλιακή μεσημβρία και αυξάνεται προς την ανατολή (Σχήμα 2-7). Για έναν παρατηρητή πάνω στη γήινη επιφάνεια σε μια θέση με γεωγραφικό πλάτος  $\Phi$ , ένα κατάλληλο σύστημα συντεταγμένων ορίζεται από μια κατακόρυφη γραμμή προς την τοποθεσία η οποία τέμνει την ουράνια σφαίρα σε δύο σημεία, στο ζενίθ και στο ναδίρ και υποτείνει τη γωνία  $\phi$  με τον πολικό άξονα.

Ο μέγιστος κύκλος που είναι κάθετος προς τον κατακόρυφο άξονα είναι ο ορίζοντας. Η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του ήλιου και του ορίζοντα είναι η ανύψωση  $\alpha$  της οποίας η συμπληρωματική είναι η γωνία  $\theta_z$ . Οι άλλες συντεταγμένες μέσα σ' αυτό το σύστημα είναι το αζιμούθιο  $\Psi$  το οποίο είναι μηδέν κατά την ηλιακή μεσημβρία και αυξάνεται προς την ανατολή. Κατά τη διάρκεια της ημερήσιας κίνησης, η ηλιακή απόκλιση συνήθως θεωρείται σταθερή και ίση προς την τιμή της κατά το μέσο της ημέρας.

Οι ακόλουθες σχέσεις θα χρειαστούν στη συνέχεια για να υπολογισθεί το μέγεθος της ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτει πάνω σε μία κεκλιμένη επιφάνεια.

$$\eta_{\mu\alpha} = \eta_{\mu\delta} \eta_{\mu\phi} + \text{συν}\delta \text{συν}\phi \text{συν}\omega = \text{συν}\theta_z \quad (2.2)$$

$$\text{συν}\psi = (\eta_{\mu\alpha} \eta_{\mu\psi} - \eta_{\mu\delta}) / \text{συν}\alpha \text{συν}\psi \quad (2.3)$$

Αυτές οι εξισώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της ωριαίας γωνίας  $\omega_s$  κατά την ανατολή του ηλίου:

$$\omega_s = \text{συν}^{-1}(-\epsilon\phi\psi \epsilon\phi\delta) \quad (2.4)$$

Οπότε η ωριαία γωνία της δύσης του ηλίου είναι απλά:  $-\omega_s$ .

### 2.2.3. Ακτινοβολία πάνω σε κεκλιμένη επιφάνεια

Τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας, όταν είναι διαθέσιμα, παρέχονται συχνά υπό τη μορφή της ολικής ακτινοβολίας πάνω σε μία οριζόντια επιφάνεια στη δεδομένη τοποθεσία, όπως για παράδειγμα, ολική ημερήσια ακτινοβολία (που συμβολίζεται με το  $G$ ) μιας τυπικής ημέρας οποιουδήποτε μήνα (βλ. για παράδειγμα Palz, 1984 και Lof et al, 1966). Επειδή τα ΦΒ πλαίσια τοποθετούνται συνήθως υπό γωνία ως προς τον ορίζοντα, η ενεργειακή είσοδος του συστήματος πρέπει να υπολογιστεί από τα δεδομένα αυτά.

Το σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού υπολογισμού για τον καθορισμό της ημερήσιας ακτινοβολίας πάνω σε μια κεκλιμένη επιφάνεια φαίνεται στο Σχήμα 2-8. Ο υπολογισμός ακολουθεί τρία βήματα. Στο πρώτο βήμα τα δεδομένα για μια τοποθεσία χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τη ξεχωριστή συνεισφορά της διάχυσης και της απ' ευθείας δέσμης στη συνολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο.

Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας την κοσμική ημερήσια ακτινοβολία  $B_0$  ως μια αναφορά και υπολογίζοντας το λόγο  $K_T = G/B_0$  που είναι γνωστός ως δείκτης διαφάνειας, και περιγράφει την εξασθένηση (κατά μέσο όρο) της ηλιακής ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου μήνα. Κατά την αξιολόγηση του  $B_0$  η μεταβολή της κοσμικής ακτινοβολίας, λόγω της εκκεντρικότητας της τροχιάς της γης (κατά προσέγγιση  $\pm 3\%$ ), λαμβάνεται συνήθως υπόψη.

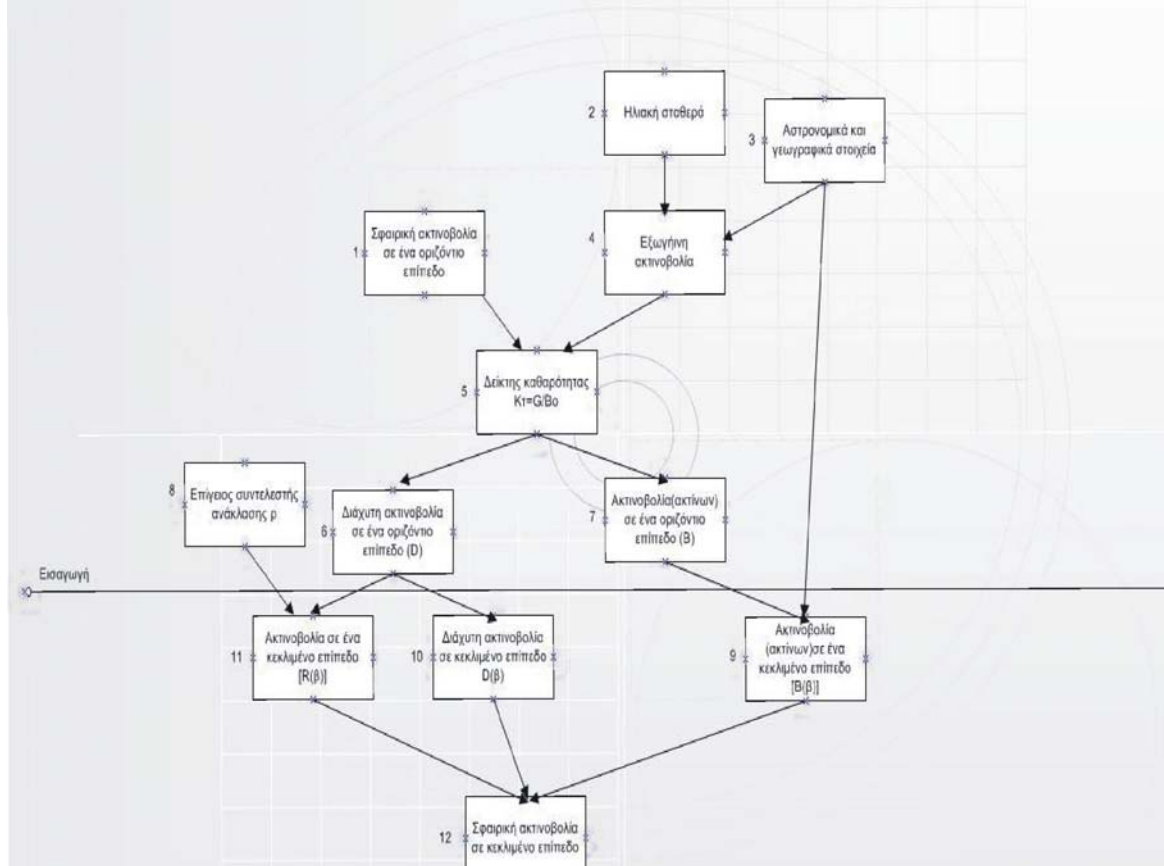
Στο δεύτερο βήμα, η διαχεόμενη ακτινοβολία βρίσκεται χρησιμοποιώντας τον εμπειρικό κανόνα ότι το κλάσμα διάχυτης  $D/G$  της συνολικής ακτινοβολίας είναι μια παγκόσμια συνάρτηση του δείκτη της διαύγειας  $K_T$ . Επειδή  $B = G - D$  αυτή η διαδικασία καθορίζει τόσο τη διάχυτη όσο και την άμεση ακτινοβολία πάνω στο οριζόντιο πεδίο.

Στο τρίτο βήμα η κατάλληλη γωνιακή εξάρτηση του κάθε στοιχείου χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η διάχυτη και η άμεση ακτινοβολία πάνω σε μία κεκλιμένη επιφάνεια. Λαμβάνοντας υπόψη και την ανακλαστικότητα της περιβάλλουσας περιοχής η ανακλώμενη ισχύς από μια επιφάνεια μπορεί επίσης να καθοριστεί. Η ολική ημερήσια ακτινοβολία πάνω σε μια κεκλιμένη επιφάνεια επιτυγχάνεται προσθέτοντας τη συμβολή και των τριών συνιστωσών.

Με περισσότερες λεπτομέρειες τώρα, η διαδικασία υπολογισμού έχει ως ακολούθως.

Τα δεδομένα για τον υπολογισμό είναι η ολική ημερήσια ακτινοβολία  $G$  για μια ημέρα στο μέσον περίπου κάθε μήνα του χρόνου [πλαίσιο 1], η ηλιακή σταθερά  $S$  και οι μεταβολές της ανάλογα με την εκκεντρότητα της γήινης τροχιάς [πλαίσιο 2], το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας και η ηλιακή απόκλιση  $\delta$  για τις ημέρες του χρόνου που εξετάζουμε [πλαίσιο 3]. Κατά τη διάρκεια του υπολογισμού πρέπει να ληφθεί υπόψη η κλίση  $\beta$  και η ανακλαστικότητα  $P$  της περιβάλλουσας περιοχής [Πλαίσιο 8]. Μερικές τυπικές τιμές της επιφανειακής ανακλαστικότητας δίνονται στον Πίνακα 2-1.





Σχήμα 2-8 Συνολική ακτινοβολία πάνω σ' ένα κεκλιμένο πεδίο.

Πίνακας 2-1 Τιμές τυπικής ανακλαστικότητας για μερικές εδαφικές καλύψεις.(Σημείωση: Αυτός ο πίνακας παρουσιάζεται μόνο ως μια διευκρίνιση, καθώς μια μεγάλη ποικιλία τιμών συναντάτε για καθένα από τα υλικά)

Εδαφική κάλυψη	Ανακλαστικότητα
Ξηρό γυμνό έδαφος	0.2
Ξηρό λιβάδι	0.3
Άμμος ερήμου	0.4
Χιόνι	0.5-0.8

Η ακτινοβολία  $B_0$  που προσπίπτει, στη διάρκεια μιας ημέρας, στη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας εκτός της γήινης ατμόσφαιρας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την έκφραση:

$$B_0 := 24 \frac{S}{\pi} \cdot \left( 1 + 0.33 \cos \left( 2 \cdot \pi \cdot \frac{dn}{365} \right) \right) \cdot (\cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) + \omega_s \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\delta))$$

όπου  $dn$  είναι ο αριθμός της ημέρας μέσα στο χρόνο (1 στην 1 η ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ και 365 στην 31η ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ).

Ο δείκτης διαφάνειας  $K_T$  υπολογίζεται τώρα για κάθε μήνα του χρόνου από τη σχέση:

$$K_t := \frac{G}{B_0}$$

Διάφοροι εμπειρικοί τύποι είναι διαθέσιμοι για τον υπολογισμό της διαχεόμενης ακτινοβολίας. Θα υιοθετήσουμε εδώ τον τύπο σύμφωνα με τον Page (1961), ο οποίος είναι πολύ απλός και αρκετά ακριβής για τους παρόντες σκοπούς:

$$D := (1 - 1.13 \cdot K_t) \cdot G$$

Η άμεση ακτινοβολία υπολογίζεται τότε από τη σχέση:

$$B := G - (1 - 1.13 \cdot K_t) \cdot G$$

Η άμεση ακτινοβολία  $B$  ( $\beta$ ) πάνω σε ένα κεκλιμένο πλαίσιο προσανατολισμένο βόρεια με μια γωνία  $\beta$  προς τον οριζόντα δίνεται τώρα από:

$$B_\beta := B \cdot \left[ \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin[\omega_s \cdot (\phi - \beta)] + \omega_s \cdot (\phi - \beta) \cdot \sin(\phi - \beta) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) + \omega_s \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\delta)} \right]$$

Υποθέτοντας ότι η διαχεόμενη ακτινοβολία κατανέμεται ισότροπα πάνω στον ουράνιο θόλο, η διάχυτη ακτινοβολία πάνω σε κεκλιμένη επιφάνεια δίνεται από:

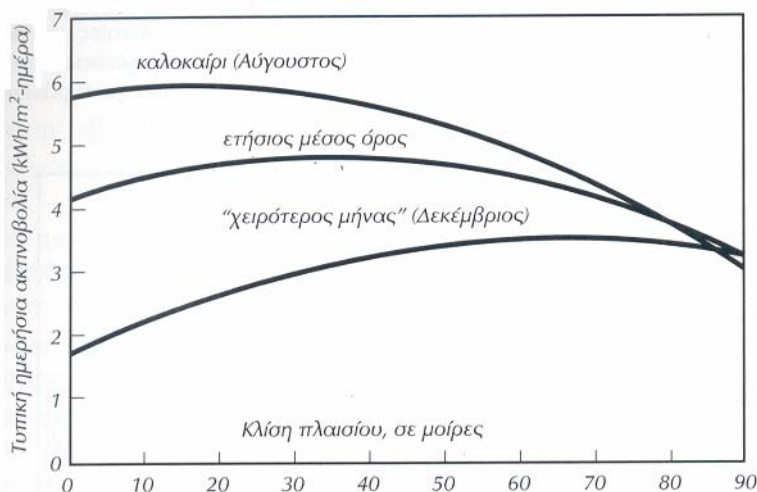
$$D_\beta := \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(\beta)) \cdot D$$

Η ανακλώμενη ισχύς ακτινοβολίας από μια επιφάνεια. Η ανακλώμενη ακτινοβολία από το έδαφος είναι γενικώς μικρή και ένα απλό ιστροπικό (isotropic) μοντέλο είναι συνήθως αρκετό. Αυτό δίνει το αποτέλεσμα:

$$R_\beta := \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos(\beta)) \cdot D \cdot \rho$$

Η ανακλώμενη ακτινοβολία αποκτά ιδιαίτερη σημασία για τις φωτοβολταϊκές μονάδες διπλής όψης, οι οποίες μπορούν να αξιοποιήσουν την προσπίπτουσα ενέργεια και στις δύο πλευρές τους δηλ. την εμπρόσθια και πίσω πλευρά του πλαισίου. Μπορούμε τώρα να βρούμε την ολική σφαιρική ακτινοβολία  $G$  ( $\beta$ ) πάνω σε μία κεκλιμένη επιφάνεια με το άθροισμα όλων των συνεισφορών:

$$G(\beta) = B(\beta) + D(\beta) + R(\beta)$$



**Σχήμα 2-9 Ημερήσια ακτινοβολία στη Βαρκελώνη ως μια λειτουργία της κλίσης πλαισίου.**

Για το σκοπό αυτό στο Σχήμα 2-9 φαίνεται ο μέσος όρος της ημερήσιας ακτινοβολίας στη Βαρκελώνη κατά τη διάρκεια διαφορετικών εποχών του έτους (καλοκαίρι, χειμώνας και ο ετήσιος μέσος όρος τους) σε συνάρτηση με την κλίση του πλαισίου. Αυτό μάς επιτρέπει να επιλέξουμε την καταλληλότερη κλίση

Σε μερικά συστήματα (για παράδειγμα αυτά που συνδέονται στο δίκτυο), η προσπάθεια είναι να συλλεχθεί η μέγιστη ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός έτους. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η καταλληλότερη γωνία πλαισίου, η οποία μεγιστοποιεί τον ετήσιο μέσο όρο ακτινοβολίας είναι μεταξύ 30° και 40°. Γενικότερα, αυτή βρίσκεται συνήθως κοντά στη γωνία γεωγραφικού πλάτους.

Σε πολλά αυτόνομα συστήματα, τα οποία βασίζονται στην αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες, το κύριο ενδιαφέρον εστιάζεται όχι στη λαμβανόμενη ολική ενέργεια αλλά στην ημερήσια ακτινοβολία κατά τη διάρκεια του μήνα με την ελαχιστότερη ηλιοφάνεια (εδώ το Δεκέμβρη). Σ' αυτή την περίπτωση, κάποιος μπορεί να επιλέξει μια γωνία μεταξύ 60° και 70° .

Ο ηλιακός ηλεκτρισμός ταιριάζει καλύτερα σε εφαρμογές, που η μεγαλύτερη κατανάλωση σημειώνεται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (για παράδειγμα, η άρδευση της σποράς). Εδώ μια γωνία πλαισίου κοντά στις 20° θα μπορούσε να είναι η καλύτερη επιλογή.

## Περίληψη του κεφαλαίου

Παρουσιάστηκε εν συντομία η φύση της ηλιακής ακτινοβολίας, που πέφτει στη γη, και τα βασικά στοιχεία της. Είδαμε πως η ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται, κατά το μέγεθος και τη δομή, από τη γεωγραφική θέση. Η αστρονομική σχέση μεταξύ της γης και του Ήλιου αναλύθηκε ορίζοντας τις βασικές γωνίες οι οποίες καθορίζουν τη φαινόμενη κίνηση του ήλιου. Αυτά τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για να αξιολογηθεί η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε μία κεκλιμένη επιφάνεια, η οποία αποτελεί την εισερχόμενη ενέργεια στο φωτοβολταϊκό σύστημα.

## **3. Ηλιακά Στοιχεία**

### **3.1. Εισαγωγή**

Σ' αυτό το κεφάλαιο θα μάθετε πώς λειτουργούν τα ηλιακά στοιχεία και πώς γίνεται η βιομηχανική παραγωγή τους. Μια ευρεία επισκόπηση των διαθέσιμων ηλιακών ηλεκτρικών στοιχείων θα δοθεί στο τμήμα 3.2.

Θα καταδειχθεί στη συνέχεια, στο τμήμα 3.3 πώς εργάζονται τα ηλιακά στοιχεία. Αρχίζοντας με τα ηλεκτρονικά χαρακτηριστικά των ημιαγωγών θα εξετάσουμε τη συνολική δομή του ηλεκτρικού στοιχείου και θα εξηγήσουμε το πώς παράγεται ο ηλεκτρισμός. Ποικίλα πρακτικά υλικά θα αναλυθούν μαζί με τις απώλειες ισχύος οι οποίες παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους.

### **3.2. Τι είναι τα ηλιακά στοιχεία**

Τα ηλιακά στοιχεία αντιπροσωπεύουν τη βασική μονάδα μετατροπής ισχύος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Κατασκευάζονται από ημιαγωγούς και έχουν πολλά κοινά με τις άλλες διατάξεις της στερεάς κατάστασης όπως οι δίοδοι, το τρανζίστορ και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Για την πρακτική τους λειτουργία, τα ηλιακά στοιχεία συνήθως συναρμολογούνται σε βασικές μονάδες.

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι ηλιακών στοιχείων οι οποίοι διατίθενται στην αγορά, ενώ τώρα τελευταία ακόμη περισσότεροι βρίσκονται υπό κατασκευή. Στα ηλιακά στοιχεία βρίσκει κανείς διαφορετικά υλικά και διαφορετικές δομές στην προσπάθειά του να έχει τη μέγιστη δυνατή ισχύ της διάταξης και να διατηρεί το οικονομικό κόστος στο ελάχιστο. Διατάξεις με απόδοση πάνω από το 30% έχουν ήδη επιδειχθεί στο εργαστήριο. Η απόδοση των εμπορικών διατάξεων, εντούτοις, είναι συνήθως μικρότερη από το μισό αυτής της τιμής.

Τα στοιχεία του κρυσταλλικού πυριτίου κατέχουν το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς. Για να ελαττωθεί το υψηλό κόστος, τα στοιχεία αυτά κατασκευάζονται συχνά από πολυκρυσταλλικό υλικό και όχι από μονό κρύσταλλο που είναι και περισσότερο ακριβό ως υλικό. Η τεχνολογία του στοιχείου κρυσταλλικού πυριτίου έχει εδραιωθεί για τα καλά. Οι βασικές μονάδες έχουν μακρό χρόνο ζωής (20 χρόνια ή περισσότερο) και η καλύτερή τους απόδοση προσεγγίζει το 18%.

Φθηνότερος τύπος (αλλά με μικρότερη απόδοση) στοιχείων άμορφου πυριτίου, κατασκευασμένων με τη μορφή λεπτής μεμβράνης, χρησιμοποιείται για να δώσει ισχύ σε μια ποικιλία καταναλωτικών προϊόντων. Έχετε ήδη εξοικειωθεί με τα ρολόγια και τους υπολογιστές ηλιακής τροφοδοσίας, καθώς και με μεγαλύτερου μεγέθους ηλιακές βασικές μονάδες άμορφου πυριτίου.

Μια ποικιλία σύνθετων ημιαγωγών μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για την βιομηχανική παραγωγή των στοιχείων λεπτής μεμβράνης (για παράδειγμα τελουριούχο κάδμιο ή δισεληνιούχος Ινδιούχος χαλκός). Αυτές οι βασικές μονάδες αρχίζουν τώρα να εμφανίζονται στην αγορά και υπόσχονται χαμηλό κόστος σε συνδιασμό με αποδεκτή απόδοση μετατροπής.

Μια ιδιαίτερη κατηγορία ηλιακών στοιχείων υψηλής απόδοσης από μονο-κρυσταλλικό πυρίτιο ή σύνθετους ημιαγωγούς (για παράδειγμα Γαλιούχο αρσενικό ή Ινδιούχοφώσφορο) χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές τέτοιες όπως η τροφοδοσία δορυφόρων ή συστημάτων τα οποία εργάζονται κάτω από υψηλής έντασης συγκεντρωμένο ηλιακό φως.

### **3.3. Πως εργάζονται τα ηλιακά στοιχεία**

#### **3.3.1. Εισαγωγή**

Η λειτουργία των ηλιακών στοιχείων βασίζεται στην ικανότητα των ημιαγωγών να μετατρέπουν αμέσως το ηλιακό φως σε ηλεκτρισμό με τη βοήθεια του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Κατά τη διαδικασία της μετατροπής, η προσπίπτουσα ενέργεια του φωτός δημιουργεί ευκίνητους φορτισμένους φορείς μέσα στον ημιαγωγό, οι οποίοι διαχωρίζονται από τη δομή της διάταξης και δημιουργούν ηλεκτρικό ρεύμα.

Η ηλεκτρονική δομή των ημιαγωγών θα εξετασθεί στο τμήμα 3.3.2. Εδώ θα μάθουμε για τη χαρακτηριστική κατανομή της ενέργειας των ηλεκτρονίων μέσα στον ημιαγωγό και το πώς τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ημιαγωγών μπορούν να ελεγχθούν με προσμίξεις (ξένα σώματα).

Θα αναλύσουμε ένα ουσιώδες τμήμα του ηλιακού στοιχείου, την ένωση (επαφή) του ημιαγωγού, και θα δείξουμε πώς ο φωτισμός δημιουργεί ευκίνητους φορτισμένους φορείς, ηλεκτρόνια και οπές. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ηλιακών στοιχείων θα προκύψουν τότε από την ανάλυση των ρευμάτων διαμέσου της επαφής.

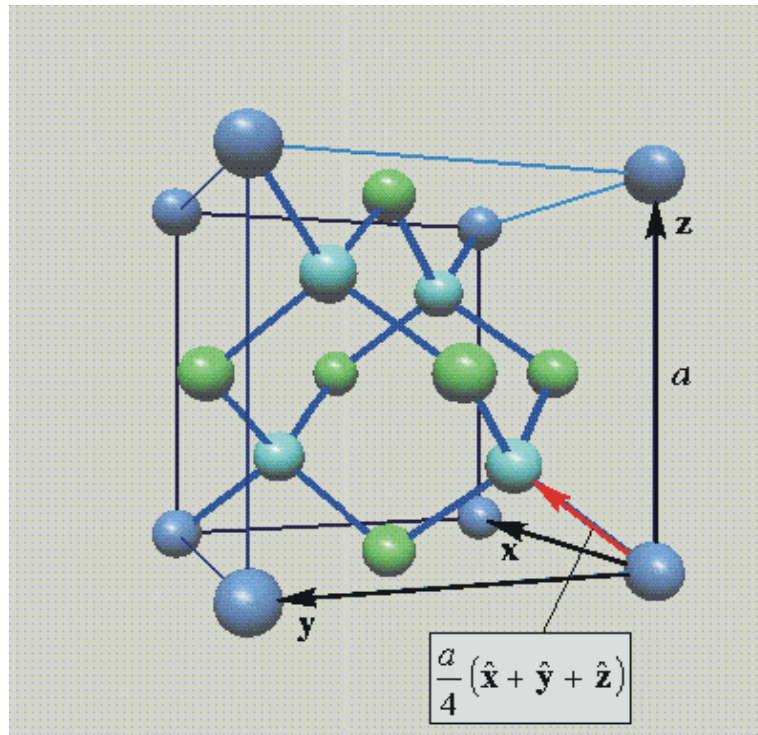
Στο τμήμα 3.3.4 δομές ποικίλων διατάξεων θα εξεταστούν και θα δείξουμε το πώς η σχεδίαση της διάταξης αποσκοπεί στο να ελαττωθούν οι απώλειες ισχύος που σημειώνονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του στοιχείου. Θα εξετάσουμε επίσης το πώς η λειτουργία του στοιχείου επηρεάζεται από τις πρακτικές συνθήκες λειτουργίας, συγκεκριμένα από τη μεταβολή της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας.

#### **3.3.2. Ηλεκτρονική δομή των ημιαγωγών**

##### **3.3.2.1 Δομή των ζωνών - Εισαγωγή προσμίξεων**

Οι αρχές της φυσικής των ημιαγωγών απεικονίζονται καλύτερα στη περίπτωση του πυριτίου ενός στοιχείου της ομάδας IV του περιοδικού πίνακα. Οι κρύσταλλοι του πυριτίου σχηματίζουν το ονομαζόμενο "πλέγμα διαμαντιού", στο οποίο κάθε άτομο έχει τέσσερις πλησιέστερους γείτονες στις κορυφές ενός τετραέδρου. Η τετραπλή τετραεδρική διάταξη είναι αποτέλεσμα της διάταξης των δεσμών, η οποία χρησιμοποιεί τα τέσσερα εξωτερικά ηλεκτρόνια (σθένους) από κάθε άτομο πυριτίου (σχήμα 3.1). Κάθε δεσμός περιλαμβάνει δύο ηλεκτρόνια και μπορείτε εύκολα να δείτε ότι όλα τα ηλεκτρόνια σθένους συμπεριλαμβάνονται στους δεσμούς. Υπάρχουν πολλοί άλλοι σημαντικοί για τη βιομηχανία ημιαγωγοί που κρυσταλλώνονται με παραπλήσια πλέγματα, και έχουν μια παρόμοια διευθέτηση των περιφερειακών δεσμών.

Αυτή η κρυσταλλική δομή έχει μια βαθιά επίδραση πάνω στα ηλεκτρονικά και οπτικά χαρακτηριστικά των ημιαγωγών.



Σχήμα 3-1 Το πλέγμα αδάματος.

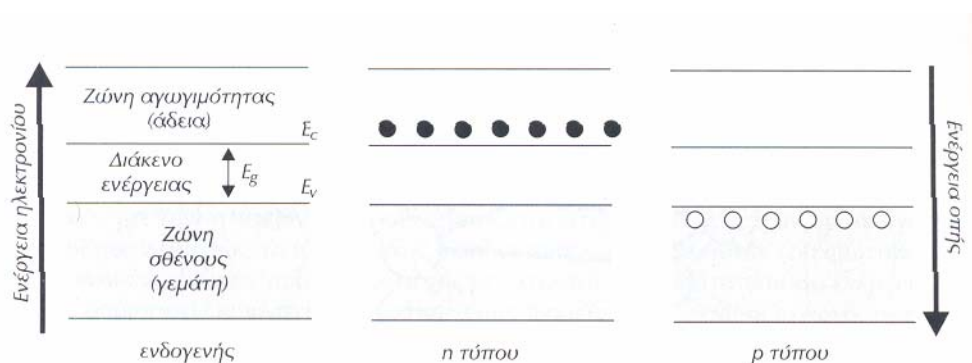
Πίνακας 3-1 Ενεργειακά χάσματα των κύριων ημιαγωγών για φωτοβολταϊκές εφαρμογές (οι τιμές χάσμα - τος δίνονται σε θερμοκρασία δωματίου).

Υλικό	Ενεργειακό χάσμα (eV)	Τύπος χάσματος
κρυσταλλικό Si	1.12	Έμμεσο
άμορφο Si	1.75	Άμεσο
CuInSe <sub>2</sub>	1.05	Άμεσο
CdTe	1.45	Άμεσο
GaAs	1.42	Άμεσο
LnP	1.34	Άμεσο

Σύμφωνα με τη θεωρία των κβάντων, η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου μέσα στον κρύσταλλο πρέπει να βρίσκεται μέσα σε καλώς καθορισμένες ζώνες. Οι ενέργειες των ηλεκτρονίων σθένους, τα οποία σχηματίζουν δεσμούς μεταξύ των ατόμων, παριστάνουν ακριβώς μια τέτοια ζώνη καταστάσεων, τη ζώνη σθένους. Η επόμενη υψηλότερη ζώνη είναι η ζώνη αγωγιμότητας, η οποία διαχωρίζεται από τη ζώνη σθένους, από το ενεργειακό διάκενο ή διάκενο ζώνης. Το πλάτος του διακένου ζώνης  $E_c - E_v$  είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του ημιαγωγού και συνήθως συμβολίζεται με το  $E_g$ . Ο Πίνακας 3-1 δίνει τα διακένα ζώνης των περισσότερων σημαντικών ημιαγωγών για εφαρμογές ηλιακών στοιχείων.

Ένας καθαρός ημιαγωγός (ο οποίος ονομάζεται ενδογενής) περιέχει ακριβώς το σωστό αριθμό των ηλεκτρονίων για να γεμίσει τη ζώνη σθένους και επομένως, η ζώνη αγωγιμότητας είναι άδεια (Σχήμα 3-2). Τα ηλεκτρόνια μέσα σε πλήρη ζώνη σθένους δεν μπορούν να

κινηθούν όπως για παράδειγμα οι μπίλιες μέσα σ' ένα τελείως γεμάτο κιβώτιο μ' ένα καπάκι στην κορυφή. Για πρακτικούς σκοπούς, ένας καθαρός ημιαγωγός είναι και μονωτής.



**Σχήμα 3-2 Διάγραμμα ζώνης και κατανομή οπών ηλεκτρονίων μέσα στους ημιαγωγούς**

Οι ημιαγωγοί μπορεί να γίνουν ηλεκτρικά αγωγά αν εισαχθούν μέσα στην ζώνη αγωγιμότητας φορείς ή μετακινηθούν από τη ζώνη σθένους. Ένας τρόπος για να το επιτύχουμε είναι να εισάγουμε στον ημιαγωγό προσμείξεις. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται ντοπάρισμα (doping). Όπως θα δούμε, το "ντοπάρισμα" δίνει αυτή την δυνατότητα άσκησης ελέγχου σε μεγάλο βαθμό πάνω στα ηλεκτρονικά χαρακτηριστικά ενός ημιαγωγού και βρίσκεται στην καρδιά της βιομηχανικής διαδικασίας κατασκευής όλων των ημιαγωγικών υλικών.

