

ΑΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ

Πτυχιακή Εργασία

ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΕ ΕΞΟΧΙΚΗ ΚΑΤΟΙΚΙΑ



Ψωμιάδης Κώστας Α.Μ 17191

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής, Καραϊσάς Πέτρος

Αθήνα Σεπτέμβριος 2017

ΠΕΡΙΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 : Ηλιακή ενέργεια

- 1.1 Γενικά για την ηλιακή ενέργεια.
- 1.2 Χαρακτηριστικά της ηλιακής ενέργειας
- 1.3 Ηλιακή γεωμετρία.
- 1.4 Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας.
- 1.5 Άμεση ηλιακή ενέργεια.
- 1.6 Έμμεση ηλιακή ενέργεια.
- 1.7 Εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας.
- 1.8 Ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα
- 1.9 Ηλιακή ενέργεια και φωτοβολταϊκά συστήματα.
- 1.10 Ηλιακή λίμνη.

Κεφάλαιο 2 : Φωτοβολταϊκή ενέργεια

- 2.1 Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολία από την ύλη
- 2.2 Φωτοαγωγιμότητα.
- 2.3 Βασικές προϋποθέσεις δημιουργίας του ΦΒ φαινομένου στους ημιαγωγούς.
- 2.4 Το ΦΒ φαινόμενο.
- 2.5 Καμπύλη $I - V$ ενός ΦΒ στοιχείου.
- 2.6 Η απόδοση του ΦΒ στοιχείου.
- 2.7 Παράγων πλήρωση ΦΒ στοιχείου.
- 2.8 Σημεία λειτουργίας μέγιστης ισχύος.
- 2.9 Καμπύλη φόρτου.
- 2.10 Θεωρητικό όριο της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

2.11 Τεχνικές δημιουργίας των επαφών p-n φωτοβολταϊκών στοιχείων.

2.12 Οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Κεφάλαιο 3 : Χαρακτηριστικά και κατηγορίες των ΦΒ συστημάτων

3.1 Χαρακτηριστικά ΦΒ συστημάτων.

3.2 Εκτός δικτύου η απομονωμένα ΦΒ συστήματα.

3.2.1 Αυτόνομα ΦΒ συστήματα.

3.2.2 Υβριδικά ΦΒ συστήματα.

3.2.3 ΦΒ σύστημα συνδεδεμένα στο δίκτυο.

3.3 Ροή ενέργειας από τη ΦΒ συστοιχία στη κατανάλωση.

3.4 Βασικά στοιχεία υβριδικού συστήματος.

Κεφαλαίο 4 : Μελέτη αυτόνομου PV- συστήματος για μια κατοικία στην Αττική.

4.1 Ενεργειακή μέθοδο.

4.1.1 Τυπικές συνθήκες δοκιμών – πιστοποίησης και λειτουργίας PV- στοιχείων.

4.2 Τυπικές συνθήκες δοκιμών πιστοποίησης και λειτουργίας PV – στοιχείων.

4.3 Διαστασιολόγηση συσσωρευτών.

4.4 Οικονομική ανάλυση και σχετικά μεγέθη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην εισαγωγή περιλαμβάνεται μια γενική παρουσίαση των συμβατικών, καθώς και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στα χαρακτηριστικά, στη σημασία και στην αξιοποίηση τους από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα. Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στην ηλιακή ακτινοβολία. Εξετάζεται η προέλευση της, τα χαρακτηριστικά της στην επιφάνεια της γης και η μεταβολή της κατά τη διάρκεια της ημερήσιας κίνησης του ήλιου. Διερευνάται επίσης η σημασία του προσανατολισμού και της κλίσης του συλλέκτη, για τη μεγιστοποίηση της συλλεγόμενης ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και των εποχών. Το δεύτερο κεφάλαιο αφιερώνεται στο φαινόμενο της γέννησης της ηλεκτρικής ενέργειας από το φως που απορροφάται από διάταξη. Εξετάζεται αναλυτικά όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου κατά τη μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική και διερευνώνται τα όρια της. Θεμελιώνονται οι βασικές έννοιες και η ορολογία της φωτοβολταϊκής παραγωγής ενέργειας και εξετάζεται η σχέση εξάρτησης της ισχύος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η αναφορά στα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων, σε πια κατηγορία ανήκουν ανάλογα με τον τρόπο που χρησιμοποιούν, αποθηκεύουν και διανέμουν την ενέργεια που συλλέγουν. Επίσης βλέπουμε την ροή ενέργεια από την φωτοβολταϊκή συστοιχία στην κατανάλωση και τα βασικά στοιχεία και μέρη ενός φωτοβολταϊκού υβριδικού συστήματος. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η μελέτη μιας κατοικίας στην Αττική περίπου 200 m². Η μελέτη γίνεται με δυο διαφορετικούς τρόπους. Πρώτα γίνεται με την ενεργειακή μέθοδο (Wh) στην συνέχεια με την μέθοδο ρεύματος (Ah),έπειτα γίνεται ο υπολογισμός της

διαστασιολόγησης των συσσωρευτών και με τους δυο τρόπους που προαναφέρθηκαν και στο τέλος γίνεται η οικονομική ανάλυση. Κάθε βήμα της μελέτης αναλύεται και σχολιάζεται.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σύνολο των πηγών ενέργειας, που ο άνθρωπος έχει στη διάθεση του διακρίνονται σε δυο κύριες κατηγορίες. Στις πηγές εκείνες που βασίζονται σε υπάρχοντα αποθέματα μέσα στο στερεό φλοιό της Γη, συγκεκριμένη διάρκεια ζωής και σ' αυτές που καθημερινά και αέναα μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης. Στις πρώτες ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο), αναφερόμενα και ως συμβατικά καύσιμα και η χαρακτηριστική μη ήπια μορφή ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια. Οι δεύτερες έχουν βασική τους προέλευση τον Ήλιο. Η ακτινοβολούμενη απ' το ήλιο ενέργεια, που φτάνει στη Γη, εκτός από την γενικότερη συμβολή της στη δημιουργία, ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας, δίδει ακατάπαυστα ενέργεια, με διάφορες μορφές αξιοποίησης. Άμεσα θερμαίνει εξατμίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού και συντηρεί τον γνωστό φυσικό κύκλο, δημιουργώντας τις λίμνες και τα ποτάμια, που αποτελούν προσθετή πηγή ενέργειας (Υδατόπτωση). Θέτει σε κίνηση τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας (Αιολική ενέργεια), δημιουργεί τα κύματα (ενέργεια κυμάτων). Συμβάλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας, η καύση δε των φυτικών προϊόντων παράγει ενέργεια (Βιομάζα). Αποροφούμενο από συνδυασμένα υλικά παράγει ηλεκτρισμό (Φωτοβολταϊκό φαινόμενο) στο οποίο θα σταθούμε. Όπως έχει υπολογισθεί, ο πληθυσμός της Γης από τον 17ο αιώνα, αυξήθηκε από 0.5 δις σε 5.7 δις. Συγχρόνως η κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε 140 φορές κατά το ίδιο χρονικό διάστημα και συνεχώς αυξάνεται. Συγκεκριμένα από τους 100 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου άνθρακα τον 17ο αιώνα, φτάσαμε την περίοδο του 1997 σε 14 δις τόνους ισοδύναμου άνθρακα. Ο σκοπός των Η.Μ.Ε. ενέργεια είναι η μείωση ρύπων και η λιγότερη μόλυνση του πλανήτη μας γιατί εάν συνεχιστεί η ραγδαία αύξηση της μόλυνση ο πλανήτη θα υποστεί μεγάλη καταστροφή χωρίς περιθώρια επιστροφής στην αρχική υγιή κατάσταση του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Στο πρώτο κεφαλαίο αναφέρουμε τα χαρακτηριστικά του ήλιου, την ηλιακή γεωμετρία, τις συνιστώσες του ήλιου, τις διαφορές της άμεσης από την έμμεση ηλιακή ακτινοβολία, τις εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας, τα ποσοστά της ηλιακής ακτινοβολίας στην χώρας μας, μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική με την χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων και το φαινόμενο της ηλιακής λίμνης

1.1 Γενικά για την ηλιακή ενέργεια

Ως ηλιακή ενέργεια ορίζεται η ενέργεια που φθάνει από τον ήλιο στη γη. Η ενέργεια αυτή εκπέμπεται από τον ήλιο λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του, και μεταδίδεται μέσα από το διάστημα με ακτινοβολία. Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη είναι κατά μέσο όρο 173×10^{15} W και είναι κατά τάξεις μεγαλύτερη της μέσης ισχύος που απαιτεί η ανθρωπότητα (7×10^{12} W). Πέρα αυτού όμως, η ηλιακή ενέργεια αποτέλεσε και αποτελεί τη βασική ενεργειακή πηγή στη γη, καθώς σε αυτήν οφείλεται ο σχηματισμός ή διαθεσιμότητα της πλειονότητας των ενεργειακών πόρων, εξαντλήσιμων και μη, με εξαιρέσεις την πυρηνική ενέργεια, τη γεωθερμική και την παλιρροιακή η οποία οφείλεται στην έλξη γης και σελήνης. Η γη βρίσκεται σε απόσταση 150 εκατομμύρια χιλιόμετρα από τον ήλιο, και με δεδομένο ότι ο ήλιος έχει 125 φορές τη διάμετρο της γης, προκύπτει ότι η τελευταία δέχεται μόλις το $1/109$ της ακτινοβολίας που εκπέμπει ο ήλιος. Η ηλικία του ήλιου εκτιμάται μεγαλύτερη από 5 δισεκατομμύρια έτη, ενώ υπολογίζεται ότι ο ήλιος θα συνεχίσει να εκπέμπει ακτινοβολία με τον ίδιο ρυθμό για άλλα τόσα έτη τουλάχιστον. Επομένως η ηλιακή ενέργεια είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας

1.2 Χαρακτηριστικά της ηλιακή ενέργειας

Οι πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στον ενεργό πυρήνα του ήλιου οδηγούν σε εσωτερικές θερμοκρασίες της τάξης των 107K και μια εσωτερική ροή ακτινοβολίας, που απορροφάται από τα εξωτερικά παθητικά στρώματα με αποτέλεσμα να θερμαίνονται έως τους 5800K περίπου. Καθίστανται έτσι μια πηγή ακτινοβολίας με σχετικά συνεχές φάσμα, που προσομοιάζει προς αυτό μέλανος σώματος αντίστοιχης θερμοκρασίας. Η ένταση της ακτινοβολίας που φθάνει από τον ήλιο στα ακρότατα όρια της ατμόσφαιρας της γης έχει μέση τιμή 1395 W/m^2 (με μικρές διακυμάνσεις) και ορίζεται σταθερά. Η ακτινοβολία του ήλιου που καταλήγει στην επιφάνεια της γης και μπορεί να φθάσει την τιμή 1 Kw/m^2 , όταν ο ήλιος είναι στο ζενίθ, και καλύπτει το φάσμα μεταξύ 0,3 και $2,5 \mu\text{m}$ με αιχμή στα $0,5 \mu\text{m}$. Η ακτινοβολία αυτή χαρακτηρίζεται ως μικρού μήκους κύματος και συμπεριλαμβάνει το ορατό φως ($0,4-0,7 \mu\text{m}$), συγκεκριμένα κατανέμεται ως εξής:

- Υπεριώδης ακτινοβολία ($\lambda < 0,4 \mu\text{m}$) 9%
- Ορατό φως ($0,4 < \lambda < 0,7 \mu\text{m}$) 45%

- Υπέρυθρη ακτινοβολία($\lambda > 0,7\mu\text{m}$) 46%

Για κατοικημένες περιοχές , η λαμβανόμενη θερμότητα λόγω ακτινοβολίας ποικίλη από 3 έως 30MJ/m² – day ανάλογα με την τοποθεσία ,την περίοδο του έτους και τις επικροτούσες καιρικές συνθήκες .Αντίστοιχα η ροή θερμότητας από την γη προς το διάστημα (με ακτινοβολία) είναι πάλι της τάξης του 1Kw/m² ,αλλά συμβαίνει σε μήκη κύματος μεταξύ 5 και 25 μm ,ώστε χαρακτηρίζεται ως ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος με αιχμή στα 10 μm .

1.3 Ηλιακή γεωμετρία

Η γη περιστρέφεται περί τον εαυτό της με γωνιακή ταχύτητα $2\pi \text{ rad}/24\text{h}$ (ή $15^\circ /\text{h}$), με αποτέλεσμα και την αντίστοιχη φαινόμενη κίνηση του ήλιου .Κάθε ημέρα περνά μια φορά ο ήλιος από το επίπεδο του μεσημβρινού του τόπου .Η ηλιακή αυτή ώρα ορίζεται ως μεσημβρία και κατά κανόνα δεν συμπίπτει με την 12:00 ώρα του τόπου για δυο λόγους :

- Εφαρμόζεται κοινή ώρα ανά κράτος σε περιοχή επομένως με σημαντικό εύρος γεωγραφικών μηκών ,οπότε μόνον σε έναν μεσημβρινό συμπίπτει η εφαρμοζόμενη ώρα με την πραγματική

Λόγω της θερινής ώρας (η εφαρμοζόμενη ώρα είναι μια ώρα πίσω από την πραγματική),όταν αυτή εφαρμόζεται.

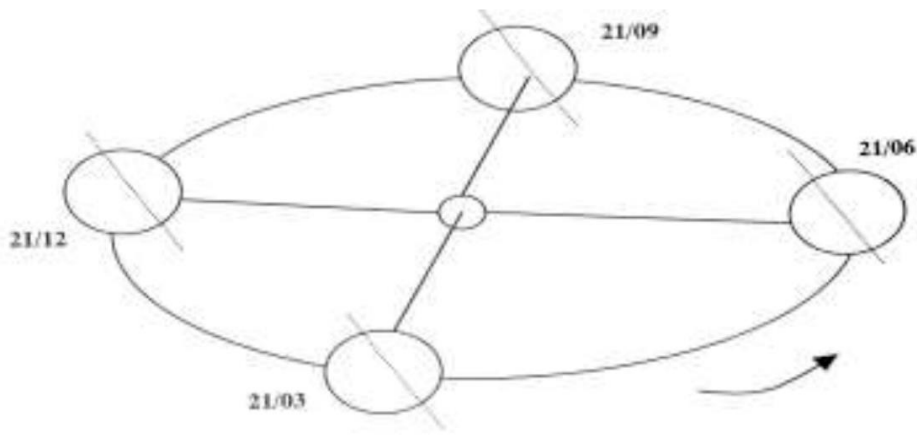
Ορίζεται ως ωριαία γωνία του ήλιου ω , σε ένα τόπο ,η γωνία που φανερώνει την απόκλιση του ήλιου από την θέση στο ζενίθ στον τόπο αυτό ,Σύμφωνα με τα παραπάνω ,η ωριαία γωνία ω θα δίνεται (σε μοίρες) με βάση την ηλιακή ώρα (σε ώρες) από την σχέση :

$$\omega = 15 \times (\text{τηλιακή} - 12)$$

Η γη κάνει μια πλήρης περιστροφή περί τον ήλιο εντός ενός έτους ,κινούμενη σε επίπεδο με κέντρο τον ήλιο .Ταυτόχρονα περιστρέφεται περί το άξονα της ,με περίοδο μια ημέρα .Ο άξονας της γης διατηρεί σταθερή διεύθυνση κατά την κίνηση της γης περί τον ήλιο ,δίχως όμως να είναι κάθετος στο επίπεδο όπου κινείται η γη αλλά έχοντας μια κλίση $\delta_0=23,5^\circ$ όπως στο σχήμα 1.1 .Η κλίση αυτή του άξονα της γης έχει σαν αποτέλεσμα :

Την μεταβλητότητα της γωνίας με την οποία φθάνει η ηλιακή ακτινοβολία σε έναν τόπο στη διάρκεια του έτους (άλλοτε κάθετα και άλλοτε με κλίση)

- Την επακόληθη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια του έτους (μεγαλύτερη ακτινοβολία όταν φθάσει με μικρότερη κλίση ως προς την κατακόρυφη στον τόπο
- Την ακολουθία των εποχών και τη διακύμανση των ωρών ηλιοφάνειας
- Τη μεταβλητότητα της θέσης του ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι (ψηλότερα το καλοκαίρι ,χαμηλότερα το χειμώνα).



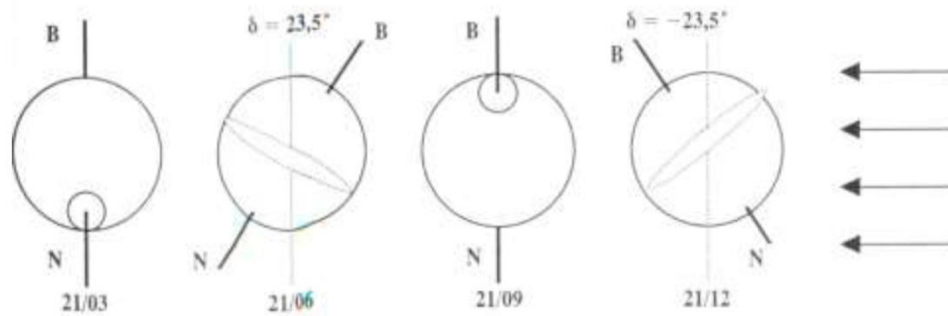
Σχήμα 1.1 Κίνηση της γης περί τον ήλιο.

Έτσι οι τόποι στο βόρειο ημισφαίριο έχουν χειμώνα και χαμηλές θερμοκρασίες το Δεκέμβριο, όταν την ίδια περίοδο η ηλιακή ακτινοβολία φθάνει στο νότιο ημισφαίριο με αποτέλεσμα να υπάρχει καλοκαίρι εκεί. Επίσης την 21/3 και 21/9 συμβαίνει ισημερία, ενώ την 21/12 και 21/6 έχουμε στο βόρειο ημισφαίριο τη μικρότερη και την μεγαλύτερη μέρα, αντίστοιχα. Για τον ίδιο λόγο (κλίση του άξονα της γης προς το επίπεδο περιστροφής περί τον ήλιο) ο ήλιος δεν ανατέλλει πάντα από την ανατολή ούτε από δύο ακριβώς προς την δύση. Η παραπάνω κατεύθυνση κίνησης συμβαίνει μόνο τις δυο μέρες του χρόνου που υπάρχει ισημερία, ενώ στο μεσοδιάστημα ο ήλιος κινείται νοτιότερα τη χειμερινή περίοδο (ώστε να ανατείλει από ΝΑ κατεύθυνση και δύο προς ΝΔ κατεύθυνση), και κινείται βορειότερα την καλοκαιρινή περίοδο (από 21/3 έως 21/6) ανατέλλοντας από ΒΑ και δύοντας ΒΔ, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2. Αναλυτικότερα (βλ. και σχήμα 1.2.) η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης προς τον ήλιο και του επιπέδου του ισημερινού καλείται απόκλιση δ . Η απόκλιση αυτή κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $+\delta_0$ - δ_0 (παίρνοντας από την τιμή 0 όποτε συμβαίνει ισημερία), και δίνεται από την σχέση:

$$\delta = \delta_0 \times \eta\mu \left\{ 360 \times (284 + n) / 365 \right\}$$

όπου n είναι η μέρα του έτους ($n=1$ για τον Ιανουάριο)

Σχήμα 1.2 Σχετικές θέσεις γης και προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας για χαρακτηριστικές τιμές



Σχήμα 1.2 Σχετικές θέσεις γης και προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας για χαρακτηριστικές τιμές

1.4 Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ακτινοβολία $G_{ολ}$ που καταλήγει σε μια επιφάνεια κάθετη στην ηλιακή ακτινοβολία, έρχεται άμεσα από τον ήλιο G_a ή καταλήγει σε αυτήν από διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας $G_δ$ σε σύννεφα ή σκόνη της ατμόσφαιρας. Ακόμα και σε ημέρα με πλήρης ηλιοφάνεια υπάρχει διάχυση της ακτινοβολίας και το πηλίκο της άμεσης προς την ολική ακτινοβολία κυμαίνεται από 0,9 για καθαρή ημέρα έως 0,0 για τελείως νεφελώδη ημέρα. $G_{ολ} = G_a + G_δ$ Η ετήσια λαμβανόμενη ακτινοβολία είναι το άθροισμα των δυο αυτών όρων για όλο το έτος, και συγκεκριμένα προκύπτει από το ολοκλήρωμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με το χρόνο : $H_{ολ} = \int (G_a \times \sin(\theta) + G_δ) dt$ όπου η γωνία θ είναι η γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή αυτή σχηματίζεται από τη διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας και από την κάθετη επιφάνεια συλλογής της ακτινοβολίας (αν ο ήλιος προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια τότε $\theta=0$ και $\sin(\theta)=1$). Συχνά εγείρεται το πρόβλημα ποια πρέπει να είναι η τοποθέτηση –προσανατολισμό ενός ηλιακού συλλέκτη ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόληψη της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο συλλέκτης τοποθετείται ώστε να κοιτά τον ισημερινό (με νότιο προσανατολισμό δηλαδή για την Ελλάδα και γενικά το βόρειο ημισφαίριο) και για μεγιστοποίηση της ετήσιας λαμβανόμενης ακτινοβολίας τοποθετείται με κλίση β (η γωνία που σχηματίζεται ο συλλέκτης με το οριζόντιο επίπεδο) ίση προς το γεωγραφικό πλάτος L της θέσης. Είναι πιθανόν όμως να ενδιαφέρει η μεγιστοποίηση της απόδοσης του συλλέκτη το χειμώνα μόνο ή το καλοκαίρι. Γενικότερα η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη μπορεί να δίνεται από τις εξής σχέσεις :

$\beta = 0,86 \times (L + 1)$ εάν ενδιαφέρει η μεγιστοποίηση της ετήσιας απολαμβανόμενης ακτινοβολίας

$\beta = 0,82 \times L + 25$ εάν ενδιαφέρει η μεγιστοποίηση της απολαμβανόμενης ακτινοβολίας το χειμώνα

$\beta = L - 17$ εάν ενδιαφέρει η μεγιστοποίηση της απολαμβανόμενης ακτινοβολία το καλοκαίρι

1.5 Άμεση ηλιακή ενέργεια

Οι κύριοι τρόποι εκμετάλλευσης της άμεσης ηλιακής ενέργειας, είναι η μετατροπή της σε θερμότητα αλλά και σε ηλεκτρισμό. Όλα τα συστήματα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, τα παθητικά και τα ενεργητικά. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό γίνεται επί το πλείστον με τη φωτοβολταϊκή μέθοδο.