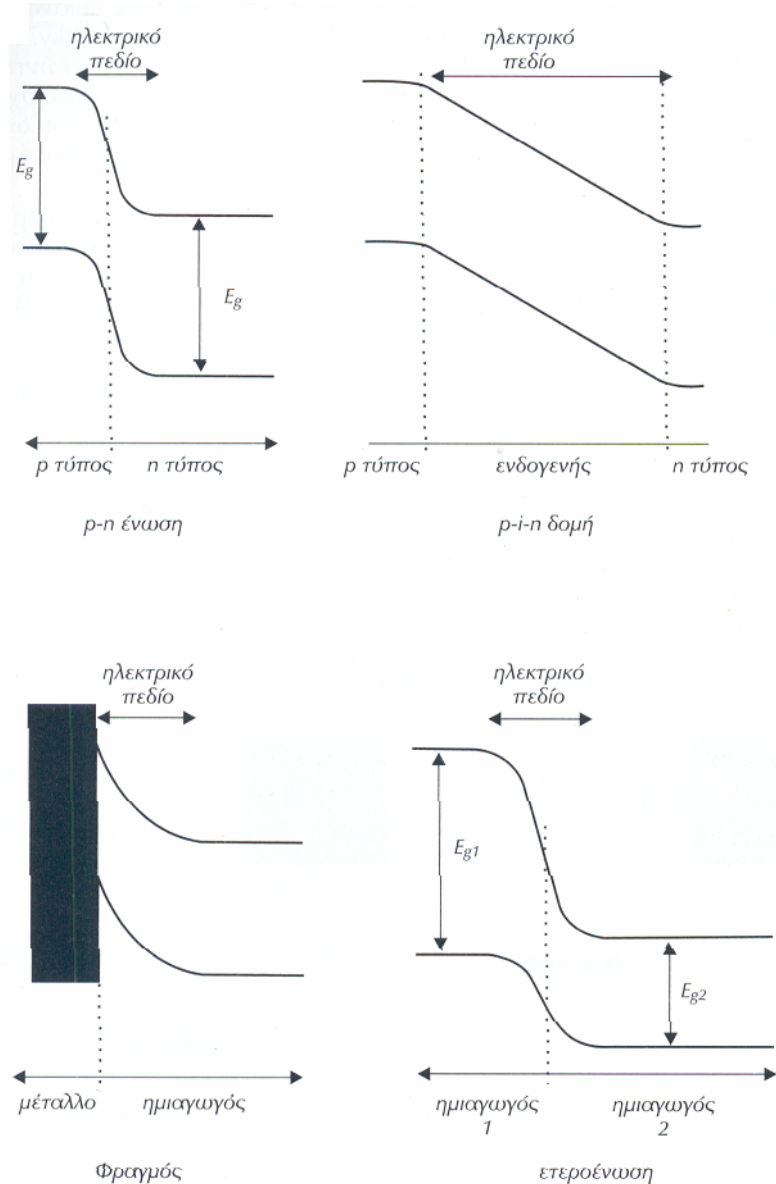
Υποθέστε ότι κάποια άτομα της ομάδας  $v$  (για παράδειγμα φώσφορος) προστίθεται σ' ένα τήγμα πυριτίου από το οποίο παράγεται η κρυσταλλική μορφή. Τέσσερα από τα πέντε εξωτερικά ηλεκτρόνια χρησιμοποιούνται για να γεμίσει η ζώνη σθένους και το πρόσθετο ηλεκτρόνιο από κάθε άτομο πρόσμειξης, προσφέρεται στην ζώνη αγωγιμότητας (Σχήμα 3-2). Γι' αυτό το λόγω τα άτομα αυτά πρόσμειξης ονομάζονται δότες. Τα ηλεκτρόνια μέσα στη ζώνη αγωγιμότητας είναι ευκίνητα και ο κρύσταλλος γίνεται αγωγός. Από τη στιγμή που το ρεύμα μεταφέρεται από αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια, αυτός ο τύπος του ημιαγωγού ονομάζεται τύπος  $n$  (N).

Μια παρόμοια κατάσταση παρατηρείται όταν το πυρίτιο ντοπάρεται με άτομα πρόσμειξης της ομάδας III (για παράδειγμα βόριων) τα οποία ονομάζονται αποδέκτες. Από τη στιγμή που χρειάζονται τέσσερα ηλεκτρόνια ανά άτομο για να γεμίσει πλήρως η ζώνη σθένους αυτό το ντοπάρισμα δημιουργεί έλλειψη ηλεκτρονίων μέσα σ' αυτή τη ζώνη (Σχήμα 3-2). Τα ηλεκτρόνια που λείπουν ονομάζονται οπές και συμπεριφέροντε ως θετικά φορτισμένα σωματίδια, τα οποία είναι ευκίνητα και μεταφέρουν ρεύμα. Ένας ημιαγωγός που το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται ως επί το πλείστον από οπές ονομάζεται τύπος- $p$  (P).

Οι επικρατέστεροι φορείς σ' έναν δεδομένο ημιαγωγό ονομάζονται φορείς πλειονότητας. Παραδείγματα φορέων πλειονότητας είναι τα ηλεκτρόνια στον ημιαγωγό τύπου  $n$  και οι οπές στον τύπου  $p$ . Ο αντίθετος τύπος των φορέων, των οποίων η συγκέντρωση είναι γενικώς πολύ μικρότερη, ονομάζονται φορείς μειονότητας.

### 3.3.2.2 Επαφές ημιαγωγού

Η λειτουργία των ηλιακών στοιχείων βασίζεται πάνω στο σχηματισμό μιας επαφής. Διάφορα παραδείγματα επαφών αναπαρίστανται στο Σχήμα 3-3. Ίσως η απλούστερη από τις επαφές είναι η επαφή p-n, μια μεταβατική περιοχή μεταξύ των περιοχών τύπου n και p ενός ημιαγωγού.



Σχήμα 3-3 Ενεργειακό διάγραμμα διαφόρων τύπων επαφών μεταξύ των ημιαγωγών.

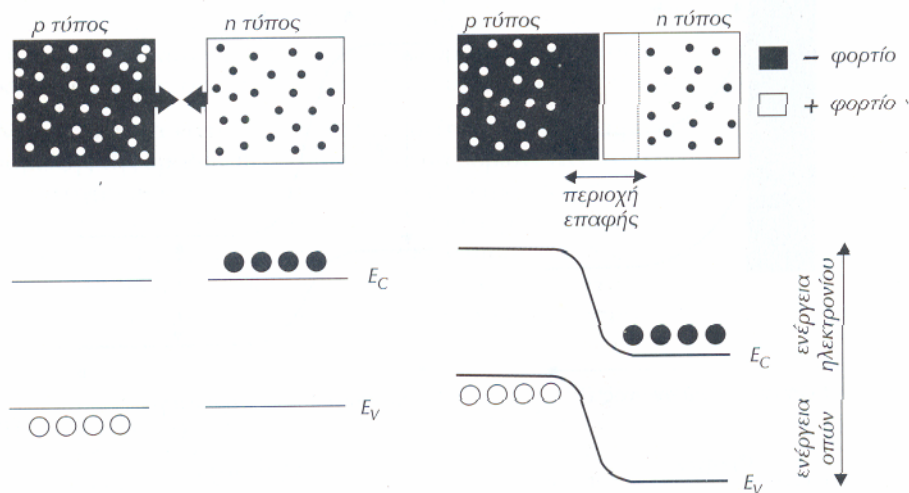
Ένα στρώμα ενδογενούς υλικού είναι μερικές φορές ενσωματωμένο μεταξύ των περιοχών τύπου n και p έχοντας ως αποτέλεσμα μια ευρύτερη ζώνη μετάβασης. Σε αντίθεση μ' αυτές τις ομοεπαφές, μια ετεροεπαφή σχηματίζεται από δύο διαφορετικούς ημιαγωγούς, σημειώστε τη διαφορά των ενεργειακών χασμάτων στις δύο πλευρές της ένωσης.

Η μεσεπιφάνεια μεταξύ ενός μεταλλικού στοιχείου και ενός ημιαγωγού μπορεί επίσης να σχηματίσει μια επαφή, που ονομάζεται φραγμός Schottky. Γενικώς, τα χαρακτηριστικά των μεταλλικών επαφών μ' έναν ημιαγωγό εξαρτώνται από τα πραγματικά υλικά που εξετάζονται. Για κάθε ημιαγωγό, μερικά μέταλλα σχηματίζουν ένα φράγμα Schottky και μερικά άλλα



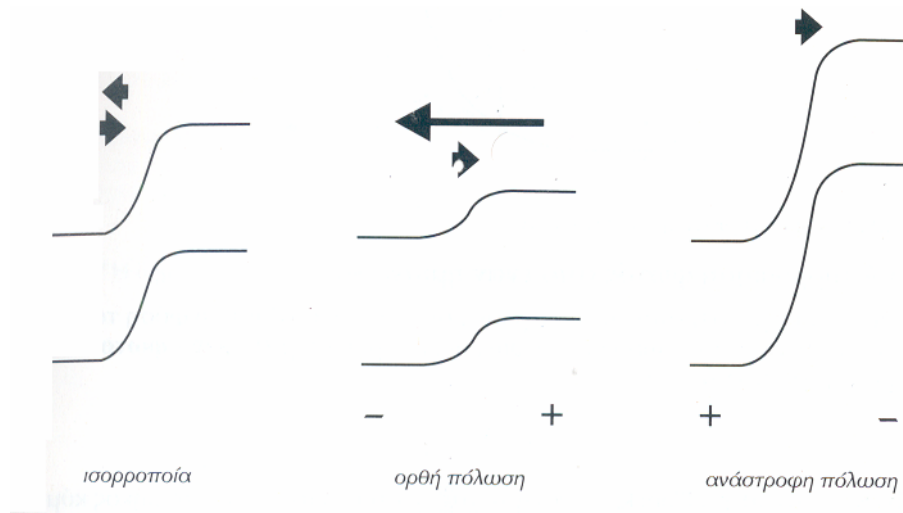
σχηματίζουν ωμική επαφή όπου δεν υπάρχει το φράγμα. Αυτές οι επαφές χρησιμοποιούνται για να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα από τη διάταξη.

Το σημαντικό χαρακτηριστικό όλων των επαφών είναι ότι αυτές περιέχουν ένα δυνατό ηλεκτρικό πεδίο. Για να γίνει κατανοητό το πώς δημιουργείται αυτό το πεδίο, ας φανταστούμε μια υποθετική κατάσταση, στην οποία η επαφή p-n σχηματίζεται από τη σύνδεση δύο κομματιών του ημιαγωγού, ενός τύπου - p και ενός άλλου τύπου - n. (Μολονότι αυτός ο τρόπος σχηματισμού επαφής δεν χρησιμοποιείται κανονικά στις πρακτικές εφαρμογές είναι ένας εύκολος τρόπος για να επιδειχθούν οι σχετικές αρχές). Όταν τα δύο μέρη είναι χωριστά υπάρχει πλεόνασμα ηλεκτρονίων στο υλικό τύπου - n και πλεόνασμα οπών στον τύπο - p. Όταν τα δύο κομμάτια έλθουν σ' επαφή, τα ηλεκτρόνια από την περιοχή - n κοντά στην επιφάνεια σύνδεση, διαχέονται στην πλευρά της περιοχής P αφήνοντας πίσω ένα στρώμα το οποίο είναι θετικά φορτισμένο από τους δότες. Ομοίως, η διάχυση οπών κατά την αντίθετη κατεύθυνση αφήνει πίσω ένα αρνητικά φορτισμένο στρώμα, απογυμνωμένο από οπές. Ως αποτέλεσμα αυτών είναι η περιοχή ένωσης να μην περιέχει πρακτικώς ευκίνητους φορείς φορτίου (Σχήμα 3-4) και τα σταθερά φορτία των ντοπαρισμένων ατόμων δημιουργούν ένα φραγμό δυναμικού που ενεργεί ενάντια στην περαιτέρω ροή ηλεκτρονίων και οπών. Σημειώστε ότι το ηλεκτρικό πεδίο μέσα στην ένωση έλκει τα ηλεκτρόνια και τις οπές προς αντίθετες κατευθύνσεις.



Σχήμα 3-4 Διάγραμμα σχηματισμού επαφής p-n και η προκύπτουσα δομή ενεργειακών ζωνών

Το Σχήμα 3-5 δείχνει το διάγραμμα ζωνών μιας διόδου επαφής p-n σε ισορροπία και όταν μια εξωτερική τάση συνδέεται προς τη διόδο. Χωρίς πόλωση, φυσικά, δεν υπάρχει ρεύμα διαμέσου της επαφής. Μπορούμε να φανταστούμε αυτό το μηδενικό καθαρό ρεύμα ισορροπίας ότι αποτελείται από δύο πολύ μικρά αντίθετα ρεύματα  $I_0$  και  $-I_0$  τα οποία παραμένουν από τη ροή ρεύματος, που προηγείται του σχηματισμού της επαφής. Αυτά τα ρεύματα είναι πράγματι πολύ μικρά και αντιστοιχούν σε μια πυκνότητα ρεύματος της τάξης του  $10^{-14}$  A/cm<sup>2</sup> σε μία καλή διόδο πυριτίου.



Σχήμα 3-5 Ηλεκτρικά ρεύματα μέσα σ' επαφή p-n κάτω από εξωτερική πόλωση.

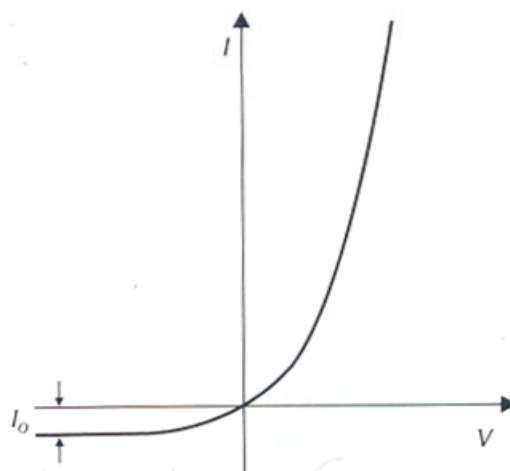
Αυτό το ρεύμα ισορροπίας μεταβάλλεται σημαντικά, όταν εφαρμόζεται μία τάση επαφής. Μια ορθή πόλωση π.χ. θετική τάση, που εφαρμόζεται στην πλευρά P, ελαττώνει το ύψος του φραγμού δυναμικού, με αποτέλεσμα να αυξάνει δραματικά το ρεύμα διαμέσου της διόδου.

Κάτω από ανάστροφη πόλωση, αντίθετα το φράγμα αυξάνεται. Αυτό έχει μια πολύ μικρότερη επίδραση πάνω στη διάταξη και παράγει μόνο ένα μικρό ρεύμα  $I_0$  (ρεύμα κόρου στο σκοτάδι) το οποίο είναι πολύ μικρότερο από το ρεύμα μιας ορθής πόλωσης. Η επαφή επομένως ενεργεί ως ένας ανορθωτής ή μια δίοδος.

Με μαθηματικούς όρους η χαρακτηριστική I-V μιας διόδου δίδεται από την εξίσωση Shockley.

$$I := I_0 \left[ \text{Exp} \left( \frac{q \cdot V}{k \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

όπου I είναι το ρεύμα, V είναι η τάση, k είναι η σταθερά Boltzmann, q είναι το μέγεθος του φορτίου ηλεκτρονίου και T είναι η απόλυτη θερμοκρασία. Η χαρακτηριστική V-I (3.1) φαίνεται στο Σχήμα 3-6.



Σχήμα 3-6 Η χαρακτηριστική I-V της διόδου.

### 3.3.2.3 Απορρόφηση φωτός από έναν ημιαγωγό

Η φωτοβολταϊκή μετατροπή της ενέργειας βασίζεται στη κβαντική φύση του φωτός σύμφωνα με την οποία θεωρούμε το φως ως μια ροή σωματιδίων - φωτονίων - τα οποία μεταφέρουν ενέργεια

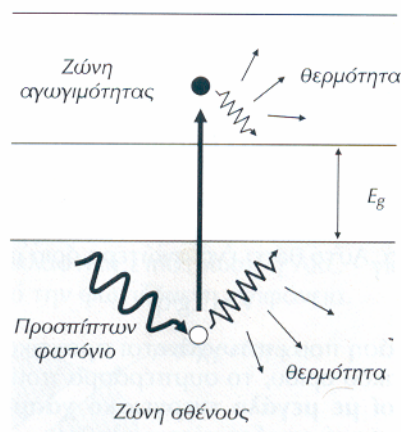
$$E_{ph}(\lambda) := \frac{hc}{\lambda} \quad (3.2)$$

όπου  $h$  είναι η σταθερά Planck,  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός και  $\lambda$  το μήκος κύματος του φωτός. Σε μια καθαρή ημέρα  $4.4 \times 10^{17}$  φωτόνια περίπου, χτυπούν ένα τετραγωνικό εκατοστό της επιφάνειας της γης κάθε δευτερόλεπτο.

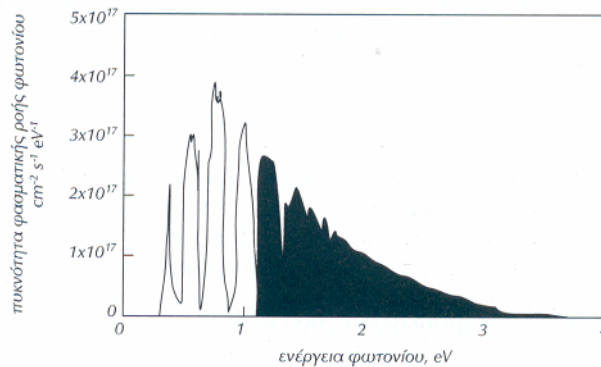
Μερικά μόνο απ' αυτά τα φωτόνια - εκείνα των οποίων η ενέργεια ξεπερνά το ενεργειακό χάσμα - μπορούν να μετατραπούν σε ηλεκτρισμό από το ηλιακό στοιχείο. Όταν ένα τέτοιο φωτόνιο εισέλθει στον ημιαγωγό, μπορεί να απορροφηθεί και να προωθήσει ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας (Σχήμα 3-7). Από τη στιγμή που μια οπή παραμένει πίσω, μέσα στη ζώνη σθένους η διαδικασία της απορρόφησης παράγει ένα ζευγάρι ηλεκτρονίου-οπής.

Κάθε ημιαγωγός επομένως περιορίζεται στο να μετατρέψει μόνο ένα μικρό μέρος του ηλιακού φάσματος (Σχήμα 3-8). Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.2), το φάσμα έχει σχεδιαστεί εδώ όπως η προσπίπτουσα ροή φωτονίων σε συνάρτηση με την ενέργεια του φωτονίου. Η σκιασμένη περιοχή συμβολίζει τη ροή φωτονίων, η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια από ένα στοιχείο πυριτίου και είναι περίπου τα δύο τρίτα της ολικής ροής.

Η φύση της διαδικασίας απορρόφησης δείχνει επίσης πως ένα μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας του φωτονίου χάνεται κατά το φαινόμενο. Πράγματι είναι εμφανές ότι πρακτικώς όλα τα παραγόμενα ζεύγη ηλεκτρονίου - οπής έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα. Αμέσως μετά τη δημιουργία τους, το ηλεκτρόνιο και η οπή μετακινούνται και παραμένουν κοντά στα άκρα των αντίστοιχων ζωνών τους. Η πλεονάζουσα ενέργεια χάνεται ως θερμότητα και δεν μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμη ισχύ. Αυτή η διαδικασία περιγράφει έναν από τους βασικούς μηχανισμούς απωλειών, που συναντούμε μέσα σ' ένα ηλιακό στοιχείο.



Σχήμα 3-7 Η δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων οπών με το φως.



Σχήμα 3-8 Χρησιμοποιούμενη ροή φωτονίων από ένα ηλιακό στοιχείο πυριτίου.

Μπορούμε να κάνουμε μερικούς χονδρικούς υπολογισμούς για το μέγεθος της ηλεκτρικής ισχύος, η οποία μπορεί να παραχθεί. Γι' αυτό το σκοπό, μπορούμε να ερμηνεύσουμε την προκληθείσα από το φως κίνηση ηλεκτρονίων δια μέσου του ενεργειακού χάσματος ως ηλεκτρικό ρεύμα, ονομαζόμενο ρεύμα δημιουργίας. Θα δούμε σύντομα (τμήμα 3.3.3) ότι ένα ηλιακό στοιχείο μπορεί πράγματι να μετασχηματίσει αυτό το εικονικό ρεύμα σε πραγματικό ηλεκτρικό ρεύμα κατά μήκος της διάταξης. Αδιαφορώντας για τις απώλειες, κάθε φωτόνιο συνεισφέρει ένα ηλεκτρόνιο στο ρεύμα. Τότε, το ηλεκτρικό ρεύμα είναι ίσο προς

$$I = q \cdot N \cdot A \quad (3.3)$$

όπου  $N$  είναι ο αριθμός των φωτονίων μέσα στη σκιασμένη περιοχή του φάσματος, και  $A$  είναι περιοχή επιφάνειας του ημιαγωγού, ο οποίος εκτίθεται στο φως. Για παράδειγμα, η πυκνότητα του ρεύματος  $11 = I/A$  που αντιστοιχεί προς το γήινο φάσμα είναι περίπου  $1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 4.4 \cdot 10^{17} = 70 \text{ mA/cm}^2$ . Απ' αυτό ένα ηλιακό στοιχείο πυριτίου μπορεί να μετατρέψει το πολύ  $44 \text{ mA/cm}^2$ .

Ποια τάση μπορεί να παράγει ένα ηλιακό στοιχείο; Μπορεί κανείς να βρει ένα ανώτερο όριο με μια απλή ηλεκτροστατική θεώρηση. Όπως θα δούμε, η ηλεκτρική ισχύς παράγεται διαχωρίζοντας τα φωτο-παραγόμενα ηλεκτρόνια και οπές προς τους ακροδέκτες της διάταξης. Αυτός ο διαχωρισμός μπορεί να προχωρήσει μόνο εάν η ηλεκτροστατική ενέργεια των φορτίων μετά τον διαχωρισμό ( $qV$  όπου  $V$  είναι η τάση στους ακροδέκτες), δεν υπερβαίνει την ενέργεια ζεύγους στον ημιαγωγό ίση προς το ενεργειακό χάσμα.

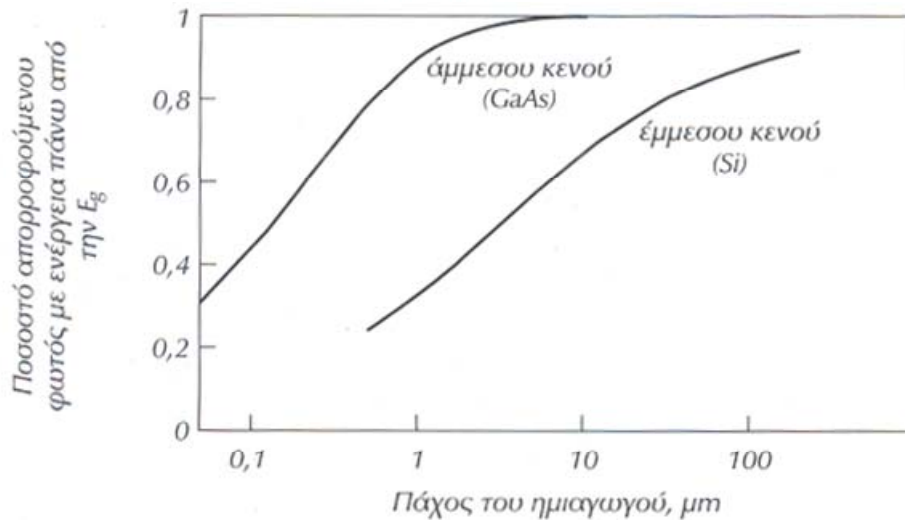
Αυτό θέτει ένα ανώτερο όριο στην τάση της μορφής:

$$V := \frac{E_g}{q} \quad (3.4)$$

Μολονότι η πραγματική τάση που επιτυγχάνεται πρακτικά είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή του θεωρητικού ορίου, το συμπέρασμα που βγαίνει από την εξίσωση (3.4) είναι ότι "ημιαγωγοί με μεγάλο ενεργειακό χάσμα παράγουν υψηλότερη τάση", συμπέρασμα που γενικά αποδεικνύεται αληθές.

Έχουμε έως τώρα υποθέσει ότι όλα τα φωτόνια με μεγαλύτερη ενέργεια από το ενεργειακό χάσμα απορροφώνται. Πράγματι πολλοί ημιαγωγοί είναι καλοί απορροφητές φωτός και απορροφούν όλο το φως με ενέργεια μεγαλύτερη από αυτή του ενεργειακού χάσματος μέσα σ' ένα στρώμα πάχους λίγων μικρομέτρων. Αυτοί ονομάζονται ημιαγωγοί άμεσου ενεργειακού χάσματος. Σε άλλους - ημιαγωγούς έμμεσου ενεργειακού χάσματος οι οποίοι περιέχουν επίσης κρυσταλλικό πυρίτιο - η διαδικασία απορρόφησης είναι περισσότερο πολύπλοκη. Ένα

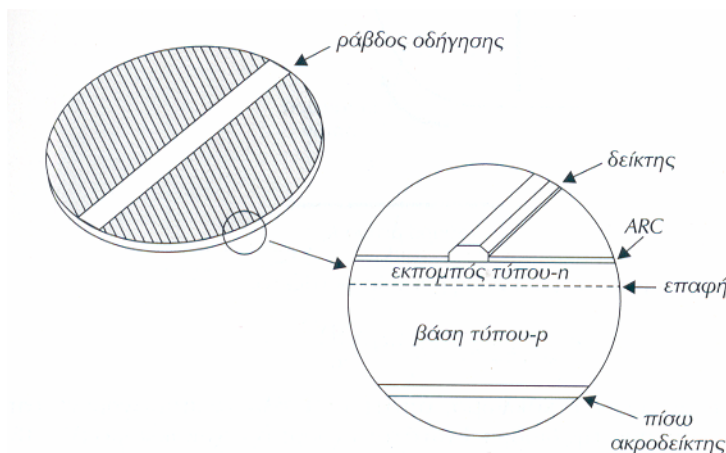
κβάντο των ταλαντώσεων του πλέγματος πρέπει να συμμετάσχει στη μετατροπή ενός φωτονίου σ' ένα ζεύγος ηλεκτρονίου - οπής για να συντηρηθεί η ορμή, εμποδίζοντας έτσι μια τέτοια διαδικασία και μειώνοντας την ικανότητα του ημιαγωγού στην απορρόφηση του φωτός. Αυτό το φαινόμενο απεικονίζεται στο Σχήμα 3-9. Σημειώστε ότι αρκετές εκατοντάδες μικρομέτρων πυριτίου είναι αναγκαία για την απορρόφηση όλου του προσπίπτοντος φωτός με ενέργεια μεγαλύτερη από  $E_g$ , πλην όμως μερικά μόνο μικρόμετρα ενός υλικού άμεσου κενού (για παράδειγμα GaAs) είναι αρκετά για τον ίδιο σκοπό.



Σχήμα 3-9 Χαρακτηριστικά οπτικής απορρόφησης των ημιαγωγών άμεσου και έμμεσου ενεργειακού χάσματος.

### 3.3.3. Το ηλιακό ηλεκτρικό στοιχείο

Το Σχήμα 3-10 παρουσιάζει το διάγραμμα ενός κυττάρου πυριτίου, το τυπικό ηλιακό κύτταρο που χρησιμοποιείται σήμερα. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται μέσα στον ημιαγωγό εξάγεται από τις επαφές στο εμπρόσθιο και πίσω μέρος του κυττάρου. Η δομή της άνω επαφής η οποία πρέπει να επιτρέπει στο φως να περάσει διαμέσου αυτής κατασκευάζεται σε μορφή λεπτών μεταλλικών λωρίδων με ευρεία απόσταση [συνήθως ονομάζονται δείκτες (fingers)], οι οποίες τροφοδοτούν με ρεύμα μια πλατύτερη ράβδο οδήγησης. Το κύτταρο καλύπτεται μ' ένα λεπτό στρώμα διηλεκτρικού υλικού - την αντί ανακλαστική επιστρώση ή ARC - για να ελαχιστοποιήσει την ανάκλαση του φωτός από την φωτιζόμενη επιφάνεια.

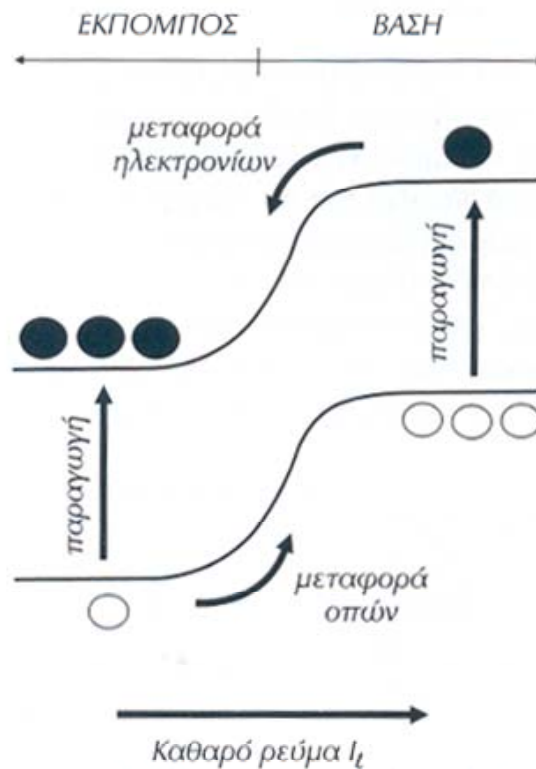


Σχήμα 3-10 Το ηλιακό κύτταρο πυριτίου.

Το Σχήμα 3-11 παρουσιάζει το διάγραμμα ζωνών του φωτιζόμενου τμήματος του ημιαγωγού. Το φως παράγει ζεύγη ηλεκτρονίων - οπών και στις δύο πλευρές της επαφής, μέσα στον εκπομπό τύπου N και στη βάση τύπου P. Οι παραγόμενοι φορείς μειονότητας - ηλεκτρόνια από τη βάση και οπές από τον εκπομπό - διαχέονται τότε προς την επαφή και αρπάζονται από το ηλεκτρικό πεδίο, έτσι παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα διαμέσου της διάταξης. Σημειώστε το πώς το ηλεκτρικό ρεύμα των ηλεκτρονίων και των οπών προστίθενται μια και έχουν αντίθετα φορτία. Η επαφή p-n επομένως διαχωρίζει τους φορείς με αντίθετο φορτίο και μετασχηματίζει το ρεύμα δημιουργίας  $I_1$  μεταξύ των ζωνών σε ηλεκτρικό ρεύμα διαμέσου της επαφής p-n.

Η χαρακτηριστική I-V ενός ηλιακού κυττάρου μπορεί να προκύψει σχεδιάζοντας ένα ισοδύναμο κύκλωμα της διάταξης (σχήμα 3.12). Η δημιουργία του ρεύματος  $I_1$  από το φως παρουσιάζεται από για γεννήτρια ρεύματος εν παραλλήλω με μια δίοδο η οποία παριστά την επαφή p-n.

Το ρεύμα εξόδου  $I$  είναι ίσο προς τη διαφορά μεταξύ του παραγόμενου από το φως ρεύματος  $I_1$  και του ρεύματος διόδου  $I_D$ . Η εξίσωση (3.1) τότε δίνει:



Σχήμα 3-11 Ρεύματα μέσα σε μια ένωση p-n που φωτίζεται

Σημειώνουμε ότι με ανοιχτό κύκλωμα, οπότε  $I = 0$ , όλο το παραγόμενο από το φως ρεύμα περνά διαμέσου της διόδου. Ενώ όταν έχουμε βραχυκύκλωμα ( $v = 0$ ), όλο αυτό το ρεύμα περνά διαμέσου του εξωτερικού φορτίου. Η χαρακτηριστική I-V (3.5) και η σχέση της με τη χαρακτηριστική της διόδου δεικνύεται στο Σχήμα 3-12.

$$I := I_1 - I_0 \left[ \text{Exp} \left( \frac{q \cdot V}{k \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

Η χαρακτηριστική I-V περιέχει αρκετά σημαντικά σημεία. Ένα από αυτά είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  το οποίο, όπως έχουμε σημειώσει, είναι απλώς το παραγόμενο από το φως ρεύμα  $I_l$ . Το δεύτερο είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  που βρίσκεται θέτοντας  $I=0$ .

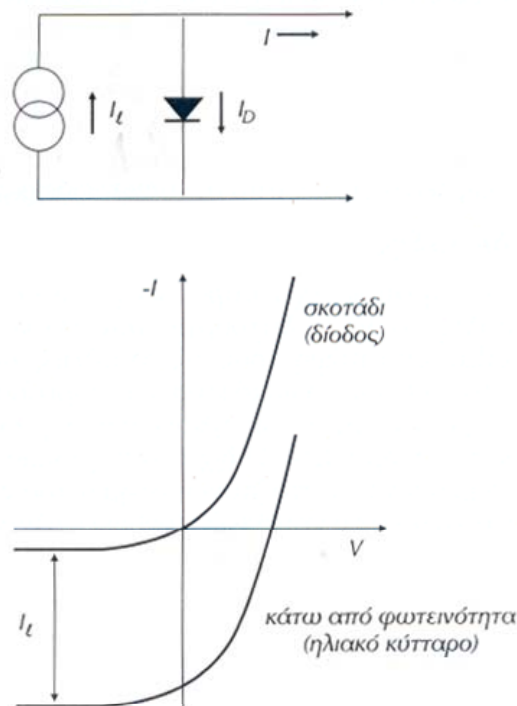
$$V_{oc} := \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_l}{I_0} + 1\right) \quad (3.6)$$

Αξίζει τον κόπο να εξετάσουμε αυτή την εξίσωση με περισσότερη λεπτομέρεια. Αμφότερα τα  $I_l$  και  $I_0$  εξαρτώνται από τη δομή της διάταξης. Εντούτοις είναι η τιμή του  $I_0$ , η οποία μπορεί να ποικίλλει κατά πολλές τάξεις μεγέθους, ανάλογα με τη γεωμετρία της διάταξης και την επεξεργασία της, η οποία καθορίζει την τάση ανοιχτού κυκλώματος στις πρακτικές περιπτώσεις.

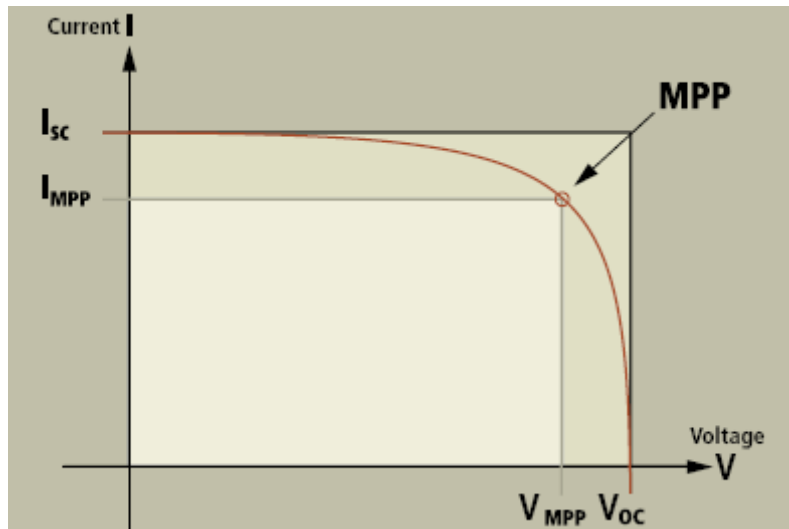
Καμία ισχύς δεν παράγεται όταν έχουμε βραχυκύκλωμα ή ανοιχτό κύκλωμα. Η μέγιστη ισχύς  $P_{max}$  παράγεται από τη διάταξη που προσεγγίζεται από ένα σημείο πάνω στη χαρακτηριστική στο σημείο που το γινόμενο  $IV$  είναι μέγιστο. Αυτό φαίνεται με γραφική απεικόνιση στο Σχήμα 3-13, στο οποίο η θέση του σημείου μέγιστης ισχύος εκπροσωπεί το μεγαλύτερο εμβαδόν του ορθογωνίου που δεικνύεται. Ορίζουμε συνήθως τον παράγοντα πληρότητα  $FF$  από την σχέση:

$$P_{max} = V_m \cdot I_m = FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc} \quad (3.7)$$

στην οποία  $V_m$  και  $I_m$  είναι η τάση και το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος.



Σχήμα 3-12 Το ισοδύναμο κύκλωμα και η χαρακτηριστική I-V ενός ηλιακού κυττάρου συγκρινόμενα προς μία δίοδο.

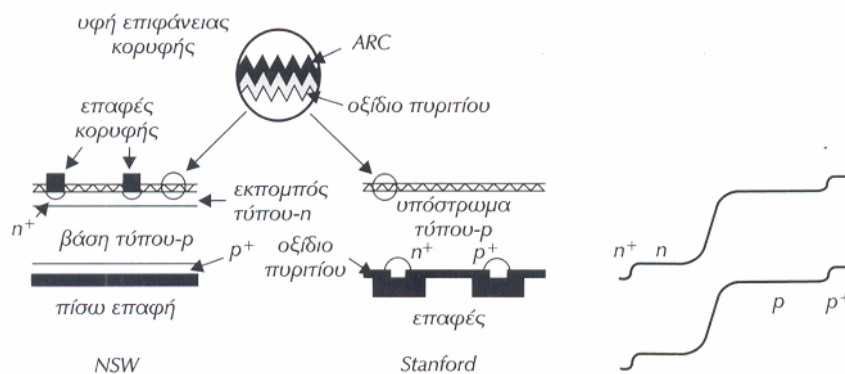


Σχήμα 3-13 Η χαρακτηριστική I-V ενός ηλιακού κυττάρου με το σημείο μέγιστης ισχύος.

Η απόδοση η ενός ηλιακού κυττάρου ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος  $P_{max}$ , που παράγεται από το ηλεκτρικό στοιχείο στο μέγιστο σημείο ισχύος κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ελέγχου, προς την ισχύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας πάνω του. Οι περισσότερο συχνές περιπτώσεις είναι: ακτινοβολία  $100 \text{ mW/cm}^2$ , τυπικό φάσμα αναφοράς AM 1.5 και θερμοκρασία τότε  $25^\circ\text{C}$ . Η χρήση αυτής της σταθερής τιμής ακτινοβολίας είναι ιδιαίτερα βολική γιατί επί τοις εκατό απόδοση του στοιχείου είναι αριθμητικώς ίση προς την ισχύ εξόδου από αυτό σε  $\text{mW/cm}^2$ . Μερικές φορές υιοθετούνται διαφορετικές συνθήκες ελέγχου για ηλιακά κύτταρα τα οποία λειτουργούν σ' ένα διαφορετικό περιβάλλον, για παράδειγμα, ηλιακά κύτταρα τα οποία τροφοδοτούν δορυφόρους  $\zeta$  λειτουργούν υπό συνθήκες φάσματος AM0.

### 3.3.4. Τυπικές δομές διάταξης

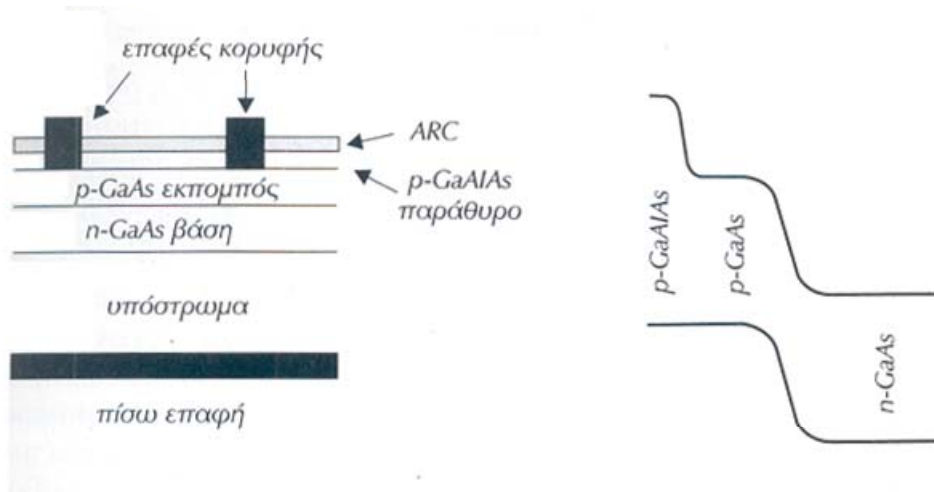
Η χαρακτηριστική I-V (3.5) η οποία έχει παραχθεί για μια απλοποιημένη διάταξη, περιγράφει πράγματι μάλλον καλά τη λειτουργία των ηλιακών κυττάρων ιδιαίτερα εάν οι παράμετροι λαμβάνουν υπόψη τους τις απώλειες που σημειώνονται στις πρακτικές διατάξεις. Αυτό το τυπικό ηλιακό κύτταρο πυριτίου (Σχήμα 3-10) έχει ήδη μνημονευθεί. Μερικοί σύγχρονοι τύποι των ηλιακών στοιχείων πυριτίου που έχουν ανακαλυφθεί φαίνονται στο Σχήμα 3-14. Η δομή του ηλιακού κυττάρου, παθητικού εκπομπού (PE5C), έχει δημιουργηθεί στο πανεπιστήμιο του New South Wales στην Αυστραλία για λειτουργία κάτω από κανονικές συνθήκες ηλιακού φωτός (NSW).



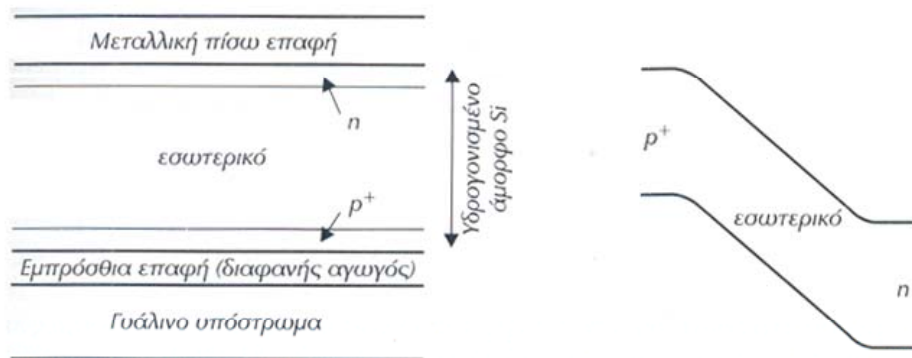
Σχήμα 3-14 Η δομή και το διάγραμμα ζώνης των υψηλής απόδοσης ηλιακών κυττάρων πυριτίου.



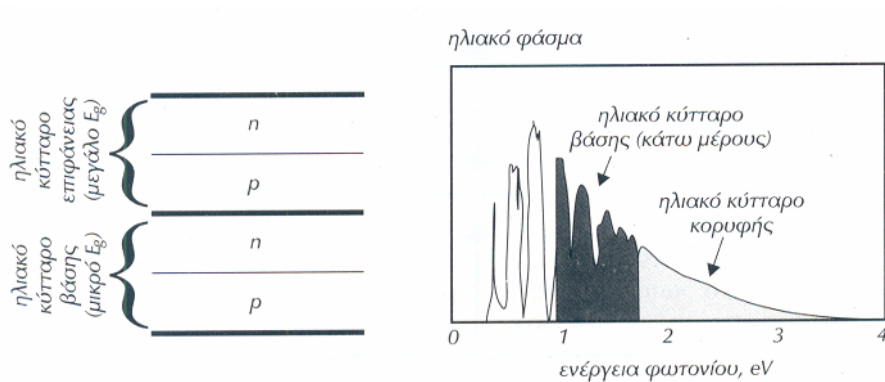
Το ηλιακό κύτταρο σημειακής επαφής του πανεπιστημίου STANFORD στις ΗΠΑ έχει σχεδιασθεί για άριστη λειτουργία κάτω από συγκεντρωμένο ηλιακό φως. Ηλιακά κύτταρα από αρσενικούχο γάλλιο (Σχήμα 3-15) συνήθως, λόγω του υψηλού κόστους τους, συστήνονται για λειτουργία σε δορυφόρους ή μέσα στα συγκεντρωτικά συστήματα. Το τυπικώς άμορφο ηλιακό κύτταρο (Σχήμα 3-16) και το ηλιακό κύτταρο του οποίου η δομή συνίσταται στη τοποθέτηση των ημιαγωγών τύπου P και N διαδοχικά τη μία μετά την άλλη (Σχήμα 3-17).



Σχήμα 3-15 Η δομή και το διάγραμμα ζωνών των ηλιακών κυττάρων αρσενικούχο γάλλιο.



Σχήμα 3-16 Η δομή του άμορφου p-ί-π ηλιακού κυττάρου στοιχείου πυριτίου.



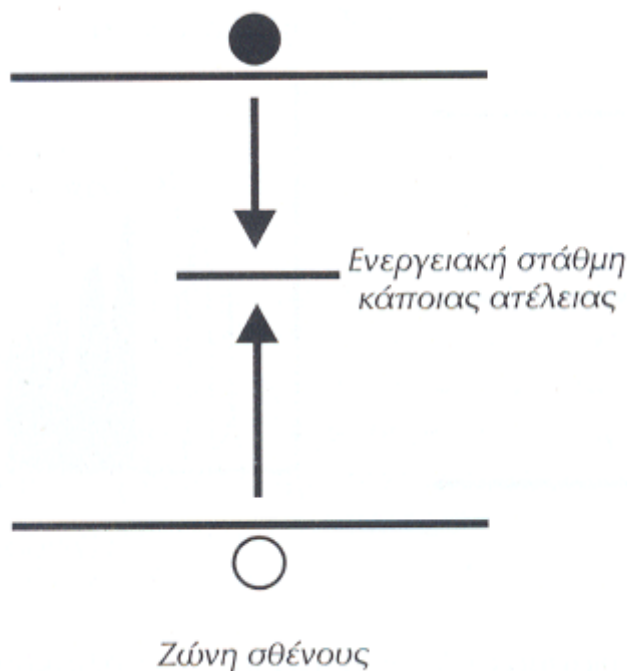
Σχήμα 3-17 Η δομή και οι φασματικές συνεργασίες του ηλιακού κυττάρου πολλαπλών επικαλύψεων ημιαγωγών τύπου P και n.

### 3.3.4.1 Απώλειες ισχύος στα ηλιακά κύτταρα

**Θεμελιώδεις απώλειες.** Όπως έχουμε δει στο τμήμα (3.3.2.3), η δημιουργία φορέων μέσα στον ημιαγωγό από το φως περιλαμβάνει σημαντική μετατροπή της ενέργειας των παραγόμενων φορέων σε θερμότητα. Επιπρόσθετα ένα σημαντικό τμήμα του ηλιακού φάσματος δεν είναι χρήσιμο λόγω της ανικανότητας ενός ημιαγωγού να απορροφήσει το φως με ενέργεια μικρότερη του ενεργειακού του χάσματος.

Μπορούν να ελαττωθούν αυτές οι απώλειες; Ναι, αλλά όχι με μια απλή δομή την οποία έχουμε στο μυαλό μας αυτή τη στιγμή. Μια τέτοια διάταξη ονομάζεται ηλιακό κύτταρο πολλαπλών επικαλύψεων (tandem cell) Σχήμα 3-17 και εκπροσωπεί μια στήλη αρκετών ηλεκτρικών κυττάρων, που το καθένα λειτουργεί σύμφωνα με τις αρχές τις οποίες έχουμε περιγράψει. Το ηλιακό κύτταρο κορυφής πρέπει να κατασκευάζεται από έναν ημιαγωγό μεγάλου ΕΥ και να αξιοποιεί την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος. Το διερχόμενο φως στη συνέχεια αξιοποιείται από το ηλιακό κύτταρο (βάσης). Αυτή η διάταξη αυξάνει σημαντικά την απόδοση που μπορούμε να επιτύχουμε. Έχουν ήδη παρουσιαστεί εργαστηριακές διατάξεις έχουν ήδη επιδειχθεί που λειτουργούν με πάνω από 30% απόδοση. Οι περισσότερες από αυτές τις δομές βρίσκονται στο στάδιο του πειραματισμού αλλά μερικές διατάξεις λεπτής μεμβράνης αυτού του τύπου ίσως δεν θ' αργήσουν να καρποφορήσουν καθώς θα δούμε στο τμήμα (3.5).

**Επανασύνδεση.** Μια αντίθετη διαδικασία από τη δημιουργία φορέων είναι η επανασύνδεση, όταν ένα ζεύγος ηλεκτρονίου - οπής εξαφανίζεται. Η επανασύνδεση είναι περισσότερο συνηθής στις προσμίξεις ή στις ατέλειες της κρυσταλλικής δομής ή στην επιφάνεια του ημιαγωγού) όπου δηλαδή ενεργειακές καταστάσεις (στάθμες) μπορούν να λειτουργούν στο εσωτερικό του ενεργειακού χάσματος. Αυτές οι στάθμες λειτουργούν, σαν σκαλοπάτια για τα ηλεκτρόνια που επιστρέφουν στη ζώνη σθένους και επανασυνδέονται με τις οπές (Σχήμα 3-18). Μια σημαντική περιοχή, που συμβαίνει επανασύνδεση είναι επίσης οι ωμικές μεταλλικές επαφές στον ημιαγωγό.



Σχήμα 3-18 Επανασύνδεση των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών υποβοηθούμενη από ατέλειες.

Ποια μέτρα μπορούμε να πάρουμε για να ελαχιστοποιήσουμε τις απώλειες επανασύνδεσης; Η επανασύνδεση στην επιφάνεια και στις επαφές που είναι σημαντικές στα συμβατικά ηλιακά στοιχεία (Σχήμα 3-10) μπορούν να ελαττωθούν προσαρμόζοντας τη δομή του υλικού. Τα σχήματα 3.14 και 3.15 δείχνουν την εφαρμογή τέτοιων μέτρων στα υψηλής απόδοσης ηλιακά κύτταρα πυριτίου. Οι εξωτερικές επιφάνειες του ημιαγωγού εδώ είναι προστατευμένες από ένα στρώμα παθητικού οξειδίου για να ελαττωθεί η επιφανειακή επανασύνδεση. Το ανώτερο στρώμα του GaAlAs στο ηλιακό κύτταρο GaAs έχει ένα παρόμοιο σκοπό. Οι επαφές περιβάλλονται από βαριά ντοπαρισμένες περιοχές, που ενεργούν ως "καθρέφτες φορέων μειονότητας" οι οποίοι εμποδίζουν τους φορείς μειονότητας στο να προσεγγίσουν τις επαφές και να επανασυνδεθούν.

Η επανασύνδεση ελαττώνει τόσο την τάση όσο και το ρεύμα εξόδου από το φωτοκύτταρο. Οι απώλειες τάσης ελαττώνουν την μέγιστη τιμή που παρέχεται από

τη σχέση (3.4) στην τιμή ανοιχτού κυκλώματος, και που περιορίζεται κυρίως από το ρεύμα κόρου σκότους 10. Αυτό το ρεύμα περιέχει δύο συνεισφορές, η κάθε μία είναι ανάλογη προς τον αριθμό των γεγονότων επανασύνδεσης και επομένως προς τον όγκο κάθε περιοχής εκατέρωθεν της επαφής. Το γεγονός αυτό ερευνάται στο φωτοκύτταρο σημειακής επαφής του Stanford (Σχήμα 3-14) όπου επιτυγχάνεται μεγάλη ελάττωση του όγκου του εκπομπού.

Οι απώλειες του ρεύματος μπορούν να ομαδοποιηθούν κάτω από τον όρο συλλογική απόδοση, δηλαδή το λόγο του αριθμού των φορέων, που παράγονται από το φως, και του αριθμού που φτάνει στην επαφή. Η εξέταση της συλλογικής απόδοσης επηρεάζει τη σχεδίαση του φωτοκυττάρου. Στα κρυσταλλικά υλικά τα χαρακτηριστικά μεταφοράς είναι συνήθως καλά και η διάδοση των φορέων με απλή διάχυση είναι αρκετά αποτελεσματική. Στα άμορφα και πολυκρυσταλλικά λεπτά ημένια όμως ηλεκτρικά πεδία χρειάζονται, για να έλξουν τους φορείς, όπως μπορούμε να δούμε στη σχεδίαση του άμορφου φωτοκυττάρου πυριτίου p-i-n (Σχήμα 3-16).

Άλλες απώλειες ρεύματος που έχουμε στο φωτοκυττάρου, οφείλονται στην ανάκλαση του φωτός από την πρώτη επιφάνεια, στη σκίαση του φωτοκυττάρου από τις επιφανειακές επαφές, στην ελλειπή απορρόφηση του φωτός. Το τελευταίο χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα κρυσταλλικά φωτοκύτταρα πυριτίου από τη στιγμή που - όπως έχουμε δει στο τμήμα 3.3.2.3 - Το πυρίτιο έχει φτωχά χαρακτηριστικά απορρόφησης του φωτός. Διάφορα μέτρα μπορούν να υιοθετηθούν για να ελαχιστοποιηθούν αυτές οι απώλειες.

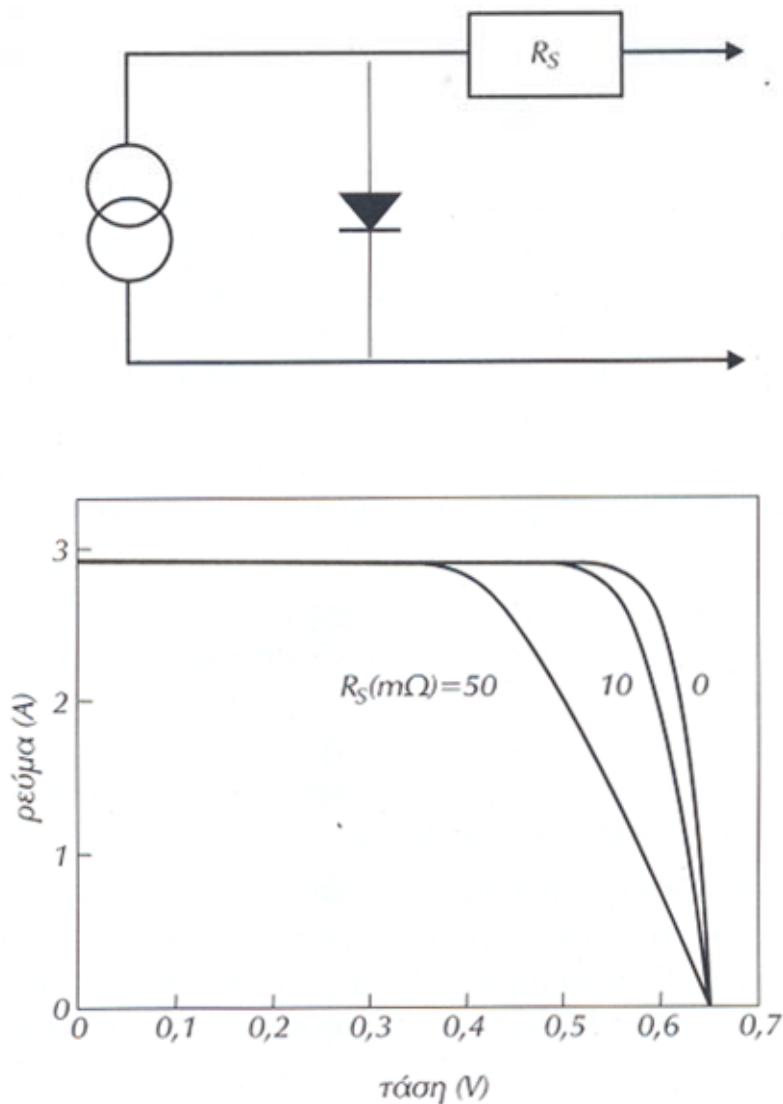
Η σκίαση της επιφανειακής επαφής είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για φωτοκύτταρα που λειτουργούν κάτω από συγκεντρωμένο μεγάλης έντασης ηλιακό φως. Είναι επομένως επωφελές να εξαλείψουμε τελείως τη σκίαση, όπως στα φωτοκύτταρα σημειακής επαφής του STANFORD, μεταφέροντας και τις δύο επαφές στο πίσω μέρος του φωτοκυττάρου.

Η ανάκλαση της ανώτερης επιφάνειας είναι συνήθως περίπου το 10% για ένα φωτοκύτταρο που καλύπτεται με μια μονή στοιβάδα ARC και μπορεί να ελαττωθεί περισσότερο με την εφαρμογή δύο ή περισσότερων στοιβάδων. Άλλη τεχνική είναι η επιφανειακή κατεργασία.

Καθώς θα δούμε στο τμήμα (3.4) η ανώτερη επιφάνεια ενός φωτοκυττάρου πυριτίου μπορεί να διαμορφωθεί με πολλές μικρές πυραμίδες οι οποίες δίνουν στο ανακλώμενο φως μια άλλη ευκαιρία απορρόφησης. Όταν η μέθοδος αυτή συνδυάζεται με αυτή της απλής στοιβάδας ARC η ανακλαστική ικανότητα της επιφάνειας μπορεί να πέσει κάτω από 1 %.

Η απορρόφηση του φωτός μέσα στο φωτοκύτταρο πυριτίου μπορεί να αυξηθεί κατασκευάζοντας τον πίσω ακροδέκτη οπτικώς ανακλαστικό και σε συνδυασμό με μια κατεργασία της ανώτερης επιφάνειας έχει ως αποτέλεσμα την αποτελεσματική παγίδευση του φωτός πράγμα που εξουδετερώνει τη μικρή απορροφητικότητα του πυριτίου.

**Αντίσταση σειράς.** Η μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από το φωτοκύτταρο περιλαμβάνει ωμικές απώλειες. Αυτές μπορούν να ομαδοποιηθούν και να περιληφθούν στο ισοδύναμο κύκλωμα ως μια αντίσταση (Σχήμα 3-19). Φαίνεται ότι η αντίσταση αυτή σειράς επηρεάζει τη λειτουργία του ηλιακού στοιχείου κυρίως ελαττώνοντας το συντελεστή πληρότητας.

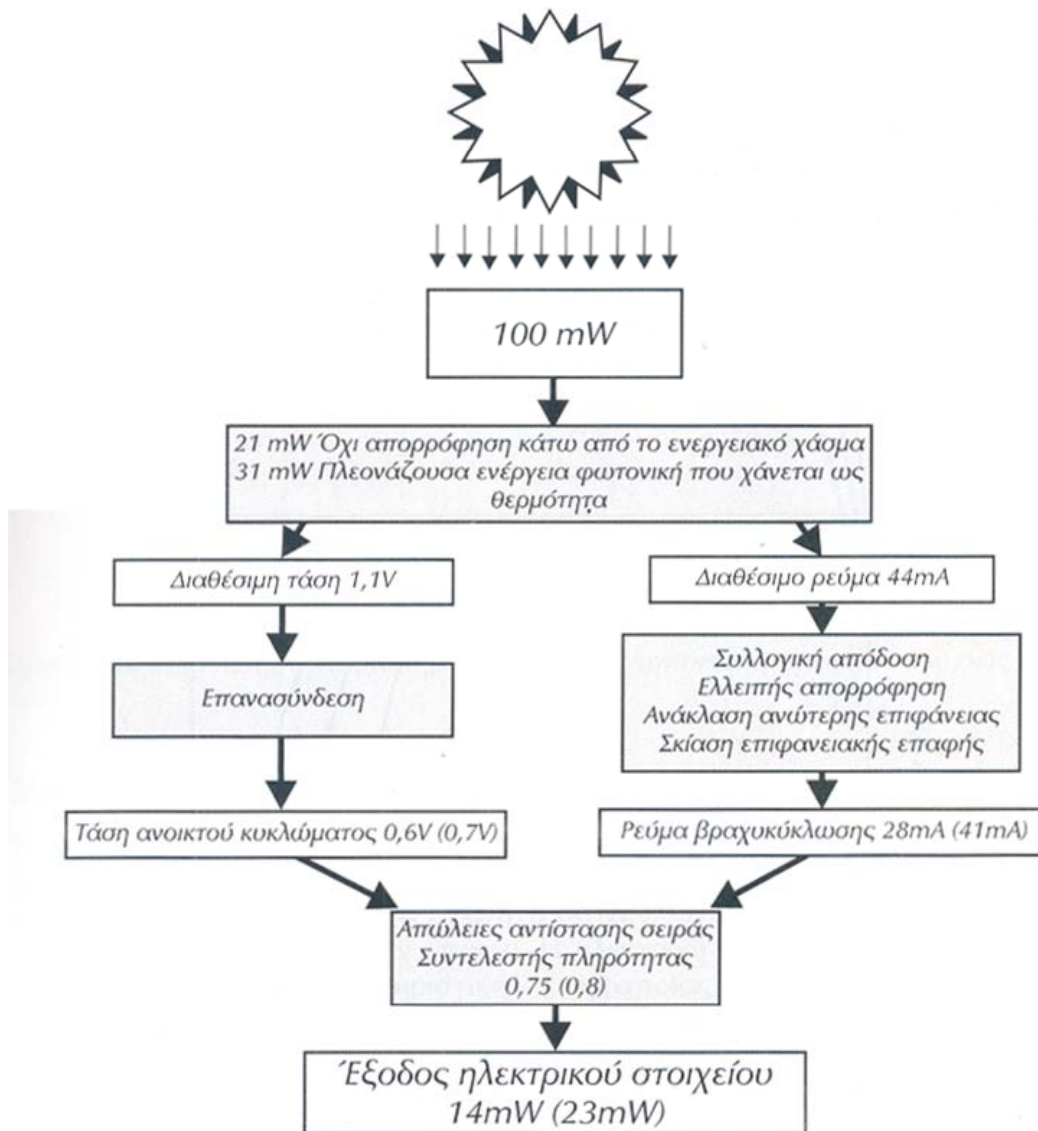


Σχήμα 3-19 Η αντίσταση σειράς και η επίδρασή της πάνω στη χαρακτηριστική I-V ενός φωτοκυττάρου.

Η χαρακτηριστική I-V μιας πρακτικής διάταξης μερικές φορές προσεγγίζεται καλύτερα από μια τροποποιημένη έκφραση:

$$I := I_1 - I_0 \left[ \text{Exp} \left( \frac{q \cdot V + I \cdot R_S}{m \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (3.8)$$

η οποία επίσης περιλαμβάνει την αντίσταση σειράς  $R_S$ . Εδώ το  $m$  είναι ένας εμπειρικός παράγων μη γραμμικότητας, του οποίου η τιμή βρίσκεται συνήθως κοντά στη μονάδα. Το παραγόμενο από το φως ρεύμα στην 3.8 λαμβάνεται ως η μετρήσιμη παράμετρος, η οποία λαμβάνει υπόψη όλες τις απώλειες του ρεύματος στο φωτοκύτταρο.