1.6 Έμμεση ηλιακή ενέργεια

Από την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στη γη, ποσοστό 1,5%-2,0% μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια αέριων μαζών στην ατμόσφαιρα. Παράλληλα η θερμική επίδραση του ήλιου στους υδάτινους όγκους (εξάτμιση, βροχοπτώσεις, θερμοκρασιακή Διαγόρα ωκεανών, τήξη των πάγων και του χιονιού) προκαλεί έντονη κινητικότητα. Μέσω της εφευρετικότητας του ανθρώπου από πολύ νωρίς κατάφερε να δαμάσει την αιολική ενέργεια (π.χ. ιστιοφόρα, ανεμόμυλοι) και υδραυλική ενέργεια (π.χ. νερόμυλοι). Ιδιαίτερα στην εποχή μας, η χρήση της αιολικής και τις αιολικής ενέργειας έχει αξιοθαύμαστα αποτελέσματα στις διάφορες εφαρμογές της

1.7 Εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας

Ανάλογα με την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας για τελική χρήση της, τα συστήματα αξιοποίησης της διακρίνονται (α) παθητικά ηλιακά συστήματα, στα οποία συμβαίνει άμεση απολαβή της ηλιακής ακτινοβολίας, δίχως προηγούμενης μετατροπής της, στα (β) ενεργητικά ηλιακά συστήματα όπου συλλέγεται η ηλιακή ακτινοβολία με μετατροπή της σε θερμότητα και ακολούθως αξιοποιείται η τελευταία (θερμική μετατροπή) και στα (γ) φωτοβολταϊκά συστήματα στα οποία η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό για περαιτέρω χρήσης της. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα ενσωματώνονται κυρίως στις κατασκευές κτιρίων για εξυπηρέτηση των θερμικών φορτίων του χειμώνα και συνιστούν εξελιγμένες και οικονομικές τεχνολογίες. Ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιούνται τόσο σε οικιακές όσο και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Έτσι η θέρμανση νερού χρήσης αποτελεί μια οικονομική και ήδη διαδεδομένη τεχνολογία, ενώ αντίθετα η ηλιακή θέρμανση οικιών δεν παρουσιάζει για την ώρα οικονομικό ενδιαφέρον. Στο βιομηχανικό τομέα διακρίνονται εφαρμογές θέρμανσης με χαμηλή ή εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία (ηλιακή φούρνοι με τη χρήση συγκεντρωτικών κατόπτρων), αφαλάτωσης (με τη χρήση ηλιακών αποστακτήρων ή συνηθών μεθόδων απόσταξης σε συνδυασμό με ηλιακούς συλλέκτες ή ηλιακές λίμνες) ή ηλεκτροπαραγωγής με τη χρήση συγκεντρωτικών κατόπτρων. Από τις παραπάνω, έχουν οικονομικό ενδιαφέρον οι εφαρμογές θέρμανσης κύριος. Περιορισμένο οικονομικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και η παραγωγή ηλεκτρισμού με φωτοβολταϊκό σύστημα εκτός αν απαιτείται για περιοχές όπου δεν είναι

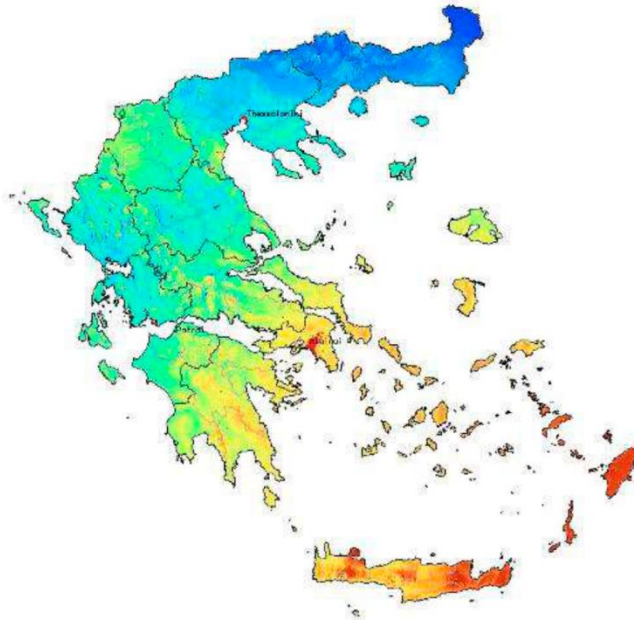
οικονομικά δυνατών να επεκταθεί το δίκτυο (π.χ. φωτισμός φάρων ,κίνηση αντλιών για άρδευση ,συστήματα πυρανάχνευσης σε δάση ,ηλεκτροδότησης καταφύγιων ,δορυφόρων κ.λ.π.) Στον πίνακα 1.1. συνοψίζονται οι διαθέσιμες τεχνολογίες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας και η τεχνο-οικονομική κατάσταση τους , που αφορά στην ωριμότητα της τεχνολογίας και στην οικονομικότητα της . Στις ήδη αναπτυγμένες και οικονομικά εφαρμόσιμες τεχνολογίες (τουλάχιστον για τα κλιματικά δεδομένα της χώρας)διακρίνουμε επόμενος την εποχιακή θέρμανση κολυμβητηρίων (οι ανάγκες συμπίπτουν με περιόδους υψηλής ακτινοβολίας) , την παραγωγή οικιακού Θέρμου νερού χρήσης για όλο το έτος (εφόσον είναι αποδεκτή αποπληρωμή της τάξης δεκαετίας) , τη χρήση σχετικά φθηνών συλλεκτών για ξήρανση αγροτικής σοδειάς , τη μικρής κλίμακας εφαρμογή Φωτοβολταϊκών συστημάτων για εφαρμογή σε νέο-ανεγειρόμενες κατοικίες .

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ		Τεχνική & οικονομική κατάσταση
1. Συστήματα Ηλιακών Συλλεκτών		
Εφαρμογές	- επαγγελματική θέρμανση κολιμβητηρίων	****
	- θέρμανση νερού οικιακής χρήσης	****
	- θέρμανση βιομηχανικών διεργασιών ΧΘ	**
	- θέρμανση χώρων σε κτίρια	***
	- ψύξη χώρων σε κτίρια	**
	- ζήτηση σοδειάς	****
	- ασφαλίωση	**
2. Παθητικά ηλιακά συστήματα για κτίρια		
Εφαρμογές	- θέρμανση χώρων και κλιματισμός κτιρίων	****
3. Ηλιακά Θερμικά Συστήματα Συγκεντρωτικών Κατόπτρων		
Εφαρμογές	- θέρμανση σε βιομηχανικές διεργασίες	**
	- αυτόνομα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής	**
	- ηλεκτροπαραγωγή σε σύνδεση στο δίκτυο	**
	- ασφαλίωση	**
	- παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση	*
	- παραγωγή καυσίμων και χημικών	*
4. Φωτοβολταϊκά Συστήματα Ηλεκτροπαραγωγής		
Εφαρμογές	- φωτισμός και προσιδοποιητικοί φανοί σε απόμακρες θέσεις	****
	- επικοινωνία, σε απόμακρες θέσεις	****
	- ηλεκτροδότηση για μεμονωμένες κατοικίες / καταφύγια	****
	- άντληση νερού και άρδευση σε απόμακρες θέσεις	****
	- ανάγκες ηλεκτροδότησης στον τομέα ανάπτυξης / διακοπών	****
	- αυτόνομη ηλεκτροδότηση για ομάδες κατοικιών	**
	- ηλεκτροπαραγωγή με σύνδεση στο δίκτυο	*
	- ηλεκτρολυτική παραγωγή υδρογόνου	*
****	τεχνολογίες ανεπτυγμένες και οικονομικά εφαρμόσιμες	
***	ανεπτυγμένες τεχνολογίες, αλλά οικονομικές μόνο με επιδότηση	
**	τεχνολογίες ακόμα στο στάδιο έρευνας και ανάπτυξης	
*	μελλοντικές αλλά δίχως, ακόμα, πρακτική εφαρμογή	

Πίνακας 1.1 Τεχνικοοικονομική κατάσταση τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας

1.8 Ηλιακή ακτινοβολία στην ΕΛΛΑΔΑ

Η χώρα μας συγκαταλέγεται μεταξύ των χωρών υψηλής ακτινοβολίας. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα στην εφαρμογή των φωτοβολταϊκών συστημάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από το ΚΕΝΤΡΟ ΕΡΕΥΝΩΝ της ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΚΟΙΝΟΤΗΤΑΣ έχουν γίνει μελέτες για την χώρα μας και απεικονίζονται στους ακόλουθους χάρτες. Οι χάρτες αντιπροσωπεύουν την ετήσια ποσότητα ενέργειας (kWh/m^2) που προέρχεται από την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε φωτοβολταϊκούς συλλέκτες σε οριζόντια θέση (Εικ. 1) καθώς και υπό άριστη γωνία κλίσης (Εικ. 2) . Αφορά διάστημα 10 ετών και συγκεκριμένα την περίοδο 1981- 1990.Εναλλακτικά δίνεται χάρτης με την ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εκφρασμένη σε kWh από φωτοβολταϊκό σύστημα , με συλλέκτες πυριτίου (c-Si) ισχύος 1kWp υπό άριστη γωνία κλίσης (Εικ.3).Σημειώστε ότι στις τιμές αυτές δεν περιλαμβάνονται απώλειες λόγω υψηλών θερμοκρασιών, αντανάκλασης καθώς και εκείνων που οφείλονται σε καλωδιώσεις και μετατροπείς.



Σχήμα 1.3. Χαμηλότερη παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού με μπλε και υψηλότερη παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού με κόκκινο.

1.9 Ηλιακή Ενέργεια και Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία απευθείας σε ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο μπορεί να τροφοδοτήσει ηλεκτρικές συσκευές, να αποθηκευτεί ή να διοχετευθεί στο δίκτυο της ΔΕΗ. Το όφελος για το περιβάλλον είναι σημαντικότερο δεδομένου ότι για την παραγωγή κάθε κιλοβατώρας ηλεκτρισμού από ορυκτά καύσιμα επιβαρύνεται η ατμόσφαιρα με ένα τουλάχιστον κιλό διοξειδίου του άνθρακα, του σημαντικότερου αερίου του θερμοκηπίου υπεύθυνου για τις κλιματικές αλλαγές. Από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος 1kW, μπορούν να παραχθούν 1800kWh το χρόνο και συνεπώς να αποτραπεί η εκπομπή περίπου 2 τόνων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Τα κύρια μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι:

Φωτοβολταϊκοί συλλέκτες που μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρικό ρεύμα

- Μεταλλική δομή στήριξης η οποία μπορεί να είναι είτε σταθερή είτε κινητή (όπως ο ηλιοστάτης Ptolemeo που σχεδίασε και υλοποίησε η ΙΡΙΣ Α.Ε.) που στρέφει τους συλλέκτες πάντα προς την κατεύθυνση του ήλιου
- Ηλεκτρονικός ρυθμιστής για την διαχείριση της φόρτισης των μπαταριών
- Ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες) για την αποθήκευση του παραγόμενου ρεύματος που πλεονάζει, για μεταγενέστερη χρήση
- Μετατροπέας τάσης για το μετασχηματισμό του συνεχούς ρεύματος από τις μπαταρίες σε ημιτονοειδές εναλλασσόμενο για τη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών ή για την τροφοδότηση του δικτύου της ΔΕΗ

1.10 Η ηλιακή λίμνη

Η ηλιακή λίμνη είναι ένας οικονομικός ηλιακός συλλέκτης (περίπου υποδεκαπλάσιο κόστος) που χρησιμοποιεί το νερό σαν το κάλυμμα. Συμπεριλαμβάνει πολλά στρώματα αλατούχου ύδατος, όπου βαθύτερα στα 1.5 m συνήθως βρίσκεται αυτή με τη μεγαλύτερη αλατότητα. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από τον πυθμένα της λίμνης (αφού το άβαθες στρώμα νερού είναι σε μεγάλο βαθμό πέρατα) που με τη σειρά του θερμαίνει το κατώτερο στρώμα του αλατούχου ύδατος με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα. Σε μια συνήθη ομογενή λίμνη το θερμαθέν νερό στον πυθμένα θα γινόταν ελαφρύτερο από τα υπερκείμενα στρώματα, θα ανερχόταν στην επιφάνεια ώστε θα εγκαθίστανται ρεύματα φυσικής κυκλοφορίας που θα οδηγούσαν σε ενιαία θερμοκρασία με το βάθος. Η ηλιακή θέρμανση θα χανόταν στο περιβάλλον λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που θα αποκτούσαν τα ανώτερα στρώματα της λίμνης. Όμως στην ηλιακή λίμνη στο κατώτερο στρώμα δίνεται τόση αλατότητα ώστε παρά την θέρμανση του παραμένει βαρύτερο από τα υπερκείμενα και τελικά να αναστέλλεται η ελεύθερη επαφή-μεταφορά. Επιτυγχάνονται έτσι υψηλές θερμοκρασίες στο κατώτερο στρώμα ύδατος (έως 90ο C) και

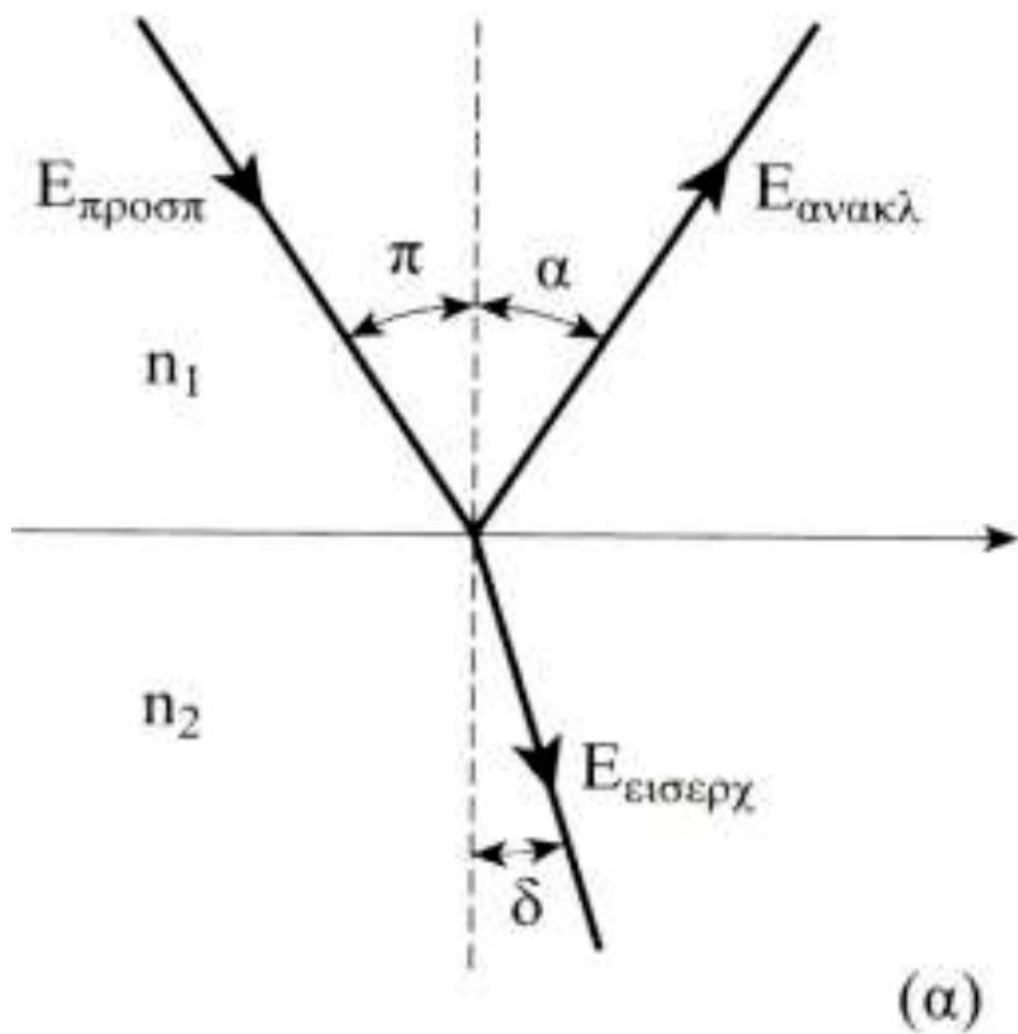
αποθήκευση σε αυτό της ηλιακής ενέργειας, δίχως ταυτόχρονη αύξηση των θερμικών απωλειών από την επιφάνεια της λίμνης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Σκοπός του 2ου κεφαλαίου είναι να γνωρίσουμε και να έχουμε μια καλλίτερη εικόνα της φωτοβολταϊκής ενέργειας. Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε το μηχανισμό απορρόφησης του Φώτος στο χώρο της ημιαγωγικής επαφής που οδηγεί στην εμφάνιση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Επίσης παρουσιάζονται και αναλύονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και οι μέθοδοι παρασκευής του βασικού κύτταρου παραγωγής της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας δηλαδή του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

2.1 Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από την ύλη

Το φωτόνιο, έννοια που εισήχθη στην επιστημονική ορολογία από τον Einstein, είναι το ελάχιστο πόσο (quantum) της ενέργειας, που εκπέμπεται κατά τις ενεργειακές μεταβολές των ηλεκτρικών διπολικών ταλαντωτών της ύλης, σε κάθε συχνότητα ν . Συνεπώς, το φωτόνιο αποτελεί το ελάχιστο πόσο ενέργειας αλληλεπίδρασης μεταξύ ηλεκτρομαγνητικού κύματος και δομικών λίθων της ύλης. Η σχέση μεταξύ ενέργειας E και της συχνότητας ν ενός φωτονίου δόθηκε από τον Planck : $E=h\nu$, όπου h , η σταθερά του Planck. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από μια πηγή φωτός γενικά συνίσταται από μεγάλο και διαφορετικό πλήθος φωτονίων σε κάθε συχνότητα, χαρακτηριστικό της πηγής και της θερμοκρασίας της όπως π.χ. το ηλιακό φως. Μια δέσμη φωτός που αποδίδεται σε υλικό A, με δείκτη διάθλασης n_1 , προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια του A με άλλο σώμα, B, με δείκτη διάθλασης n_2 . Εκεί αφενός ανακλάται, ακολουθώντας το νόμο της ανάκλασης ($\pi=\alpha$), αφετέρου διαθλάται ακολουθώντας αντίστοιχα το νόμο της διάθλασης ($n_1\eta\mu\pi=n_2\eta\mu\delta$), όπου π , α , δ , οι γωνίες πρόσπτωσης, ανάκλασης και διάθλασης, αντίστοιχα (σχήμα 2.1.). Ως δείκτης διάθλασης n , ενός υλικού ορίζεται το πηλίκο $n = c_0 / c$ όπου το c_0 , c η ταχύτητα του Φώτος στο κενό και στο μέσο αντίστοιχα ($c < c_0$).



Σχήμα 2.1 Ανάκλαση- διάθλαση ακτίνας που προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δυο μέσων.

2.2 Φωτοαγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα σκότους ενός ημιαγωγού είναι μικρότερη (και σε ορισμένες περιπτώσεις, πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερη) σε σχέση με την αντίστοιχη των μετάλλων. Όταν ο ημιαγωγός αυτός φωτιστεί τότε οι φορείς ρεύματος δηλαδή τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας και οι οπές, στη ζώνη σθένος, αυξάνονται και συνεπώς, αυξάνεται και η αγωγιμότητα του. Η αυξανόμενη αγωγιμότητα του ημιαγωγού, με την επίδραση του φωτός, ονομάζεται φωτοαγωγιμότητα π.χ. η φωτοαγωγιμότητα του c-Si, με τυπικό ηλιακό φωτισμό πυκνότητας ισχύος 1 kW/m^2 , είναι 7 έως 8 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη της αγωγιμότητας σκότους. Όταν διακοπεί ο φωτισμός του ημιαγωγού, η αγωγιμότητα του επανέρχεται στα αρχικά επίπεδα, με επανασυνδέσεις των φορέων μειονότητας με φορείς πλειονότητας. Μια φωτοαγωγιμη διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως απλό αισθητήριο φωτός είτε ως όργανο μέτρησης της έντασης του φωτός (φωτοαντίσταση ή φωτοαγωγός).