Σχήμα 3-20 Απώλειες ισχύος μέσα στα φωτοστοιχεία. Οι αριθμοί είναι ανά τετραγωνικό εκατοστό για φωτοκύτταρα εμπορικής παραγωγής και (σε παρένθεση) για φωτοκύτταρα εργαστηρίου.

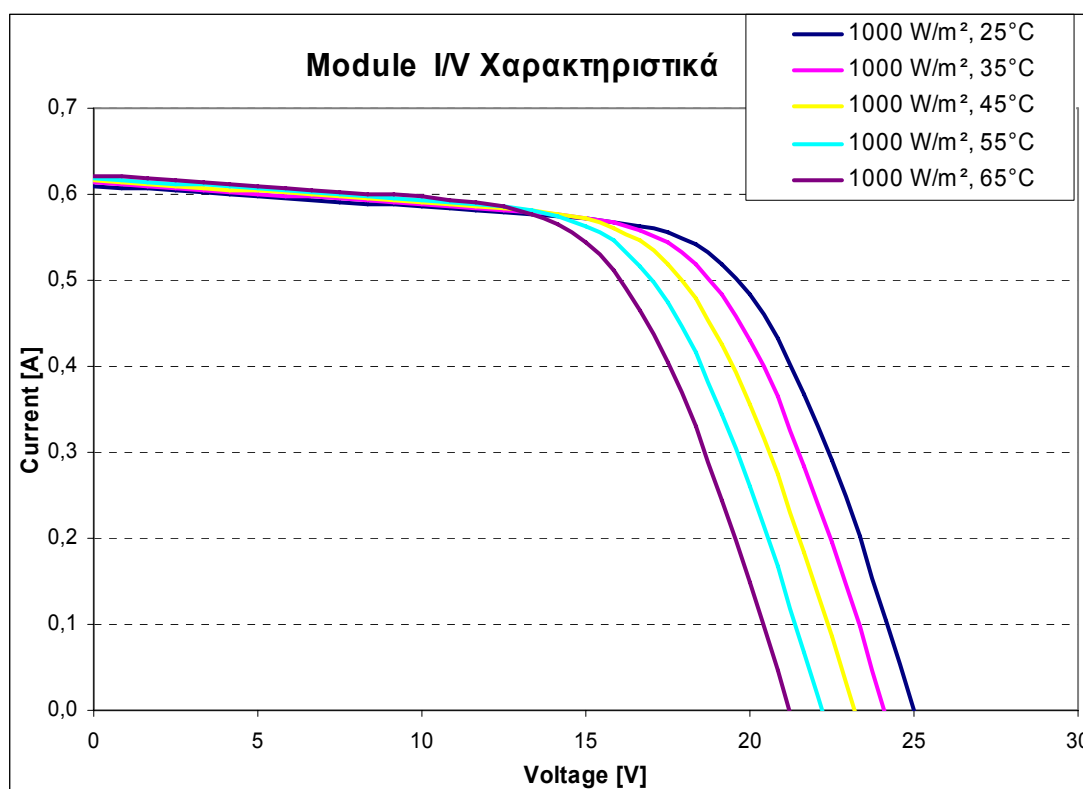
Οι απώλειες τις οποίες έχουμε αναλύσει σ' αυτό το τμήμα συνοψίζονται στο Σχήμα 3-20. Φαίνεται ότι οι θεμελιώδεις απώλειες περιορίζουν τη μέγιστη θεωρητική απόδοση ενός φωτοκυττάρου πυριτίου περίπου σε 48%. Πρόσθετες απώλειες τάσης (-36%), απώλειες ρεύματος (-10%) και απώλειες σχετιζόμενες με τον συντελεστή πληρότητας (-20%)

εξηγούν το ότι η απόδοση είναι περίπου 23%, για το καλύτερο φωτοκύτταρο πυριτίου σήμερα. Υψηλότερες αποδόσεις έχουν ήδη επιτευχθεί κάτω από συγκεντρωμένο ηλιακό φως σε διατάξεις από διαφορετικά υλικά ή με δομή tandem. Το τυπικό εμπορικό φωτοκυττάρων πυριτίου έχει απόδοση 14% περίπου. Εντούτοις, νέα υλικά με απόδοση που προσεγγίζει το 18% αρχίζουν να εμφανίζονται στην αγορά.

### 3.3.4.2 Επιδράσεις της θερμοκρασίας και έντασης φωτισμού

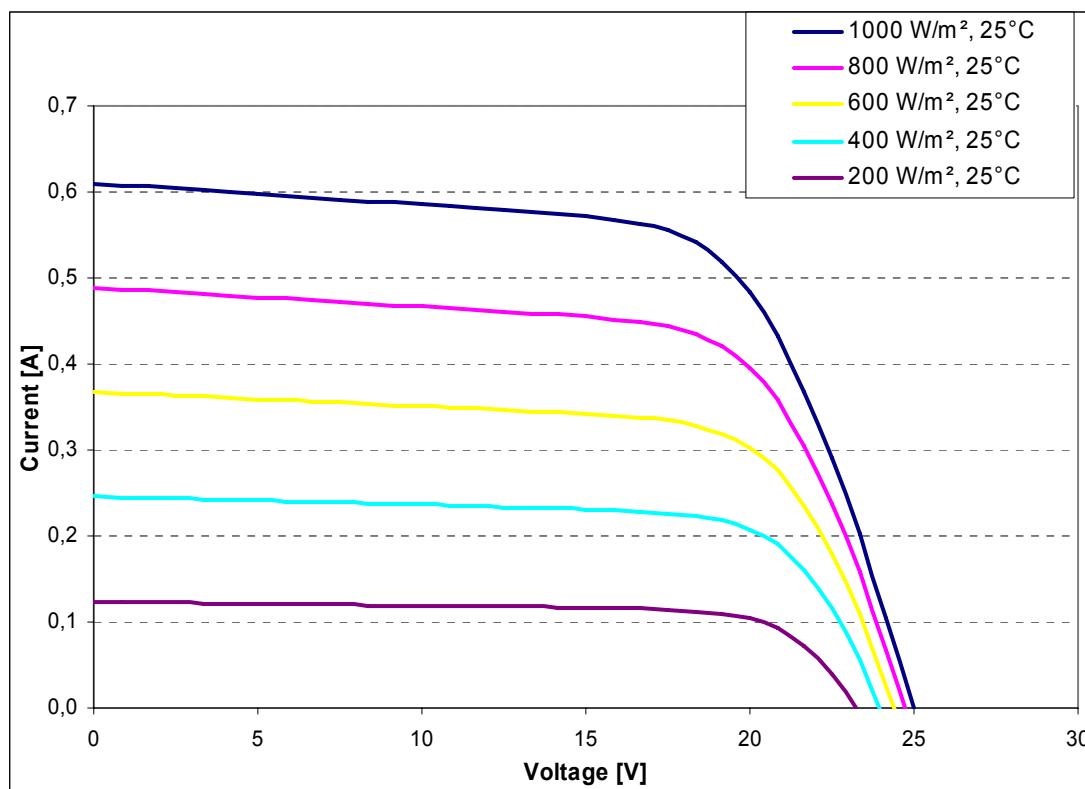
Στις πρακτικές εφαρμογές τα φωτοκύτταρα δεν λειτουργούν κάτω από σταθερές συνθήκες. Οι δύο περισσότερο σημαντικές επιδράσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη οφείλονται στη μεταβολή της θερμοκρασίας και της έντασης του φωτισμού.

**Θερμοκρασία.** Αυτή έχει μια σημαντική επίδραση πάνω στην ισχύ εξόδου του φωτοκυττάρου (Σχήμα 3-21). Η πιο σημαντική είναι η εξάρτηση της τάσης από τη θερμοκρασία η οποία ελαττώνεται με την αύξηση αυτής (ο θερμοκρασιακός συντελεστής της είναι αρνητικός). Η μείωση της τάσης ενός φωτοκυττάρου πυριτίου είναι τυπικά 2.3 mV ανά °C. Η θερμοκρασιακή μεταβολή του ρεύματος ή του συντελεστή πληρότητας είναι πολύ μικρότερη και συνήθως κρίνεται αμελητέα στη σχεδίαση των ΦΒ συστημάτων.



Σχήμα 3-21 Θερμοκρασιακή εξάρτηση της χαρακτηριστικής I-V ενός φωτοκυττάρου.

**Επίδραση της έντασης φωτισμού.** Οι χαρακτηριστικές του φωτοκυττάρου υπό την επίδραση διαφορετικών επιπέδων ακτινοβολίας φαίνονται στο Σχήμα 3-22. Όπως έχουμε ήδη δει, το φωτόρρευμα είναι ανάλογο προς τη ροή των φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη της  $E_g$ . Αυξάνοντας την ένταση του φωτισμού αυξάνεται, κατά την ίδια αναλογία, η ροή των φωτονίων η οποία, εν συνεχεία, παράγει ένα κατ' αναλογία υψηλότερο ρεύμα. Επομένως, το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός φωτοκυττάρου είναι ανάλογο προς την ένταση του φωτισμού. Η μεταβολή της τάσης όπως μπορεί κάποιος να δει από την εξίσωση (3.6) είναι πολύ μικρότερη (εξαρτάται λογαριθμικά από την ένταση του φωτισμού) και συνήθως δεν υπολογίζεται στις πρακτικές εφαρμογές.



Σχήμα 3-22 Εξάρτηση της χαρακτηριστικής I-V από την ένταση του φωτισμού ενός φωτοκυττάρου.

### Περίληψη

Το φωτοκύτταρο είναι μια διάταξη ημιαγωγού, η οποία μετατρέπει την κβαντική ροή των φωτονίων σε ηλεκτρικό ρεύμα. Όταν το φως απορροφηθεί, αρχικά δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων - οπών. Τα ευκίνητα αυτά φορτία στη συνέχεια, διαχωρίζονται από το ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή. Η ηλεκτρική απόκριση του φωτοκυττάρου περιγράφεται από τη χαρακτηριστική I-V της οποίας οι παράμετροι εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του υλικού του ημιαγωγού. Ποικίλες δομές φωτοκυττάρων έχουν αναλυθεί σε σχέση με τις απώλειες ισχύος σ' αυτά. Εκτός από τις θεμελιώδεις απώλειες, που σχετίζονται με την απορρόφηση του φωτός, άλλες απώλειες, συμπεριλαμβανομένης της επανασύνδεσης και των απωλειών από τη δομή του υλικού, έχουν ήδη αναλυθεί με αρκετή λεπτομέρεια.

## 4. Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία

### Σκοπός

Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η επισκόπηση της δομής, της λειτουργίας και του σχεδιασμού των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

### Σύμβολα και μονάδες μέτρησης

Σύμβολο		Μονάδες SI
EL	Ημερήσιο απαιτούμενη ενέργεια φορτίου	J
FF	Συντελεστής πληρότητας	
G	Ηλιακή ακτινοβολία	W/m <sup>2</sup>
IL	Μέσο ρεύμα φορτίου	A
Im	Ρεύμα βασικής μονάδας στο μέγιστο σημείο ισχύος	A
Ip	Φ.Β. ρεύμα στο μέγιστο σημείο ισχύος	A
Isc	Ρεύμα βραχυκυκλώματος υπό κανονικές Συνθήκες	A
K	Σταθερά Boltzmann	J/K
LLP	Πιθανότητα απώλειας φορτίου	
NOCT	Θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας ηλεκτρικού στοιχείου	K
Ns	Αριθμός σε σειρά συνδεδεμένων βασικών μονάδων	
Np	Αριθμός παράλληλων σειρών	
Nc	Αριθμός ηλεκτρικών στοιχείων μέσα σε μια βασική μονάδα	
Pmax	Ισχύς στο μέγιστο σημείο ισχύος	W
PSH	Ωρες Ηλιακού μεγίστου	C
Qyd	Ετήσιο έλλειμμα φορτίου	C
Qios	Έλλειμμα φορτίου για αντιστάθμιση των ,χωρίς λιακάδα ημερών	C
QB	Ονομαστική χωρητικότητα μπαταρίας	C
R	Αντίσταση φορτίου	Ω
Rs	Αντίσταση σειράς	Ω
SF	Συντελεστής (ασφαλείας) υπερμεγέθυνσης διάταξης	
Ta	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	K
Tc	Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοκυττάρου	K
Ti	Διάρκεια λειτουργίας της συσκευής	s
Vdc	Τάση DC ράβδου επαφής	V
Voc	Τάση ανοικτού κυκλώματος	V



VR	Τάση σε αντίσταση φορτίου	V
Vm	Τάση στη μέγιστη ισχύ	V
Wi	Ονομαστική ισχύς της συσκευής i	W
ΔΕ	Ετήσιο ενεργειακό έλλειμμα	
Φ	Χαμηλότερη επιτρεπτή φόρτιση Της μπαταρίας	J

Τιμές φυσικών σταθερών

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} = 86.3 \cdot 10^{-3} \text{ eV/K}$$

## 4.1. Εισαγωγή

Τα φωτοκύτταρα δεν είναι τα μόνα συστατικά ενός Φ.Β. συστήματος. Πολλά άλλα τμήματα συνήθως απαιτούνται για να παράσχουν μια ικανοποιητική ηλεκτρική τροφοδοσία.

Πολλά Φ.Β. συστήματα περιλαμβάνουν μια πρόβλεψη για αποθήκευση ενέργειας και για την παροχή ηλεκτρισμού το βράδυ και κατά τη διάρκεια περιόδων άσχημου καιρού.

Τα ηλιακά ηλεκτρικά στοιχεία παράγουν συνεχές ρεύμα. Από τη στιγμή που οι περισσότερες εφαρμογές εργάζονται με εναλλασσόμενο ρεύμα, απαιτείται συνήθως κάποια μορφή ρύθμισης της ισχύος.

Άλλα ρυθμιστικά συστήματα ή στοιχεία ελέγχου χρειάζονται για τη διασύνδεση των διαφόρων τμημάτων του συστήματος και για να αντιμετωπισθεί η φυσική αστάθεια της μετατρεπόμενης ηλιακής ενέργειας. Μερικά συστήματα αποβλέπουν στην παρακολούθηση της λειτουργίας.

Όλα αυτά τα στοιχεία πρέπει να είναι καταλλήλως διασυνδεδεμένα, να έχουν ταξινομηθεί και καθορισθεί για τη λειτουργία του Φ.Β..

Στο τμήμα 4.2 θα εξετάσουμε τη δομή ενός συστήματος και το πως τα διάφορα τμήματα ή υποσυστήματα συνεργάζονται για την παροχή της επιθυμητής ισχύος εξόδου.

Κάθε υποσύστημα θα αναλυθεί με περισσότερες λεπτομέρειες στα τμήματα (4.3) - (4.5). Η κατασκευή και τα υλικά θα συνοψισθούν παρουσιάζοντας συνάμα και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους. Θα δειχθεί το πως τα ηλιακά στοιχεία, τα οποία ήταν το θέμα του κεφαλαίου 3, μπορούν να ολοκληρωθούν μέσα σε μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Θα φωτίσουμε τις φωτοβολταϊκές πλευρές των υποσυστημάτων της αποθήκευσης και ρύθμισης ισχύος, τα οποία επίσης αποτελούν τυπικά συστατικά και άλλων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και ελέγχου.

Το μέγεθος του συστήματος και, ιδιαίτερα, της Φ.Β. γεννήτρια και των υποσυστημάτων αποθήκευσης εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση και από την εφαρμογή στην οποία το σύστημα προορίζεται. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να είναι μια πολύ αξιόπιστη πηγή ισχύος σε απόμερες τοποθεσίες με ελάχιστη φροντίδα και συντήρηση. Ο βαθμός αξιοπιστίας ενός Φ.Β. συστήματος είναι επομένως πολύ σημαντικός. Όπως θα δούμε σ' αυτό το κεφάλαιο, πολλές αποφάσεις, οι οποίες υπεισέρχονται στη σχεδίαση ενός συστήματος, αντανakλούν μια προσεκτική εξισορρόπηση ανάμεσα στην αναζήτηση για μέγιστη παραγωγή ισχύος και την αξιοπιστία. Συγκεκριμένα η ταξινόμηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ένα σημαντικό μέρος της σχεδίασης του.

## 4.2. Δομή ενός φωτοβολταϊκού συστήματος

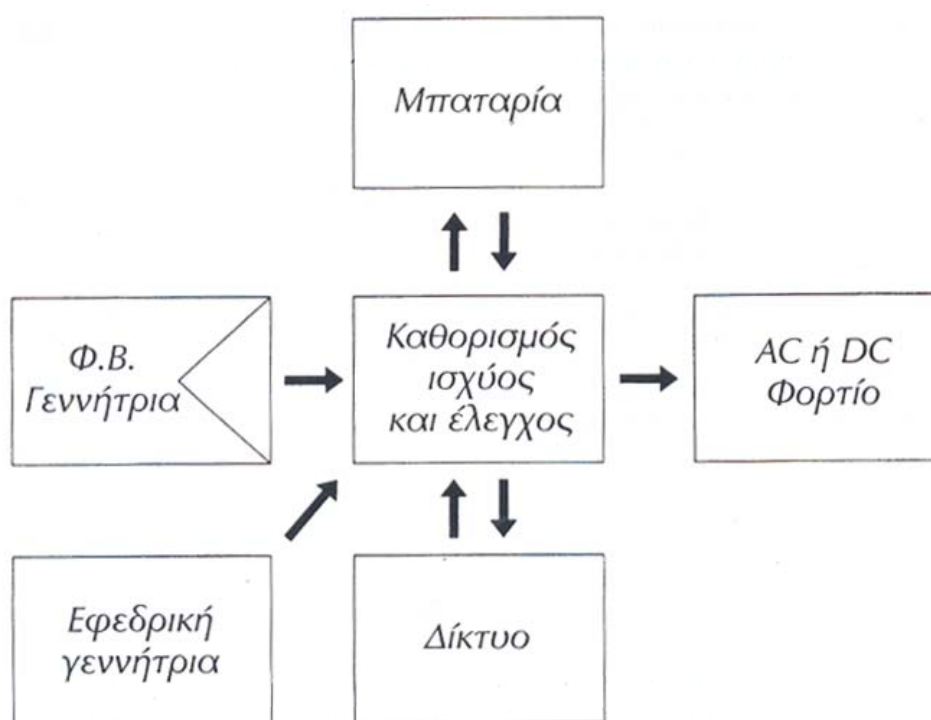
Το φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα αριθμό μερών ή υποσυστημάτων (Σχήμα 4-1)

(α) Τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια με τη μηχανική υποστήριξη και πιθανόν ένα σύστημα παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς.

(β) Μπαταρίες (υποσύστημα αποθήκευσης).

(γ) Καθορισμό ισχύος και συσκευή ελέγχου που περιλαμβάνει φροντίδα για μέτρηση και παρατήρηση.

(δ) Εφεδρική γεννήτρια. Η επιλογή του πώς και ποια από αυτά τα στοιχεία ολοκληρώνονται μέσα στο σύστημα εξαρτάται από ποικίλες εκτιμήσεις.



Σχήμα 4-1 Το φωτοβολταϊκό σύστημα. Συνήθως δεν περιλαμβάνονται όλα τα υποσυστήματα.

Υπάρχουν δυο κύριες κατηγορίες συστημάτων, το διασυνδεδεμένο με το δίκτυο και το αυτόνομο. Η απλούστερη μορφή του δεύτερου εκ των δυο αποτελείται απλώς από μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια, η οποία μόνη της τροφοδοτεί με ισχύ DC ένα φορτίο οποτεδήποτε υπάρχει αποτελεσματική φωτεινότητα. Αυτού του τύπου το σύστημα είναι κοινό σε εφαρμογές άντλησης. Σε άλλες περιπτώσεις το σύστημα θα περιέχει συνήθως μια φροντίδα για αποθήκευση ενέργειας από τις μπαταρίες. Κάποια μορφή ρύθμισης της ισχύος συμπεριλαμβάνεται συχνά, όπως στην περίπτωση όταν απαιτείται ρεύμα AC στην έξοδο από το σύστημα. Σε μερικές περιπτώσεις το σύστημα περιέχει μια εφεδρική γεννήτρια.

Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα μπορούν να υποδιαιρεθούν σ' εκείνα στα οποία το δίκτυο ενεργεί απλώς ως μια βοηθητική τροφοδοσία (εφεδρικό δίκτυο) και εκείνα τα οποία ίσως λάβουν επίσης πρόσθετη ισχύ από τη Φ.Β. γεννήτρια (αλληλοεπιδρώμενο δίκτυο). Μέσα στους Φ.Β. σταθμούς όλη η παραγόμενη ισχύς τροφοδοτείται στο δίκτυο.

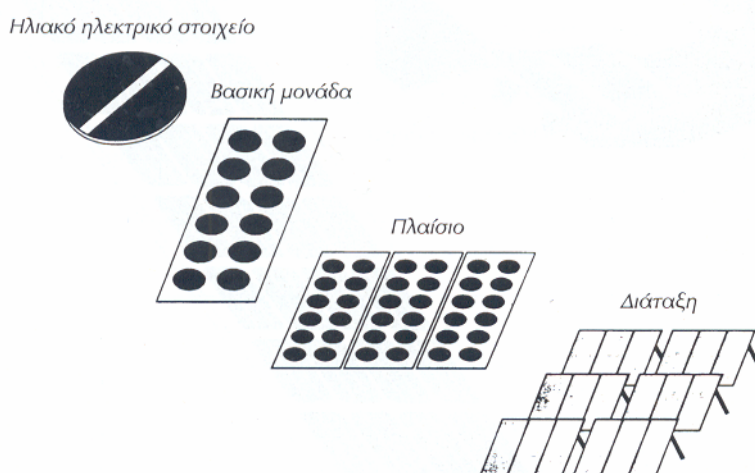
## Περίληψη

Επαναλάβουμε τους βασικούς τύπους των φωτοβολταϊκών συστημάτων και παρουσιάσαμε στα βασικά τους υποσυστήματα. Δείξαμε τη διαφορά μεταξύ των συστημάτων με σύνδεση δικτύου και αυτών που είναι αυτόνομα.

### 4.3. Η Φωτοβολταϊκή γεννήτρια

#### 4.3.1. Εισαγωγή

Η καρδιά του συστήματος είναι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Αυτή αποτελείται από φωτοβολταϊκές βασικές μονάδες, οι οποίες είναι εσωτερικώς συνδεδεμένες για να σχηματίσουν μια μονάδα παραγωγής ισχύος DC. Η φυσική συγκέντρωση των βασικών μονάδων με τα στοιχεία υποστήριξης τους συνήθως ονομάζεται διάταξη (Σχήμα 4-2).



Σχήμα 4-2 Η φωτοβολταϊκή ιεραρχία

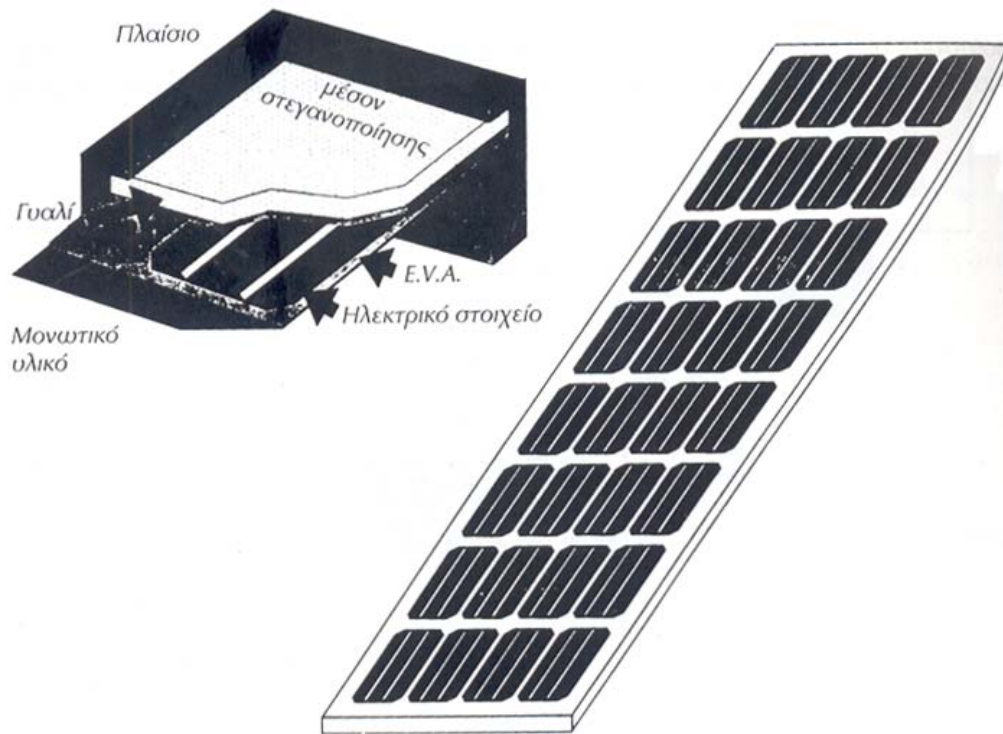
Η κατασκευή της βασικής μονάδας παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3. Σ το τμήμα (4.3.2) αυτού του κεφαλαίου θα εξετάσουμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μιας βασικής μονάδας με λεπτομέρεια και θα δείξουμε το πώς καθορίζεται η έξοδος της βασικής μονάδας κατά τη διάρκεια της πρακτικής λειτουργίας.

Η εσωτερική σύνδεση μέσα σε μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια θα αναλυθεί στο τμήμα (4.3.3), στο οποίο περιγράφουμε τα χαρακτηριστικά μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας κάτω από καταστάσεις, οι οποίες συναντώνται σε συνθήκες πρακτικής λειτουργίας.

Στο τμήμα (4.3.4) αναλύουμε τις δυο βασικές επιλογές για τον προσανατολισμό: Σταθερής κλίσης ή ιχνηλάτησης.

#### 4.3.2. Φωτοβολταϊκές βασικές μονάδες

Τη φωτοβολταϊκή βασική μονάδα την έχουμε ήδη συναντήσει στο κεφάλαιο 3. Καθώς υπονοεί το όνομά της, η βασική μονάδα αποτελεί τη βασική μονάδα κατασκευής της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Η δομή μιας βασικής μονάδας που βασίζεται πάνω σε στοιχεία κρυσταλλικού ή ημικρυσταλλικού πυριτίου (αναλύθηκε στο τμήμα 3.4.5) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-3. Αυτός είναι ο τύπος της βασικής μονάδας, η οποία χρησιμοποιείται περισσότερο στην πράξη και θα πρέπει να εξετάσουμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της με περισσότερη λεπτομέρεια.



**Σχήμα 4-3 Φωτοβολταϊκή βασική μονάδα αποτελούμενη από ηλιακά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου.**

Συνήθως τα ηλιακά στοιχεία σε μια βασική μονάδα συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά. Αυτό οφείλεται στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κάθε ηλιακού στοιχείου. Όπως έχουμε δει στο κεφάλαιο 3, ένα τυπικό (διαμέτρου 4 ιντσών) ηλιακό στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου ή ένα (10 cm \* 10 cm) πολυκρυσταλλικό στοιχείο θα παρέχουν κάτω από κανονικές συνθήκες ισχύ μεταξύ 1 και 1.5 βατ, εξαρτώμενη από την απόδοση του ηλιακού στοιχείου. Αυτή η ισχύς παρέχεται συνήθως υπό τάση 0.5 ή 0.6 V. Από τη στιγμή που υπάρχουν πολύ λίγες εφαρμογές, οι οποίες εκτελούνται σε αυτή την τάση, η άμεση λύση είναι να συνδεθούν τα ηλιακά στοιχεία σε σειρά.

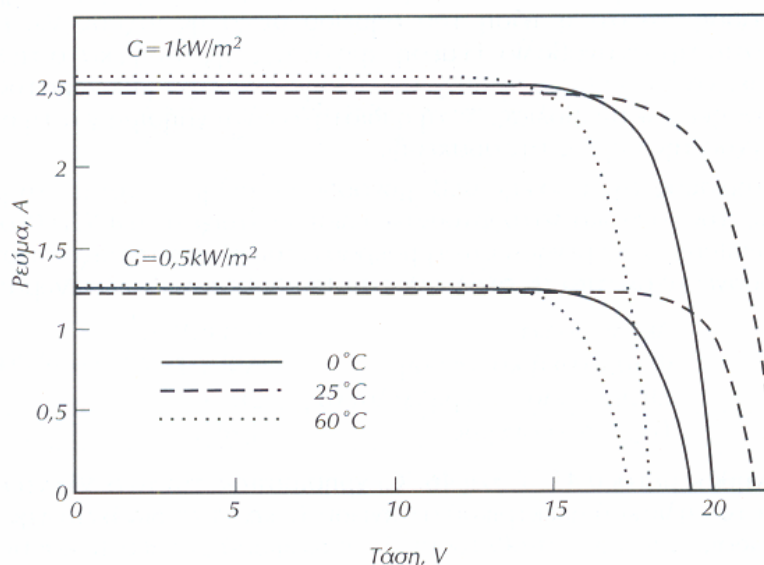
Ο αριθμός των ηλεκτρικών στοιχείων μέσα σε μια βασική μονάδα ρυθμίζεται από την τάση της βασικής μονάδας. Η ονομαστική τάση λειτουργίας του συστήματος συνήθως πρέπει να ταιριάζει με την ονομαστική τάση του υποσυστήματος αποθήκευσης. Οι περισσότερες εκ των φωτοβολταϊκών βασικών μονάδων, που κατασκευάζονται βιομηχανικά έχουν, επομένως, σταθερές διατάξεις, οι οποίες μπορούν να συνεργασθούν ακόμη και με μπαταρίες των 12Volt. Προνοώντας για κάποια υπέρταση προκειμένου να φορτισθεί η μπαταρία και να αντισταθμιστεί χαμηλότερη έξοδος, κάτω από συνθήκες χαμηλότερες των κανονικών, έχει βρεθεί ότι μια ομάδα των 33 έως 36 ηλιακών στοιχείων σε σειρά συνήθως εξασφαλίζουν αξιόπιστη λειτουργία.

Έτσι η ισχύς των βασικών μονάδων πυριτίου συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 40 και 60 W. Οι παράμετροι της βασικής μονάδας καθορίζονται από τον κατασκευαστή κάτω από τις ακόλουθες κανονικές συνθήκες:

$$\begin{aligned}
 &\text{Ακτινοβολία} && 1 \text{ kW/m}^2 \\
 &\text{Φασματική κατανομή} && \text{AM 1.5} \\
 &\text{Θερμοκρασία ηλιακού στοιχείου} && 25^\circ\text{C}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Πράγματι, αυτές είναι οι ίδιες συνθήκες με αυτές που χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρισθούν τα ηλιακά στοιχεία. Η ονομαστική έξοδος συνήθως ονομάζεται ισχύς κορυφής μιας βασικής μονάδας και εκφράζεται σε βαττ κορυφής (W).