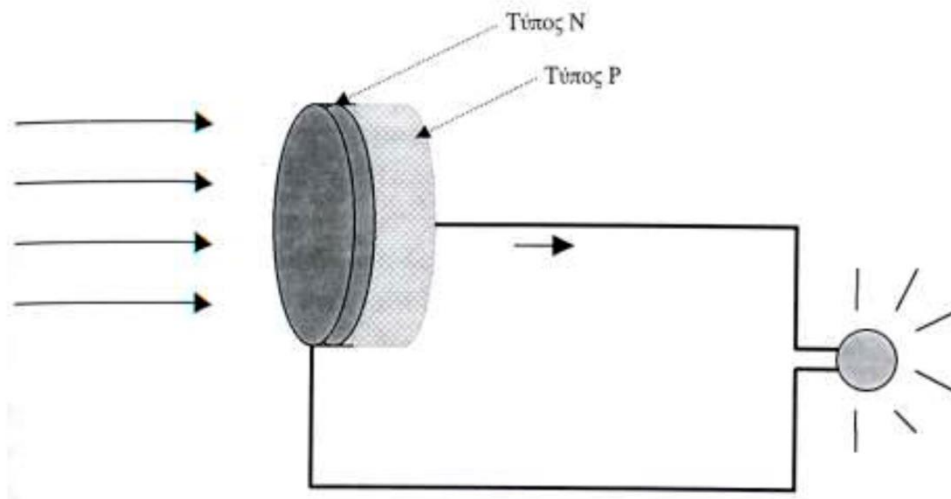
2.3 Οι βασικές προϋποθέσεις δημιουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου στους ημιαγωγούς

Η περιγραφείσα οπτικό – ηλεκτρική συμπεριφορά του ημιαγωγού, εκφράζεται μακροσκοπικά με τη χαρακτηριστική ιδιότητα της φωτοαγωγιμότητας του. Όταν ένας ημιαγωγός φωτίζεται άγει με πολλές φορές ισχυρότερο ρεύμα απ' ό,τι όταν βρίσκεται στο σκοτάδι. Το αποτέλεσμα αυτό εξαρτάται από το ημιαγωγικό υλικό και τη συχνότητα (το μήκος κύματος ή την ενέργεια φωτονίου) της προσπίπτουσας ηλεκτρο- μαγνητικής ακτινοβολίας. Η υψηλή φωτοαγωγιμότητα ενός ημιαγωγού, παρ'ότι αποτελεί βασικότατη προϋπόθεση για να δημιουργηθεί αξιόλογο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δεν αρκεί. Οι ευκίνητη ηλεκτρικοί φορείς που παράγονται στο εσωτερικό του, πρέπει να τεθούν σε κίνηση, μέσω μηχανισμού που δεν θα απαιτεί προφανώς, ενέργεια από εξωτερική ηλεκτρική πηγή. Ευτυχώς ο μηχανισμός αυτός προσφέρεται από την ίδια τη φύση. Είναι το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται στις επαφές δυο διαφορετικών υλικών. Αυτό το πεδίο μπορεί να κινήσει τους φωτοδημιουργημένους ηλεκτρικούς φορείς. Το εύρος της παροχής του καθορίζει ως ένα βαθμό το αποδοτικό ποσοστό των φωτο- δημιουργημένων φορέων που θα δώσουν το φωτοβολταϊκό ηλεκτρικό ρεύμα. Συνοψίζοντας τα προηγούμενα μπορούμε εντελώς επιγραμματικά να σχημα- τοποιήσουμε τις προϋποθέσεις του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε ημιαγωγούς ως εξής : « Για να προκύψει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, απαιτείται η δημιουργία διάταξης δυο φωτοαγωγιμων ημιαγωγικών υλικών σε επαφή »

2.4 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Ημιαγωγοί όπως το πυρίτιο ή το γερμάνιο είναι ύλη που κατατάσσεται μεταξύ των αγωγών και των μονωτών και υπό προϋποθέσεις μπορούν να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Όταν προσπέσει φως σε ημιαγωγό μπορεί να εκτοπίσει ένα ηλεκτρόνιο από τη θέση του σχηματίζοντας έτσι ένα ουδέτερο ηλεκτρικό ζεύγος οπής – ηλεκτρονίου όπου με τον όρο οπή προσδιορίζουμε τη θέση

που εγκατέλειψε το ηλεκτρόνιο που μετακινήθηκε. Αν δεν έχουν ληφθεί αλλά μέτρα το ζεύγος επανενώνεται σε εκατο-μυριοστό του δευτερολέπτου με την επιστροφή του ηλεκτρονίου στη θέση του. Το βάθος στο οποίο θα διεισδύσει η ακτινοβολία στην ύλη για το παραπάνω φαινόμενο εξαρτάται από το μήκος κύματος και αυξάνεται όσο μικρότερο είναι αυτό (υψηλότερη διεισδυτικότητα για τις μεγαλύτερες συχνότητες). Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό κύτταρο θερμαίνει γενικά το υλικό και ενισχύει την κίνηση των ατόμων του. Εάν η ενέργεια του κάθε φωτονίου είναι αρκετή κάποιο ηλεκτρόνιο που την απορροφά μπορεί να μεταπηδήσει από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας από όπου τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν ως φορείς ρεύματος. Για το πυρίτιο το όριο αυτό είναι 1,1 V που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος 1,100 nm. Οι ημιαγωγοί χρησιμοποιούνται σε μορφή κατά την οποία έχουν προστεθεί σε αυτούς ελεγχόμενες ποσότητες συγκεκριμένων άλλων ιόντων, προσδίδοντας του έτσι νέες ιδιότητες, Για παράδειγμα το πυρίτιο Si είναι τετρασθενές και ανήκει στην IV ομάδα του περιοδικού συστήματος. Εάν σε αυτό προστεθούν ιόντα μικρότερου σθένους (π.χ. βόριο) τότε σχηματίζονται αυτά στο πλέγμα του Si θέσεις δέκτες ηλεκτρονίων που παγιδεύουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ώστε προκύπτουν θετικά φορτισμένες καταστάσεις που καλούνται οπές και μπορούν να κινούνται μέσα στην ύλη ως ελεύθεροι φορείς φορτίων. Ο σχηματιζόμενος ημιαγωγός καλείται τύπου p (positive) επειδή έχει ως κύριους φορείς φορτίων τις οπές. Αντίθετα εάν στο Si προστεθούν άτομα με μεγαλύτερο σθένος (π.χ. φώσφορος, της V ομάδας), αυτά δρουν ως δότες ηλεκτρονίων παράγοντας ημιαγωγούς τύπου n (negative) που έχουν ηλεκτρόνια ως του κύριους φορείς ηλεκτρικών φορτίων. Όταν συνδέσουμε δυο διαφορετικούς τύπους ημιαγωγού, P και N αντίστοιχα στη θέση επαφής έχουμε μετακίνηση ηλεκτρονίων από τον N προς τον P για κατάληψη των οπών με αποτέλεσμα το σχηματισμό δυο αντίθετα φορτισμένων περιοχών μιας θετικής στο όριο επαφής του N και μιας αρνητικής στο όριο επαφής του P. Σχηματίζεται έτσι ένα δυναμικό που εμποδίζει την περαιτέρω συνένωση οπών και ηλεκτρονίων μέσω του υλικού ώστε η κίνηση ηλεκτρονίων από το N στον P θα μπορούσε πλέον να υλοποιηθεί μόνον εξωτερικά. Όταν προσπίπτει ακτινοβολία σε ένα ζεύγος N-P που να μπορεί να φθάνει έως την επαφή τους, σχηματίζεται εκεί ζεύγη ηλεκτρονίου – οπής τα οποία λόγω του εγκατεστημένου ηλεκτρικού πεδίου δεν μπορούν να συνενωθούν ώστε πλέον το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας. Με σύνδεση φορτίου τα ηλεκτρόνια κινούνται από τον N στον P με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (βλ. σχήμα 2.2).



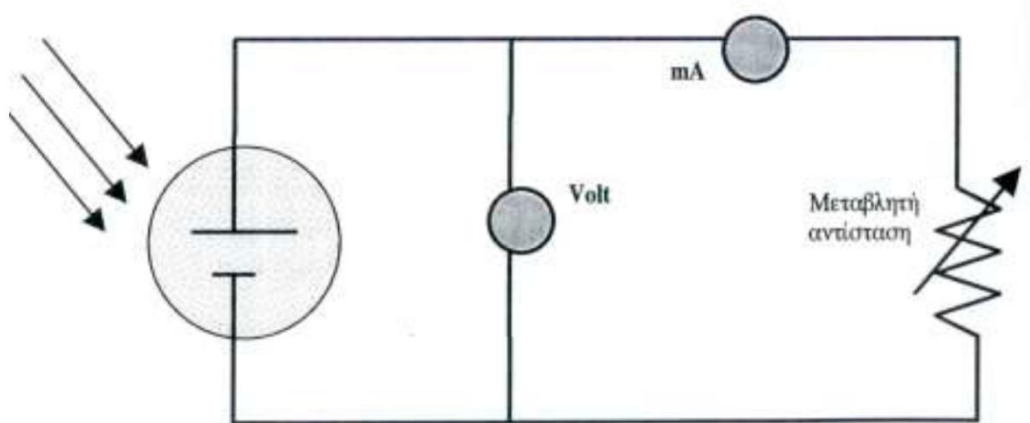
Σχήμα 2.2 Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκού κύτταρου και η επαγωγική ροή ρεύματος από την πρόσπτωση της ακτινοβολίας.

Οι συσκευές που συνδέουν δυο διαφορετικού τύπου ημιαγωγούς λέγονται φωτοβολταϊκά κύτταρα (ή στοιχεία) ή ηλιακά κύτταρα. Πρόκυπτε για πηγές ρεύματος το οποίο ρεύμα προκαλείται από την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και επομένως ο όρος αυτός είναι πλέον κατάλληλος (πηγή ρεύματος) παρά του όρου πηγή τάσης που χρησιμοποιείται για τα ηλεκτροχημικά στοιχεία. Η πλειονότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ημιαγωγοί πυριτίου που πρωτοπαράχθηκαν το 1945 και αναπτύχθηκαν γρήγορα για την ηλεκτροδότηση δορυφόρων. Με το κύκλωμα του σχεδίου 2.3 μπορούν να υπολογισθούν τα χαρακτηριστικά ρεύματος – τάσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Με την εφαρμογή μεταβλητής αντίστασης αλλά και φωτισμού, προκύπτουν οι καμπύλες του σχήματος 2.4. Από τις καμπύλες προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

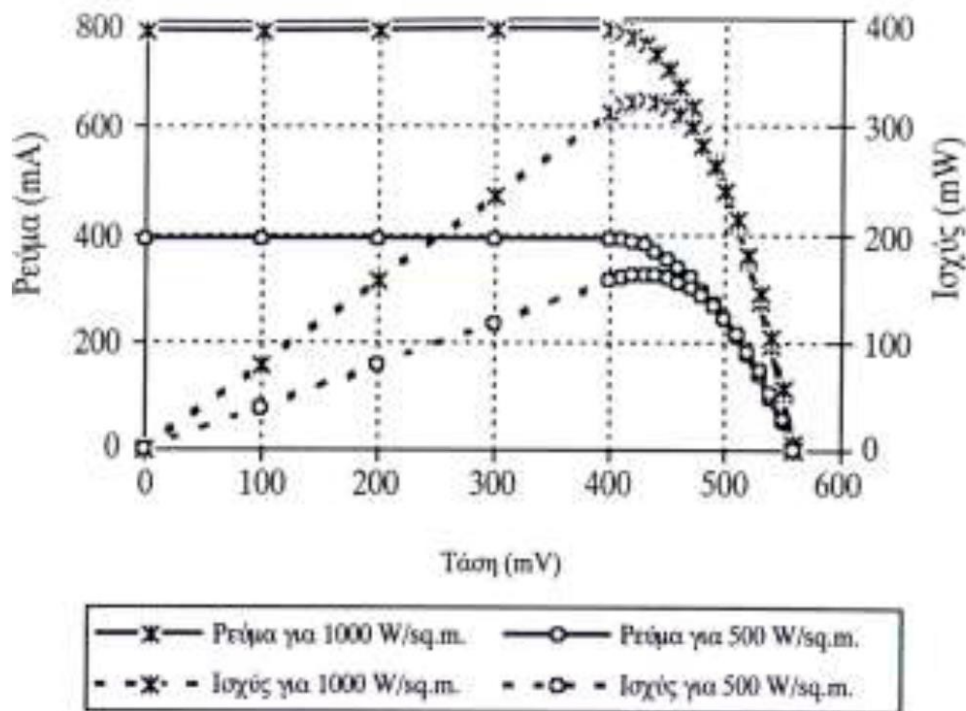
- Το ρεύμα είναι περίπου σταθερό μέχρι την τιμή της μέγιστης ισχύος (γι' αυτό χαρακτηρίζονται ως πηγές ρεύματος παρά τάσης)
- Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως έχει τιμή παραπλήσια του ρεύματος λειτουργίας ώστε δεν υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του στοιχείου στην περίπτωση βραχυκυκλώματος και μπορεί να λειτουργεί δίχως επίβλεψη.
- Η μέγιστη τάση ανοικτού κυκλώματος είναι λίγο μεγαλύτερη από την τάση λειτουργίας (μέγιστη ισχύος).

- Η μέγιστη ισχύς παρέχετε στα περίπου 0,45 V για μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία (1000 W/m²). Από τα στοιχεία του ίδιου σχήματος μπορεί να διαπιστωθεί πως και σε χαμηλότερη ακτινοβολία (π.χ. 500 W/m²) η μέγιστη ισχύς παρέχεται στην ίδια περίπου (λίγο μικρότερη) τάση.
- Το ρεύμα λειτουργίας είναι ανάλογο της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο είναι περίπου 16% της ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (η θεωρητική μέγιστη απόδοση είναι 24 %). Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο περιληπτικά είναι μια επαφή (συνηθέστερα ημιαγωγών), στην οποία η απορροφούμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 2.3 Κύκλωμα υπολογισμού χαρακτηριστικών φωτοβολταϊκού στοιχείου.

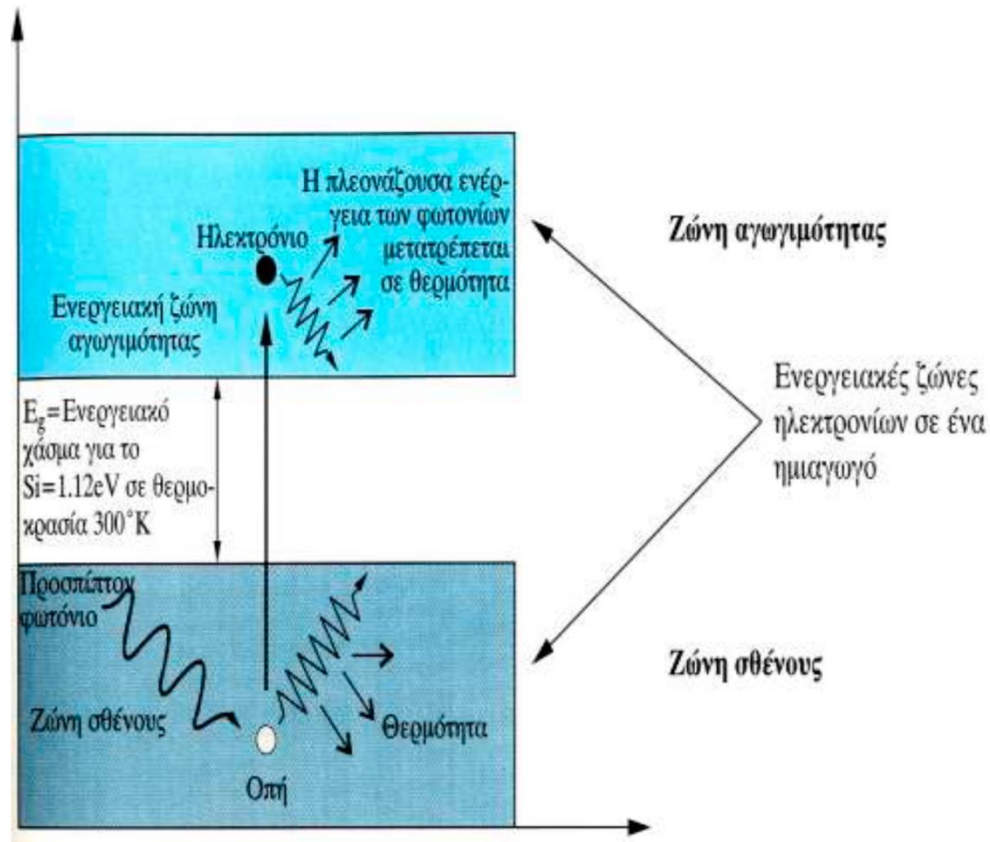


Σχήμα 2.4 Συμπεριφορά φωτοβολταϊκού κυττάρου για διάφορα φορτία και για δυο επίπεδα προσπίπτουσας ακτινοβολίας 500 και 1000 W/m²

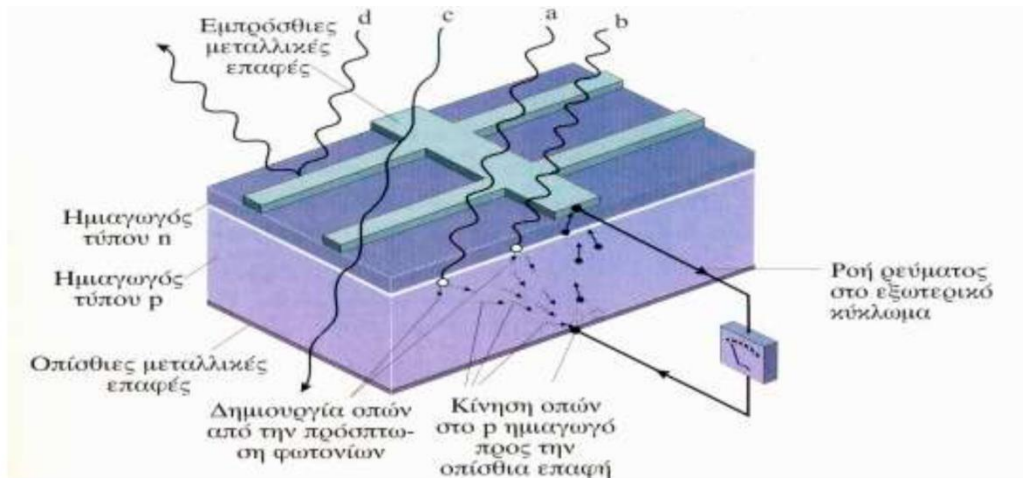
Τα PV – στοιχεία αξιοποιούν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά το οποίο έχουμε την ανάπτυξη μιας διαφοράς δυναμικού (τάσης) μεταξύ των ακροδεκτών του PV – στοιχείου, όταν επί του συστήματος προσπέσει φωτεινή δέσμη. Η τάση αυτή αντιστοιχεί στην ορθή πόλωση της διόδου n-p , όταν προσπίπτει φως (φωτόνια) στην επιφάνεια της, με ενέργεια E (hν) μεγαλύτερη της ενέργειας E_g του χάσματος των ζωνών σθένους – αγωγιμότητας , E_g = 1,12 eV για το Si στους 3000 K σχήμα 2.5 . Η μεγαλύτερη των 1,12 eV ενέργεια του κάθε φωτονίου , ουσιαστικά χάνεται καθώς το ζεύγος ηλεκτρονίων –οπών είναι το ίδιο , είτε δημιουργηθεί από φωτόνιο ενέργειας π.χ. hν =1.5eV είτε από φωτόνιο ενέργειας 2,0 eV . Αυτή η περίσσια ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα, σχήμα 2.5 . Λόγο του γεγονότος αυτού , το 41% της ενέργειας των φωτονίων δεν προσφέρεται στη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων. Ουσιαστικά μόνο το 59 % είναι χρήσιμη ενέργεια . Αυτό το 59% πρέπει να πολλαπλασιασθεί επί το 74 % των φωτονίων του ηλιακού φάσματος έχει ενέργεια >1,12 eV. Το γινόμενο των ποσοστών 0,74 x 0.59 = 0.44 ή 44% αποτελεί το μέγιστο βαθμό ή άνω όριο μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική για το Si.

- Το ρεύμα που παράγεται στο PV-στοιχείο , που είναι ένας ημιαγωγός n-p , το περνούμε από επαφές στην εμπρόσθια και οπίσθια επιφάνεια του σχήμα 2.6 και 2.7.

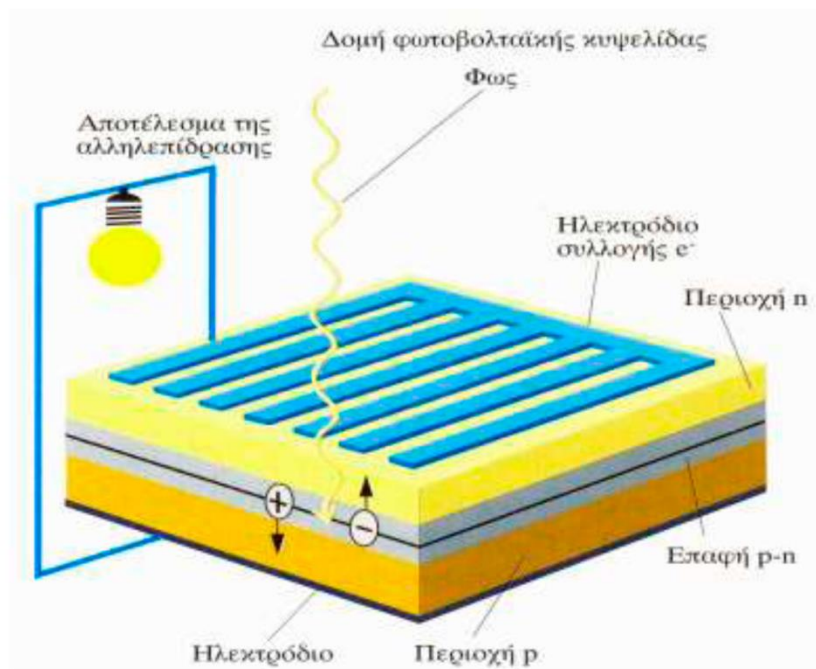
- Η εμπρόσθια πλευρά του PV-στοιχείου επιτρέπει τη διέλευση του φωτός σε πολύ μεγάλο ποσοστό . Ένα λεπτό υμένιο από αντιανακλαστικό διηλεκτρικό υλικό καλύπτει την εμπρόσθια επιφάνεια , ώστε να μειώνονται οι ανακλάσεις της προσπίπτουσας ακτινοβολίας
- Η εμπρόσθια επιφάνεια του PV-στοιχείου περιλαμβάνει ένα πλήθος μεταλλικών λωρίδων (δάκτυλοι) που οδηγούν το ρεύμα στην κεντρική αρτηρία του ηλεκτροδίου , σχήματα και 2.7, 2.8.



Σχήμα 2.5 Δημιουργία ζεύγους e- και οπής από την αλληλεπίδραση φωτονίου με ηλεκτρόνιο που ευρίσκεται στην ζώνη σθένους π.χ. ηλεκτρόνιο ατόμου Si.



Σχήμα 2.6 Δομικά στοιχεία PV – κυψελίδας. Δημιουργία e^- και οπής. Κίνηση των φορέων μειονότητας στο κλειστό κύκλωμα και εμφάνη του (φωτο) ρεύματος.