Τα τρία περισσότερο σημαντικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μιας βασικής μονάδας είναι το ρεύμα βραχυκυκλώματος, η τάση ανοικτού κυκλώματος και το σημείο μέγιστης ισχύος σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία. Αυτές οι χαρακτηριστικές μοιάζουν με τη χαρακτηριστική I-V ενός ηλιακού στοιχείου (Σχήμα 4-4), ωστόσο μερικές συγκεκριμένες ιδιομορφίες χρειάζεται να διασαφιστούν.



**Σχήμα 4-4 Εξάρτηση της χαρακτηριστικής I-v βασικής μονάδας από τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία.**

Η **θερμοκρασία** είναι μια σημαντική παράμετρος λειτουργίας ενός Φ.Β. συστήματος. Όπως έχουμε δει στο κεφάλαιο 3, ο συντελεστής θερμοκρασίας για την τάση ανοικτού κυκλώματος είναι κατά προσέγγιση ίσος με  $-2.3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  για καθένα ηλιακό στοιχείο. Ο συντελεστής τάσης μιας βασικής μονάδας είναι επομένως αρνητικός και πολύ μεγάλος από τη στιγμή που συνδέονται σε σειρά 33 έως 36 ηλιακά στοιχεία. Ο συντελεστής ρεύματος, από την άλλη πλευρά, είναι θετικός και μικρός  $+6 \text{ }\mu\text{A}/^\circ\text{C}$  περίπου ανά τετραγωνικό εκατοστό της βασικής μονάδας. Συνεπώς, μόνο η μεταβολή τάσης σε σχέση μ' αυτή της θερμοκρασίας λαμβάνεται υπόψη για πρακτικούς κυρίως υπολογισμούς ενώ για κάθε βασική μονάδα αποτελούμενη από  $n_c$  ηλιακά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ισούται προς:

$$dV_{oc}/dT = -2.3 * n_c \text{ mV}/^\circ\text{C} \tag{4.2}$$

Είναι σημαντικό να σημειώσετε ότι η τάση καθορίζεται από τη θερμοκρασία λειτουργίας των ηλιακών στοιχείων, η οποία διαφέρει από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (βλέπε εξίσωση 4.5 παρακάτω).

Όπως και για καθένα ηλιακό στοιχείο, το ρεύμα βραχυκυκλώματος  $I_{sc}$  μιας βασικής μονάδας είναι ανάλογο προς την ακτινοβολία και επομένως θα ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ημέρας κατά τον ίδιο τρόπο. Εφόσον η τάση είναι μια λογαριθμική συνάρτηση του ρεύματος, θα εξαρτάται επίσης λογαριθμικά και από την ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια της ημέρας

επομένως η τάση θα μεταβάλλεται λιγότερο από ότι το ρεύμα. Στο σχεδιασμό της Φ.Β. γεννήτριας είναι συνηθισμένο να παραμελείτε η μεταβολή της τάσης και να λαμβάνεται το ρεύμα βραχυκυκλώματος ανάλογο προς την ακτινοβολία.

$$I_{sc}(G) = I_{sc}(\text{σε } 1 \text{ kW/m}^2) \times G(\text{σε } \text{kW/m}^2) \quad (4.3)$$

Η λειτουργία μιας βασικής μονάδας θα πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος. Είναι ένα σημαντικό γνώρισμα της χαρακτηριστικής της βασικής μονάδας, το ότι η τάση του σημείου μέγιστης ισχύος  $V_m$  είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την ακτινοβολία. Η μέση τιμή αυτής της τάσης κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί να εκτιμηθεί στο 80% της τάσης ανοικτού κυκλώματος κάτω από κανονικές συνθήκες ακτινοβολίας. Αυτή η ιδιότητα είναι χρήσιμη για τη σχεδίαση της μονάδας ελέγχου της ισχύος της συσκευής.

Ο χαρακτηρισμός της βασικής Φ.Β. μονάδας συμπληρώνεται με τη μέτρηση της θερμοκρασίας ενός κανονικά λειτουργούντος ηλιακού στοιχείου (NOCT) (Normal Operating Cell Temperature), οριζόμενης ως η θερμοκρασία του ηλιακού στοιχείου, όταν η βασική μονάδα λειτουργεί κάτω από τις ακόλουθες συνθήκες σε ανοικτό κύκλωμα:

Ακτινοβολία	0.8 kW/m <sup>2</sup>	
Φασματική κατανομή	AM 1.5	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	20°C	
Ταχύτητα ανέμου	1 m/s	(4.4)

Η NOCT (συνήθως μεταξύ 42°C και 46 °C) χρησιμοποιείται τότε για να καθορίσει τη θερμοκρασία του ηλιακού ηλεκτρικού στοιχείου  $T_c$  κατά τη διάρκεια της λειτουργίας βασικής μονάδας. Συνήθως υποθέτουμε ότι η διαφορά μεταξύ  $T_c$  και θερμοκρασίας περιβάλλοντος  $T_a$  εξαρτάται γραμμικά από την ακτινοβολία  $G_r$  κατά τον ακόλουθο τρόπο:

$$T_c := T_a + \frac{(N_o - 20) \cdot G_r}{0.8} \quad (4.5)$$

Το Σχήμα 4-5 συνοψίζει τους υπολογισμούς των παραμέτρων βασικής μονάδας κάτω από καταστάσεις λειτουργίας. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος καθορίζεται από την εξίσωση (4.3). Η θερμοκρασία λειτουργίας του ηλεκτρικού στοιχείου βρέθηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.5) και η τιμή του αποτελέσματος χρησιμοποιείται τότε για να βρεθεί η τάση ανοικτού κυκλώματος χρησιμοποιώντας την (4.2). Η εξάρτηση του συντελεστή πληρότητας από τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία είναι πολύπλοκη αλλά μπορεί να καθοριστεί υπολογίζοντας αρχικά την αντίσταση σειράς, η οποία είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες της βασικής μονάδας. Σε έναν απλοποιημένο υπολογισμό ο συντελεστής πληρότητας μπορεί να θεωρηθεί σταθερός. Αυτές οι παράμετροι στη συνέχεια παρέχουν τη μέγιστη ισχύ της βασικής μονάδας κάτω από ορισμένες συνθήκες λειτουργίας.

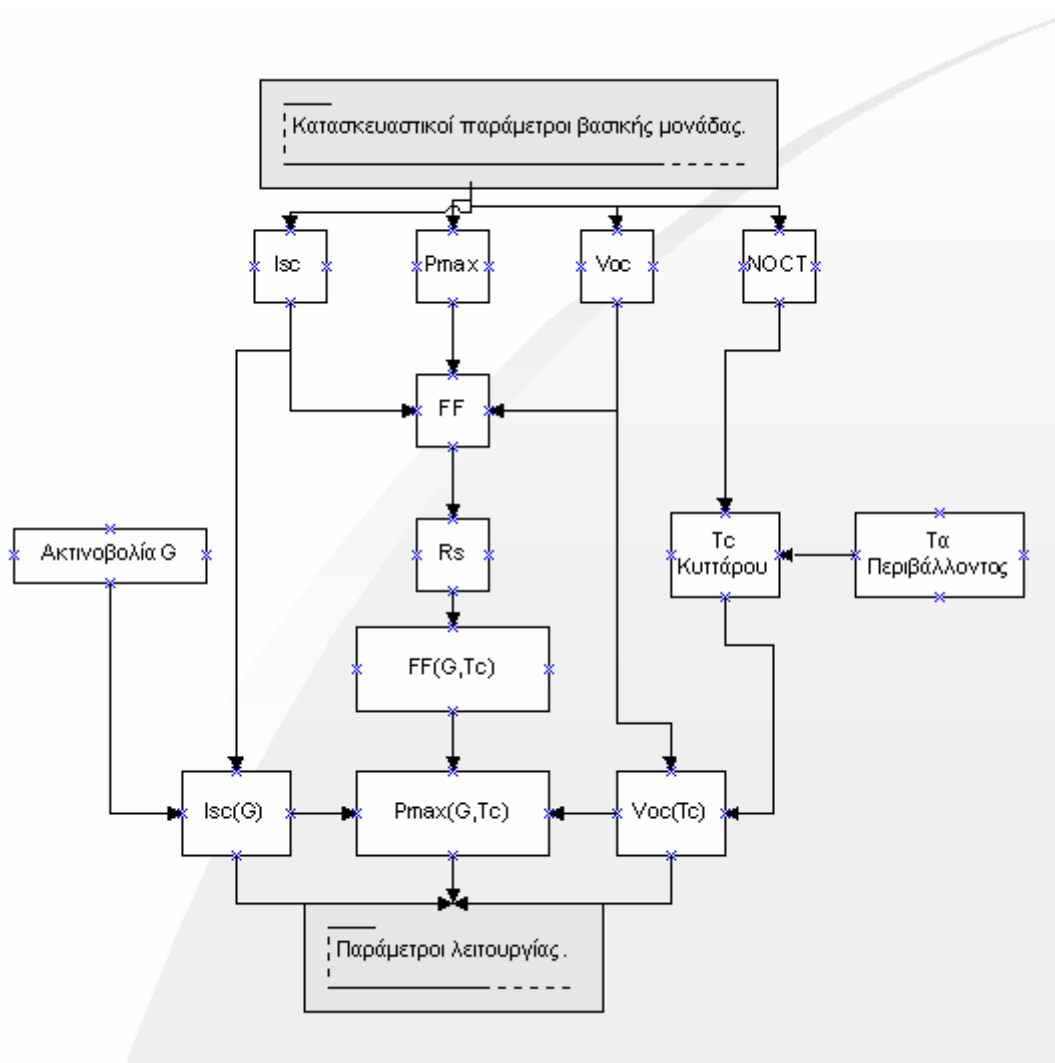
### 4.3.2.1 Παράδειγμα εργασίας

(Πάνω στο ΦΒ το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της μακέτας)



#### Solar module ASI-F 10/12

Voltage at the rated output $U_{mpp}$ [V]*	16,8V
Current at the rated output $I_{mpp}$ [mA]*	613mA
Rated output $P_{mpp}$ [W]*	10,3W
Short-circuit current $I_{sc}$ [mA]*	808mA
Idle voltage $U_{oc}$ [V]*	22,8V



Σχήμα 4-5 Υπολογισμός των παραμέτρων λειτουργίας βασικής μονάδας.

Καθορίστε τις παραμέτρους μιας βασικής μονάδας που σχηματίζεται από 34 ηλιακά στοιχεία

σε σειρά κάτω από συνθήκες λειτουργίας:  $G = 700 \text{ W/m}^2$  και  $T_a = 34^\circ\text{C}$ . Οι τιμές του κατασκευαστή κάτω από σταθερές κανονικές είναι:  $I_{sc} = 0.8 \text{ A}$ ,  $V_{oc} = 22.8 \text{ V}$ ,  $P_{max} = 10.3 \text{ W}$ ,  $NOCT = 43^\circ\text{C}$

### Λύση

1. Ρεύμα κλειστού κυκλώματος

$$I_{sc} = 0.8 \cdot 0.7 \text{ (kW/m}^2\text{)} = 0.56 \text{ A (εξ. 4.3)}$$

2. Θερμοκρασία ηλιακού ηλεκτρικού στοιχείου

$$T_c = 34 + 0.7 \chi (43 - 20)/0.8 = 54.12 \text{ }^\circ\text{C (εξ. 4.5)}$$

3. Τάση ανοικτού, κυκλώματος

$$V_{oc} (54.12 \text{ C}) = 22.8 - 0.0023 \cdot 34 \cdot (54.12 - 25) = 20.53 \text{ V (εξ. 4.2)}$$

4. Θα καθορίσουμε τώρα το μέγιστο σημείο ισχύος χρησιμοποιώντας την απλοποιημένη παραδοχή ότι ο συντελεστής πληρότητας είναι ανεξάρτητος από τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία:

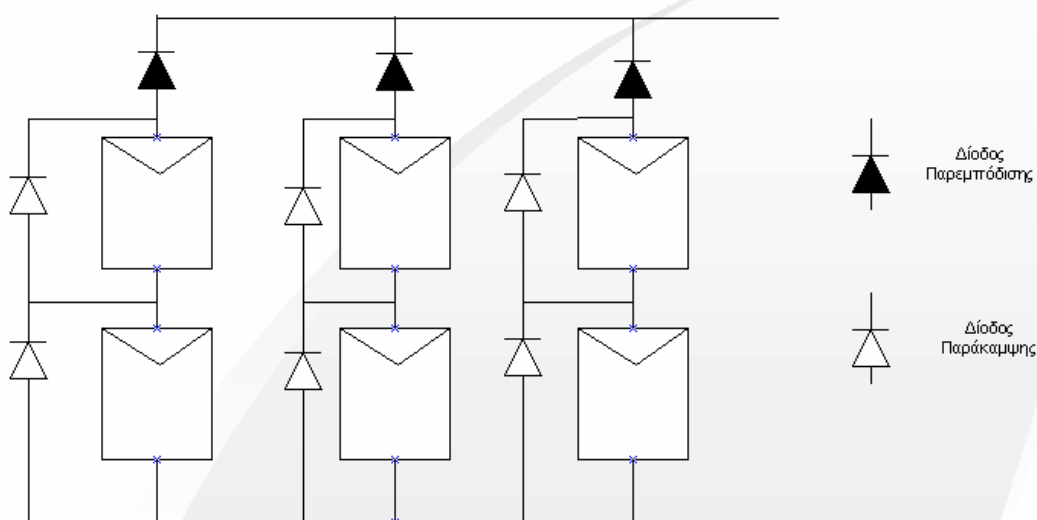
$$FF = 10,3 / (0.8 \cdot 22.8) = 0.55 \text{ (εξ. 3.7)}$$

$$P_{max} (G, T_c) = (0.56 \cdot 20.53) \cdot 0.55 = 6.32 \text{ W (εξ. 3.7)}$$

Ετσι, σημειώνοντας την τιμή του κατασκευαστή της  $P_{max}$  βλέπουμε ότι η βασική μονάδα λειτουργεί στο 62% περίπου της ονομαστικής επίδοσης.

#### 4.3.3. Εσωτερική σύνδεση των Φ.Β. βασικών μονάδων

Ένα σχηματικό διάγραμμα μιας Φ.Β. γεννήτριας που αποτελείται από αρκετές βασικές μονάδες παρουσιάζεται στο σχήμα (4.6). Επιπρόσθετα, πέρα από τις φωτοβολταϊκές βασικές μονάδες η γεννήτρια περιέχει διόδους παράκαμψης και παρεμπόδισης. Καθώς θα δούμε παρακάτω και στο τμήμα (4.4), αυτές οι διόδους προστατι ι'ουλιτη βασική μονάδα και αποτρέπουν τη γεννήτρια από το να ενεργεί ως ένα φορτίο στο σκοτάδι.



Σχήμα 4-6 Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια.

Οι βασικές μονάδες συνδέονται σε σειρά για να σχηματίσουν ταινίες, στις οποίες ο αριθμός των βασικών μονάδων  $N_s$  καθορίζεται από την επιλεγμένη τάση DC που υπάρχει στους αγωγούς διέλευσης και ο αριθμός των παράλληλων ταινιών  $N_p$  δίνεται από το ρεύμα που



απαιτείται από τη γεννήτρια. Για τη γεννήτρια στο Σχήμα 4-6,  $N_s = 2$  και  $N_r = 3$ . Η τάση εξόδου επομένως θα μπορούσε να είναι διπλάσια της τάσης της βασικής μονάδας και το ρεύμα αυτής τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό της βασικής μονάδας.

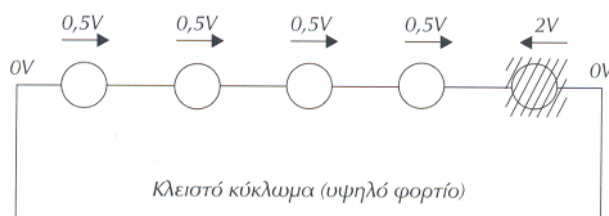
Αυτή η ανάλυση προϋποθέτει ότι όλες οι βασικές μονάδες είναι όμοιες. Πρακτικά οι βασικές μονάδες (και τα ηλιακά στοιχεία) δεν είναι όμοια και οι παράμετροι τους παρουσιάζουν ένα συγκεκριμένο βαθμό διαφοροποίησης για δυο κυρίως λόγους

- Τα ηλιακά στοιχεία και οι βασικές μονάδες ποικίλλουν σε ποιότητα, καθώς αυτή είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας της βιομηχανοποίησης. Γενικότερα το ρεύμα που παράγεται από εμπορικές βασικές μονάδες παρουσιάζει μεγαλύτερη διαφοροποίηση από την τάση.
- Διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες ίσως υπάρχουν σε διαφορετικά τμήματα της Φ.Β. διάταξης. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρχει διαφορετική καθαρότητα των διαφόρων τμημάτων της Φ.Β. γεννήτριας ή μερικές βασικές μονάδες ίσως σκιάζονται από ένα σύννεφο το οποίο καλύπτει μόνο ένα μέρος της σειράς.

Αυτή η διαφοροποίηση των παραμέτρων ενός στοιχείου έχει δυο σημαντικά αποτελέσματα. Πρώτα η ισχύς εξόδου της γεννήτριας είναι μικρότερη από το άθροισμα των τιμών που αντιστοιχούν σε όλες τις βασικές μονάδες του συστήματος. Αυτό προκαλεί απώλειες λόγω της κακής προσαρμογής. Αυτές οι απώλειες μπορούν να ελαχιστοποιηθούν βραχυκυκλώνοντας τις βασικές μονάδες πριν την εσωτερική σύνδεσή τους και σχηματίζοντας σειρές από βασικές μονάδες με όμοιες τιμές του ρεύματος βραχυκυκλώματος.

Κατά δεύτερον, υπάρχει η δυνατότητα υπερθέρμανσης του "φτωχότερου" ηλεκτρικού στοιχείου μιας σειράς. Σε μερικές περιπτώσεις ένα στοιχείο μπορεί να λειτουργεί ως "φορτίο" για τα άλλα στοιχεία που ενεργούν ως "γεννήτριες". Συνεπώς, αυτό το στοιχείο καταναλώνει ενέργεια και η θερμοκρασία του αυξάνεται. Εάν η θερμοκρασία του ηλεκτρικού στοιχείου αυξηθεί πάνω από ένα όριο (85 - 100 °C), τα στερεωτικά υλικά μπορεί να πάθουν βλάβη και αυτό θα μειώσει την αποτελεσματικότητα όλης της βασικής μονάδας. Αυτό ονομάζεται σχηματισμός "ζεστής κηλίδας" (Hot Spot).

.Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται στο Σχήμα 4-7 που παρουσιάζει ένα στοιχείο το οποίο δεν παράγει ρεύμα μέσα σε μια ταινία, αυτό μπορεί να συμβεί, για παράδειγμα, όταν το στοιχείο σκιάζεται. Στο κεφάλαιο 3 μάθαμε ότι ένα ηλεκτρικό στοιχείο στο σκοτάδι ενεργεί ως μια δίοδος. Η σκίαση ενός ηλεκτρικού στοιχείου, το μετατρέπει σε μια δίοδο κάτω από ανάστροφη πόλωση, μηδενίζοντας μ' αυτόν τον τρόπο την παραγωγή ρεύματος από όλη την ταινία. Ακόμη περισσότερο, το σκιασμένο στοιχείο θα καταναλώσει όλη την παραγόμενη ισχύ των φωτισμένων στοιχείων στην ταινία, η οποία μπορεί να είναι σημαντική, εάν η ταινία είναι μεγάλη.



**Σχήμα 4-7 Σχηματισμός ζεστής κηλίδας.**

Η κοινή τεχνική που χρησιμοποιείται για να απαλύνει αυτό το φαινόμενο είναι η χρησιμοποίηση διόδων παράκαμψης, οι οποίες συνδέονται στα άκρα ομάδας αρκετών

στοιχείων μιας ταινίας (Σχήμα 4-6). Αυτό περιορίζει την ισχύ, που καταναλώνεται σ' αυτή την ομάδα, και παρέχει μια οδό χαμηλής αντίστασης για το ρεύμα της βασικής μονάδας.

#### **4.3.4. Συλλογή του ηλιακού φωτός**

Ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο σχεδιαστής μιας διάταξης είναι το που θα στερεωθούν οι βασικές μονάδες, αν θα στερεωθούν σε σταθερές θέσεις ή οι προσανατολισμοί τους θα ακολουθούν (ιχνηλατούν) την κίνηση του ηλίου.

Στις περισσότερες διατάξεις οι βασικές μονάδες στερεώνονται σ' ένα σταθερό κεκλιμένο επίπεδο με την πρόσοψη προς τον ισημερινό. Αυτό έχει την αρετή της απλότητας, δηλαδή κανένα κινούμενο τμήμα και χαμηλό κόστος. Όπως έχουμε δει στο κεφάλαιο 2, η άριστη γωνία κλίσης εξαρτάται κυρίως από το γεωγραφικό πλάτος, την αναλογία της διάχυτης ακτινοβολίας στην τοποθεσία και το είδος του φορτίου.

Στερεώνοντας τη διάταξη πάνω σε σύστημα με δύο άξονες παρακολούθησης του Ηλίου, μπορεί να συλλεχθεί μέχρι 40% περισσότερη ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός έτους, σε σύγκριση με την εγκατάσταση σταθερής κλίσης. Κάτι τέτοιο όμως αυξάνει την πολυπλοκότητα και έχει ως αποτέλεσμα μια χαμηλότερης αξιοπιστίας και υψηλότερου κόστους συντήρηση. Η μονού άξονα παρακολούθηση (ιχνηλάτηση) είναι λιγότερο σύνθετη αλλά παρουσιάζει μικρότερο κέρδος. Ο προσανατολισμός μπορεί να ρυθμίζεται χειροκίνητα, εκεί που η προσφορά εργασίας είναι διαθέσιμη, αυξάνοντας έτσι τις όποιες απολαβές. Έχει υπολογιστεί ότι σε κλίματα με ηλιοφάνεια μια διάταξη επίπεδης κινούμενης πλάκας που έχει κατάλληλη ρύθμιση ώστε να στρέφεται προς τον ήλιο δυο φορές την ημέρα και να παίρνει την κατάλληλη κρίση τέσσερις φορές το χρόνο, μπορεί να συλλαμβάνει το 95% της ενέργειας, που συλλέγετε με ένα σύστημα δυο αξόνων παρακολούθησης πλήρως αυτοματοποιημένο.

Το σύστημα παρακολούθησης είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα συστήματα, που λειτουργούν κάτω από συγκεντρωμένο ηλιακό φως. Η δομή αυτών των συστημάτων εκτείνεται από έναν απλό σχεδιασμό βασισμένο πάνω σε πλευρικούς ενισχυτικούς καθρέπτες μέχρι τα συγκεντρωτικά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν υπερσύγχρονες οπτικές τεχνικές, για να αυξήσουν την είσοδο φωτός προς τα ηλιακά στοιχεία κατά μερικές τάξεις του μεγέθους. Αυτά τα συστήματα πρέπει να προνοούν για ένα σημαντικό γεγονός, ότι δηλαδή συγκεντρώνοντας το ηλιακό φως ελαττώνουν το γωνιακό άνοιγμα των ακτίνων, που το σύστημα μπορεί να δεχθεί. Η παρακολούθηση γίνεται απαραίτητη από τη στιγμή που ο λόγος συγκέντρωσης υπερβαίνει το 10 περίπου και το σύστημα μπορεί να μετατρέψει μόνο την άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας.

### **Περίληψη**

Η δομή και τα χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και της βασικής της δομικής μονάδας, έχουν ήδη εξετασθεί. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και το επίπεδο της ακτινοβολίας, ενώ έχουμε δείξει το πώς η έξοδος από μια Φ.Β. γεννήτρια μπορεί να καθορισθεί κάτω από λειτουργικές συνθήκες. Οι απώλειες κακής προσαρμογής και τα μέτρα που είναι δυνατόν να ληφθούν για να τις ελαττώσουν, έχουν ήδη αναλυθεί. Τα σχετικά πλεονεκτήματα των κυρίως επιλογών σχετικά με τον προσανατολισμό του πλαισίου- σταθερή κλίση ή παρακολούθηση - έχουν επίσης αναλυθεί.

## 4.4. Αποθήκευση ενέργειας

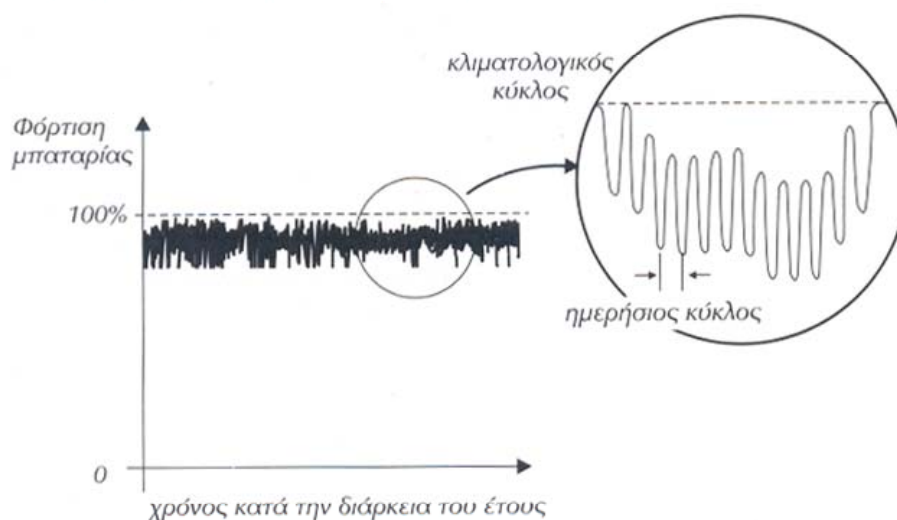
### 4.4.1. Εισαγωγή

Από τη στιγμή που η τροφοδοτούμενη ηλιακή ενέργεια είναι ουσιαστικά μεταβαλλόμενη στο χρόνο, στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα συνήθως γίνεται πρόβλεψη για αποθήκευση ενέργειας.

Παρ' όλο που μια ποικιλία μεθόδων αποθήκευσης της ενέργειας είναι υπό μελέτη, η πλειονότητα των αυτόνομων Φ.Β. συστημάτων σήμερα χρησιμοποιεί ως μέσον αποθήκευσης τη μπαταρία. Σημαντική εξαίρεση αποτελούν τα συστήματα άντλησης νερού, στα οποία η αποθήκευση του αντλούμενου νερού είναι η προτιμότερη διέξοδος (βλέπε τμήμα 5.4). Οι μπαταρίες στην περισσότερο κοινή χρήση τους είναι ως επί το πλείστον μπαταρίες μολύβδου-οξέος, λόγω της ευκολίας απόκτησης τους και της σχέσης κόστους-απόδοσης. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τους θα αναλυθούν παρακάτω. Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρότερες εφαρμογές, λόγω της αντοχής τους, μηχανικής και ηλεκτρικής και λόγω του υψηλού τους κόστους ανά ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας. Γι' αυτό το λόγο έχει σταματήσει την ευρύτερη χρήση τους στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

### 4.4.2. Λειτουργία μπαταρίας μέσα στα Φ.Β. Συστήματα

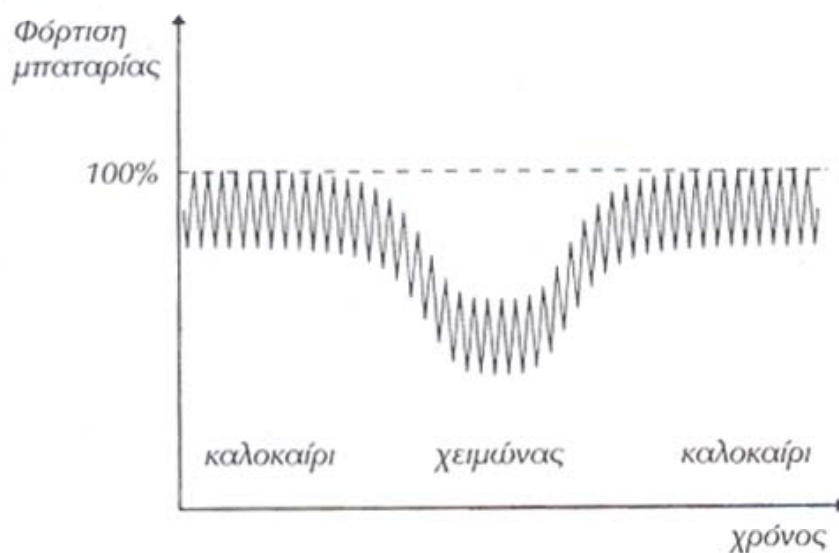
Οι μπαταρίες στα ΦΒ συστήματα λειτουργούν κάτω από συγκεκριμένες, συνθήκες, οι οποίες πρέπει να έχουν προβλεφθεί κατά τη σχεδίαση του συστήματος, καθώς αυτές επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και την αποτελεσματικότητα της λειτουργίας της. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι η κυκλική τους λειτουργία με διαφορετική κανονικότητα (σχήμα 4.8). Κατά τον ημερήσιου κύκλο η μπαταρία φορτίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και εκφορτίζεται στη διάρκεια της νύκτας. Το βάθος της εκφόρτισης κατά τον ημερήσιο κύκλο για τα συστήματα χωρίς εφεδρική πηγή είναι πάντοτε σχετικά μικρό. Επάνω στον ημερήσιο κύκλο υπερτίθεται ο κλιματολογικός κύκλος ανάλογα με τις μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες. Αυτός ο κύκλος συμβαίνει οποτεδήποτε το ημερήσιο φορτίο ξεπερνά τη μέση παροχή ενέργειας από την ΦΒ γεννήτρια.



Σχήμα 4-8 Κυκλική λειτουργία της μπαταρίας στα ΦΒ συστήματα.

Σε συστήματα, στα οποία η αξιοπιστία δεν είναι η υπέρτατη σπουδαιότητα, η μπαταρία ίσως να ενεργεί ως ένας εποχιακός αποθηκευτής. Σ' αυτή την περίπτωση ο κύκλος κλίματος εκτείνεται πάνω σ' ένα σημαντικό τμήμα της εποχής (σχήμα 4.9).

Οι λεπτομέρειες της κυκλικής λειτουργίας εξαρτώνται από την επιθυμητή αξιοπιστία του συστήματος και από τη σχέση μεταξύ της ικανότητας αποθήκευσης και του μεγέθους της ΦΒ γεννήτριας. Θα επιστρέψουμε σ' αυτό το σημείο στο τμήμα 4.6, όταν θα αναλύσουμε το μέγεθος των Φ.Β. Συστημάτων.



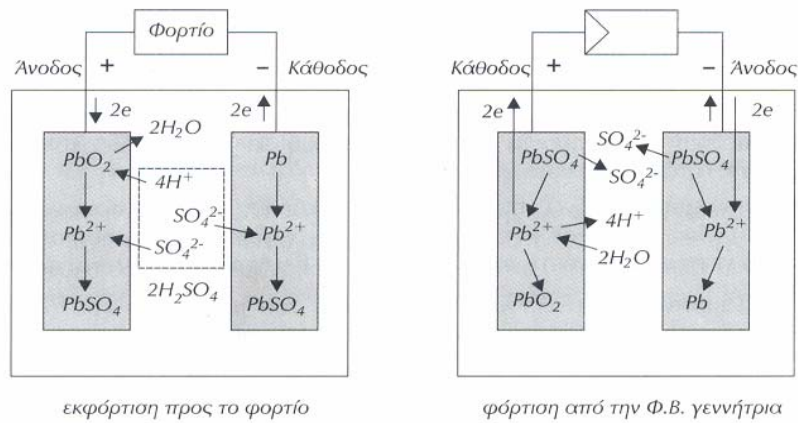
Σχήμα 4-9 Ο εποχιακός κύκλος.