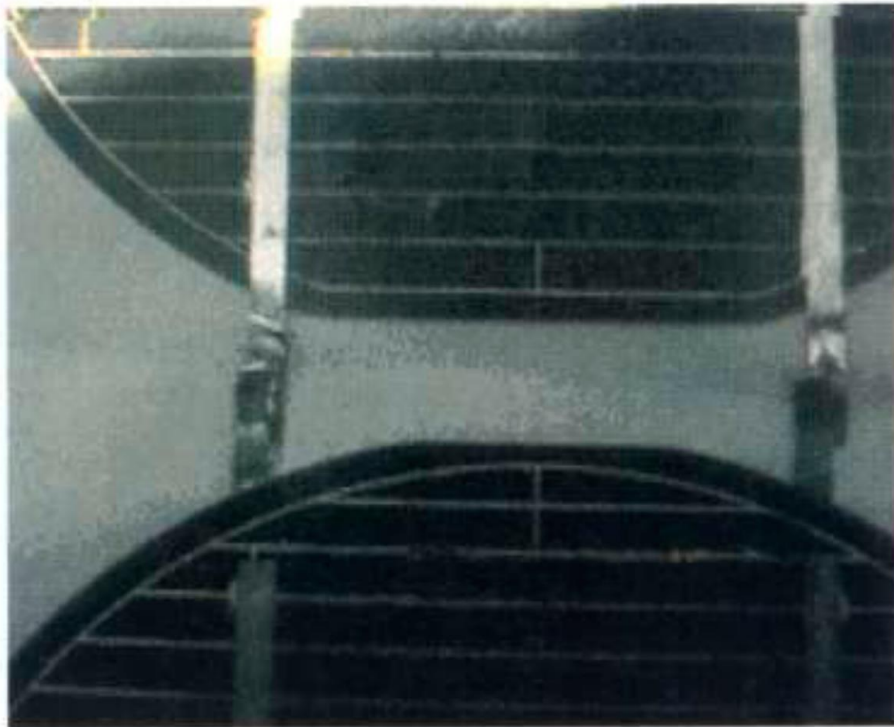


Σχήμα 2.7 Η αλληλεπίδραση των φωτονίων με τα άτομα του ημιαγωγού δημιουργεί ζεύγη e^- και οπής. Η διέλευση των e^- από τον p προς τον n δια της επαφής n-p και των οπών από τον ημιαγωγό

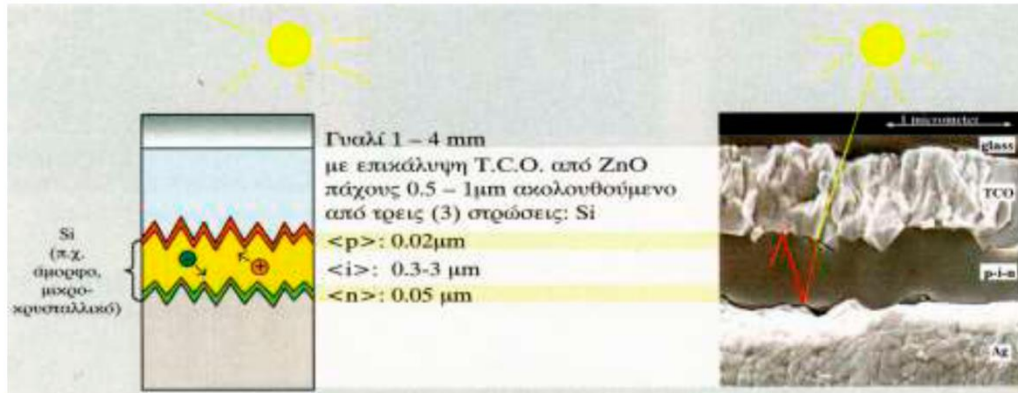
η προς τον p , δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα. Η διέλευση φορτίων δια του εξωτερικού κυκλώματος, εκδηλώνεται με την πυράκτωση του σύρματος του λαμπτήρα.



Σχήμα 2.8α Εμπρόσθια επιφάνεια τυπικών φωτοβολταϊκών στοιχείων Si ,τύπου : μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό ,λεπτού υμενίου (thinfilm) και thickfilm.



Σχημα2.8β Σύνδεση δυο PV – κυψελίδων, εν σειρά. Βλέπουμε τη σύνδεση του ημιαγωγού n του ενός , με τον p του άλλου PV- στοιχείου που είναι εν σειρά.

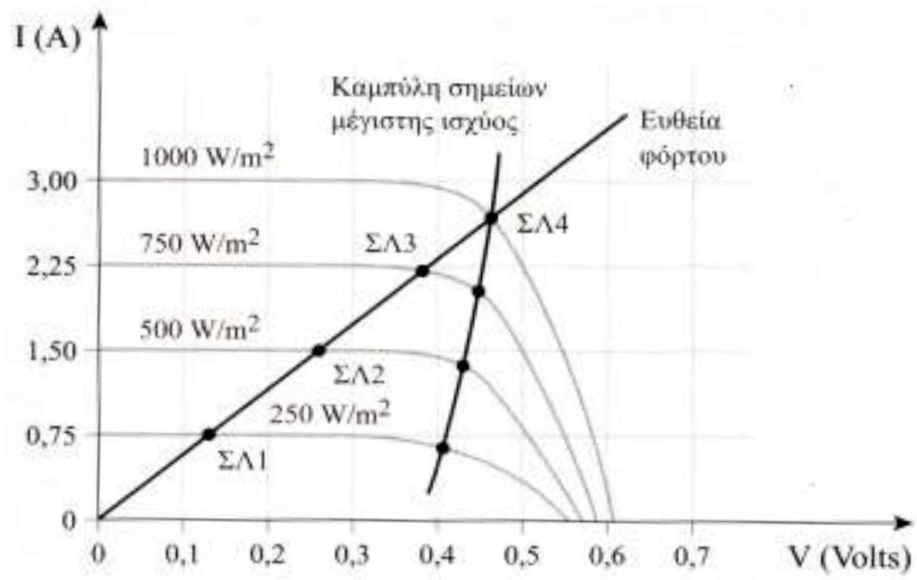


Σχημα2.8γ Τομές PV - στοιχείων τύπου λεπτού υμενίου (thinfilm)

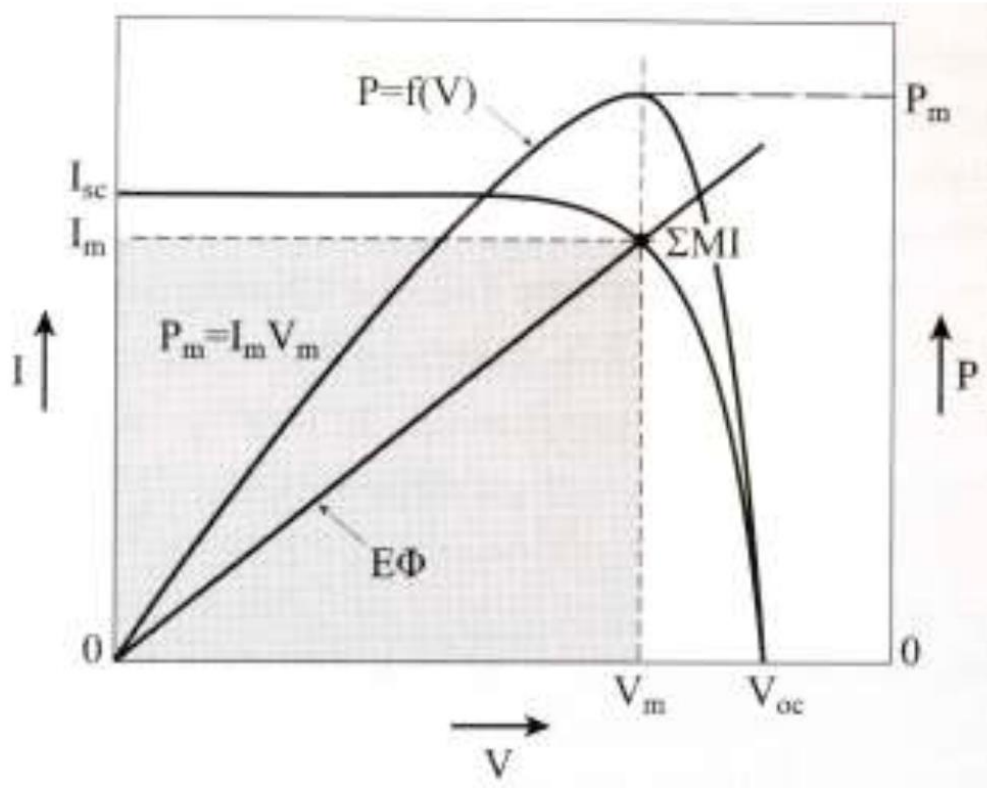
2.5. Η καμπύλη I- V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Για τον έλεγχο της αποδοτικής λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αλλά και για τον σχεδιασμό των ηλεκτρονικών που συνδυάζονται με αυτό, προσδιορίζουμε τα σημεία μέγιστης ισχύος, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του στοιχείου. Επιδιώκουμε το σημείο λειτουργίας του σε κάθε διαφορετική κατάσταση, που θα προκύψει π.χ. από μεταβολή της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας , E , να αποτελεί και το σημείο μέγιστης ισχύος P_m , για τη δεδομένη κατάσταση (σχήμα 2.9 για τη καμπύλη I-V, με $E=1 \text{ kW/m}^2$). Στις υπόλοιπες καμπύλες I-V τα δυο σημεία δεν συμπίπτουν. Για να συμβεί κάτι τέτοιο πρέπει να αλλάξει η ωμική αντίσταση έτσι ώστε η νέα ευθεία φόρτου να περνά από το αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος της νέας καμπύλης I-V. Το σημείο αυτό μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά αν παραστήσουμε γραφικά την παρεχόμενη από το φωτοβολταϊκό στοιχείο ηλεκτρική ισχύς, $P = I \cdot V$, υπό δεδομένη πυκνότητα ισχύος, E , πάνω σε μια μεταβλητή ηλεκτρική αντίσταση ως συνάρτηση της τάσης V στα άκρα της αντίστασης σχήμα 2.10 . Παρουσιάζει ένα μέγιστο που μπορείτε να διακρίνεται στο κοινό διάγραμμα των I-V και P- V εντοπίζεται στο γόνατο της καμπύλης I-V. Οι τιμές ρεύματος – τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος συμβολίζονται με I_m και V_m . Η μέγιστη δυνατή ισχύς που μπορεί να δώσει το φωτοβολταϊκό στοιχείο υπό δεδομένη προσπίπτουσα πυκνότητα ακτινοβολίας, E , ισούται με :

$$P_m = I_m \cdot V_m$$



Σχήμα 2.9 Διάγραμμα $I - V$



Σχήμα 2.10 Διάγραμμα (I - V -P)

2.6. Η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου

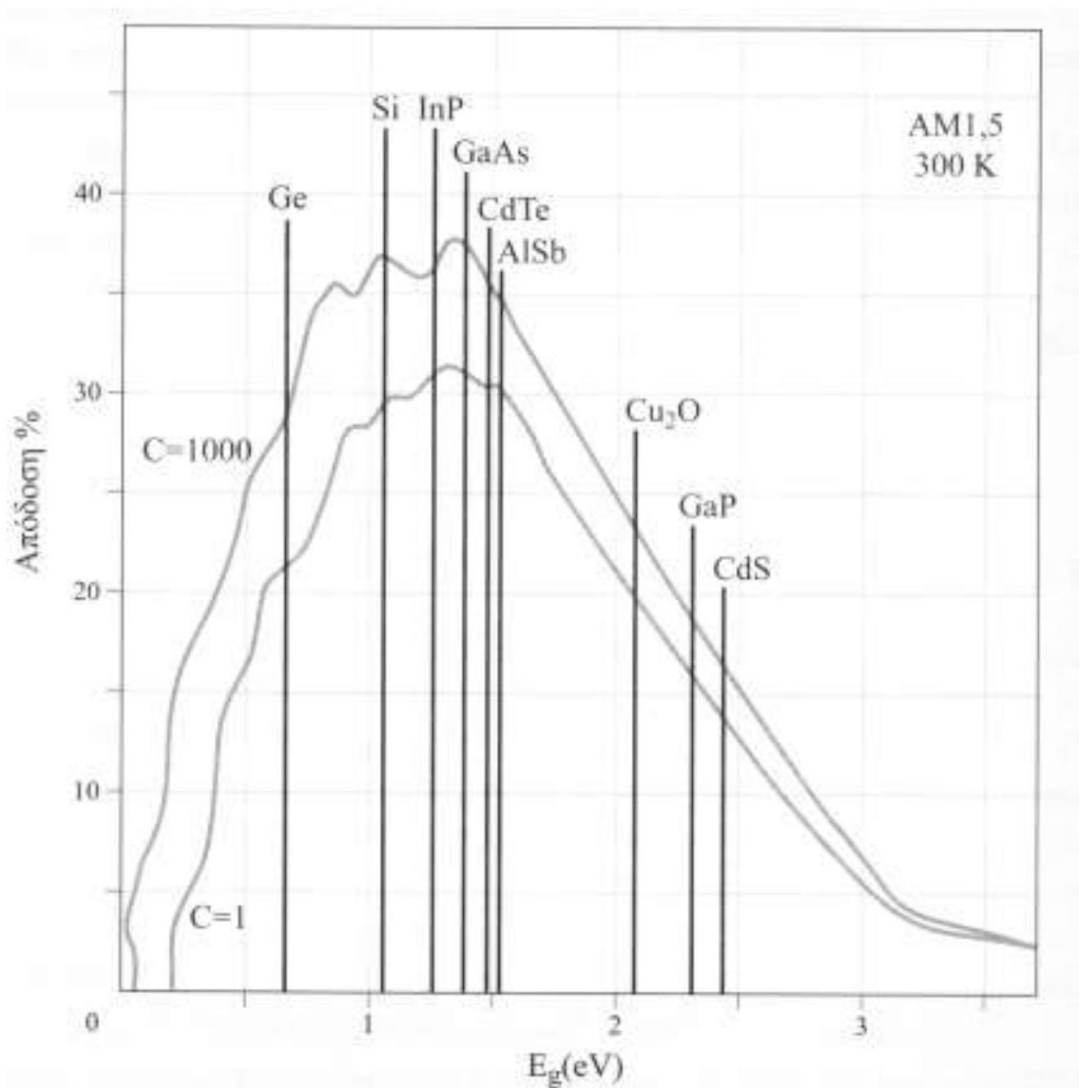
Ας θεωρήσουμε ότι πάνω στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου εμβαδού S , προσπίπτει ισχύς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, $P_{in} = E \cdot S$ (incident), όπου E η πυκνότητα ισχύος. Το πηλίκο της ηλεκτρικής ισχύος P_m , που αποδίδεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο στο αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος προς την προσπίπτουσα ισχύ ακτινοβολίας, P_{in} , καθορίζει την απόδοση ενεργειακής μετατροπής (energy conversion efficiency), η_c , του φωτοβολταϊκού στοιχείου:

$$\eta_c = P_m / P_{in} = I_m \cdot V_m / P_{in} = FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc} / P_{in}$$

Η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτάτε από το χρησιμοποιούμενο ημιαγωγό, αυξάνεται με αύξηση της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας, E , (διατηρώντας τη θερμοκρασία της κυψελίδας σταθερή) και μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Η περισσότερο αποδοτική περιοχή ενεργειακού χάσματος είναι περί την τιμή 1,5 eV, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11 και σχολιάζεται στην επόμενη παραγράφω 2.7. . Η ονομαστική του τιμή καθορίζεται από τις πρότυπες συνθήκες έλεγχου(STC) την οποία σε αυτό το σύγγραμμα θα συμβολίζουμε με n_c,STC . Τα εργαστήρια παρασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων καθώς και τα κέντρα πιστο-ποίησης των χαρακτηριστικών τους, αναφέρουν πάντα τις συνθήκες προσδιορισμού τις απόδοσης τους. Σε συνθήκες διαφορετικές από τις πρότυπες η τιμή του προς- διορισμού από τη διαφορά $\theta_c - \theta_{STC}$, των θερμοκρασιών της κυψελίδας και της θερμοκρασίας αναφοράς (STC , 25 0C) και από την πυκνότητα ισχύος E της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η εξάρτηση αυτή σε κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας παρέχεται από την σχέση :

$$n_c = n_T \cdot n_c,STC$$

όπου ο παράγων n_T , που ονομάζεται συντελεστής ή παράγων θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, εκφράζει την επίδραση της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας της κυψελίδας, σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς (25 0C), στην απόδοση της. Η αναλυτική έκφραση του συντελεστή αυτού δίδεται στο τέλος της παραγράφου 2.8. όπου μελετούνται εκτενέστερα τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής κυψελίδας.



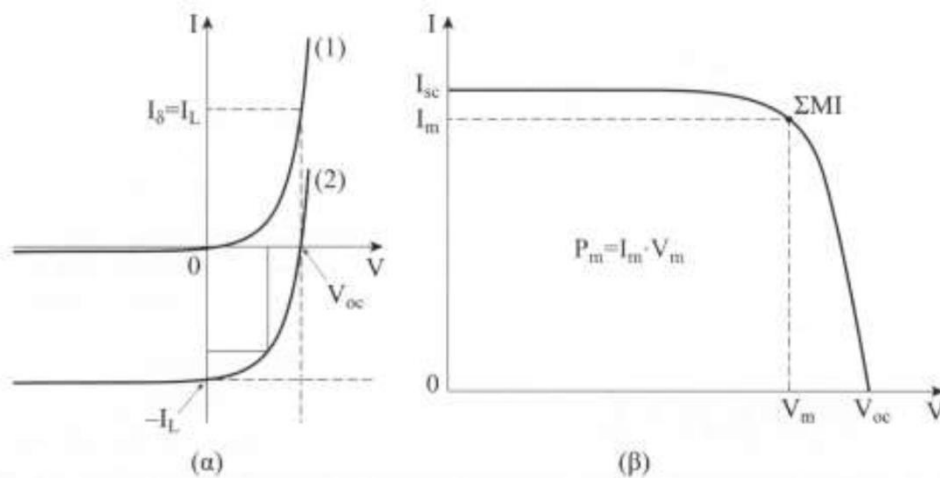
Σχήμα 2.11 Απεικόνιση των ιδανικών αποδόσεων των πιο σημαντικών φωτο-βολταϊκών στοιχείων , ως συνάρτηση του ενεργειακού χάσματος των αντίστοιχων ημιαγωγών , στους 3000 K. Η εσωτερική καμπύλη αντιστοιχεί σε ένα ήλιο AM 1.5 , ενώ η εξωτερική σε συγκεκριμένο φως, αντίστοιχο 1000 ήλιων.

2.7. Παράγων πλήρωσης φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το διαγραμμισμένο παραλληλόγραμμο μέσα στην καμπύλη I-V (σχήματος 2.12 και 2.10), με πλευρές I_m και V_m έχει εμβαδόν ίσο με τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ από το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Το πηλίκο του εμβαδού προς το εμβαδόν ενός αλλού παραλληλογράμμου με πλευρές I_{sc} και V_{oc} που περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού στοιχείου ως πηγή σταθερού ρεύματος , δίνει το μέτρο προσέγγισης αυτής της λειτουργίας της επαφής .Λέγεται παράγων πλήρωσης FF(Fillfactor) και οι τιμές του που καθορίζονται από το υλικό του

φωτοβολταϊκού στοιχείου και τις συνθήκες είναι μεταξύ 0 και 1. η τιμή αναφοράς του δίδεται σε πρότυπες συνθήκες έλεγχου (STC). Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές του FF, τόσο περισσότερο η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος στην περιοχή τάσεων 0 - Voc. Σε αυτές τις περιπτώσεις η διάταξη χαρακτηρίζεται αφενός από μικρή ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά αφετέρου από μεγάλη τιμή παράλληλης αντίστασης. Τυπικές τιμές 0,7 έως 0,9 χαρακτηρίζουν φωτοβολταϊκά στοιχεία με αποδεκτή έως πολύ καλή ενεργειακή απόδοση, αντίστοιχα

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



Σχήμα 2.12 (α) Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V, ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, στο σκοτάδι (1) και στο φως (2). (β) Δίδεται σε μεγένθυση το τμήμα της καμπύλης που βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο, όπου η επαφή p-n συμπεριφέρεται ως φωτοβολταϊκό στοιχείο.

2.8. Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος

Υπολογίζουμε την ισχύ που παρέχει το φωτοβολταϊκό στοιχείο, στην αντίσταση R σε συνάρτηση με την τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου και κατά-σκευάζουμε το γράφημα της σε συνάρτηση με την τάση V. Στις ακραίες τιμές τάσης 0 και Voc οι παρεχόμενη ισχύς είναι μηδέν. Συνεπώς είναι αναμενόμενο η καμπύλη $P=f(V)$ να εμφανίζει μέγιστο (σχήμα 2.10). Παρουσιάζεται κοντά στο σημείο όπου αρχίζει έντονη πτώση του ρεύματος. Είναι προφανές ότι για αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του φωτοβολταϊκού στοιχείου πρέπει να συνδέσουμε στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου ώστε η τάση και το ρεύμα σ' αυτόν να αντιστοιχούν στο σημείο μέγιστης ισχύς, Σ.Μ.Ι. (Maximumpowerpoint, M.P.P.).

2.9. Καμπύλη φόρτου

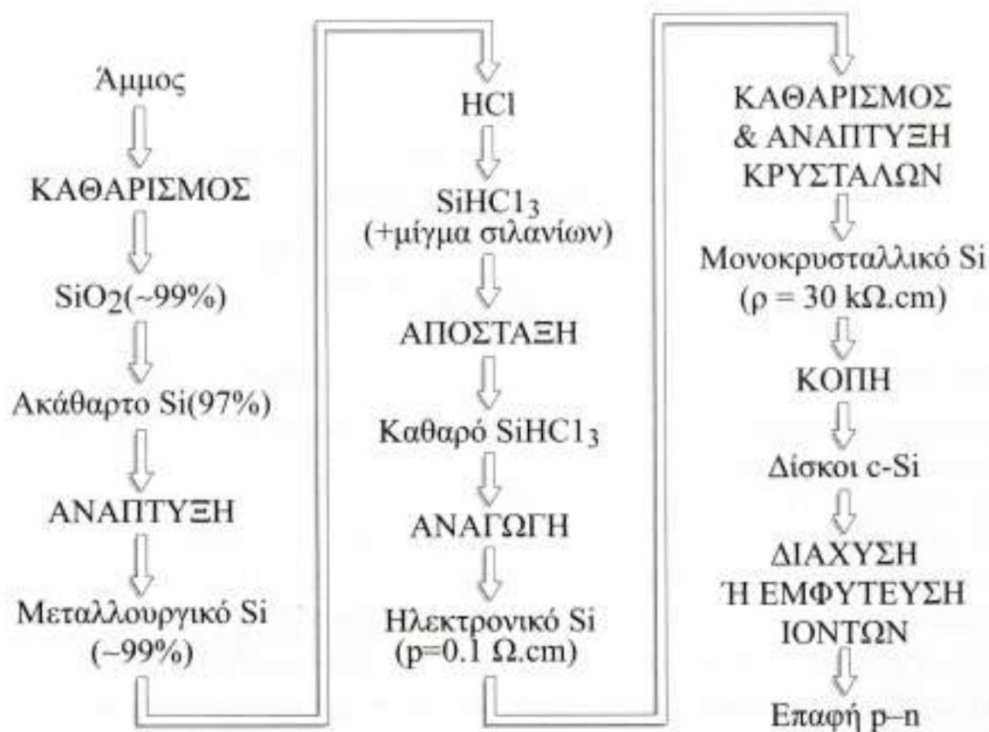
Μια χρήσιμη γραφική παράσταση η οποία ενσωματώνεται και συνδυάζεται με τα διαγράμματα I-V της ηλεκτρικής πηγής που τροφοδοτεί μια διάταξη αξιοποίησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας π.χ. μια ωμική αντίσταση, ένα ηλεκτρικό συσσωρευτή, ένα ηλεκτρικό κινητήρα κ.α. είναι η καμπύλη φόρτου της διάταξης την οποία στο εξής θα ονομάσουμε φόρτο ή φορτίο. Είναι η καμπύλη που προκύπτει ως γραφική παράσταση του ρεύματος I που διαρρέει τη διάταξη, σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη, στην είσοδο της, ηλεκτρικής τάσης, V. Η θεωρητική εξάρτηση του $I=f(V)$, για το φορτίο, προκύπτει με εφαρμογή των κανόνων του Kirchhoff, στο αντίστοιχο κύκλωμα. Πειραματικά, η εξάρτηση του I από το V, προκύπτει με μέτρηση του ρεύματος, I, που διαρρέει το φόρτο και της τάσης στην είσοδο του. Η καμπύλη φόρτου, τοποθετημένη στο διάγραμμα I-V του φωτοβολταϊκού στοιχείου, τέμνει την χαρακτηριστική καμπύλη του σε ένα σημείο που αποτελεί κοινή λύση για τις εξισώσεις που αντιστοιχούν στις δυο καμπύλες. Το σημείο αυτό καθορίζει το ρεύμα και την τάση στο φόρτο και ονομάζεται σημείο λειτουργίας του συστήματος. Στην περίπτωση που ο φόρτος είναι ωμική αντίσταση, η σχέση $I=f(V)$, είναι αναλογική και η γραφική παράσταση της ευθεία γραμμή. Στο σχήμα 2.10 έχει σχεδιαστεί η ευθεία φόρτου για την ωμική αντίσταση εκείνη, που προσδιορίζει σημείο λειτουργίας, ταυτόσημο με το σημείο μέγιστης ισχύος. Αυτή η κατάσταση παρά ότι επιθυμητή, δεν συμβαίνει πάντα π.χ. εάν μεταβληθεί η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, η καμπύλη I-V αλλάζει και για το δεδομένο φόρτο το σημείο λειτουργίας δεν θα συμπίπτει πλέον με Σ.Μ.Ι.. Σε κάθε περίπτωση επιδιώκουμε την συνεχή σύμπτωση του σημείου λειτουργίας του συστήματος με το εκάστοτε σημείο μέγιστης ισχύος ώστε να αποδίδει στο φόρτο η μέγιστη δυνατή ισχύς. Αυτό γίνεται εφικτό με χρήση ειδικών ηλεκτρονικών διατάξεων, «παρακολούθησης» του Σ.Μ.Ι., όταν οι συνθήκες αλλάζουν.

2.10 Θεωρητικό όριο της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Στο σχήμα 2.11, δίδεται η εξάρτηση της ιδανικής απόδοσης των διαφόρων φωτοβολταϊκών συστοιχιών, που αντιστοιχούν στο σύνολο σχεδόν, των διαφορετικών υλικών παρασκευής τους, σε συνάρτηση με το ενεργειακό τους χάσμα. Οι δυο καμπύλες αφορούν διαφορετικές πυκνότητες ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, φάσματος AM 1,5. $E=1\text{ kW/m}^2$, για ακτινοβολία ενός ήλιου και $E=1000\text{ kW/m}^2$, για πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας χιλίων ήλιων. Η καμπύλη C=1 παρουσιάζει μέγιστη τιμή 31%, που αντιστοιχεί στο φωτοβολταϊκό στοιχείο InP, με ενεργειακό χάσμα 1,35 eV, πολύ κοντά στο ενεργειακό χάσμα του σύνθετου ημιαγωγού GaAs (1.42 eV). Το κρυσταλλικό πυρίτιο, με ενεργειακό χάσμα 1,12 eV, χαρακτηρίζεται από ιδανική απόδοση 28%. Στο πίνακα 2.1 δίδονται μερικές τιμές απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων διαφόρων υλικών. Περιοριζόμαστε στη συνέχεια, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου, επειδή χαρακτηρίζονται από σταθερή χρονικά και σχετικά υψηλή απόδοση, στοιχεία που ενισχύουν την αξιοπιστία τους και τα έχουν καταστήσει ευρέως διαδεδομένα.

2.11 Τεχνικές δημιουργίας των επαφών p-n φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η διαδικασία της δημιουργίας μιας επαφής p-n θα μπορούσε να συνοψιστεί στο ακόλουθο παραστατικό σχήμα: προετοιμασία του βασικού υλικού (δηλαδή του ενδογενούς ημιαγωγού), παρασκευή των δυο τμημάτων ημιαγωγού με προσμίξεις τύπου p και n και συνένωση των δυο τμημάτων. Στην πράξη παρασκευάζεται αρχικά ο ένας εκ των δυο ημιαγωγών προσμίξεις π.χ. ο ημιαγωγός τύπου p. Προκύπτει από τον ενδογενή ημιαγωγό λ.χ. το πυρίτιο, το γερμάνιο κ.α. στον οποίο προστίθεται πρόσμειξη στοιχείου από την ομάδα των αποδεκτών. Στο επόμενο στάδιο δημιουργείται με κάποια από τις μεθόδους που αναφέρονται στην συνέχεια, η περιοχή τύπου n με προσθήκη στοιχείου από την ομάδα των δότεων. Ως δότες χρησιμοποιούνται συνήθως το λίθιο Li, ο φώσφορος P, το αρσενικό As, το αντιμόνιο Sb, το βισμούθιο Bi κ.α. και ως αποδεκτές το βόριο B, το αλουμίνιο Al, το γάλλιο Ga, το ίνδιο In κ.α. Το πυρίτιο είναι από τα πλέον διαδεδομένα στοιχεία στη φύση (αποτελεί περίπου το 28 % του στερεού φλοιού της γης) με τη μορφή διαφόρων ενώσεων του. Το οξείδιο του πυριτίου (SiO_2) αποτελεί το κύριο συστατικό της άμμου. Το σχήμα 2.13 δείχνει τα βασικά στάδια παραγωγής καθαρού πυριτίου, με πρώτη ύλη την άμμο. Γενικά για την παρασκευή ενός καθαρού ημιαγωγού και την εισαγωγή των διάφορων προσμίξεων, χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι οι οποίοι είναι :



Σχήμα 2.13 Διάγραμμα ροής εργασιών παραγωγής ηλεκτρονικά καθαρού πυριτίου, με πρώτη ύλη την άμμο.

- Μέθοδος αναπτύξεως μονοκρυσταλλικού
- Μέθοδος της επιπλέουσας ζώνης
- Μέθοδος κράματος
- Τεχνική της διάχυσης
- Τεχνική της εμφύτευσης ιόντων

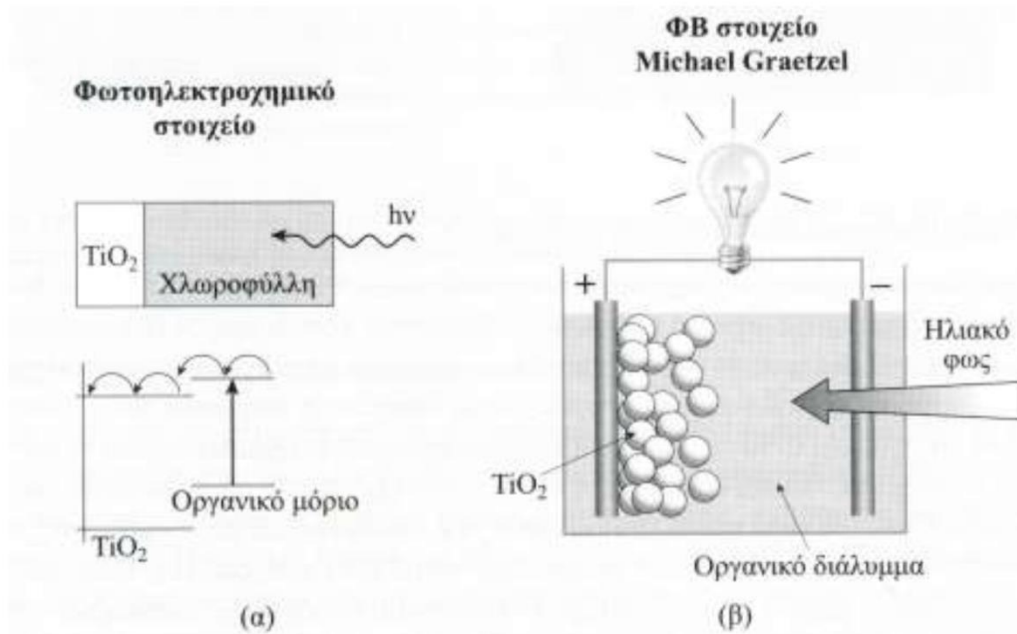
Τύπος ΦΒ στοιχείου-πλασίου	Απόδοση %	Παρατηρήσεις
GaAs-cell	25,1 ± 0,8	STC
GaAs- module	27,6 ± 1,0	Συγκεντρωτικά, 255X ¹¹⁶ , δύσκολη βιομηχανική παρασκευή.
c-Si-cell	24,4 ± 0,5	STC
c-Si-cell	26,8 ± 0,8	Συγκεντρωτικά, 96X
c-Si - module	22,7 ± 0,6	STC, σταθερό σε απόδοση
a-Si-cell	12,7 ± 0,4	Μείωση απόδοσης κατά το φωτισμό, τελική απόδοση ~ 6%
a-Si/a-SiGe/a-SiGe module (Tandem)	10,2 ± 0,5	STC, σταθερό. Εργαστήρια USSC
CuInSe2	16,4 ± 0,5	STC, σταθερό, μικρή Voc, πολύπλοκη η παρασκευή του
CuInSe2-module	14,2 ± 0,2	
CdTe	16,0 ± 0,2	STC, μεγάλη Voc, ειδικές συνθήκες παρασκευής
CdTe-module	9,1 ± 0,5	STC

Πίνακας 2.1 Αποδόσεις μερικών φωτοβολταϊκών στοιχείων και πλασίων

2.12 Οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Εκτός από την ώριμη ήδη τεχνολογία των συμβατικών φωτοβολταϊκών στοιχείων, η οποία βασίζεται στη δημιουργία ισχυρού εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ δυο φωτοαγωγικών ημιαγωγών, η ερευνητική προσπάθεια στράφηκε στα λεγόμενα ηλεκτροχημικά ή οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Όπως, προσδίδει η ονομασία τους η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια, πραγματοποιείται σε οργανικά συστήματα. Πρώτη διδάξασα η φύση με το φαινόμενο της φωτο- σύνθεσης. Το ηλιακό φως, σε ευρύ τμήμα του φάσματος του απορροφάται από τα μόρια της οργανικής ουσίας των φύλλων των φυτών που ονομάζεται χλωροφύλλη. Ηλεκτρόνιο του οργανικού μορίου που απορροφά ένα φωτόνιο «ανεβαίνει» ενεργειακά στην επόμενη ενεργειακά στάθμη του μορίου και περνά σε γειτονικό

πρωτεϊνικό σύμπλοκο του φύλλου, συμμετέχοντας στις αντιδράσεις που συμβαίνουν σε αυτά, κατά τις οποίες δημιουργούνται υδρογονάνθρακες με ταυτόχρονη παραγωγή οξυγόνου. Μια παρόμοια ηλεκτρονική διαδικασία μπορούμε να αναπαράγουμε στο εργαστήριο, σε διάταξη αποτελούμενη από ηλεκτρολυτικό διάλυμα που περιέχει έγχρωμη οργανική ουσία (π.χ. χλωροφύλλη), σε επαφή με ημιαγωγό πλάκα TiO_2 (σχήμα 2.14α). Τα φωτόνια του ηλιακού φωτός απορροφώνται από τα μόρια της οργανικής ουσίας, δημιουργούμενων διεργεμένων ηλεκτρονίων σε ενεργειακή στάθμη του οργανικού μορίου, που βρίσκεται ψηλότερα από τον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας του ημιαγωγού. Τα ηλεκτρόνια περνούν στον ημιαγωγό, ως ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας του και καταλήγουν στο αρνητικό ηλεκτρόδιο της διάταξης. Το ηλεκτρικό κύκλωμα κλείνει, με μεταφορά φορτίου από το αρνητικό ηλεκτρόδιο στα μόρια που έχασαν το ηλεκτρόνιο τους, μέσω ιόντων του ηλεκτρολύτη (συνήθως ιόντων $Iωδίου$). Το 1961, ο Melvin Calvin δημιούργησε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο βασιζόμενο στην προηγούμενη περιγραφή, με πολύ χαμηλή απόδοση 0,01 %. Το σημαντικό βήμα στον τομέα αυτό έγινε από τον Ελβετό ερευνητή Michael Graetzel, το 1991. Αντικατέστησε το συμπαγή ημιαγωγό TiO_2 , με ίδιο, σε λεπτό διαμέρισμα, ώστε να αυξάνεται η επιφάνεια επαφής των οργανικών μορίων με τον ημιαγωγό (σχήμα 2.14β). Το αποτέλεσμα ήταν θεαματικό. Η απόδοση του φωτοηλεκτροχημικού αυτού στοιχείου έφτασε στο 10 %. Το κύριο μειονέκτημα των φωτοβολταϊκών στοιχείων αυτών έγκειται στη ευπάθεια του στο φως και η συνα- κολουθεί ταχεία γήρανση τους. Έκτοτε πολλά εργαστήρια ανά το κόσμο επικεντρώνουν την προσπάθεια τους σε δοκιμές και τροποποιήσεις που αποσκοπούν στη βελτίωση της αποδοτικότητας και του χρόνου ζωής (μείωση του φαινομένου γήρανσης) των φωτοβολταϊκών στοιχείων της νέας αυτής τεχνολογίας με στόχο τη βιομηχανική παραγωγή. Για να παρακάμψει το μειονέκτημα της ευπάθειας των έγχρωμων ουσιών που περιέχονται στα οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία, στο ηλιακό φως, προτάθηκαν λύσεις που βασίζονται στη χρήση υλικών σύγχρονης τεχνολογίας όπως τα πολυμερή καθώς και ειδικών τεχνικών βελτίωσης της αντοχής των οργανικών ουσιών στη δράση του ηλιακού φωτός. Η απόδοση των πολυμερών οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων αυτής της τεχνολογίας είναι το εξαιρετικά χαμηλό κόστος παρασκευής τους, γεγονός που επιτρέπει να θεωρούμε δυνατή την αξιοποίηση τους ακόμα και με το μειονέκτημα του πολύ μικρού χρόνου ζωής τους σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά στοιχεία



Σχήμα 2.14 (α) Βασική λειτουργία φωτοηλεκτροχημικού στοιχείου. Αρχικός μηχανισμός φωτοσύνθεσης. (β) Το φωτοηλεκτροχημικό στοιχείο Graetzel. Απόδοση $\eta = 10\%$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Στο κεφαλαίο αυτό εξετάζονται τα χαρακτηριστικά, οι κατηγορίες και η λειτουργικότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων που ως σκοπό έχουν την καλύτερη κατανόηση αυτών ως προς τις διάφορες τους και τα πλεονεκτήματά τους.

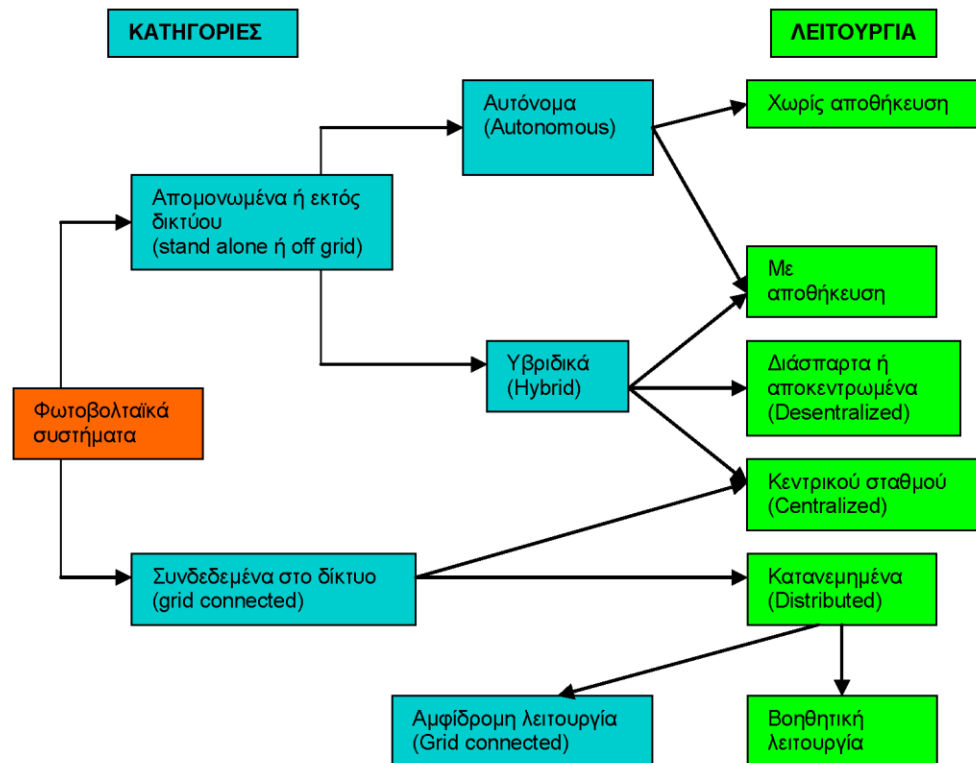
3.1 Χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται έναντι άλλων πηγών Α.Π.Ε. με βάση τα επόμενα χαρακτηριστικά τους σε συντομία :

ΘΕΤΙΚΑ	ΑΡΝΗΤΙΚΑ
<ul style="list-style-type: none">• Άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρή ή μεγάλη ισχύ• Δυνατότητα σταδιακής υλοποίησης του συστήματος• Μηδενικές εκπομπές ρύπων κατά τη λειτουργία τους• Αθόρυβη λειτουργία• Ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης• Μεγάλη αξιοπιστία• Μεγάλη διάρκεια ζωής• Αποδεκτή αισθητική παρουσία	<ul style="list-style-type: none">• Υψηλό οικονομικό κόστος

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να αξιοποιηθούν σε πλήθος ηλεκτρικών εφαρμογών. Καλύπτουν ευρεία περιοχή ισχύος, από το μέγεθος της πολύ χαμηλής ισχύος ευρείας χρήσεως καταναλωτικών προϊόντων όπως είναι οι αριθμητικοί υπολογιστές, τα μικρά φωτιστικά σώματα κήπου κ.α. έως συστήματα μεγάλης ισχύος για την τροφοδοσία νησιών ή πρότυπων μεγάλων κτιριακών συγκροτημάτων, συνδεδεμένων ή όχι στο δίκτυο. Όπου εδώ αναφέρατε ο όρος δίκτυο, εννοείται το εθνικό ή το τοπικό δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές πηγές. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες (σχήμα 3.1) : τα απομονωμένα (stand- alone) ή εκτός δικτύου (offgrid) συστήματα (σχήματα 3.3 α,β,γ,) και τα συνδεδεμένα στο δίκτυο (gridconnected, σχήμα 3.3 δ). Τα απομονωμένα φωτο-βολταϊκά συστήματα διακρίνονται επίσης σε αυτόνομα και υβριδικά. Το κριτήριο για τον προσδιορισμό

της σύνθεσης του καταλληλότερου φωτοβολταϊκού συστήματος στις κατηγορίες αυτές, προκύπτει με βάση την απαίτηση για πλήρη ή μερική (αυτονομία) των ενεργειακών καταναλώσεων της εφαρμογής, μηνιαίως ή ετησίως, από το φωτοβολταϊκό σύστημα.



Σχήμα 3.1 Κατηγορίες και λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων

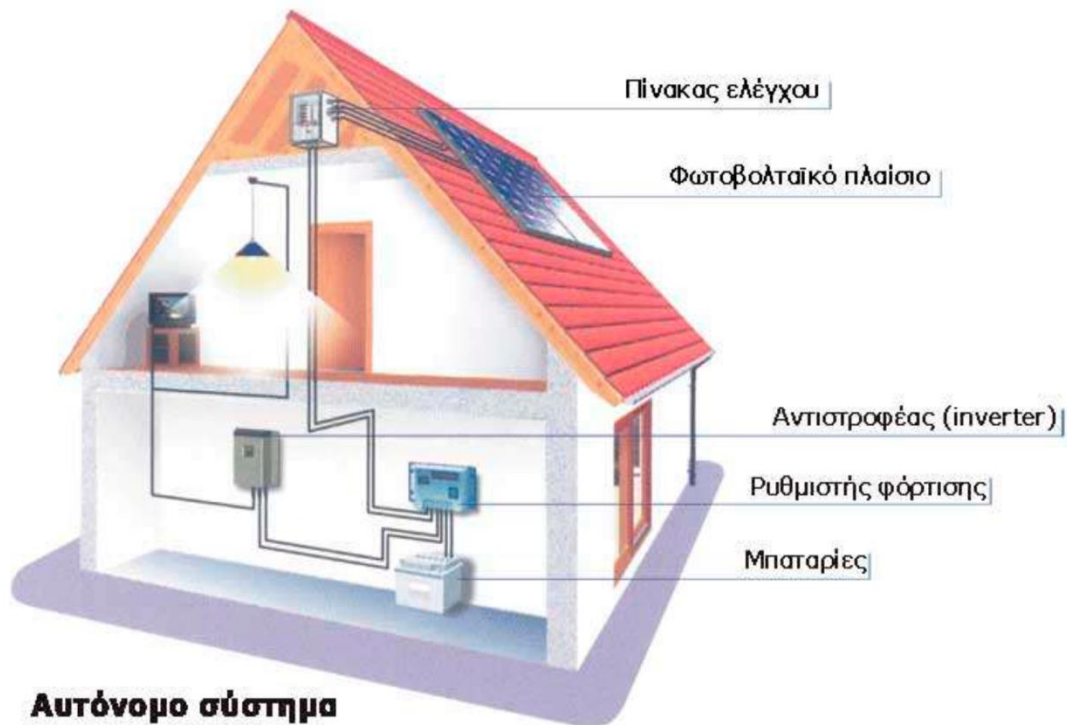
3.2 Εκτός δικτύου ή απομονωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα (off- grid ή standalonesystems)

Χαρακτηρίζονται έτσι τα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να είναι συνδεδεμένα στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Διακρίνονται σε αυτόνομα, στα οποία η φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελεί την αποκλειστική πηγή ενέργειας και σε υβριδικά, στα οποία περιλαμβάνεται και άλλη πηγή Α.Π.Ε. ή συμβατική ηλεκτρική πηγή.