#### 4.4.3. Μπαταρίες μολύβδου-οξέος

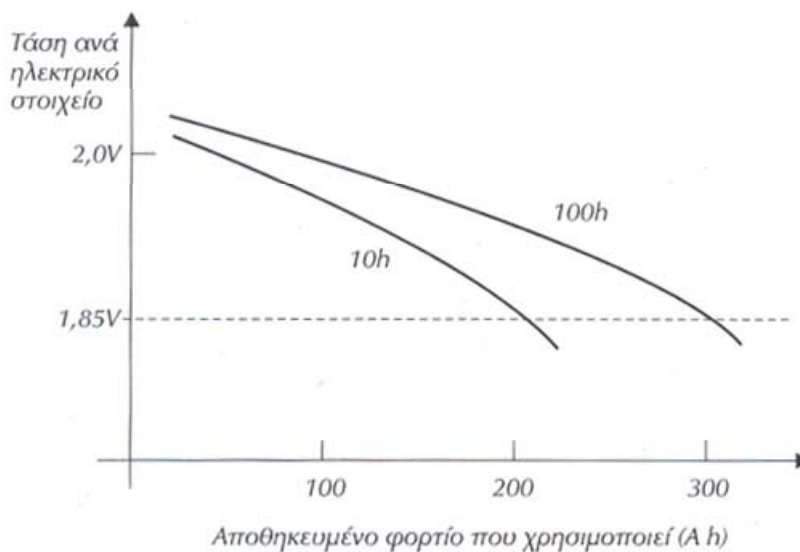
Με απλοποιημένους όρους η μπαταρία μολύβδου-οξέος περιλαμβάνει δύο ηλεκτρόδια μολύβδου και διοξειδίου του μολύβδου και τον ηλεκτρολύτη του θεικού οξέος διαλυμένο με νερό. Στις πρακτικές κατασκευές τα ηλεκτρόδια σχηματίζονται από πλέγμα μολύβδου (μερικές φορές σε μορφή κράματος με ασβέστιο ή αντιμόνιο), όπου το ενεργό υλικό φέρεται με τη μορφή μιας πορώδους δομής, η οποία προσφέρει μια μεγάλη περιοχή επιφάνειας για χημικές αντιδράσεις με τον ηλεκτρολύτη.

Οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μπαταρίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-10. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης το οξίδιο του μολύβδου σχηματίζεται στην κάθοδο και το θειικό οξύ ελευθερώνεται μέσα στον ηλεκτρολύτη. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης σχηματίζεται ο θειικός μολυβδος και στα δύο ηλεκτρόδια και το θειικό οξύ απομακρύνεται από τον ηλεκτρολύτη.

Μια τυπική συμπεριφορά της τάσης κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης μιας μπαταρίας μολύβδου-οξέος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-11. Φαίνεται ότι η χωρητικότητα της μπαταρίας ελαττώνεται εμφανώς, όταν εκφορτίζεται με έντονο ρυθμό. Για παράδειγμα, μια μπαταρία με μια ονομαστική χωρητικότητα που έχει προσδιοριστεί με εκφόρτιση στις 1 Ο ώρες, μπορεί να αυξήσει εμφανώς τη χωρητικότητα της όταν η εκφόρτιση διαρκέσει 1 00 ώρες μια διάρκεια, η οποία χρησιμοποιείται σε πολλές φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Αυτό το χαρακτηριστικό πρέπει να ληφθεί υπόψη, όταν σχεδιάζεται η αποθήκευση ενέργειας ενός Φ.Β. συστήματος, γιατί πολλά λειτουργούν κάτω από διαφορετικές συνθήκες από αυτές που καθορίζουν οι κατασκευαστές της μπαταρίας.



Σχήμα 4-10 Λειτουργία μπαταρίας μολύβδου-οξέος.



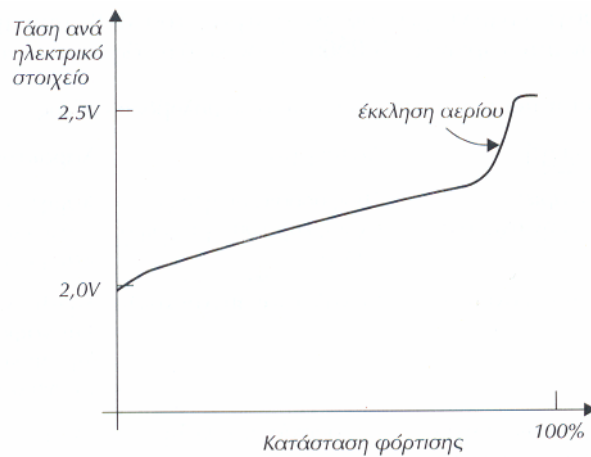
Σχήμα 4-11 Χαρακτηριστικά εκφόρτισης μπαταρίας κάτω από διαφορετικούς ρυθμούς εκφόρτισης.

Η συμπεριφορά της τάσης κατά τη διάρκεια φόρτισης παρουσιάζεται στο σχήμα (4.12). Μετά από μια σχετικά αργή αύξηση έως τα 2.35 V περίπου ανά στοιχείο υπάρχει μια απότομη αύξηση τάσης που συνοδεύεται από έκκλιση αερίου - γένεση υδρογόνου και οξυγόνου στα ηλεκτρόδια.

Αυτές οι χημικές αντιδράσεις συνεπάγονται ποικίλες διαδικασίες (δηλητηρίαση), οι οποίες συνοδεύουν τη λειτουργία της μπαταρίας και μειώνουν τη διάρκεια ζωής της ή αυξάνουν τις απαιτήσεις συντήρησης.

Η έκκλιση αερίου αυξάνει την ανάγκη για συντήρηση και ίσως παρουσιάζει έναν κίνδυνο ασφαλείας. Μέσα σε μέτρια επίπεδα, αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πλεονέκτημα γιατί ελαττώνει τη στρωμάτωση του ηλεκτρολύτη. (Βλέπε παρακάτω).

Η επαναλαμβανόμενη ανάπτυξη και διάλυση του μολύβδου, του οξειδίου του μολύβδου και του θεικού άλατος με διαφορετικούς ειδικούς όγκους συνοδεύεται από μηχανικές τάσεις στα ηλεκτρόδια. Αυτές οι τάσεις, στη συνέχεια, έχουν αποτέλεσμα την απόρριψη ενεργού υλικού από τα ηλεκτρόδια. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να συμβεί και κάποια άλλη στιγμή κατά τη διάρκεια της έντονης έκκλισης αερίου.



**Σχήμα 4-12 Χαρακτηριστική φόρτισης μπαταρίας.**

Η θείωση είναι ένας σχηματισμός μεγάλων κρυστάλλων θειικού μόλυβδου στις πλάκες, οι οποίες εμποδίζουν τις αμφίδρομες χημικές αντιδράσεις. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει κυρίως όταν η μπαταρία παραμένει σε μια κατάσταση χαμηλής φόρτισης για εκτεταμένες χρονικές περιόδους.

Η λειτουργία της μπαταρίας τείνει να υποβοηθά μια μη ομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρολύτη, στην οποία ο ηλεκτρολύτης με την υψηλότερη πυκνότητα συγκεντρώνεται στο κάτω μέρος του δοχείου της μπαταρίας. Αυτή η στρωματοποίηση του ηλεκτρολύτη ενισχύει την οξείδωση και τη θείωση του κάτω μέρους του αρνητικού ηλεκτροδίου, μπορεί ωστόσο να αποφευχθεί με μια κανονική εβδομαδιαία υπερφόρτωση στη διάρκεια της οποίας η έκκλιση αερίου χρησιμοποιείται για την ανάδευση του ηλεκτρολύτη.

Μια καλή πρακτική είναι να δίνεται στις μπαταρίες μια αντισταθμιστική φόρτιση στο τέλος μιας περιόδου, όταν η μπαταρία θα έχει λειτουργήσει σε κατάσταση χαμηλού φορτίου (κανονικά στο τέλος του χειμώνα). Αυτή το πρόσθετο φορτίο, το οποίο για λίγο υπερφορτώνει τη μπαταρία εξασφαλίζει ότι όλα τα στοιχεία είναι πλήρως επαναφορτισμένα.

Διάβρωση ηλεκτροδίου συμβαίνει ιδιαίτερα με την ανάπτυξη του θετικού μολύβδινου πλέγματος και επιταχύνεται με υψηλές θερμοκρασίες.

Η σχεδίαση της αποθηκευτικής ικανότητας της μπαταρίας πρέπει επίσης να εξασφαλίζει ότι ο ηλεκτρολιτης δεν θα παγώνει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της σε τοποθεσίες, που η θερμοκρασία μπορεί να πέσει σε χαμηλά επίπεδα. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με τη διατήρηση μιας σχετικά υψηλής πυκνότητας ΤΟΥ ηλεκτρολιτη είτε με μια υψηλή κατάσταση φόρτισης ή ακόμη και με την αύξηση της πυκνότητας ΤΟΥ ηλεκτρολιτη πάνω από το συνηθισμένο μέτρο.

Μολονότι ειδικές Φ.Β. μπαταρίες είναι τώρα διαθέσιμες στην αγορά, οι περισσότερες μπαταρίες, οι οποίες συνήθως εγκαθίστανται στα Φ.Β. συστήματα, είναι αυτές που αρχικά προορίζονται για συμβατικές εφαρμογές ή προσαρμοσμένες για να ταιριάζουν στη συγκεκριμένη μέθοδο λειτουργίας του Φ.Β. συστήματος. Οι τρεις βασικές τάξεις των μπαταριών μολύβδου οξέος καταγράφονται στον Πίνακα 4-1.

**Πίνακας 4-1 Βασικοί τύποι των μπαταριών εμπορίου μολύβδου - οξέος**

Τύπος	Χαρακτηριστικά
SLI	Χαμηλή αντίσταση

	Επαναφόρτισης Χαμηλό κόστος
Έλξης	Υψηλή αντίσταση επαναφόρτισης Υψηλή κατανάλωση νερού Συχνή συντήρηση
Στάσιμη αποθήκευση	Μέτρια αντίσταση στην επαναφόρτιση Χαμηλή κατανάλωση νερού

### Περίληψη

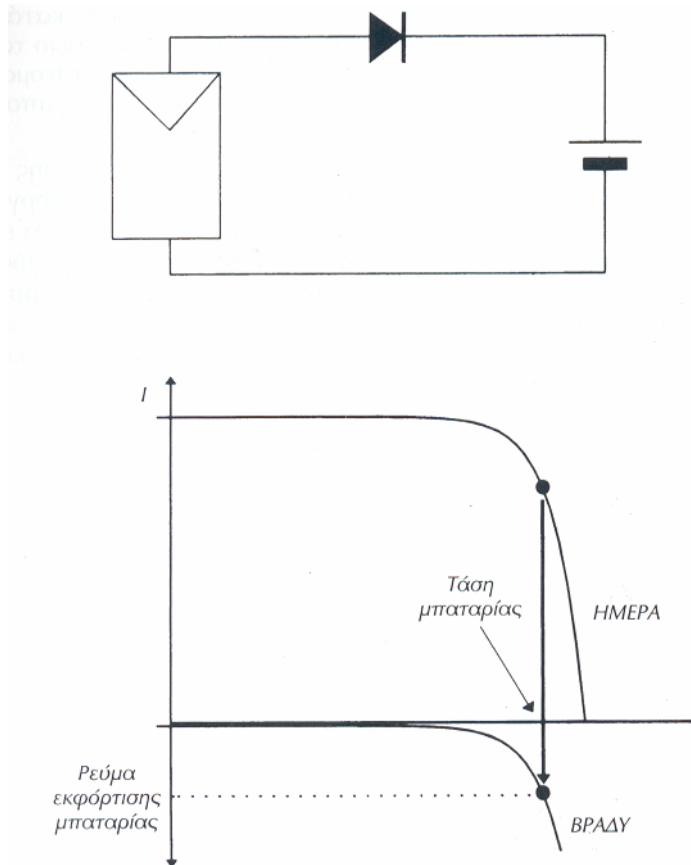
Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος αποτελούν το περισσότερο κοινό μέσο αποθήκευσης ενέργειας στα Φ.Β. συστήματα σήμερα. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας τους είναι η επανακύκλωση. Αυτό μαζί με άλλες λειτουργικές παραμέτρους επηρεάζουν τη ζωή της μπαταρίας και τις απαιτήσεις συντήρησης, οι οποίες πρέπει να παρέχονται σ' αυτές κατά τη σχεδίαση ενός Φ.Β. Συστήματος.

## 4.5. Καθορισμός ισχύος και έλεγχος

Ποικίλες ηλεκτρονικές διατάξεις χρησιμοποιούνται για να αντιμετωπίσουν τη μεταβλητότητα της ισχύος εξόδου από την Φ.Β. γεννήτρια, για να αποφευχθεί η δυσλειτουργία του συστήματος ή για να μετατραπεί η παραγόμενη DC ισχύς από την Φ.Β. γεννήτρια σε AC.

### 4.5.1. Δίοδος φραγής

Έχουμε δει στο κεφάλαιο 3 ότι ένα ηλιακό στοιχείο στο σκοτάδι συμπεριφέρεται ως μια δίοδος. Ομοίως η χαρακτηριστική μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας το βράδυ μπορεί να ληφθεί μετατοπίζοντας τη συνήθη χαρακτηριστική της με φως κατά μήκος του άξονα ρεύματος, έως ότου αυτή περάσει την αρχή του. Χωρίς ιδιαίτερες προφυλάξεις αυτός ο τρόπος της νυκτερινής λειτουργίας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας θα ανοίγει το δρόμο για την εκφόρτιση της μπαταρίας. Η απλούστερη λύση είναι να διαχωριστεί η γεννήτρια και η μπαταρία με μια δίοδο φραγής (σχήμα 4.13). Όταν η τάση στη μπαταρία υπερβαίνει την τάση στη γεννήτρια, η δίοδος πολώνεται αντίστροφα και αποτρέπει την εκφόρτιση της μπαταρίας. Κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας, επομένως, θα υπάρξει μια πτώση τάσης κατά μήκος της διόδου φραγής, η οποία θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό του συστήματος.



Σχήμα 4-13 Η λειτουργία της διόδου φραγής.

Στα συστήματα που χρησιμοποιούν σύγχρονες ΦΒ βασικές μονάδες, στις οποίες η αντίσταση σειράς είναι χαμηλή και η χαρακτηριστική I-V προσεγγίζει την ιδανική καμπύλη, το ρεύμα εκφόρτισης της μπαταρίας μέσω της Φ.Β. γεννήτριας το βράδυ μπορεί να είναι πολύ μικρό. Η ισχύς που χάνεται στη δίοδο φραγή κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας ίσως να ξεπερνά τις απώλειες κατά τη νυκτερινή εκφόρτιση. Γι' αυτό το λόγο η δίοδος φραγής μερικές φορές παραλείπεται από τη σχεδίαση του κυκλώματος.

#### 4.5.2. Αυτορυθμιζόμενα συστήματα

Στα μικρά συστήματα η σύνδεση της μπαταρίας με την ΦΒ γεννήτρια μέσω μιας διόδου φραγής εμπλοκής παρέχει την απλούστερη λύση. Αυτός ο συνδυασμός στηρίζεται στη σωστή επιλογή του σημείου λειτουργίας της ΦΒ γεννήτριας για να ταιριάζει στις απαιτήσεις φόρτισης της μπαταρίας. Η συνήθης λειτουργία του συστήματος λαμβάνει χώρα μεταξύ της τάσης που έχει η μπαταρία κάτω από την ελάχιστη επιτρεπόμενη κατάσταση της φόρτισης και της τάσης αυτής σε πλήρες φορτίο, προνοούνται περιπτώσεις όπως η πτώση τάσης κατά μήκος της διόδου φραγής. Εάν η τάση λειτουργίας της σειράς τεθεί στο άνω όριο τάσης αυτής της περιοχής, τότε μια ελαφρά αύξηση στην τάση της μπαταρίας απότομα ελαττώνει το ρεύμα φόρτισης από την ΦΒ γεννήτρια και προφυλάσσει την μπαταρία από υπερφόρτωση.

Θα δώσουμε επομένως έμφαση στο ότι η απλότητα της σχεδίασης σ' αυτά τα συστήματα παρουσιάζει σοβαρά μειονεκτήματα στην πρακτική λειτουργία. Το γεγονός ότι δεν υπάρχει προστασία εκφόρτωσης της μπαταρίας, μπορεί να έχει άσχημο αντίκτυπο στη διάρκεια ζωής



της μπαταρίας. Η σχεδίαση του συστήματος είναι πολύ ευαίσθητη στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και σε πολλές περιπτώσεις θα μπορούσε να παρουσιάσει πολύ αναποτελεσματική λειτουργία. Γι' αυτούς τους λόγους συστήνεται συνήθως η αυτορρύθμιση, μόνο δηλαδή στις περιπτώσεις εκείνες που οι δαπάνες του συστήματος πρέπει να κρατηθούν στο απόλυτο ελάχιστο.

#### **4.5.3. Ρυθμιστής φόρτισης**

Όπως αναλύθηκε στο τμήμα (4.4) πρέπει να ληφθούν μέτρα για να προληφθεί η υπερβολική εκφόρτιση και υπερφόρτιση των μπαταριών. Ποικίλοι τύποι ρυθμιστών φόρτισης είναι διαθέσιμοι και καλύπτουν αυτό το ρόλο. Στις μικρές εφαρμογές (έως 100 W περίπου) ένας ρυθμιστής παράκαμψης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καταναλώνει την ανεπιθύμητη ισχύ από τη γεννήτρια. Μια κοινή εφαρμογή είναι να χρησιμοποιηθεί ένα τρανζίστορ παράλληλα με την ΦΒ γεννήτρια, το οποίο τίθεται σε αγωγιμότητα και εκτρέπει το ρεύμα από τη μπαταρία πάνω από μια κρίσιμη τιμή τάσης.

Στις μεγάλες εφαρμογές συνιστάται να αποσυνδέουμε τη μπαταρία από τη γεννήτρια με τη βοήθεια ενός ρυθμιστή σειράς. Αυτός μπορεί να είναι ένας ηλεκτρομηχανικός διακόπτης (για παράδειγμα ένας ηλεκτρονόμος) ή μια διάταξη στερεάς κατάστασης (διπολικό τρανζίστορ, MOSFET κλπ.). Τα προηγούμενα υλικά έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν καταναλώνουν ενέργεια, αλλά η αξιοπιστία τους είναι μικρή σε τοποθεσίες με πολύ σκόνη ή άμμο.

Η μπαταρία ίσως πρέπει να προστατεύεται από την υπερβολική εκφόρτιση με έναν περιοριστή φορτίου. Αυτή η διάταξη εισάγεται μεταξύ του φορτίου και της μπαταρίας και ενεργεί ως ένας διακόπτης, ο οποίος ανοίγει, όταν η φόρτιση της μπαταρίας προσεγγίζει ένα ελάχιστο αποδεκτό επίπεδο.

#### **4.5.4. Μετατροπέας DC/DC**

Η αστάθεια της ισχύος εξόδου από την ΦΒ γεννήτρια συνεπάγεται ότι χωρίς τη λήψη Ειδικών μέτρων η γεννήτρια θα λειτουργεί συχνά εκτός του μέγιστου σημείου ισχύος. Οι σχετιζόμενες απώλειες μπορούν να αποφευχθούν με τη χρήση ενός παρακολουθητή μέγιστου σημείου ισχύος (MPP), ο οποίος εξασφαλίζει ότι υπάρχει πάντοτε μια μέγιστη μεταφορά ενέργειας από τη γεννήτρια προς την μπαταρία.

Για την περίπτωση που η ΦΒ γεννήτρια τροφοδοτεί με ισχύ ένα φορτίο αντίστασης  $R$ . Παρουσιάζονται επίσης οι χαρακτηριστικές  $I-V$  της γεννήτριας και του φορτίου μαζί με τις σταθερές καμπύλες ισχύος  $P = IV = \text{σταθερά}$ . Απ' αυτό φαίνεται ότι στο λειτουργικό σημείο 1 (το οποίο αντιστοιχεί σε μια άμεση σύνδεση μεταξύ της γεννήτριας και του φορτίου) η μεταφερόμενη ισχύς είναι σημαντικά κάτω από την  $P_{\max}$ , τη μέγιστη ισχύ της ΦΒ γεννήτριας. Ένας μετατροπέας DC/DC θα μετασχηματίσει την τάση στο φορτίο σε μια τιμή  $V_R := \sqrt{P_{\max} R}$  εξασφαλίζοντας έτσι μια μέγιστη μεταφορά ισχύος.

Η χρήση του παρακολουθητή MPP είναι συνήθως δικαιολογημένη στα συστήματα με ισχύ κορυφής μεγαλύτερη από 1 kWp.

#### **4.5.5. Μετατροπείας (αναστροφείας) DC/AC**

Αυτό είναι ένα τυπικό ηλεκτρονικό εξάρτημα, που χρησιμοποιείται σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές. Η ισχύς εισόδου είναι η DC ισχύς από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια ή μπαταρία και η έξοδος είναι AC ισχύς, που χρησιμοποιείται για να τρέξουν οι AC εφαρμογές ή για να τροφοδοτηθεί μέσα στο δίκτυο κατανάλωσης. Η απόδοση των αναστροφέν συνήθως εξαρτάται από το ρεύμα στο φορτίο που είναι μέγιστο στην ονομαστική ισχύ εξόδου. Μπορεί να φτάνει το 95% αλλά είναι μικρότερη (75 -80%), εάν ο αναστροφείας λειτουργεί υπό μερικό φορτίο.

Η πλειονότητα των αναστροφέν για ΦΒ εφαρμογές μπορούν να ταξινομηθούν μέσα σε τρεις κύριες κατηγορίες. Αναστροφείς μεταβλητής συχνότητας : χρησιμοποιούνται για αυτόνομες εφαρμογές ισχύος, σχεδόν αποκλειστικώς στα συστήματα ΦΒ άντλησης. Οι υπόλοιπες δυο κύριες κατηγορίες αναστροφέν ταιριάζουν στη σύνδεση δικτύου ΦΒ ισχύος για βιομηχανικά συγκροτήματα. Αυτομεταγώμενοι αναστροφείς σταθερής συχνότητας, οι οποίοι είναι ικανοί να τροφοδοτήσουν ένα απομονωμένο δίκτυο διανομής και εάν εξοπλισθεί με ειδικό παραλληλισμένο έλεγχο , ένα δίκτυο τροφοδοτούμενο και από άλλες παράλληλες πηγές ισχύος. Αναστροφείς γραμμής μεταγωγής σταθερής συχνότητας που είναι ικανοί να τροφοδοτήσουν το δίκτυο μόνο όταν η συχνότητα δικτύου ορίζεται από άλλη πηγή ισχύος συνδεδεμένη παράλληλα. Ο αναστροφείας δε θα εργασθεί, εάν μια τέτοια εξωτερική συχνότητα αναφοράς λείπει (π.χ. κατά τη διάρκεια γενικής διακοπής του δικτύου).

#### **Περίληψη**

Η ρύθμιση της ισχύος και τα στοιχεία ελέγχου δίνουν τη δυνατότητα να μετατραπεί η παραγόμενη DC ισχύς σε AC, για να προστατεύσουμε την μπαταρία από την υπερφόρτιση ή την υπερβολική εκφόρτιση και για να βελτιστοποιήσουν την μεταφορά ενέργειας μεταξύ της ΦΒ γεννήτριας και της μπαταρίας ή φορτίου.

## 5. Μακέτα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τη κατασκευή της μακέτας

### 5.1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά

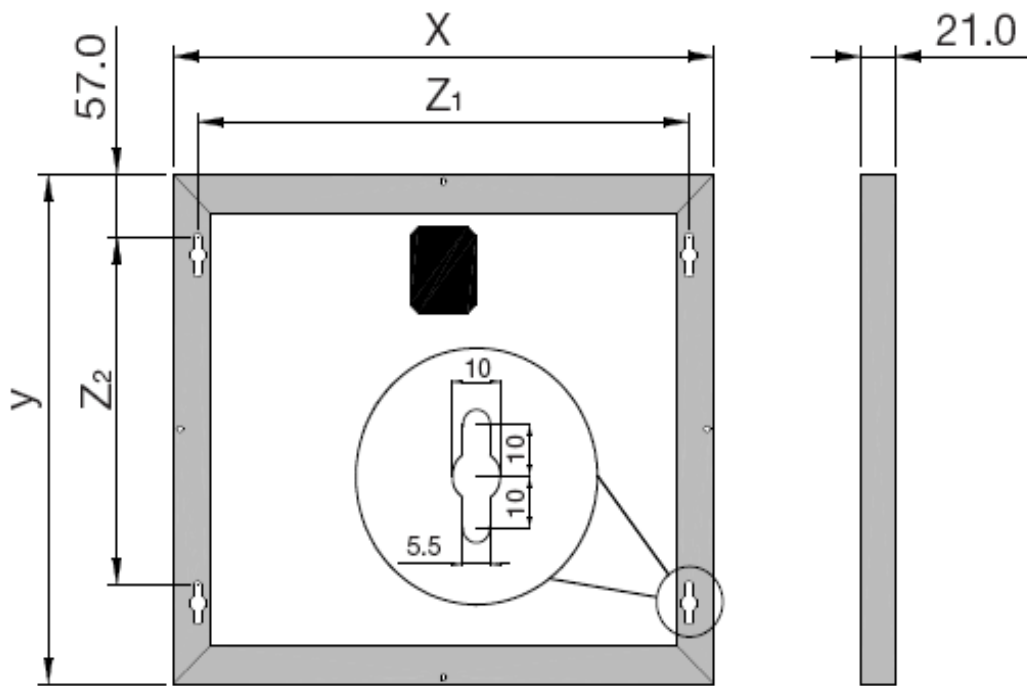
Για τη κατασκευή της μακέτας χρειαστήκαμε ένα μοντέλο σιδηροδρόμου της εταιρείας Marklin και για να τροφοδοτήσουμε το μοντέλο σιδηροδρόμου χρησιμοποιήσαμε ένα φωτοβολταϊκό ένα ρυθμιστή φόρτισης και μία μπαταρία. Παρακάτω παραθέτουμε τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε αναλυτικότερα.

#### Φωτοβολταϊκού Μοντέλο ASI®-F 2-10/12



Μοντέλο Φωτοβολταϊκού	ASI-F 10/12
Ονομαστική ισχύς [Wp]	12,5
Ισχύς στο μέγιστο σημείο ισχύος $P_{mpp}$ [Wp]	10,3
Τάση στο μέγιστο σημείο ισχύος $V_{mpp}$ [V]	16,8
Ρεύμα στο μέγιστο σημείο ισχύος $I_{mpp}$ [mA]	613
Ρεύμα βραχυκυκλώματος $I_{sc}$ [mA]	808
Τάση ανοικτού κυκλώματος $V_{oc}$ [V]	22,8
Διαστάσεις [mm] Χ	330
Διαστάσεις [mm] Υ	581
Βάρος [Kg]	2,1

Πίνακας 5-1 Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού ASI®-F 2-10/12



Σχήμα 5-1 Διαστάσεις φωτοβολταϊκού ASI®-F 2-10/12



Σχήμα 5-2 Φωτογραφίες του φωτοβολταϊκού ASI®-F 2-10/12

## Ρυθμιστή Φόρτισης Phocos CX10

*phocos*

Μοντέλο Ρυθμιστή Φόρτισης	CX10
Μέγιστο ρεύμα φόρτισης [A]	10
Μέγιστο ρεύμα τροφοδοσίας [A]	10
Τάση συστήματος [V]	12/24
Διαστάσεις [mm] Χ	89
Διαστάσεις [mm] Υ	90

Πίνακας 5-2 Τεχνικά χαρακτηριστικά Ρυθμιστή Φόρτισης Phocos CX10



Σχήμα 5-3 Φωτογραφία του ρυθμιστή Φόρτισης Ρυθμιστή Φόρτισης Phocos CX10

## Μοντέλο σιδηροδρόμου της εταιρείας marklin American Starter Set. Freight Train with Oval of Track

**marklin**

### Μοντέλο σιδηροδρόμου

American Starter Set

Τάση συστήματος [V]

12

Πίνακας 5-3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του Μοντέλο σιδηροδρόμου American Starter Set



Σχήμα 5-4 Φωτογραφία του Μοντέλο σιδηροδρόμου American Starter Set

### Μπαταρία

#### Μπαταρία

American Starter Set

Τάση μπαταρίας [V]