3.2.1 Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα

Η απαιτούμενη, από την εφαρμογή, ηλεκτρική ενέργεια καλύπτει εξ ολοκλήρου από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, χωρίς τη συμμετοχή άλλων Α.Π.Ε. ή Η/Ζ και μπορεί να περιλαμβάνονται ή όχι ηλεκτρικοί συσσωρευτές. Αφορούν εφαρμογές μη συνδεδεμένες στο εθνικό δίκτυο. Η παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι είτε συνεχούς (DC) είτε εναλλασσόμενης (AC) τάσεως. Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται σε :

- Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα άμεσης τροφοδοσίας του φορτίου της εφαρμογής (Direct-couple PV systems) στα οποία η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αποδίδεται απευθείας στην κατανάλωση, όσο φωτίζεται η φωτοβολταϊκή συστοιχία, χωρίς αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άντληση καλλιεργειών που δεν απαιτούν αυστηρά τακτική λειτουργία του συστήματος, όπως π.χ. κατά την άρδευση ορισμένων καλλιεργειών, που δεν απαιτούν πότισμα ανά τακτά χρονικά διαστήματα.
- Αυτόνομα συστήματα με αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας π.χ. αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα φωτισμού οδών, αρχαιολογικών χώρων, υποστήριξη συστημάτων πυρανάχνευσης δασικών εκτάσεων, τηλεπικοινωνιακών αναμεταδοτών, διατάξεων καταγραφής δεδομένων (Loggers) κ.α.. Σχεδιάζονται με πρόβλεψη ορισμένων ημερών αυτονομίας του συστήματος, με βάση το κατάλληλο μέγεθος των συσσωρευτών



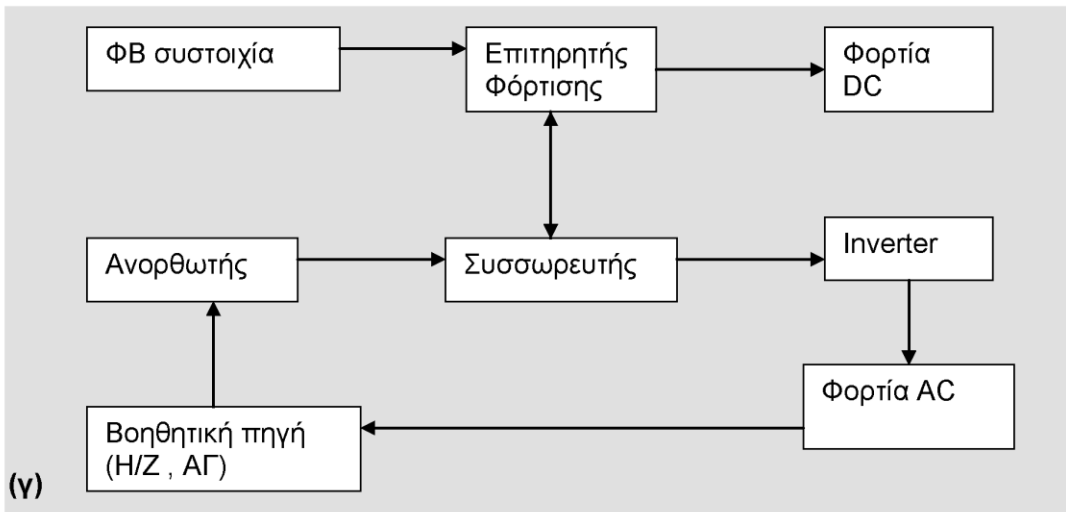
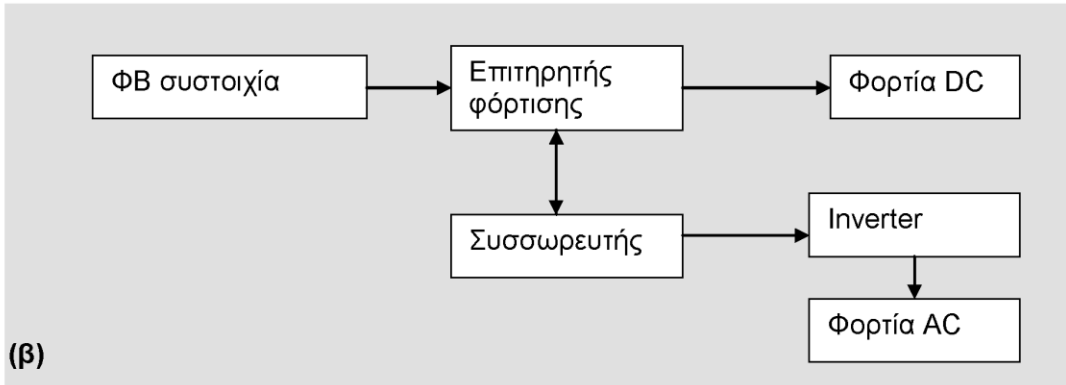
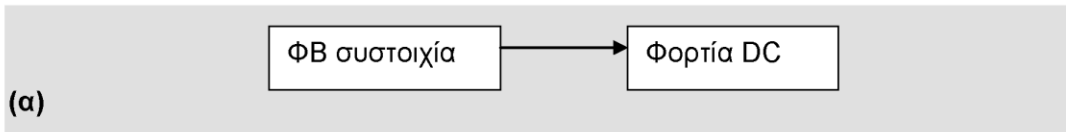
Σχήμα 3.2 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό συστήματα

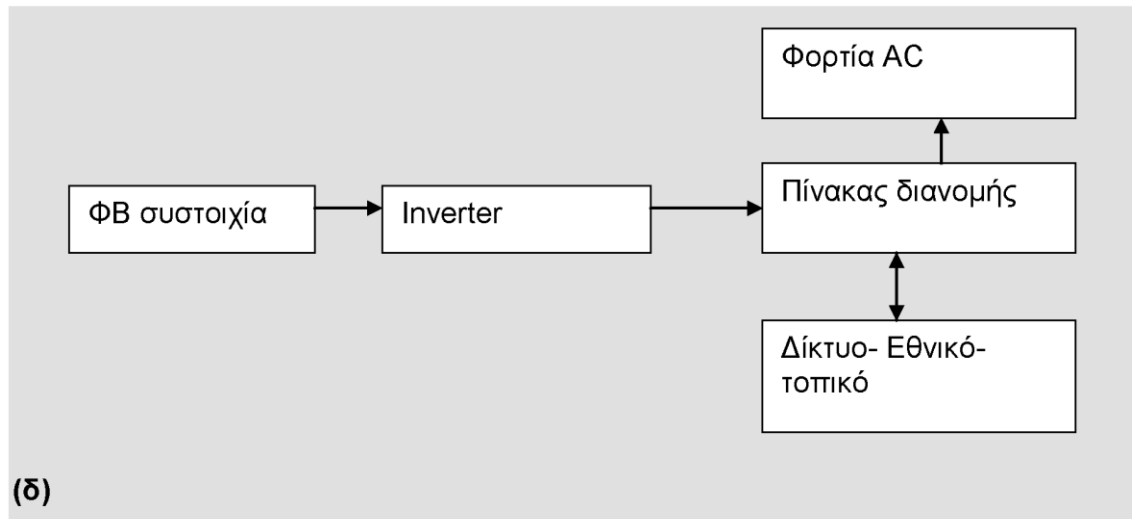
3.2.2 Υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα (hybridPVsystems)

Στα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται από τον συνδυασμό φωτοβολταϊκής συστοιχίας με άλλες πηγές ενέργειας, δηλαδή ,Α.Π.Ε. (π.χ. ανεμογεννήτριες, ΑΓ) ή πηγές συμβατικών καύσιμων (ηλεκτροπαραγωγό ζεύγους, Η/Ζ). Ο προσδιορισμός των συνιστωσών Α.Π.Ε. προκύπτει με ολοκληρωμένη οικονομοτεχνική μελέτη του συστήματος, με κριτήριο το βαθμό συμμετοχής του Η/Ζ στη διασφάλιση της καλύψεως των ενεργειακών απαιτήσεων της εφαρμογής. Στις περισσότερες των περιπτώσεων στο σύστημα προβλέπεται αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές (αυτονομία αποθηκευμένης ενέργειας).

Ο συνδυασμός ΦΒ συστοιχίας με άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας ανανεώσιμης συμπεριφοράς (κυρίως ανεμογεννήτριας), με αποθήκευση μέρους ή του συνόλου της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε συνεργασία ή όχι με συμβατική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Η/Ζ), με στόχο τη βέλτιστη, από τεχνοοικονομική πλευρά, κάλυψη των ηλεκτρικών ενεργειακών απαιτήσεων μιας εφαρμογής, χαρακτηρίζεται ως Υβριδικό ΦΒ σύστημα (HybridPVsystem). Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι υπολογισμού των συνιστωσών ενός ΦΒ υβριδικού συστήματος, οι διαφορές των οποίων εντοπίζονται σε εξειδικευμένα οικονομοτεχνικά και λειτουργικά κριτήρια βελτιστοποίησης της αποδιδόμενης από το σύστημα, ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μεθοδολογίες αυτές οδήγησαν στη δημιουργία λογισμικών (Hybridsystemsizingcalculatorsandsizingtools), για τον προσδιορισμό των συνιστωσών των υβριδικών συστημάτων. Γενικά οι ενεργειακοί υπολογισμοί σε ένα ΦΒ υβριδικό σύστημα αποσκοπούν στον προσδιορισμό των υποσυστημάτων του, με βάση την απαίτηση για ολική ή μερική κάλυψη των μέσων ημερήσιων , μηνιαίων ή ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων των καταναλώσεων της εφαρμογής. Λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες κατά τις ενεργειακές μετατροπές και τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από το χώρο παραγωγής στο χώρο εκμετάλλευσης. Αναλυτικότερα, ενδιαφερόμαστε για τον προσδιορισμό:

- Του μεγέθους των συντιθέμενων ανανεώσιμων πηγών (ΦΒ συστοιχίας και ανεμογεννήτριας).
- Της χωρητικότητας του συσσωρευτή, αν απαιτείται.
- Των χαρακτηριστικών των ηλεκτρονικών διατάξεων προσαρμογής και μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας (converter, inverter και ελεγκτή φόρτισης) όσων η παρουσία κρίνεται επιβεβλημένη
- Των τεχνικών χαρακτηριστικών της συμβατικής πηγής (Η/Ζ), σύμφωνα με το βαθμό συμμετοχής της στην κάλυψη των ενεργειακών καταναλώσεων της εφαρμογής.



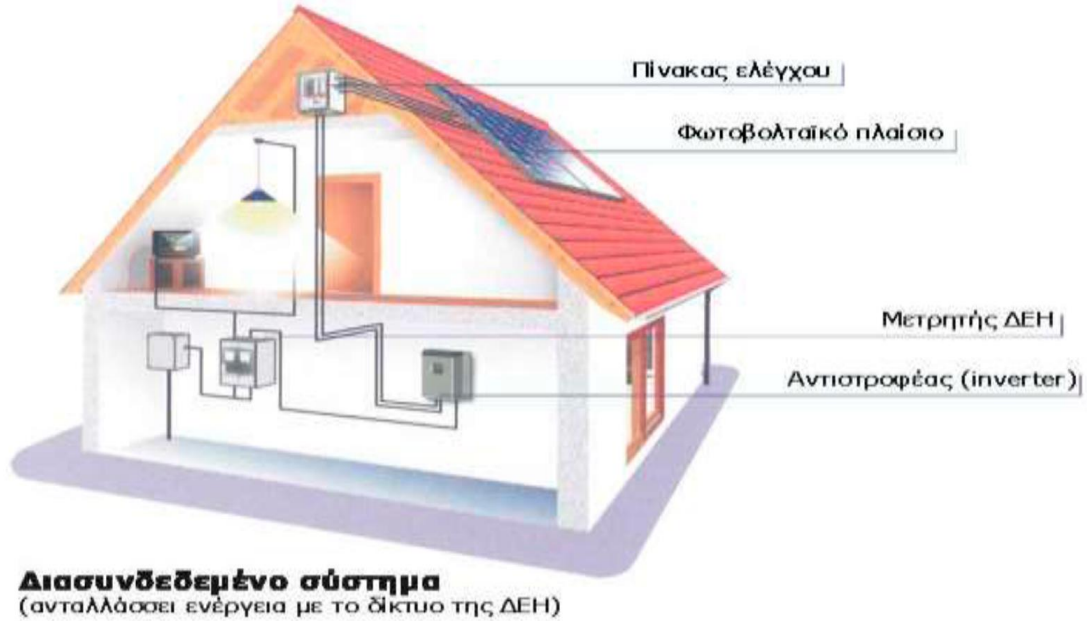


Σχήμα 3.3 Βασικά είδη ΦΒ συστημάτων. (α) Αυτόνομο ΦΒ σύστημα με συστοιχία απευθείας στο φορτίο (DC). (β) Αυτόνομο ΦΒ σύστημα με αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και τροφοδοσία φορτίων συνεχούς και εναλλασσόμενης τάσεως. (γ) Αυτόνομο ΦΒ υβριδικό σύστημα. (δ) ΦΒ σύστημα συνδεδεμένο στο εθνικό ή τοπικό δίκτυο.

3.2.3 ΦΒ σύστημα συνδεδεμένα στο δίκτυο (Grid-connected Systems)

Τα συστήματα αυτά συνδέονται απ' ευθείας στο εθνικό ή τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής παροχής (AC). Το δίκτυο αποτελεί για το ΦΒ σύστημα μια τεράστια δεξαμενή ηλεκτρικής ενέργειας, σταθερής ηλεκτρικής τάσης. Συνεπώς στα συστήματα αυτά δεν απαιτείται αποθήκευση της παραγόμενης ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας. Διακρίνονται σε αυτά που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, ως καταναμημένα (Distributed) συστήματα και σε εκείνα που συνιστούν κεντρικούς ΦΒ σταθμούς μεγάλης ισχύος, των οποίων η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο (Centralized systems). Με στοιχεία του 2002 (IEA), τα συστήματα αυτά καλύπτουν το 74 % της ολικά εγκατεστημένης ισχύος ΦΒ συστημάτων και το ποσοστό αυτό παρουσιάζει συνεχή αύξηση στο διάστημα 1992-2002. Τα καταναμημένα ΦΒ συστήματα αποτελούν το 95 % των συνδεδεμένων στο δίκτυο συστημάτων, παγκόσμιος. Στην κατηγορία των κεντρικών ΦΒ συστημάτων ανήκουν και τα μεγάλα ΦΒ συγκροτήματα, των οποίων η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται κατ' ευθείαν στο δίκτυο. Τα καταναμημένα ΦΒ συστήματα, διακρίνονται σε αυτά που χρησιμοποιούν το δίκτυο ως βοηθητικό πηγή ενέργειας (Gridback-up) και σε εκείνα που λειτουργούν σε συνεχή αλληλεπίδραση με το δίκτυο, διοχετεύοντας την επιπλέον παραγόμενη ενέργεια σ' αυτό (Gridinteractive). Στην πρώτη περίπτωση το ΦΒ σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε να καλύπτει κατά μέσο όρο τις μηνιαίες ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής. Το δίκτυο καλύπτει έκτακτη ενεργειακή ζήτηση ή καταστάσεις αστοχίας του ΦΒ συστήματος. Στη δεύτερη περίπτωση, το βασικότερο κριτήριο αφορά στην επιλογή εκείνης της ΦΒ συστοιχίας η οποία καλύπτει, κατά μέσο όρο, τις ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής. Στις χρονικές περιόδους που το ΦΒ σύστημα υστερεί

στην καλύψει των καταναλώσεων της εφαρμογής, η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται από το δίκτυο. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, μέσα στο έτος, η συνολική ενέργεια από το δίκτυο στην εφαρμογή, προβλέπεται να είναι ίση με τη συνολική ενέργεια από το ΦΒ σύστημα στο δίκτυο. Αν η επιδίωξη μας είναι το ετήσιο οικονομικό ισοζύγιο μεταξύ παραγωγού και ΔΕΗ, κατά τη σχεδίαση του συστήματος λαμβάνεται υπ' όψη η διαφοροποίηση των τιμολογίων παραγωγής και κατανάλωσης.



Σχήμα 3.4 Διασυνδεδεμένο σύστημα (Grid-connected Systems)



Σχήμα 3.5 Υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα (hybridPVsystems)

3.3 Ροή ενέργειας από τη ΦΒ συστοιχία στην κατανάλωση

Κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη ΦΒ συστοιχία, μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια

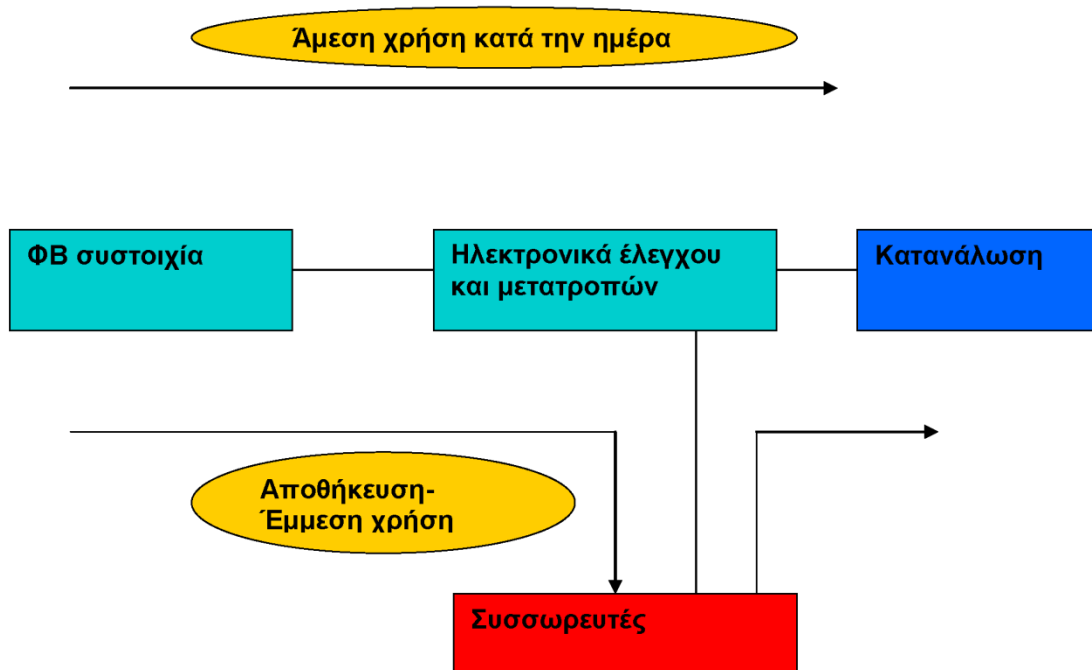
- είτε χρησιμοποιείται για την απευθείας τροφοδοσία των ηλεκτρικών συσκευών της εφαρμογής, οι οποίες αναφέρονται στη συνέχεια, ως καταναλώσεις ή φορτία (άμεση χρήση),
- είτε αποθηκεύεται σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές προκειμένου να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύκτας ή των περιόδων συννεφιάς (έμμεση χρήση).

Οι περιπτώσεις αυτές αποτυπώνονται παραστατικά στο σχήμα 3.6. Επίσης, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, είτε αξιοποιείται ως έχει, δηλαδή, ως ενέργεια συνεχούς ρεύματος, είτε μετατρέπεται σε ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος, μέσωδιάταξης που ονομάζεται inverter.

Πάντως, στις περισσότερες περιπτώσεις ενδείκνυται η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος της ΦΒ συστοιχία σε εναλλασσόμενο, δεδομένης της ευρείας χρήσης των συσκευών με τροφοδοσία 220 V. Σε κάθε περίπτωση, η μετατροπή της ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας, στην είσοδο του ΦΒ συστήματος, σε ηλεκτρική και η μεταφορά της στο χώρο τελικής αξιοποίησης της, συνοδεύεται από απώλειες. Μέρος της μεταφερόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια των συσκευών, αυξάνοντας τη θερμοκρασία των καλωδίων και των ηλεκτρονικών διατάξεων του ΦΒ συστήματος, αποβαλλόμενη, τελικά προς το περιβάλλον. Σε κάθε χαρακτηριστικό τμήμα της γραμμής παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, προσδιορίζεται ο βαθμός αξιοποίησης της διαθέσιμης ενέργειας ή της απόδοσης του, αν αφορά σε ενεργειακή μετατροπή. Οι χρησιμοποιούμενοι συντελεστές χαρακτηρίζουν το αίτιο, που προκαλεί την απώλεια ή το τμήμα του συστήματος στο οποίο συμβαίνει. Αναλυτικότερα, καθορίζονται οι συντελεστές απωλειών ενέργειας στα επόμενα τμήματα του συστήματος

1. στη ΦΒ συστοιχία
2. στη γραμμή μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας
3. στις ηλεκτρονικές συσκευές του ΦΒ συστήματος και
4. στον ηλεκτρικό συσσωρευτή αν το σύστημα περιλαμβάνει αποθήκευση ενέργειας

Οι συντελεστές απωλειών ενέργειας στη ΦΒ συστοιχία προσδιορίζουν την ελάττωση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με αυτή που προσδιορίζεται από τα χαρακτηριστικά των ΦΒ πλαισίων σε πρότυπες συνθήκες.



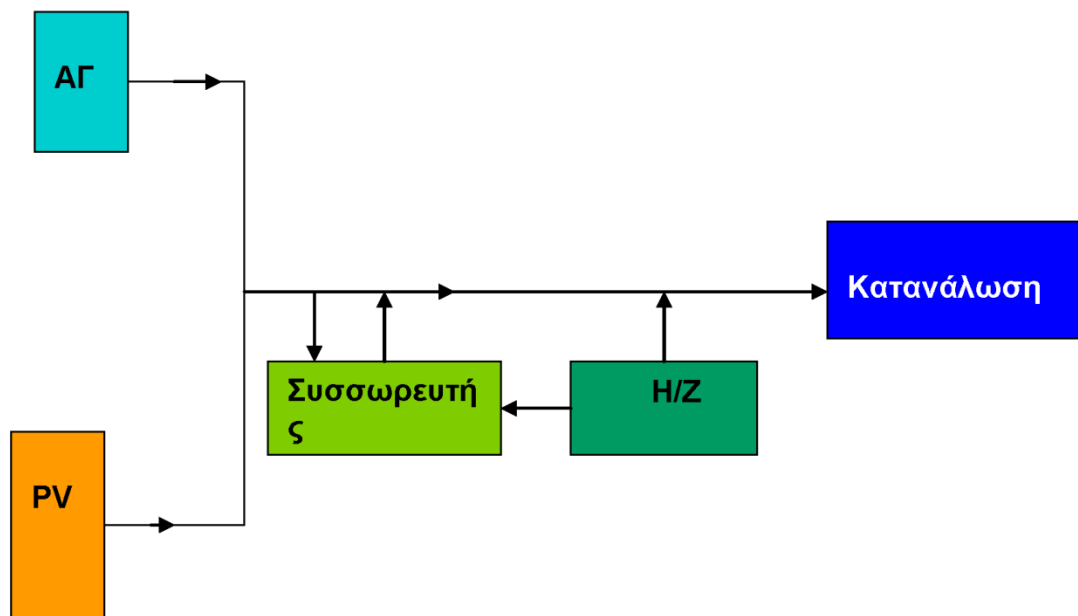
Σχήμα 3.6 Διάγραμμα της παραγόμενης ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας και τα βασικά τμήματα ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος. Στη πιο απλή μορφή του η ΦΒ συστοιχία συνδέεται απευθείας στην κατανάλωση χωρίς ηλεκτρονικά και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.

3.4 Βασικά στοιχεία ΦΒ υβριδικού συστήματος

Σύμφωνα με τα προηγούμενα επικεντρώνουμε την παρουσίαση της μεθοδολογίας προσδιορισμού ενός υβριδικού συστήματος στην περίπτωση που αυτό συνίσταται από ΦΒ συστοιχία και ανεμογεννήτρια. Λαμβάνεται υπόψη, η αναγκαιότητα αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργεια σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές καθώς και η απαίτηση ορισμένων ημερών αυτονομίας, σε συνδυασμό με την παρουσία ηλεκτροπαραγωγό ζεύγους, (σχήμα 6,1). Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι να υπολογιστούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ΦΒ συστοιχίας, της ανεμογεννήτριας, του συσσωρευτή και του Η/Ζ, ώστε να καλύπτονται κατά τον οικονομικότερο τρόπο, οι ενεργειακές απαιτήσεις για όλο το έτος, δεδομένων των ηλιακών και ανεμολογιών χαρακτηριστικών του τόπου εγκατάστασης. Περιοριζόμαστε στην αναλυτική παρουσίαση των επόμενων περιπτώσεων και των τρόπων προσεγγίσεις της λύσης, με βάση την αυτονομία αποθήκευσης ενέργειας και το βαθμό συμμετοχής της συμβατικής ενεργειακής πηγής (Η/Ζ).

1. Ενεργειακό σύστημα ΦΒ συστοιχίας και ΑΓ , χωρίς βοηθητική ενεργειακή πηγή. Σχεδίαση του συστήματος για πλήρη κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων της εφαρμογής, με αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές, λαμβάνοντας υπόψη ορισμένο πλήθος ημερών αυτονομίας συσσωρευτού.

2. Ενεργειακό σύστημα ΦΒ συστοιχίας και ΑΓ, με σύμπραξη βοηθητικής ενέργειας πηγής. Σχεδίαση του συστήματος με κριτήριο την οικονο- μικότερη επένδυση, σε βάθος χρόνου που αφορά στο χρόνο ζωής του συστήματος ΑΠΕ.



Σχήμα 3.7 Τα βασικά υποσυστήματα ενός απομονωμένου ΦΒ υβριδικού συστήματος με αποθήκευση ενέργειας.

Φωτογραφίες από διάφορα ΦΒ συστήματα



Σχήμα 3.8 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα σε κατοικία μόνιμης διαμονής



Σχήμα 3.9 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα στην Κύμη Ευβοίας, που ηλεκτροδοτεί μοναστηριακό μετόχι μόνιμης διαμονής.



Σχήμα 3.10 Αυτόνομο σύστημα στην Ελούντα (Κρήτη), το οποίο από τον Ιούνιο του 1996 ηλεκτροδοτεί το ElundalslandVillas, ένα ξενοδοχειακό συγκρότημα 50 κλινών. Για την αξιοπιστία και τη συμβολή του στην ανάπτυξη του Οικολογικού Τουρισμού, επιλέχτηκε και αναφέρεται στο "RenewableEnergy: BestPracticeProjectsYearbook" της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.



Σχήμα 3.11 Αυτόνομο σύστημα που ηλεκτροδοτεί τον παραδοσιακό τουριστικό Οικισμό 14 οικιών "Άσπρος Ποταμός", στο Μακρύ Γιαλό της Κρήτης. Αυτή η εφαρμογή τιμήθηκε το 1995 από την EUROSOLAR με το Ευρωπαϊκό Βραβείο Φωτοβολταϊκών Εφαρμογών, για την τεχνολογία, την άψογη λειτουργία, την αισθητική και την οικολογική ευαισθησία του ιδιοκτήτη



Σχήμα 3.12 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα που ηλεκτροδοτεί εξοχική κατοικία.



Σχήμα 3.13 Υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα με Η/Ζ, που ηλεκτροδοτεί Ιερό καλύβι στο Άγιο Όρος.



Σχήμα 3.14 Υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα σε συνδυασμό με το κεντρικό δίκτυο σε Ιερά Μονή της Καλύμνου.



Σχήμα 3.15 Υβριδικό σύστημα σε συνδυασμό με το κεντρικό δίκτυο σε εργαστήριο στον Μαρουλά Ρεθύμνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΛΕΤΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ PV- ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΜΙΑ ΚΑΤΟΙΚΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ

Οι ιδιοκτήτες μιας κατοικίας περίπου 200m² στην Αττική απεφάσισαν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες με τεχνολογία των Α.Π.Ε.. Για το ζεστό νερό και την θέρμανση χώρου η λύση που υιοθετήθηκε ήταν συστήματα ηλιακών συλλεκτών, ενώ όλες οι άλλες ηλεκτρικές συσκευές / καταναλωτές θα τροφοδοτούνται από ένα αυτόνομο PV σύστημα που θα εγκατασταθεί στην οροφή. Για το πρόβλημα αυτό θα επιχειρηθεί μια διαστασιολόγηση της PV- διάταξης που θα εγκατασταθεί, με βάση την ενεργειακή μέθοδο και την μέθοδο των Ah. Η PV συστοιχία θα έχει κλίση $\beta=45^\circ$ ως προς το οριζόντιο και θα βλέπει το Νοτιά. Αντί αλλού υλικού π.χ. κεραμίδια, η στέγη θα καλύπτεται με ηλιακούς συλλέκτες και PV πλαίσια όπως το δείχνει το σχήμα 4.1 .



Σχήμα 4.1 Εγκατάσταση PV πλαισίων σε στέγη για αυτοδύναμη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών (ηλεκτρικά φορτία). Μια τέτοια κατοικία απαιτεί ημερησίως 5 kWh.

4.1 Ενεργειακή Μέθοδος Διαστασιολόγησης

Βήμα 1 : Για την αντιμετώπιση του έργου αυτού ο μηχανικός συζήτησε με τον ιδιοκτήτη για το φορτία που θα καλύπτει το PV- σύστημα . Με την χρήση του πίνακα 4.1 στο συμπέρασμα ότι το ημερήσιο φορτίο είναι ίσο με 2500 Wh ή 2.5 kWh/day.

Κατανάλωση	Εγκατεστημένη Ισχύς (W) (1)	Μέσος ημερησίως χρόνος λειτουργίας (2)	Μέση ημερήσια κατανάλωση Wh/day (3)=(2)*(1) Του μήνα	Μέση μηνιαία κατανάλωση Wh/mo (4)=(3)* ημέρες	Μέση ετήσια κατανάλωση Wh/year (5)=(4)* 12
Φωτισμός φθορισμού τύπου 16 σημεία * 5	240 W	2 h	480 Wh	14.4 kWh	170 kWh
TV έγχρωμη 24", TV 17" video	100 W 40 W 30 W	1 h 5 h 1 h	100 Wh 200 Wh 30 Wh	3 kWh 6 kWh 1 kWh	36 kWh 72 kWh 12 kWh
Απορροφητήρας κουζίνας	70 W	0.4 h	30 Wh	1 kWh	12 kWh
Ανεμιστήρας	50 W	1.4 h	70 Wh	2 kWh	24 kWh
Κυκλοφορητής ζεστού νερού	70 W	2 h	140 Wh	4 kWh	48 kWh
Προσωπικός υπολογιστής με εκτυπωτή	180 W	0.55 h	100 Wh	3 kWh	36 kWh
Ηλεκτρικό ψυγείο δίπορτο με καταψύκτη	150 W	9.33 h	1400 Wh	42 kWh	500 kWh
Πλυντήριο	500 W	0.5 h	250 Wh	7.5 kWh	90 kWh
Ηλεκτρική σκούπα	800 W	0.1 h	80 Wh	7.5 kWh	28.2 kWh
Ηλεκτρική κουζίνα	3700 W	0.4 h	1480 Wh	50 kWh	540 kWh
Ηλεκτρικό σίδηρο	1100 W	0.3 h	1100*0.3*50%= 165 Wh	165 Wh*30.5 5 kWh	60 kWh
Φούρνος	2600 W	0.5 h	2600*0.5*25%= 325 Wh	9.8 kWh	117.6 kWh
Κλιματισμός ανά δωμάτιο	860 W	10 h	10 d / μήνα το καλοκαίρι	86 kWh	1032 kWh
Σύνολο	10490 W			199.7 kWh	2770.6 kWh

Πίνακας 4.1 Βασικά φορτία και ζήτηση πρώτης προτεραιότητας για μια τυπική κατοικία

Βήμα 2 :

Το φορτίο αυτό υποθέτουμε ότι απαιτείται υπό μορφή AC και DC ως εξής : α. Φορτία DC 1000 Wh/day β. Φορτία AC 1500 Wh/day Τα στατιστικά δεδομένα : τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας , των τιμών PHS, δίνονται στον πίνακα 4.2

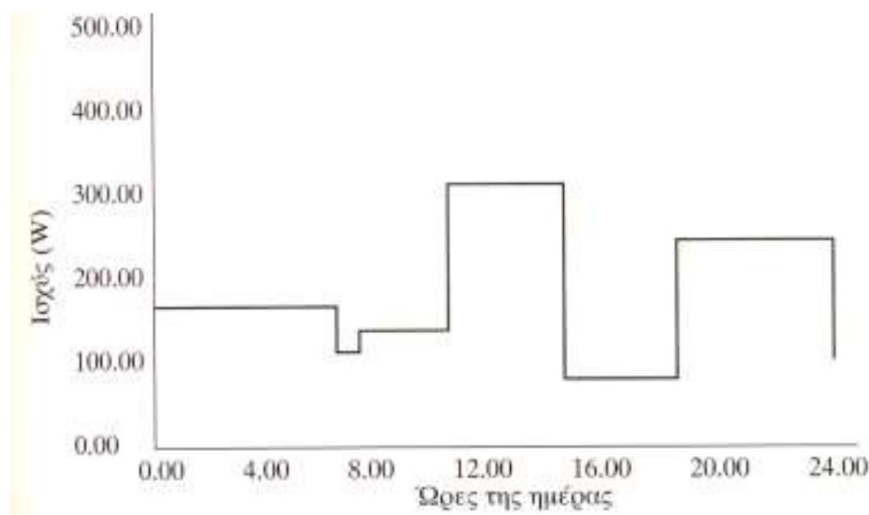
Μήνας	R Συντελεστής μετατροπής της ακτινοβολίας από το οριζόντιο σε κεκλιμένο επίπεδο 45° (1)	Αριθμός ημερών κάθε μήνα (2)	$I_t \cdot 10_3$ kWh Μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία στις 45° (3)	Μέση ημερήσια ακτινοβολία (kWh/m ²) σε επίπεδο 45° (3)/(2)*	PSH h	Τα Μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος °C
Ι	1.655	31	65	3.06	3.06	10.5
Φ	1.38	28	104	3.71	3.71	11.6
Μ	1.16	31	128	4.13	4.13	12.9
Α	0.965	30	144	4.8	4.8	17.1
Μ	0.845	31	162	5.22	5.22	21.9
Ι	0.79	30	163	5.43	5.43	26.6
Ι	0.81	31	179	5.77	5.77	29.3
Α	0.92	31	188	6.06	6.06	29.2
Σ	1.105	30	167	5.57	5.57	25.3
Ο	1.355	31	142	4.58	4.58	20
Ν	1.61	30	115	3.83	3.83	16.3
Δ	1.7	31	94	3.03	3.03	12.5
Ετήσιο Μ.Ο.				4.6 kWh/m ²	4.6 h	20 °C

Πίνακας 4.2. Τιμές ακτινοβολίας σε επίπεδο με κλίση $\beta = 45^\circ$. Τιμή του PSH ανά μήνα και θερμοκρασίας περιβάλλοντος για την Αττική. *Σημείωση: Εάν οι τιμές της ακτινοβολίας εδίδοντο για το οριζόντιο επίπεδο τότε έπρεπε να πολλαπλασιασθούν με την κατάλληλη τιμή του συντελεστή μετατροπής R, για το κεκλιμένο επίπεδο. Δηλ. στη στήλη αυτή οι τιμές θα προέκυπταν ως έξης: $(1) \cdot (3) / (2)$

Βήμα 3 : Υπολογισμός της ημερήσιας κατανομής των φορτίων

Από την μορφή της ημερήσιας κατανάλωσης των φορτίων, σχήμα 4.2 ο μηχανικός εκτιμά π.χ. ότι 40 % των φορτίων , ήτοι $2500 \text{ Wh} \cdot 0.4 = 1000 \text{ Wh}$ καλύπτονται απ' ευθείας κατά την διάρκεια της ημέρας όποτε και η PV- γεννήτρια παρέχει την ισχύ απ' ευθείας στα φορτία, ενώ το 60 %, ήτοι $2500 \text{ Wh} \cdot 0.6 = 1500 \text{ Wh}$, θα καλυφθεί μέσω συσσωρευτών. Με τα δεδομένα αυτά και βάση της αρχικής εκτίμησης προκύπτει :

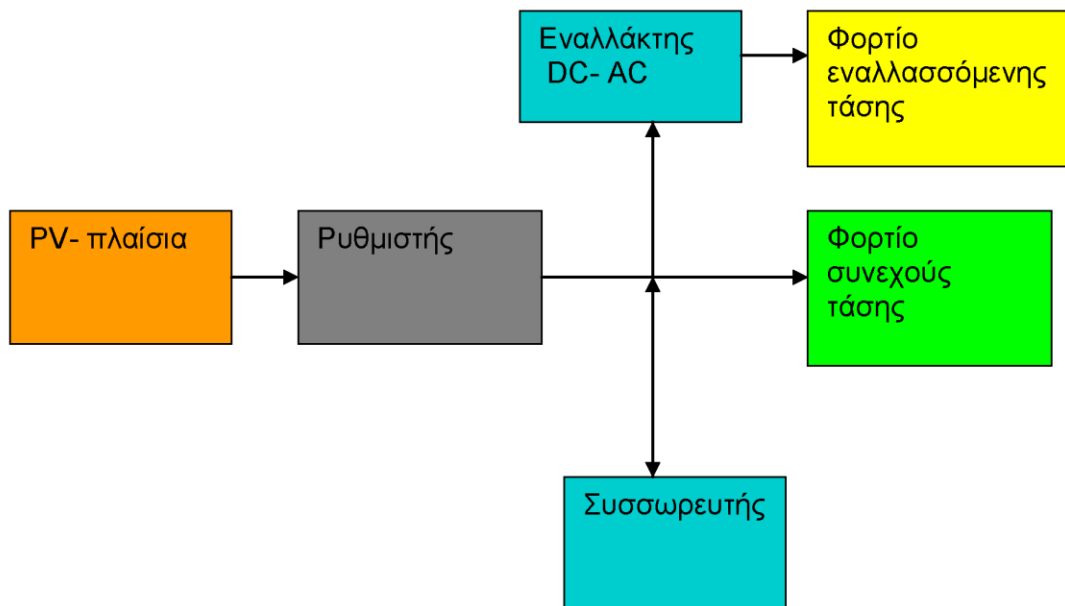
- **Φορτία DC** : άμεση κάλυψη από PV- γεννήτρια : $0.4 \cdot 1000 \text{ Wh} = 400 \text{ Wh/day}$
Έμμεση κάλυψη από συσσωρευτές : $0.6 \cdot 1000 \text{ Wh} = 600 \text{ Wh/day}$
- **Φορτία AC** : άμεση κάλυψη των φορτίων
από την PV- γεννήτρια μέσω του
αντιστροφέα DC/AC : $0.4 \cdot 1500 \text{ Wh} = 600 \text{ Wh/day}$
Έμμεση κάλυψη μέσω συσσωρευτών
και του αντιστροφέα DC/AC : $0.6 \cdot 1500 \text{ Wh} = 900 \text{ Wh/day}$
- Επόμενος το σύνολος θα είναι : **2500 WH/day**



Σχήμα 4.2 Υποθετική χρονική κατανομή των φορτίων μιας κατοικίας κατά την διάρκεια της ημέρας.

Βήμα 4 : Γενική τοπολογία PV- συστήματος.

Τα ανώτερα βήματα της μελέτης μας οδηγούν στη γενική τοπολογία της PV- εγκατάστασης, όπως δείχνει το σχήμα 4.3

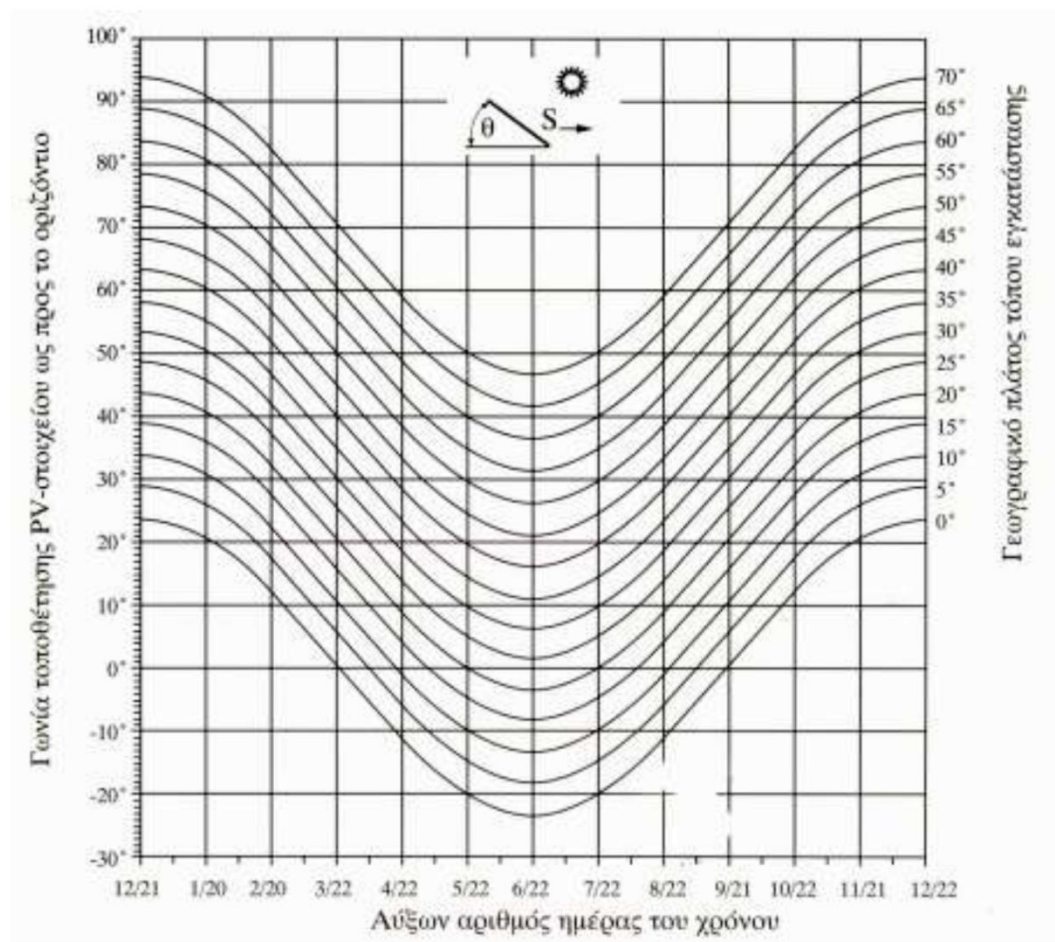


Σχήμα 4.3 Σχηματικό διάγραμμα ενός PV- συστήματος αποτελούμενο από ένα ρυθμιστή τάσης, συσσωρευτές και ένα Εναλλάκτης συνεχούς / εναλλασσομένου ρεύματος.

Βήμα 5 : Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο

Υποθέτουμε ότι η κλίση των PV- πλαϊσίων θα είναι 450 και τα PV- πλαϊσια βλέπουν το νοτιά. Είναι γεγονός ότι σε μια μελέτη να εξετάζουμε εάν : 1. Οι PV- συστοιχίες είναι ακίνητες και να υπολογίζουμε την κλίση τους, β , ως προς το οριζόντιο επίπεδο π.χ. αν θα είναι : $\beta = \phi - 15$ ή $\beta = \phi$ ή $\beta = \phi + 15$ ή κάποια άλλη τιμή κλίσης β , σύμφωνα με τις καμπύλες του σχήματος 4.4.

Μάλιστα, θα πρέπει να υπολογίζουμε επακριβώς την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα PV- πλαίσια, καθώς και το PSH για την συγκεκριμένη κλίση. Οι τιμές αυτές θα μας βοηθήσουν καθώς θα δούμε στο τέλος του προ- βλήματος αυτού να εξοικονομήσουμε PV- πλαίσια και συνεπώς να βελτιώσουμε το όφελος έναντι του κόστους σε ένα τέτοιο έργο .