12

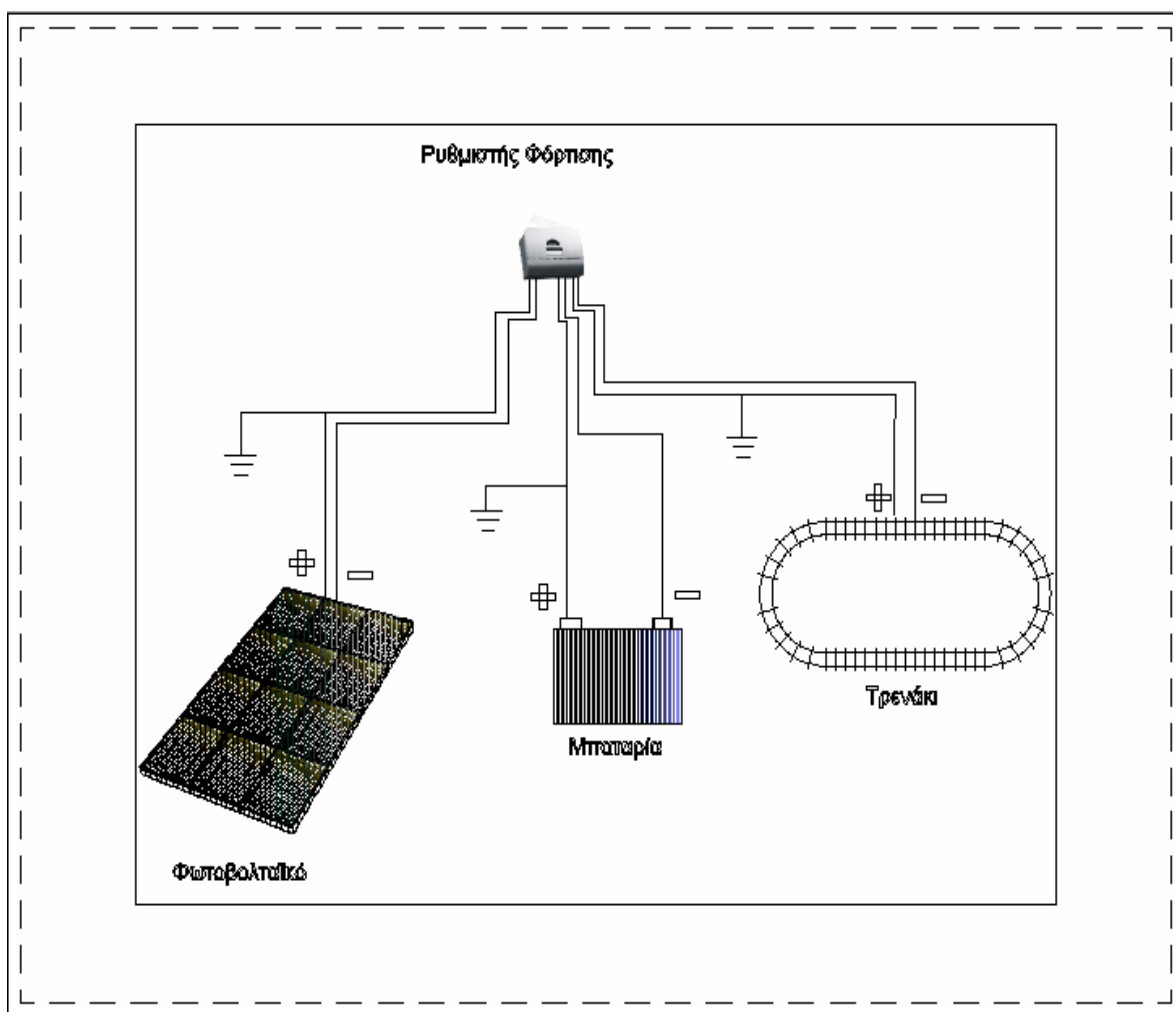
Αμπερόρια

4

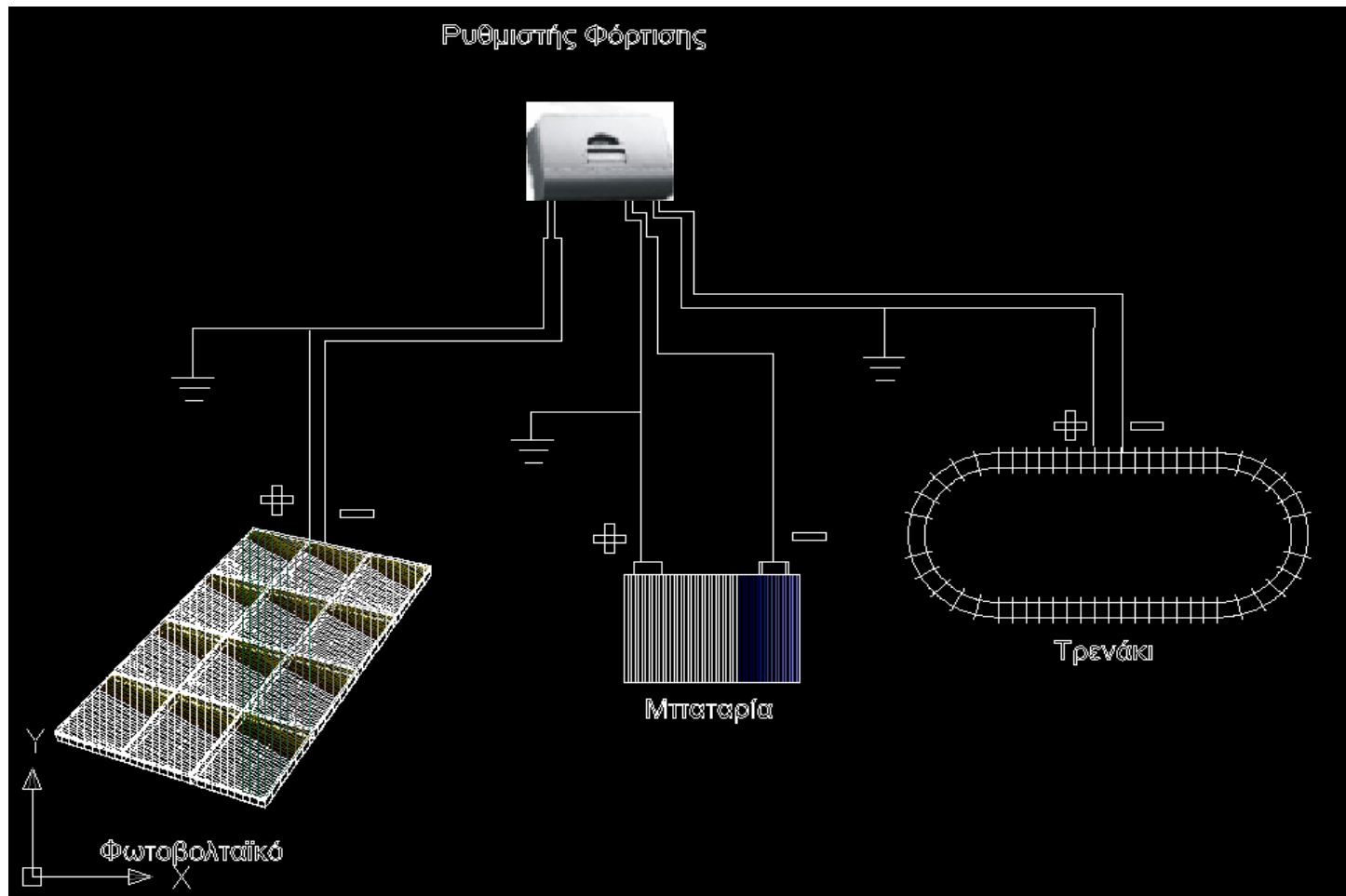
## 5.2. Κατασκευή μακέτας

Στο κεφάλαιο 5.1 παρουσιάσαμε τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή της μακέτας και τώρα θα αναλύσουμε την συνδεσμολογία που χρησιμοποιήσαμε για την τροφοδοσία του μοντέλου σιδηροδρόμου.

Η συνδεσμολογία έγινε όπως στο Σχήμα 5-5 , Σχήμα 5-6. Δηλαδή συνδέσαμε όλα τα αντικείμενα πάνω στο ρυθμιστή φόρτισης και ειδικότερα το φωτοβολταϊκό πηγαίνει στο ρυθμιστή φόρτισης και αυτός με την σειρά του δίνει ενέργεια στην μπαταρία η οποία φορτίζεται και τέλος μέσα από τον ρυθμιστή φόρτισης παίρνουμε την ενέργεια και τροφοδοτούμε το μοντέλο σιδηροδρόμου.



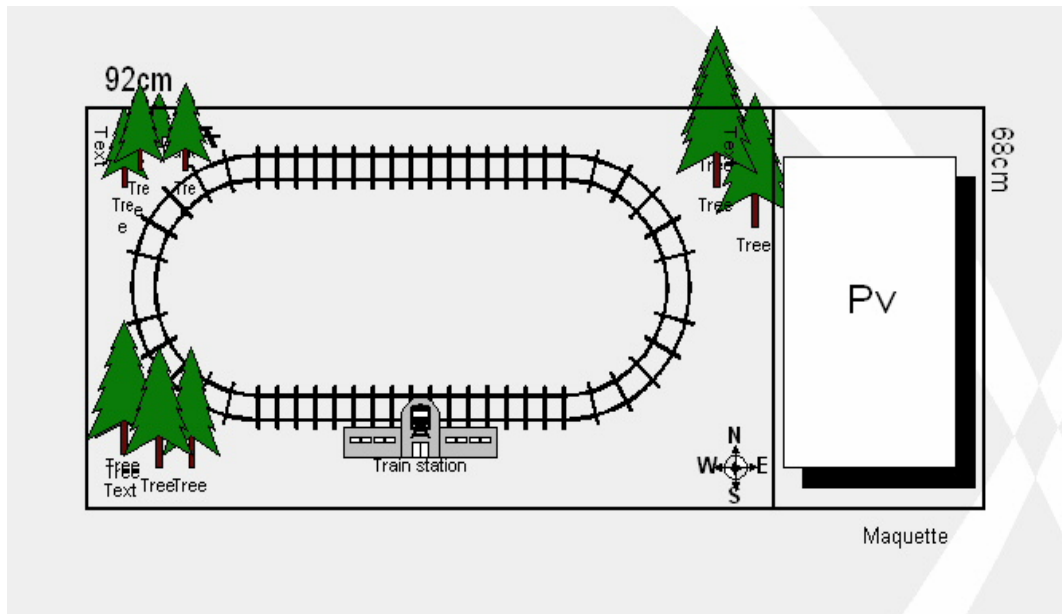
Σχήμα 5-5 Συνδεσμολογία μακέτας



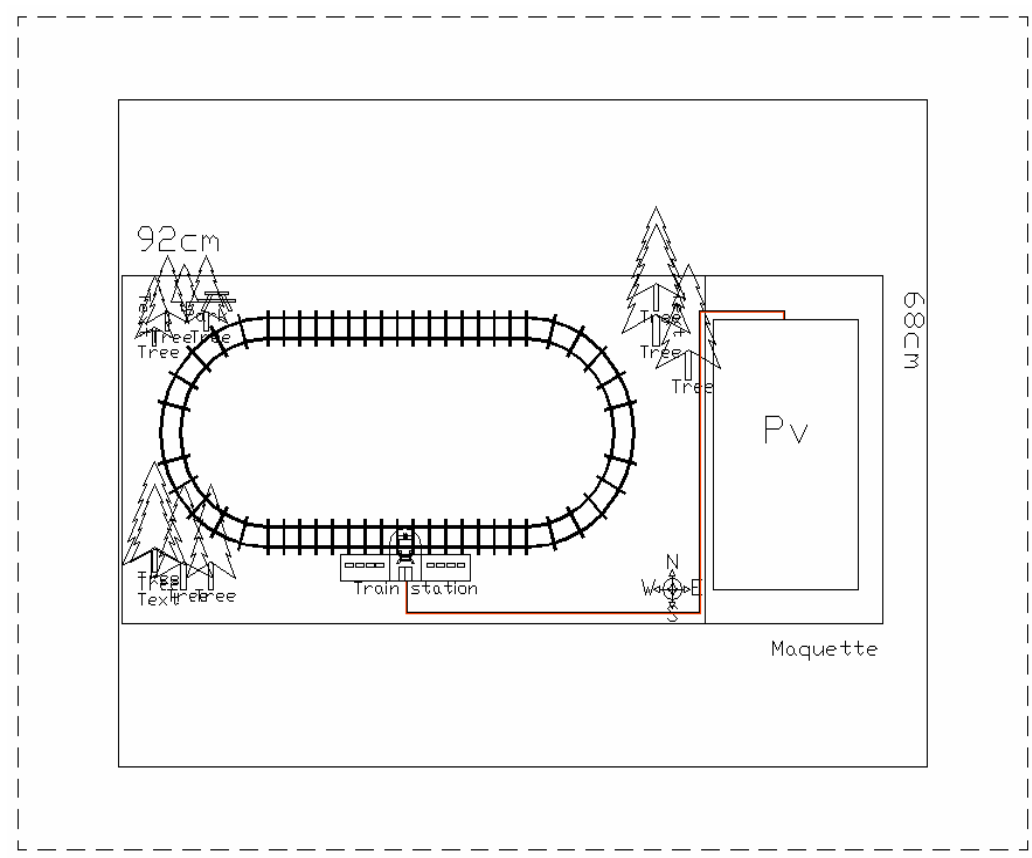
Σχήμα 5-6 Συνδεσμολογία μακέτας (μέσα από το AutoCAD Electrical 2006)



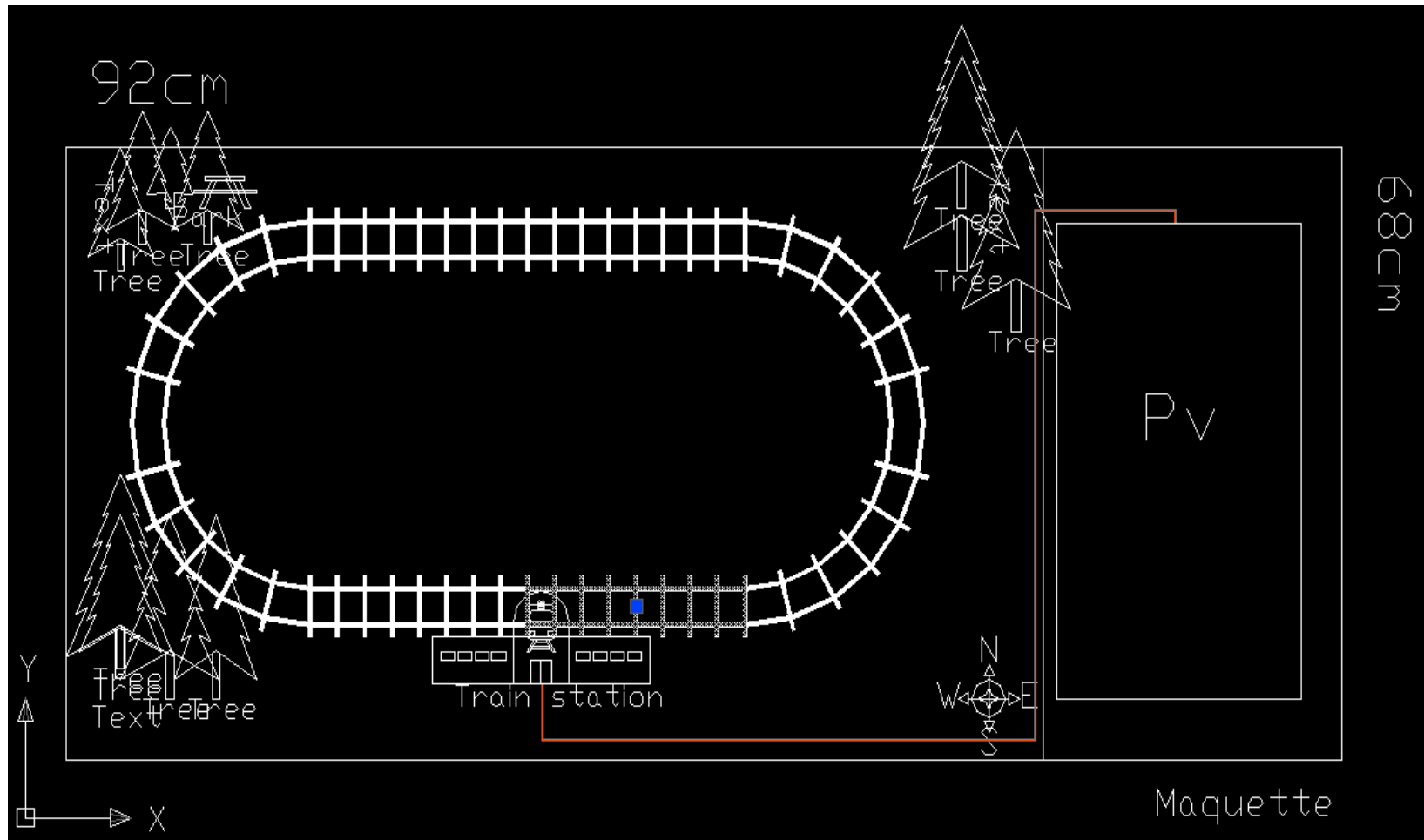
Παρακάτω σας παραθέτουμε σχεδιαγράμματα και φωτογραφίες της μακέτας.



Σχήμα 5-7 Σχεδιάγραμμα μακέτας (μέσα από το Corel)



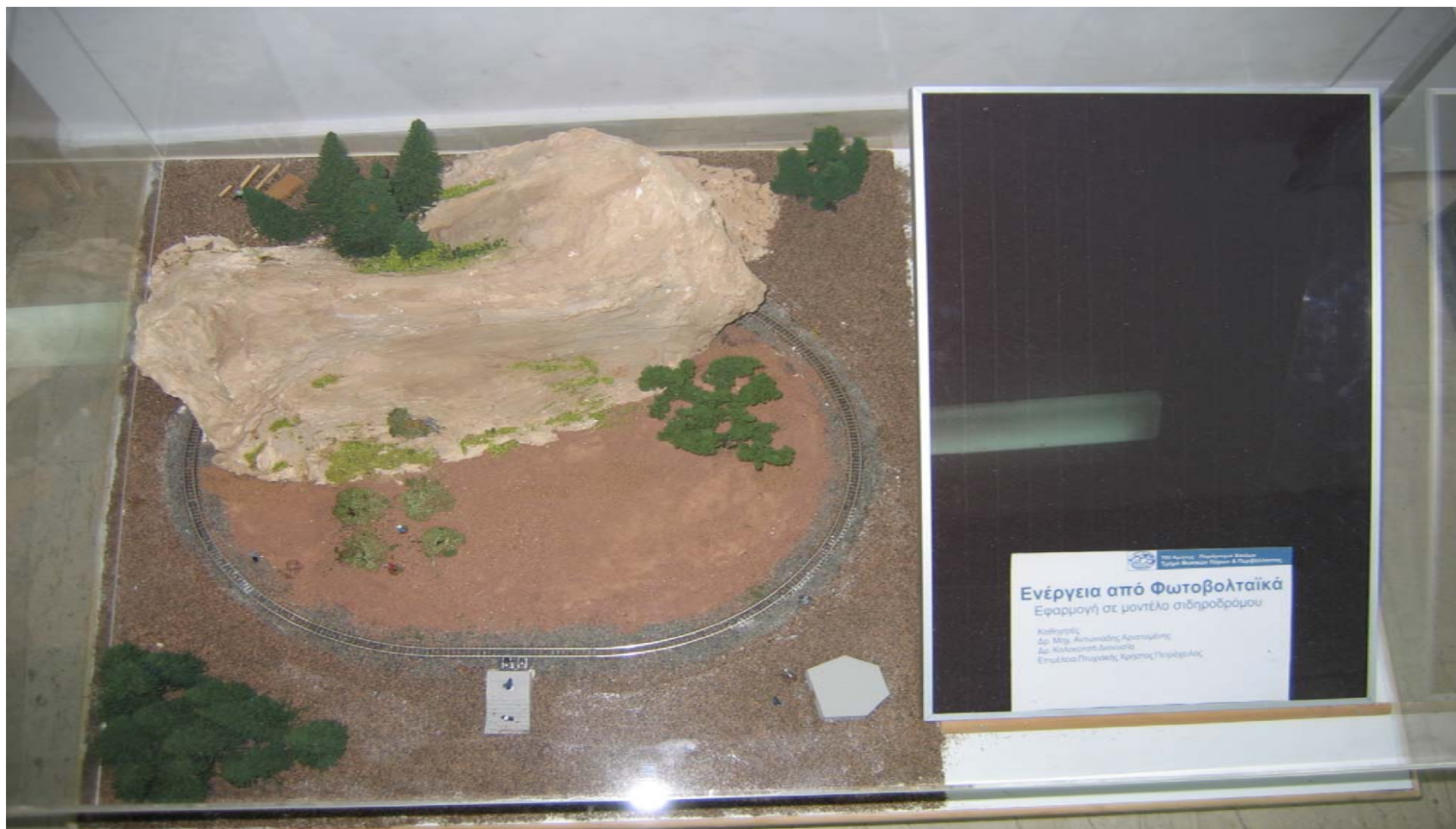
Σχήμα 5-8 Σχεδιάγραμμα μακέτας (μέσα από το AutoCAD Electrical 2006)



Σχήμα 5-9 Σχεδιάγραμμα μακέτας (μέσα από το AutoCAD Lt 2006)



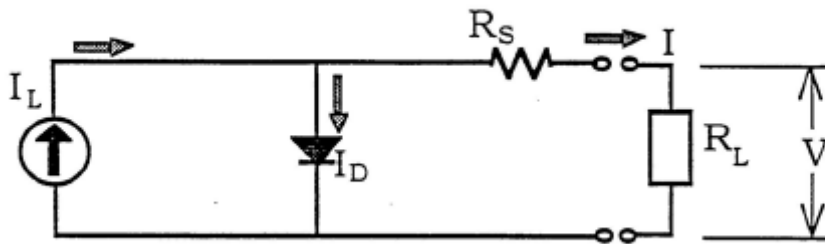
Σχήμα 5-10 Φωτογραφία της μακέτας (N°1)



Σχήμα 5-11 Φωτογραφία της μακέτας (N°2)

## 6. Προσομοίωση

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το LP4 Model(Lumped, 1 Mechanism, 4 Parameter Equivalent Circuit).Είναι το βασικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του κεντρικού αλγόριθμου του προγράμματος Photovoltaics Energy.



Ισοδύναμο κύκλωμα -τεσσάρων παραμέτρων

Οι σχέσεις ρεύματος-τάσης για αυτό το κύκλωμα είναι οι ακόλουθες :

$$I := I_L - I_D \quad (\text{εξ } 6.1)$$

$$I_D := I_0 \cdot \left( \exp\left(\frac{q}{\gamma \cdot k \cdot T_c} \cdot V + I \cdot R_s\right) - 1 \right) \quad (\text{εξ } 6.2)$$

Από 6.1,6.2

$$I := I_L - I_0 \cdot \left( \exp\left(\frac{q}{\gamma \cdot k \cdot T_c} \cdot V + I \cdot R_s\right) - 1 \right) \quad (\text{εξ } 6.3)$$

Οι τέσσερις παράμετροι για αυτό το κύκλωμα είναι:

$I_L$  = ελαφρύ τρέχον

$I_0$  = αντίστροφος κορεσμός τρέχον

$\gamma$  =  $A \cdot X$  (NCS)

$R_s$  = αντίσταση σειράς για αυτό το κύκλωμα

Η σειρά των βημάτων που απαιτούνται για να καθορίσουν τις άγνωστες παραμέτρους για το L4P πρότυπο αρχίζει με τη βασική I-V εξίσωση για το L4P κύκλωμα, Eqn 6.3. Οι τέσσερις παράμετροι για αυτό το κύκλωμα είναι  $I_L$ ,  $I_0$ ,  $\gamma$ , και  $R_s$ . Οι άλλες άγνωστες μεταβλητές στην αρχική εξίσωση είναι  $I$  και  $V$ . Τρεις νέες και ανεξάρτητες εκδόσεις της εξίσωσης γράφονται με την αντικατάσταση των μετρημένων τιμών για το  $I$  και το  $V$  σε τρία σημεία στην καμπύλη. Οποιαδήποτε τρία τα τρία σημεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλλά συνήθως τα τρία σημεία που χρησιμοποιούνται είναι:

Για  $I = I_{sc}$  και  $V = 0$

$$I = 0 \quad V = V_{oc}$$

$$I = I_{mp} \quad V = V_{mp}$$

$$-I_{sc} + I_{l0} - I_{o0} \cdot \left( \exp\left(\frac{q \cdot I_{sc} \cdot R_s}{\gamma \cdot k \cdot T_{ref}}\right) - 1 \right) = 0 \quad (\text{εξ 6.4})$$

$$I_{l0} - I_{o0} \cdot \left( \exp\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{\gamma \cdot k \cdot T_{ref}}\right) - 1 \right) = 0 \quad (\text{εξ 6.5})$$

$$-I_{mp} + I_{l0} - I_{o0} \cdot \left[ \exp\left[\frac{q \cdot (V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s)}{\gamma \cdot k \cdot T_{ref}}\right] - 1 \right] = 0 \quad (\text{εξ 6.6})$$

Και από  $dI/dV$  έχουμε :

$$I_{l0} + I_{o0} - I_{o0} \cdot \exp\left[\frac{q \cdot (V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s)}{\gamma \cdot k \cdot T_{ref}}\right] \cdot \left[ 1 + \frac{\frac{q \cdot V_{mp}}{\gamma \cdot k \cdot T_{ref}}}{\left[ 1 + R_s \cdot \frac{q}{\gamma \cdot k \cdot T_{ref}} \cdot I_{o0} \cdot \exp\left[\frac{q}{\gamma \cdot k \cdot T_{ref}} \cdot (V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s)\right] \right]} \right] = 0 \quad (\text{εξ 6.7})$$

ένα σύστημα τεσσάρων μη γραμμικών εξισώσεων(εξ 6.4-6.7) σε τέσσερις άγνωστες μεταβλητές  $I_{l0}=X1$ ,  $I_{o0}=X2$ ,  $\gamma=X3$  και  $R_s=X4$ .

Σε αυτό το σύστημα των τεσσάρων εξισώσεων θα εισάγουμε την μέθοδο Newton-Raphson για να βρούμε τους τέσσερις αγνώστους. Βέβαια να αναφέρουμε ότι η συγκεκριμένη μέθοδος είναι εξαιρετικά ασταθής και χρειάστηκε αρχικές τιμές για να αρχίσει την επίλυση των εξισώσεων. Τις αρχικές τιμές τις παίρνει από την επίλυση των τεσσάρων εξισώσεων που ακολουθούν.

$$I_{l0} := I_{sc} \quad (\text{εξ 6.8})$$

$$R_s := \frac{\frac{1}{\Lambda} \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right) + V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (\text{εξ 6.9})$$

$$I_{o0} := I_{sc} \cdot \exp(-\Lambda \cdot V_{oc}) \quad (\text{εξ 6.10})$$

$$\gamma := \frac{q}{\Lambda \cdot k \cdot T_{ref}} \quad (\text{εξ 6.11})$$

$$\Lambda := \frac{\left(\frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_{mp}} + \ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right)\right)}{2 \cdot V_{mp} - V_{oc}} \quad (\text{εξ 6.12})$$

Μετά την επίλυση των εξισώσεων αυτό που μένει να βρούμε είναι το  $I_{mp}$  και το  $V_{mp}$  σε διαφορετικές τιμές ηλιοφάνειας και θερμοκρασίας.

$$f(I_{mpg}) := I_{mpg} + \frac{(I_{mpg} - I_{lnew} - I_{onew}) \cdot \left( \ln\left(\frac{I_{lnew} - I_{mpg}}{I_{onew}} + 1\right) - \frac{I_{mpg} \cdot R_s \cdot v}{\gamma} \right)}{1 + (I_{lnew} - I_{mpg} + I_{onew}) \cdot \frac{R_s \cdot v}{\gamma}} \quad (\text{εξ 6.13})$$

Εισάγουμε την μέθοδο Newton-Raphson για να βρούμε το  $I_{mpg}$  και σαν αρχική τιμή βάζουμε την λύση της εξίσωσης 6.14 αφού πρώτα βρούμε το  $I_0$  σε διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας(εξ 6.13).

$$I_{0new} := I_0 \cdot \left( \frac{T_c}{T_{cref}} \right)^3 \cdot \exp \left[ \frac{q \cdot e_g}{k \cdot A} \cdot \left( \frac{1}{T_{cref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (\text{εξ 6.14})$$

$$I_{mpg} := \frac{\Phi}{\Phi_{pref}} \cdot NP \cdot [I_{mp} + \mu_{sc} \cdot (T_c - T_{cref})] \quad (\text{εξ 6.15})$$

$$I_{mpnew} := \text{root}(f(I_{mpg}), I_{mpg}) \quad (\text{εξ 6.16})$$

$$V_{mpnew} := \frac{\gamma}{v} \cdot \ln \left( \frac{I_{lnew} - I_{mpnew}}{I_{0new}} + 1 \right) - I_{mpnew} \cdot R_s \quad (\text{εξ 6.17})$$

$$W_{maxnew} := I_{mpnew} \cdot V_{mpnew} \quad (\text{εξ 6.18})$$

Περισσότερα για το πώς εισάγουμε την μέθοδο Newton Raphson στο παράρτημα 1.

## 7. Αποτελέσματα

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του προηγούμενου κεφαλαίου βγάλαμε τα παρακάτω αποτελέσματα-Χαρακτηριστικές καμπύλες. Να επισημάνουμε ότι ο κεντρικός αλγόριθμός για φωτοβολταϊκά τύπου CIS εξαιρετικά ασταθής με πολλά λάθη στα αποτελέσματα.

$$I_{sc} := 0.80\xi$$

$$q := 1.602 \cdot 10^{-19}$$

$$k := 1.381 \cdot 10^{-23}$$

$$T_c := 306.4$$

$$V_{oc} := 22.8$$

$$I_{mp} := 0.61\xi$$

$$V_{mp} := 16.8$$

$$I_l := I_{sc}$$

$$\Lambda := \frac{\left( \frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_{mp}} + \ln \left( 1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) \right)}{2 \cdot V_{mp} - V_{oc}}$$

$$R_s := \frac{\frac{1}{\Lambda} \cdot \ln \left( 1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) + V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}}$$

$$I_o := I_{sc} \cdot \exp(-\Lambda \cdot V_{oc})$$

$$\gamma := \frac{q}{\Lambda \cdot k \cdot T_c}$$

$$x := \begin{pmatrix} I_l \\ I_o \\ \gamma \\ R_s \end{pmatrix}$$

$$F := \begin{bmatrix} -I_{sc} + x_0 - x_1 \cdot \left( \exp \left( \frac{q \cdot I_{sc} \cdot x_3}{x_2 \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right) \\ x_0 - x_1 \cdot \left( \exp \left( \frac{q \cdot V_{oc}}{x_2 \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right) \\ -I_{mp} + x_0 - x_1 \cdot \left[ \exp \left[ \frac{q \cdot (V_{mp} + I_{mp} \cdot x_3)}{x_2 \cdot k \cdot T_c} \right] - 1 \right] \\ x_0 + x_1 - x_1 \cdot \exp \left[ \frac{q \cdot (V_{mp} + I_{mp} \cdot x_3)}{x_2 \cdot k \cdot T_c} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{\frac{q \cdot V_{mp}}{x_2 \cdot k \cdot T_c}}{\left[ 1 + x_3 \cdot \frac{q}{x_2 \cdot k \cdot T_c} \cdot x_1 \cdot \exp \left[ \frac{q}{x_2 \cdot k \cdot T_c} \cdot (V_{mp} + I_{mp} \cdot x_3) \right] \right]} \right] \right] \end{bmatrix}$$



$$F = \begin{pmatrix} -3.918 \times 10^{-8} \\ -1.746 \times 10^{18} \\ -5.899 \times 10^{11} \\ -5.899 \times 10^{11} \end{pmatrix}$$

$$J = \begin{pmatrix} 1 & -0.122 & 2.737 \times 10^{-9} & -7.276 \times 10^{-7} \\ 1 & -5.436 \times 10^{24} & 6.565 \times 10^{18} & 0 \\ 1 & -1.836 \times 10^{18} & 1.637 \times 10^{12} & -9.033 \times 10^{11} \\ 1 & -1.836 \times 10^{18} & 1.637 \times 10^{12} & -9.033 \times 10^{11} \end{pmatrix} \cdot$$

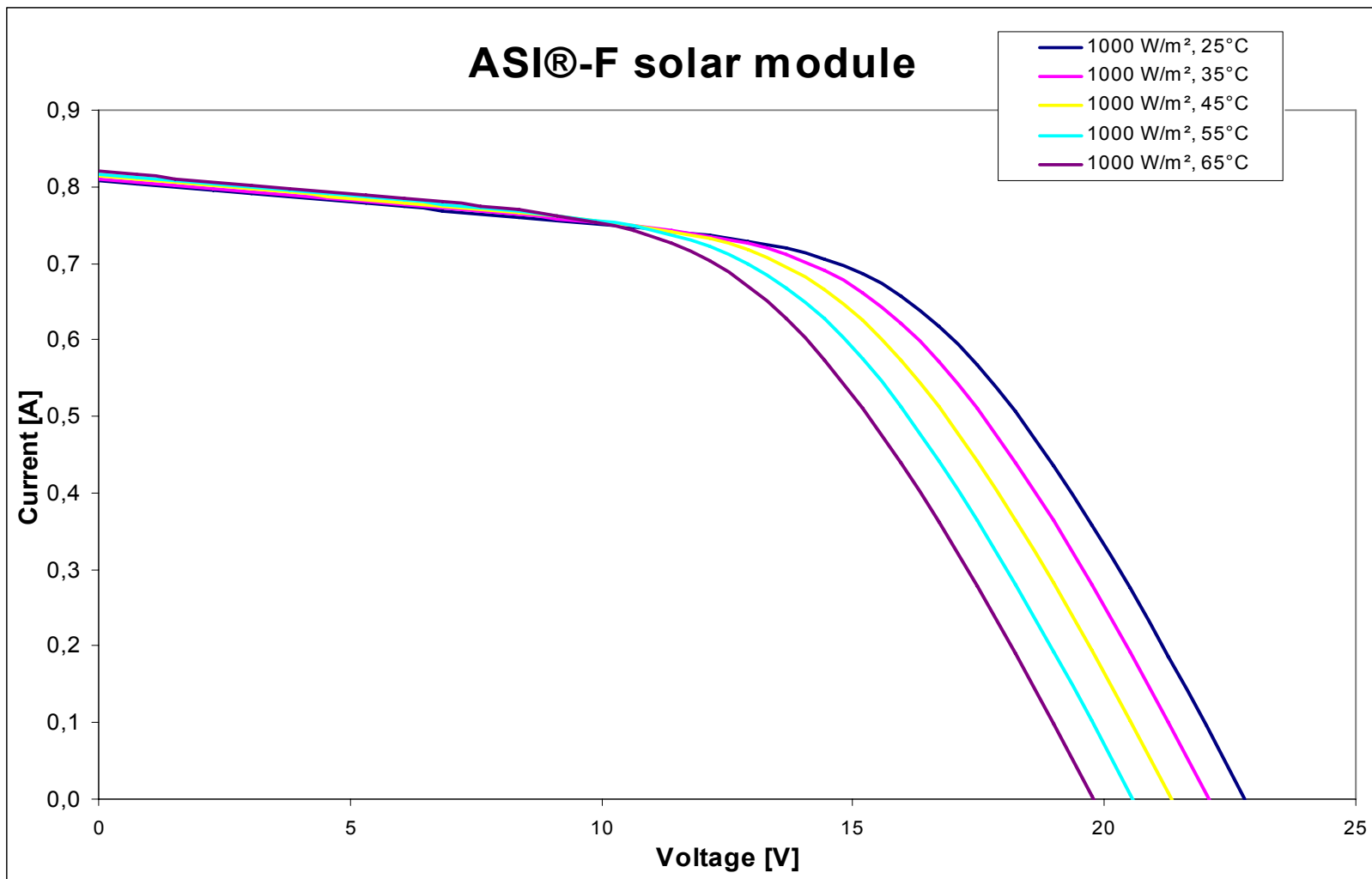
$$\delta x := \text{lsolve}(J, -F)$$

$$\delta x = \begin{pmatrix} 2.859 \times 10^{-8} \\ -4.283 \times 10^{-7} \\ -0.089 \\ 0.057 \end{pmatrix}$$

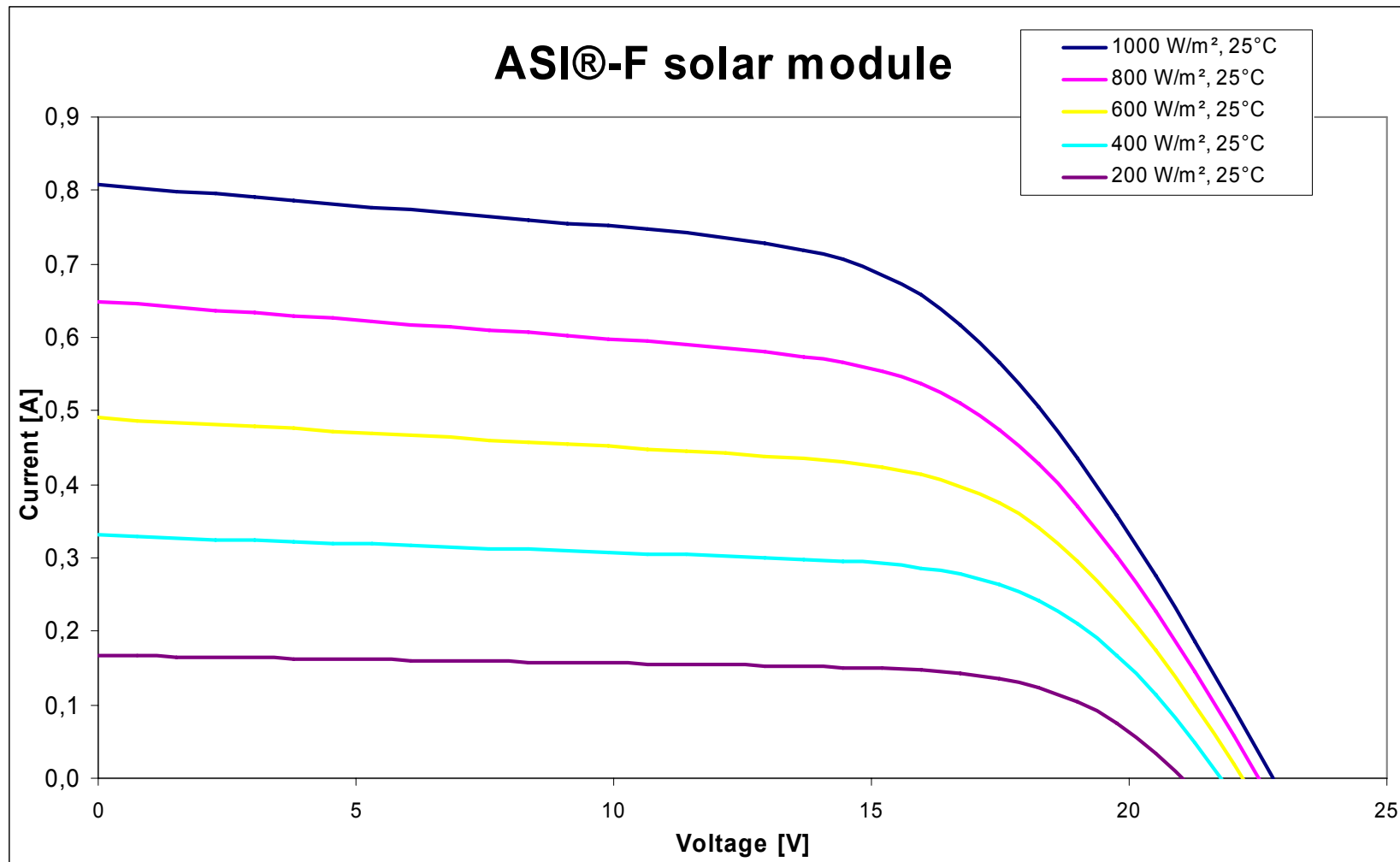
$$x1 := x + \delta x$$

$$x1 = \begin{pmatrix} 0.808 \\ -1.07 \times 10^{-7} \\ 15.062 \\ 0.114 \end{pmatrix}$$

$$x = \begin{pmatrix} 0.808 \\ 3.213 \times 10^{-7} \\ 15.151 \\ 0.057 \end{pmatrix}$$



Σχήμα 7-1 Χαρακτηριστικές καμπύλες του Φωτοβολταϊκού ASI®-F 2-10/12 σε διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας



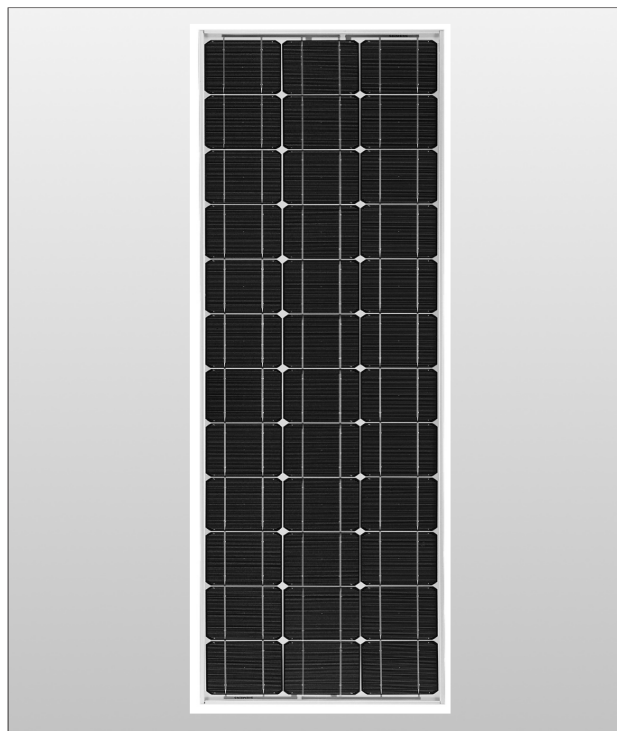
Σχήμα 7-2 Χαρακτηριστικές καμπύλες του Φωτοβολταϊκού ASI®-F 2-10/12 σε διαφορετικές τιμές ηλιοφάνειας

Στην συνέχεια θα κάνουμε ένα συγκριτικό μεταξύ του PVSyst ,του Photovoltaics Energy με τα στοιχεία του κατασκευαστή.

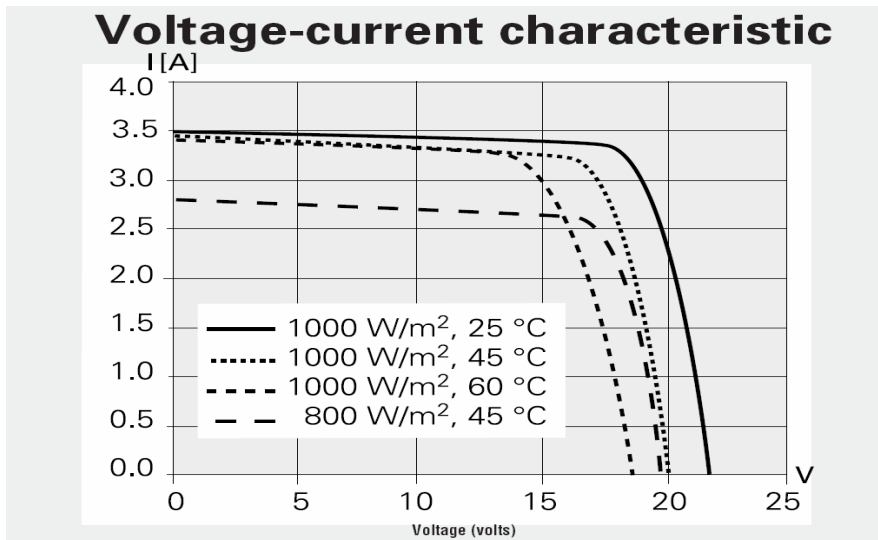
Για το συγκριτικό αυτό διαλέξαμε το φωτοβολταϊκό της Siemens και ειδικότερα το μοντέλο SM 55 με τα εξής χαρακτηριστικά:

<b>Μοντέλο Φωτοβολταϊκού</b>	<b>Siemens SM 55</b>
Ονομαστική ισχύς [Wp]	55
Τάση στο μέγιστο σημείο ισχύος $V_{mpp}$ [V]	17.4
Ρεύμα στο μέγιστο σημείο ισχύος $I_{mpp}$ [A]	3.15
Ρεύμα βραχυκυκλώματος $I_{sc}$ [A]	3.45
Τάση ανοικτού κυκλώματος $V_{oc}$ [V]	21.7

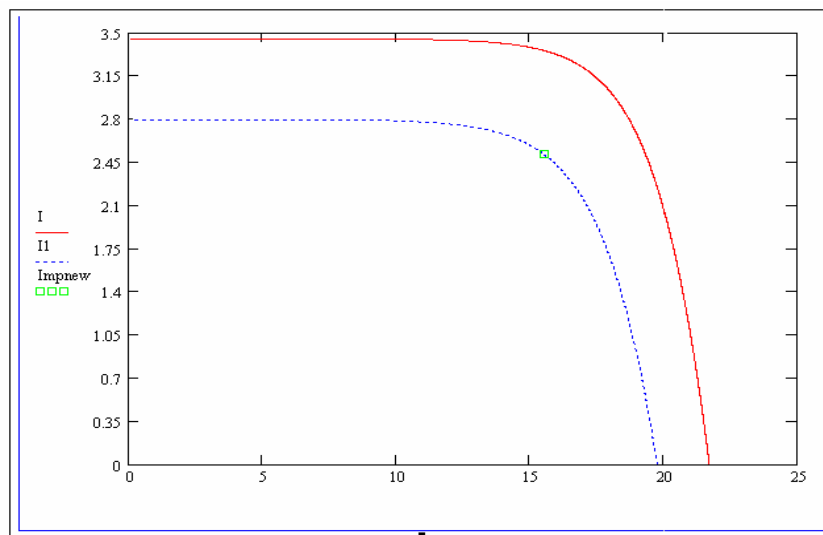
Μετά από τις προσομοιώσεις που κάναμε με τα 2 προγράμματα Σχήμα 7-3,Σχήμα 7-4 (PVSyst ,Photovoltaics Energy) δημιουργήσαμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες των φωτοβολταϊκών σε ηλιοφάνεια 1000-800  $W/m^2$  και σε 25-40 βαθμούς κελσίου. Στη συνέχεια τα συγκρίνουμε με τις χαρακτηριστικές καμπύλες του κατασκευαστή Σχήμα 7-2.



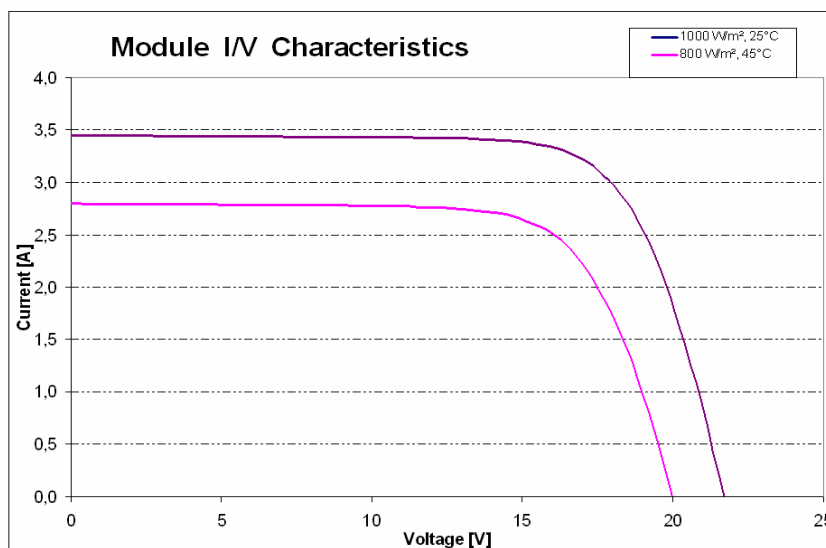
Σχήμα 7-3 Φωτοβολταϊκό Siemens SM55



Σχήμα 7-4 Χααρακτηριστικές καμπύλες κατασκευαστή



Σχήμα 7-5 Χααρακτηριστικές καμπύλες μέσα από το Photovoltaics Energy



Σχήμα 7-6 Χααρακτηριστικές καμπύλες μέσα από το PvSys

## 8. Συμπεράσματα

Η χρήση Φ/Β για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο θεωρείται σημαντική από περιβαλλοντική πλευρά αλλά όχι πάντα οικονομική. Η Ελλάδα παρουσιάζει αξιοσημείωτες προϋποθέσεις, για ανάπτυξη και εφαρμογή των Φ/Β συστημάτων λόγω του ιδιαίτερα υψηλού δυναμικού ηλιακής ενέργειας. Η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τόσο σε απομακρυσμένες όσο και σε κατοικημένες περιοχές, χωρίς επιπτώσεις στο περιβάλλον, κάνει ελκυστική τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα.

Σήμερα υπάρχουν αρκετοί χρήστες, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές που χαρακτηρίζονται από έλλειψη ηλεκτρικού δικτύου, για τους οποίους τα φωτοβολταϊκά συστήματα θεωρούνται η πλέον ενδεδειγμένη και οικονομική λύση για την κάλυψη των ηλεκτρικών τους αναγκών.

Με την φωτοβολταϊκή τεχνολογία γίνεται εκμετάλλευση της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία επιφάνεια 1 m<sup>2</sup> μια ηλιόλουστη μέρα μπορεί να φθάσει το 1 kW.

Η ενέργεια η οποία προσπίπτει συνολικά σε ένα έτος σε μια επιφάνεια εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση και το προσανατολισμό της επιφάνειας. Για τη περιοχή της Αθήνας, η τιμή της ετήσιας ενέργειας που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια 1 m<sup>2</sup> κυμαίνεται περίπου στις 1.500 kWh. Με δεδομένο ότι τα Φ/Β πλαίσια που κυκλοφορούν στην αγορά μετατρέπουν περίπου το 11% της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, ένα πλαίσιο επιφάνειας 1 m<sup>2</sup> παράγει περίπου 110 Wp.

### Πλεονεκτήματα- μειονεκτήματα

Βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας των Φ/Β είναι η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο σημείο χρήσης. Άλλα πλεονεκτήματα είναι τα παρακάτω:

- μηδενική ρύπανση της ατμόσφαιρας,
- μεγάλη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων (πάνω από 25 χρόνια)
- αθόρυβη λειτουργία,
- μηδαμινό κόστος συντήρησης και λειτουργίας,
- δυνατότητα ενσωμάτωσης τους σε οροφές, προσόψεις κτιρίων ως κύρια δομικά στοιχεία,
- δυνατότητα επέκτασης του συστήματος ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις.

Το κόστος των Φ/Β πλαισίων αποτελεί το μεγαλύτερο μειονέκτημα για την ευρεία εξάπλωση της Φ/Β τεχνολογίας. Παρόλα αυτά, σε αρκετές περιπτώσεις, όπως σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε περιοχές όπου το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλό, τα Φ/Β αποτελούν τη πλέον ενδεδειγμένη, τεχνικά αξιόπιστη και οικονομικά αποδεκτή λύση.

Ακόμα ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι η χαμηλή αποδοτικότητα που έχουν τα φωτοβολταϊκά και ειδικότερα πάνω σε μεγάλες εγκαταστάσεις όπως η τροφοδότηση ενός τραίνου από τα φωτοβολταϊκά δεν θα ήταν εφικτή την δεδομένη στιγμή γιατί θα χρειαζόμασταν πάρα πολύ μεγάλη επιφάνεια για να εγκαταστήσουμε τα φωτοβολταϊκά και να μπορέσουμε να τροφοδοτήσουμε το τρένο η οποιοδήποτε άλλο μεγάλο φορτίο.

## Κύρια εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν

Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας με τα φωτοβολταϊκά είναι σήμερα η πιο ακριβή μορφή ανανεώσιμης ενέργειας. Ωστόσο, έχει το μεγαλύτερο δυναμικό και μπορεί εύκολα προσαρμοστεί στα συστήματα ηλεκτρικού ρεύματος.

Τα κύρια εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν είναι:

- Το υψηλό κόστος

Μόνο εάν το κόστος των φωτοβολταϊκών μειωθεί κατά ένα συντελεστή μεγαλύτερο από τέσσερα ή πέντε, θα γίνει η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια ανταγωνιστική με τη μαζική συμβατική παραγωγή. Στόχος θα πρέπει να είναι η μείωση του κόστους και του πλαισίου και του συστήματος.

- Τεχνολογικοί περιορισμοί στα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Το πρόβλημα του αποθέματος για τα στοιχεία πυριτίου θα μπορούσε να γίνει ένα κύριο εμπόδιο για συνεχώς αυξανόμενη ανάπτυξη. Παράλληλα, πρέπει να επιτευχθεί καλύτερη χρήση του υλικού με εναλλακτικές διαδικασίες παραγωγής. Για τη συμβατική τεχνολογία μεγαλύτερη πρόοδος θα σημειωνόταν μειώνοντας τα βήματα διαδικασίας και τις απαιτήσεις διακίνησης. Αυτά είναι απαραίτητο να σημειωθούν στη γραμμή παραγωγής και να γίνει καλύτερη χρήση του ακριβού εξοπλισμού.

- Αποδοχή της τεχνολογίας λεπτών στρωμάτων

Τα σημαντικότερα προβλήματα αυτής της τεχνολογίας που πρέπει να ξεπεραστούν είναι:

- το φτωχό ομοίωμα των πρώτων πρωτότυπων άμορφου πυριτίου
- η σχετικά χαμηλή αποδοτικότητα
- η τοξικότητα κάποιων υλικών στην παραγωγή και τη διάθεση
- η αναμενόμενη διάρκεια ζωής
- το κόστος του εξοπλισμού παραγωγής

Τα πέντε προηγούμενα προβλήματα θα πρέπει να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά εάν η τεχνολογία των λεπτών φύλλων αναμένεται να κατέχει ένα αξιόλογο ποσοστό της αναπτυσσόμενης αγοράς.

- Αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας

Νέες τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί για άλλες εφαρμογές, πρέπει να υιοθετηθούν για φωτοβολταϊκή χρήση. Θέματα όπως η αξιοπιστία, η συντήρηση και η ευκολία στη χρήση σε αυτόνομες εφαρμογές θα πρέπει να συζητηθεί. Μακροπρόθεσμη έρευνα πρέπει να επικεντρωθεί στις ηλεκτροχημικές διαδικασίες, οι οποίες μετατρέπουν και αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια.

## 9. Summary

The history, present status and future of photovoltaics have been outlined.

The nature of solar radiation on Earth was reviewed, and the principal components of the radiation were introduced. We have seen how the solar radiation, both in magnitude and structure, depends on the geographical location. The astronomical relationship between the Earth and the Sun was discussed, defining the principal angles which determine the apparent motion of the Sun. These results were used to evaluate the daily solar irradiation on an inclined surface which represents the energy input to a photovoltaic system.

We have seen that inclination close to the latitude angle of the site will maximize the radiation on an inclined panel over the whole year. In stand-alone systems, it is usual to choose a somewhat steeper angle to minimize storage requirements. For a summer peaking load, on the other hand, a more shallow angle is usually preferred.

Solar cells convert sunlight into electricity by exploiting the photovoltaic effect. The maximum conversion efficiencies observed in laboratory devices have exceeded 30% but the typical efficiencies for production cells are 10-15%.

The physical principles of photovoltaic energy conversion have been discussed, starting from electronic properties of semiconductors. A variety of structures have been examined with a view of how power losses which accompany their operation can be reduced.

Crystalline silicon solar cells represent the largest part of the market. The technology has been reviewed in detail, starting from crystalline silicon production through wafer preparation and cell manufacture to the final module assembly. The traditional single-crystal technology, as well as the newer semi crystalline and ribbon techniques, have been examined. We have also taken a brief look at some devices in the research stage which are likely to shape the technology in the years to come.

Thin-film solar cells hold the promise of inexpensive technology with acceptable conversion efficiencies. The requirements on a thin-film cell have been considered. Four types of thin-film cells that are to be of likely commercial importance in the next few years have been examined in detail: the amorphous silicon cell, thin polycrystalline silicon cell grown on a low-cost substrate, the copper indium diselenide cell and the cadmium telluride cell.

The photovoltaic system usually consists of a number of subsystems. In addition to the photovoltaic generator, provision is usually made for energy storage and power conditioning, including control elements. Some systems also have a back-up generator.

The construction of a Pv generator from modules has been discussed, focusing attention on the electrical characteristics of the generator under operating conditions and problems which arise from module interconnection.

The most common method of energy storage in pv systems is by lead-acid batteries. The characteristics of their operation have been analyzed, alongside various chemical and physical processes which limit battery life or increase the maintenance requirements.

Power conditioning and control elements are often included to feed AC loads or the grid, interface different parts of the system, or monitor the system performance.

Sizing is an important part of the system design, particularly for stand-alone systems. The sizing procedure uses the radiation and load data to recommend the sizes of the array and battery storage, subject to the required reliability of power supply. It also allows the system cost to be minimized.



## 10. Παράρτημα 1

### Newton-Raphson Method

Each objective function F1 thru F4 equals zero when the correct value for each of the four "x" variables is found. First, guesses are made for each variable. Then, a first order Taylor-series expansion is used to establish a new set of simultaneous equations in matrix form [34]. This requires computing the Jacobian matrix of the objective functions. Solving the new set of equations provides a better guess for each unknown, and the process is repeated until the difference between successive guesses lies within a desired tolerance. The form of the expansion for the first objective function is:

$$F_1(x_{1,T}, x_{2,T}, x_{3,T}, x_{4,T}) \approx F_1(x_{1,C}, x_{2,C}, x_{3,C}, x_{4,C}) + \frac{\partial F_1(x_{1,T}, x_{2,T}, x_{3,T}, x_{4,T})}{\partial x_2} (x_{2,T} - x_{2,C}) + \frac{\partial F_1(x_{1,T}, x_{2,T}, x_{3,T}, x_{4,T})}{\partial x_3} (x_{3,T} - x_{3,C}) + \frac{\partial F_1(x_{1,T}, x_{2,T}, x_{3,T}, x_{4,T})}{\partial x_4} (x_{4,T} - x_{4,C})$$

where subscripts T and C refer to temporary and correct values. The form is similar for the other three objective functions. The new set of equations in matrix form is:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} & \frac{\partial F_1}{\partial x_3} & \frac{\partial F_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} & \frac{\partial F_2}{\partial x_3} & \frac{\partial F_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial F_3}{\partial x_1} & \frac{\partial F_3}{\partial x_2} & \frac{\partial F_3}{\partial x_3} & \frac{\partial F_3}{\partial x_4} \\ \frac{\partial F_4}{\partial x_1} & \frac{\partial F_4}{\partial x_2} & \frac{\partial F_4}{\partial x_3} & \frac{\partial F_4}{\partial x_4} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{1,T} - x_{1,C} \\ x_{2,T} - x_{2,C} \\ x_{3,T} - x_{3,C} \\ x_{4,T} - x_{4,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix}$$

Solving this matrix usually requires the initial guesses to be within approximately an order of magnitude of the correct value. Otherwise, Newton's method may provide divergent and unstable iterative guesses. In practice, assuming an approximate value for the series resistance and then solving a simpler 3 x 3 system provides good initial guesses to use for the above 4 x 4 system. The Jacobian terms are:

$$\frac{\partial F_1}{\partial x_1} = 1.0$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial x_2} = 1.0 - \exp\left(\frac{qI_{sc}R_s}{\gamma kT_c}\right)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial x_3} = I_o \frac{qI_{sc}R_s}{\gamma^2 kT_c} \exp\left(\frac{qI_{sc}R_s}{\gamma kT_c}\right)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial x_4} = -I_o \frac{qI_{sc}}{\gamma kT_c} \exp\left(\frac{qI_{sc}R_s}{\gamma kT_c}\right)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial x} = 1.0$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial x_2} = 1.0 - \exp\left(\frac{qV_{oc}}{\gamma kT_c}\right)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial x_3} = I_o \frac{qV_{oc}}{\gamma^2 kT_c} \exp\left(\frac{qV_{oc}}{\gamma kT_c}\right)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial x_4} = 0.0$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial x_1} = 1.0$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial x_2} = 1.0 - \exp\left(\frac{q}{\gamma kT_c}(V_{MP} + I_{MP}R_s)\right)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial x_3} = I_o \frac{q}{\gamma^2 kT_c}(V_{MP} + I_{MP}R_s) \exp\left(\frac{q}{\gamma kT_c}(V_{MP} + I_{MP}R_s)\right)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial x_4} = -I_o \frac{q}{\gamma kT_c} I_{MP} \exp\left(\frac{q}{\gamma kT_c}(V_{MP} + I_{MP}R_s)\right)$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial x_1} = 1.0$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial x_2} = 1.0 - \exp\left(\frac{q(V_{MP} + I_{MP}R_s)}{\gamma kT_c}\right) \times$$

$$\left(1.0 + \frac{qV_{MP}}{\gamma kT_c(1 + R_s Z)} - \frac{qR_s V_{MP} Z}{\gamma kT_c(1.0 + R_s Z)^2}\right)$$

where  $Z$  is:

$$Z = I_O \frac{q}{\gamma k T_C} \exp\left(\frac{q}{\gamma k T_C} (V_{MP} + I_{MP} R_S)\right)$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial x_3} = \frac{-Z(V_{MP} + I_{MP} R_S)}{\gamma} \left(1.0 + \frac{q V_{MP}}{\gamma k T_C (1 + R_S Z)}\right) -$$

$$Z V_{MP} \left[ \frac{1}{(1 + R_S Z)} - \frac{R_S I_O q}{\gamma^2 k T_C} \left(1 + \frac{q(V_{MP} + I_{MP} R_S)}{\gamma k T_C}\right) \right]$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial x_4} = -Z I_{MP} \left[1 + \frac{q V_{MP}}{\gamma k T_C (1 + R_S Z)}\right] + \frac{Z^2 V_{MP} \left[1 + \frac{R_S q I_{MP}}{\gamma k T_C}\right]}{[1 + R_S Z]^2}$$

## 11. Βιβλιογραφία

TOMAS MARKAVART Solar Electricity University of Southampton

CHAPIN, D. M., FULLER, C.S and PEARSON, G. L., A new p-n junction photocell for converting solar radiation electrical power, J. Appl. Phys.23; 1954: 676-677.

DOSTROVSKY, I. Energy and the Missing Resource, Cambridge University Press  
Cambridge, 1988.

IQBAL, M., An introduction Solar Radiation, Academic, New York, 1983. LOF, G. o. F.,  
DUFFIE, F. A. and SMITH, C. O., World Distribution

Radiation, University of Wisconsin Report No. 21, 1966.

LORENZO, E., Solar Radiation, in: Luque A., Solar Cells and Optics Photovoltaic  
Concentration, Adam Hilger, Bristol, 1989,. 268-304.

PAGE, J. K., The estimation of monthly mean values of daily total short. radiation on vertical  
and inclined surfaces from sunshine records for latit. 40oN-40oS, in: Proc. United Nations on  
New Sources Of Energy, vol. 4, 1 378-390.

PALZ, W., ed. European Solar Radiation Atlas, Volumes 1 and 2, 2nd edn, V των Rheinland,  
Cologne, 1984.

GREEN, M. A., Solar Cells, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1982.

HERSH, P. and ZWEIBEL, K., Basic Photovoltaic Principles and Methods, U.S. Government  
Printing Office, Washington, DC, SERI/SP-290-1448, 1982.

PULFREY, D. L., Photovoltaic Power Generation, Van Nostrand Rheinhold, New York, 1978.

YAN OVERSTRAETEN, R. and MERTENS, R., Physics.Technology and Use Of Photovoltaics,  
Adam Hilger, Bristol, 1986.

EGIDO, M. A. and LORENZO, E., The sizing of stand-alone pv systems: a review and a  
proposed new method, So/ar Energy Material/s and So/ar Ce[[s 26, 1992: 51-69.

KALHAMMER, F. R., Energy-storage systems, Scientific American 241 (6), 1979:  
42-51.

LORENZO, E. et α/., Electricidad Solar Fotovolltaica, E. T .8.1. Telecomunicacion, Madrid,  
1984.

MACOMBER, H. L. et αl, Engineering Design Handbook for Stand-A/one Photo- vo/taic  
Systems, NA8A contract OEN 3-195, 1981.

Christos Petroxelos Simulation and Photovoltaics, Basic Algorithm in Programme  
Photovoltaics Energy Cres 2005

ΚΑΠΕ, Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, Εφαρμογές στην Ελλάδα, 2001, ΕΠΕ 3.3.10.