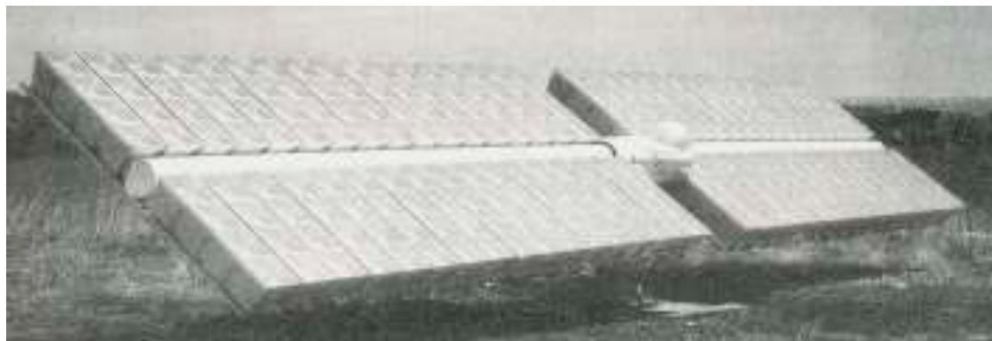


Σχήμα 4.4 Γωνίες τοποθέτησης PV- στοιχείων σε διάφορα γεωγραφικά πλάτη για να επιτύχουμε κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτά, κατά το ηλιακό μεσημέρι, κάποιας ημέρας του έτους.

2. Οι PV- συστοιχίες περιστρέφονται περί έναν ή δυο άξονες , βλ. σχήμα 4.5 . Από τα δεδομένα αυτά και τον πίνακα 4.3 για την Αττική, η μέση ετήσια τιμή του (PSH) είναι 4.61h. Οι μηνιαίες τιμές του (PSH) προσδιορίζουμε αναλυτικά από τις τιμές του πίνακα 4.3

Μήνας	Μέση Μηνιαία ακτινοβολία στις 45 ⁰ στην Αθηνά (kWh/m ²)	Μέση Μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)
Ιανουάριος	95	10.5
Φεβρουάριος	104	11.6
Μάρτιος	128	12.9
Απρίλιος	144	17.1
Μάιος	162	21.9
Ιούνιος	163	26.6
Ιούλιος	179	29.3
Αύγουστος	188	29.2
Σεπτέμβριος	167	25.3
Οκτώβριος	142	20
Νοέμβριος	115	16.3
Δεκέμβριος	94	12.5
Ετήσιο Σύνολο	1.681 kWh/m ²	

Πίνακας 4.3 Τιμές Μέσης Μηνιαίας Ηλιακής Ακτινοβολίας στην περιοχή της Αθήνας που προσπίπτει σε PV- πλαίσιο με κλίση 450 ως προς το οριζόντιο επίπεδο και μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

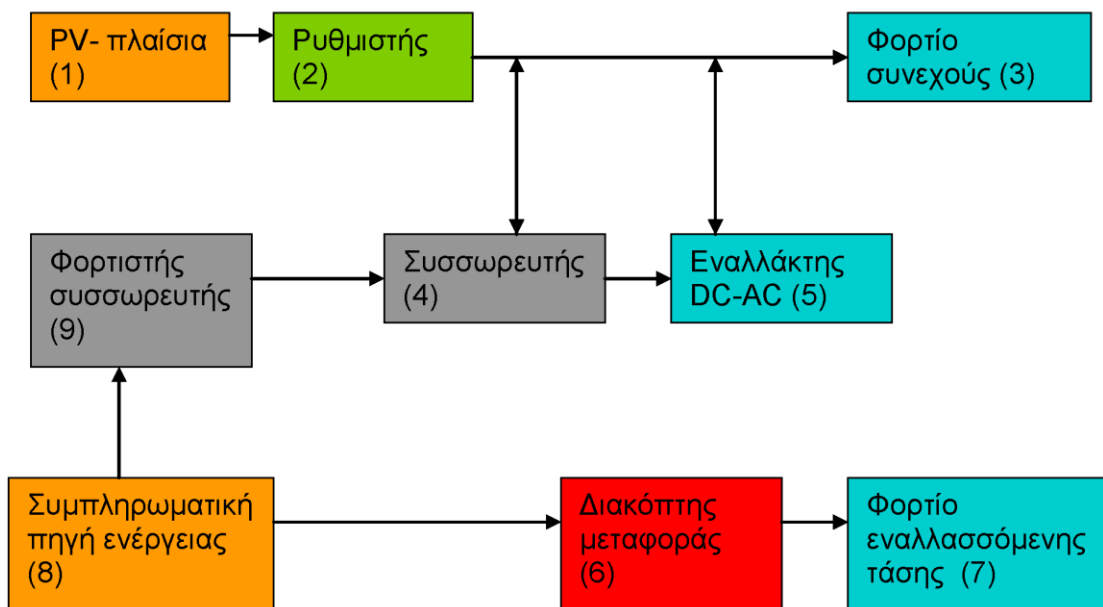


Σχήμα 4.5 PV- συστήματα με δυνατότητα περιστροφής περί δυο άξονες A-Δ και B- N για επίτευξη μεγάλων επιδόσεων παραγωγής ενέργειας

Βήμα 6 : Χρόνος αυτοδυναμίας του συστήματος.

Με βάση τα δεδομένα ότι η μέση ετήσια τιμή του (PSH)= 4.16h και ότι τα φορτία δεν είναι κρίσιμα, η περίοδο αυτοδυναμίας, d , προσδιορίζεται από την σχέση. $Dn-cr = -0.48 \times (PSH) + 4.58 = -0.48 \times 3.03 + 4.58 = 3 \text{ days}$

Παρατήρηση: Η απόφαση αυτή περί μη- κρίσιμων φορτίων συνεπάγεται ότι υπάρχει πιθανότητα για κάποιες ώρες το PV- συστημάτων να τεθεί εκτός λειτουργίας. Οδηγούμαστε στη λύση μιας συμπληρωματικής πηγής ενέργειας για την περίπτωση όπου ο πελάτης θα θελήσει να έχει πάντοτε τους καταναλωτές σε λειτουργία και νέα τεχνολογία, είναι αυτή που παρουσιάζει το σχήμα 4.6 .



Σχήμα 4.6 Σχηματικό διάγραμμα ενός PV- συστήματος με ένα ρυθμιστή τάσης, συσσωρευτές, έναν εναλλάκτη συνεχούς / εναλλασσομένου, μια συμπληρωματική πηγή ενέργειας και ένα ελεγκτή φόρτισης των συσσωρευτών

Βήμα 7 : Διορθώσεις των τιμών των φορτίων λόγω απωλειών

Τα φορτία (DC, AC) όπως προσδιορίστηκαν στο 3 βήμα πρέπει να διορθωθούν λόγω των απωλειών, ώστε να χρησιμοποιηθούν οι διορθωμένες τιμές στην ενεργειακή μέθοδο Διαστασιολόγησης της PV- γεννήτριας. Οι απώλειες ομαδοποιούνται, σύμφωνα και με τα προηγούμενα τοπολογία διαγράμματα, ως εξής : Φορτία DC : απώλειες 5% στις καλωδιώσεις για τα φορτία που εξυπηρετούνται απ' ευθείας από την PV- γεννήτρια. Για τα φορτία που εξυπηρετούν μέσω των συσσωρευτών 5% απώλειες στον ελεγκτή φόρτισης και στις καλωδιώσεις και απώλειες 20% λόγω της απόδοσης των συσσωρευτών ήτοι απόδοση 80% (φόρτιση – εκφόρτιση, γήρανση, κ.λ.π.), με βάση την ενεργειακή μέθοδο .

A) Βαθμός απόδοσης (Ρεύματος)= $nAh = (Ah)_{εκφόρτισης} / (Wh)_{φόρτισης}$

B) Βαθμός απόδοσης (Ενέργειας)= $nWh=(Wh)_{εκφόρτισης}/(Wh)_{φόρτισης}$

Παρατήρηση: Στο σημείο αυτό γίνεται αντιληπτό, πως οι συσσωρευτές επηρεάζουν και τις διαστάσεις της PV- γεννήτριας. Φορτία AC : που εξυπηρετούνται απ' ευθείας από την PV- γεννήτρια μέσω του αντιστροφέα DC/AC, υφίστανται απώλειες 5% στις καλωδιώσεις και 15% στον αντι- στροφέα. Φορτία AC : που εξυπηρετούνται μέσω του συσσωρευτή και του αντιστροφέα υφίστανται απώλειες 5% λόγω εναλλαγή φόρτισης , 20% λόγω των κύκλων φορτίσεων- εκφορτίσεων (απόδοση συσσωρευτή 80%) και 15% απώλειες στον αντιστροφέα (απόδοση 85%). Σύνολο απωλειών : 40 %

Σύμφωνα με τα ανώτερα τα ενεργειακά φορτία που πραγματικά πρέπει να απόδοση η PV- γεννήτρια για να φθάσουν στους καταναλωτές όπως απαιτείτε και προβλέπεται είναι :

DC	Δρόμος 1,2,3	400*1.05=420 Wh
DC	Δρόμος 1,2,4,3	600*1.25=750 Wh
AC	Δρόμος 1,2,5,6,7	600*1.20=720 Wh
AC	Δρόμος 1,2,4,5,6,7	900*1.40=1260 Wh
Σύνολο :		3150 Wh=3.15 kWh
Αντί της αρχικής προσεγγίσεις:		2500 Wh =2.50 kWh

Βήμα 8 : Ένας αρχικός προσδιορισμός της Ισχύς Αιχμής, P_m ή W_p .

Η ισχύς αιχμής της PV- γεννήτριας προσδιορίζεται άμεσα από την σχέση : $P_m=3150Wh / (PSH)m=3150Wh / 4.61h= 683W_p$ μέση ετήσια ισχύς αιχμής.

Παρατήρηση : Οι ανά μήνα τιμές του PSH για την κλίση των 450 που έχουν υπολογισθεί όπως δείχνει ο πίνακας 4.3 δίδουν μέση ετήσια τιμή 4.16h .

Βήμα 9 : Επιλογή PV- πλαίσιων.

Τα PV- πλαίσια που μετά από ερευνά της αγοράς επελέγησαν βάσει : του κόστους, των λειτουργικών χαρακτηριστικών τους, της άμεσης παράδοσης, της εγγύησης κ.λ.π., έχουν τα εξής χαρακτηριστικά.

$isc= 3.45A$

Voc= 21.7 Volts

isc= 3.15A

Vm= 17.4 Volts

Pm=55 Wp

Σε συνθήκες STC, δηλαδή 103 W/m², σε θερμοκρασία 25 οC και φάσμα AM 1.5. Ωστόσο θα πρέπει να γίνει διόρθωση στην ισχύ που αποδίδουν τα PV- πλαίσια, επειδή θα λειτουργούν υπό υψηλότερη θερμοκρασία. Επιχειρούμε την διόρθωση αυτή ακριβώς όπως επεξηγείτε στο επόμενο βήμα.

Βήμα 10 : Διόρθωση λόγω θερμοκρασίας λειτουργίας, T_c, των πλαισίων.

Για τα PV- πλαίσια που επελέγησαν, NOTC, δίδεται ότι είναι ίση με 46 οC. Σύμφωνα με την σχέση η θερμοκρασία λειτουργίας, T_c των PV- πλαισίων θα προσδιορισθεί ως εξής : $T_c - T_a / NOTC - 20 \text{ }^\circ\text{C} = I_t / 0.8 \text{ kW/m}^2$ $T_c = T_a + NOTC - 20^\circ / 0.8 \times I_t \text{ (kW/m}^2) = T_a + 46^\circ - 20^\circ / 0.8 \times I_t = T_a + 26^\circ / 0.8 \times 1 = T_a + 32.5 \text{ }^\circ\text{C}$

Η θερμοκρασία T_a θα ληφθεί ως μέση θερμοκρασία της ημέρας που για κάθε μέρα δίνεται από τον πίνακα 4.2 και 4.4.

1	2	3	4	5	6
Ηράκλειο	Αθηνά	Αργοστόλι	Άρτα	Θεσσαλονίκη	Ιωάννινα
Ιεράπετρα	Καλαμάτα	Κόρινθος	Κέρκυρα	Καβάλα	Κομοτηνή
Ρόδος	Νάξος	Μυτιλήνη	Λαμία	Κατερίνη	Κόνιτσα
Σητεία	Σάμος	Πάτρα	Λήμνος	Λάρισα	Σέρρες
Χανιά	Σύρος				

Πίνακας 4.4 Κατάταξη των κυριότερων πόλεων σε ζώνες με βάση την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

Ας υποθέσουμε ότι για τον Αύγουστο η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{a,Au} = 28 οC. Τότε σύμφωνα με τα ανώτερα : T_{a,Au} = 32.5 + 29 = 61 οC. Για την θερμοκρασία αυτή υπολογίζουμε τα μεγέθη isc, Voc, FF και τελικά την ισχύ P_m που αποδίδουν τα PV- πλαίσια υπό τις νέες συνθήκες. Εξετάζουμε το PV-πλαίσιο των 55 Wp το οποίο έχει 36 PV- κυψελίδες εν σειρά :

1. Η isc = 3,45 A. Θα υποθέσουμε ότι δεν επηρεάζεται από την θερμοκρασία. Ωστόσο, βάση της σχέσης η Voc επηρεάζεται και η νέα τιμή της υπολογίζεται ως εξής.

2. $V_{oc} = 21.7 \text{ Volts} - 36 \times 0.0023 \text{ Volts/}^{\circ}\text{C} \times (61 - 25) ^{\circ}\text{C} = 18.8 \text{ Volts}$ $V_{oc} = V_{oc} (\text{S.T.C.}) + dV_{oc} / dT \times (T_c - 25 ^{\circ}\text{C})$ όπου το $dV_{oc}/dT = 2.3 \times 10^{-3} \text{ Volts/}^{\circ}\text{C}$ για κάθε PV- στοιχείο.

3. Υπολογίζουμε τον συντελεστή $FF = I_m \times V_m / I_{sc} \times V_{oc}$, $FF = 55 \text{ W} / 3.45 \times 2.17 \text{ Volts} = 0.735$.

4. P_m για συνθήκες $I_t = 103 \text{ W/m}^2$ και $T_c = 60 ^{\circ}\text{C}$ υπολογίζεται βάσει των ανώτερων τιμών I_{sc} , V_{oc} και FF :

$$P_m (103 \text{ W/m}^2 , T_c = 60 ^{\circ}\text{C}) = 3.45 \times 18.8 \times 0.735 = 47.65 \text{ W}$$

Βήμα 11 :

Ο αριθμός των PV- πλαισίων του τύπου που επελέγησαν, μετά και την διόρθωση της αποδιδόμενης από αυτά ισχύος λόγω υψηλότερης θερμοκρασίας από την NO_{TC} (η διορθώσει αυτή πρέπει να γίνεται στην ενεργειακή μέθοδο) προσδιορίζεται ως εξής: $N_{pv} = P_m / P_{m,pv} = 683 \text{ Wp} / 47.65 \text{ Wp} = 14.3$ PV- πλαίσια. Ενώ, εάν δεν λαμβάνεται υπ' όψη η επίδραση της θερμοκρασίας το αποτέλεσμα θα ήταν $683 \text{ Wp} / 55 \text{ Wp} = 12.4$ PV- πλαίσια. Τούτη η Διαφορά στη διαστασιολόγηση θα μπορούσε να προκαλέσει αναξιόπιστα αποτέλεσμα. Βέβαια, ο αριθμός των PV- πλαισίων θα πρέπει να είναι ακέραιος και η συνδεσμολογία τους τέτοια, ώστε να ικανοποιούν και άλλες προϋποθέσεις που θα εξεταστούν αμέσως στην συνέχεια. Ο πλησιέστερος προς τα άνω ακέραιος τον οποίο αποδεχόμεθα είναι $N_{pv} = 15$ PV- πλαίσια.

Βήμα 12 :

Επειδή οι απώλειες λόγω μεταφοράς θα πρέπει να παραμείνουν μικρές, εξετάζεται η περίπτωση να μεταφέρεται η ισχύς της PV- γεννήτριας στον μετατροπέα DC / AC υπό τάση 48 Volts ή 120 Volts τιμή η οποία συνίσταται για εγκαταστάσεις άνω των 2.5 kWp, όπως δείχνει ο πίνακας 4.5 .

Ισχύς αιχμής PV- γεννήτριας	Φορτίο μετατροπέα DC/AC	Συνολικό φορτίο (kWh/day)	Τάση εισόδου DC/ AC (volts)
< από 0.4 kW _p	Μικρότερο από 1	Μικρότερο από 1	12 Volts
0.4 – 1 kW _p	2.5 ή μικρότερο	Μικρότερο από 5	24 Volts
1 – 2.5 kW _p	5 ή μικρότερο	5 – 12	48 Volts
> από 5 kW _p	Μεγαλύτερο από 5	12 – 25	120 Volts

Πίνακας 4.5 Οδηγίες για αυτόνομους μετατροπή συνεχούς – εναλλασσόμενου (DC /AC) ρεύματος.

Ας θεωρήσουμε τις δυο αυτές δυνατές λύσεις , δηλαδή :

$V_s = 48 \text{ Volts}$ και $V_s = 120 \text{ Volts}$. Αν $V_s = 48 \text{ Volts}$,

τότε ο αριθμός των PV- πλαισίων, εν σειρά, θα πρέπει να είναι :

$(N_p.s)_{48V} = 48 \text{ Volts} / 17.4 \text{ Volts} = 2.76$ ή τελικά $(N_p.s)_{48V} = 3$ PV- πλαίσια εν σειρά.

Τότε, ο ολικός αριθμός των παραλλήλων σειρών, $(N_p)r$, θα είναι : $N_{pv} / (N_p)r = 15 / 3 = 5$, ήτοι $N_{p,r} = 5$ σειρές PV- πλαισίων, εν παραλλήλω με την κάθε σειρά να έχει 3 PV- πλαίσια.

Αν $V_s = 120 \text{ Volts}$, ο αριθμός των PV- πλαισίων εν σειρά θα είναι : $(N_p.s)_{120V} = 120 \text{ Volts} / 17.4 \text{ Volts} = 6.89$ ή τελικά $(N_p.s)_{120V} = 8$ PV- πλαίσια εν σειρά.

Τότε, ο ολικός αριθμός των παράλληλων σειρών θα είναι : $(N_p)r = 2$ όποτε τελικά, $N_{pv} = 16$ PV- πλαίσια.

Η δεύτερη λύση είναι θεωρητικά προτιμητέα λόγω της υψηλότερης απόδοσης στο σύστημα αφού οι απώλειες μεταφοράς μειώνονται, με το ύψος της τάσεως μεταφοράς, ενώ το κόστος για το ένα επιπλέον PV- πλαίσιο θεωρείται αμελητέο. Ωστόσο, κατά την μελέτη της αποθήκευσης ενέργειας μέσω συσσωρευτών, διαπιστώνεται ότι ο αριθμός των συσσωρευτών εξαρτάτε από το V_s όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια. Η τελική απόφαση για την ακριβή διαστασιολόγηση του συστήματος θα ληφθεί μετά την μελέτη και του συστήματος αποθήκευσης – συσσωρευτών και την οικονομοτεχνική ανάλυση, για το πιο σενάριο είναι προτιμητέο.

Βήμα 13 : Επιβεβαίωση.

Στο 11ο βήμα προσδιορίσθηκε ο αριθμός $N_{pv} = 15$ PV- πλαίσια. Δηλαδή 15 PV- πλαίσια \times 47.65 $W_p = 715 W_p$ σε σύγκριση με τα 683 W_p μέση ετήσια ισχύ αιχμής που υπολογίσθηκε κατ' αρχήν στο βήμα 8. Η διάφορα είναι ικανή να καλύψει και μια επιπλέον πτώση ισχύος λόγω αυξημένης θερμοκρασίας ή την επιπλέον απαιτούμενη ισχύ στα φορτία κατά το χειμώνα σε ημέρα με σχετική συννεφιά, χωρίς την ανάγκη εκφόρτισης των συσσωρευτών. Τα ίδια και σε καλλίτερο βαθμό ισχύουν αν προχωρήσουμε στην ανάλυση για την περίπτωση των 16 PV- πλαισίων, λύση που προκύπτει για $V_s = 120 \text{ Volts}$

4.1.1 Τυπικές συνθήκες δοκίμων – πιστοποίησης και λειτουργίας PV- στοιχείων.

Για λόγους συγκρισιμότητας της απόδοσης και της ισχύς αιχμής που αποδίδουν τα PV- πλαίσια, έχει συμφωνηθεί όπως επικρατούν σε ακόλουθες συνθήκες κατά τις δόκιμες. 1. Οι κανονικές συνθήκες (S.T.C. : Standard test conditions) υπό τις οποίες γίνονται οι δόκιμες – μετρήσεις των ανωτέρων μεγεθών είναι οι εξής : α) Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουσα στα PV- πλαίσια 103 W/m^2 β) Θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου, $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ γ) Φάσμα προσπίπτουσας ακτινοβολίας : A.M. = 1.5 2. Τυπικές συνθήκες λειτουργίας PV- πλαισίων, (Standard Operating Condition, S.O.C.). Οι ακόλουθες συνθήκες έχουν προταθεί για τον

προσδιορισμό της ισχύος αιχμής, ώστε να προσεγγίζουν περισσότερο μια πραγματική κατάσταση λειτουργίας, δηλ. η τιμή P_m που προκύπτει από τις συνθήκες αυτές να προσεγγίζει αυτήν που θα αποδίδει το PV- σύστημα στο πεδίο εφαρμογής. Οι συνθήκες είναι :

α) Ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας 800 W/m^2

β) Θερμοκρασία αέρα (περιβάλλοντος), $T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

γ) Ταχύτητα ανέμου 1 m/sec .

δ) Προσανατολισμό ανέμου προς το νότο και μετρήσεις κατά το ηλιακό με- σιμερι.

ε) Μετρήσεις υπό συνθήκες ανοικτού κυκλώματος

3. Ονομαστικές τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας ενός PV- πλαισίου, (NominalOperationCellTemperatures, N.O.C.T.). Είναι η θερμοκρασία που αποκτά ένα PV- πλαίσιο όταν λειτουργεί υπό συνθήκες (S.O.C.) . Συνήθως η N.O.T.C. είναι μια θερμοκρασία κατά $20 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$ πάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Τύπο PV- πλαίσιων	SR 100		SR 90		SR 50		SP 75	SP 70	
Αριθμός PV-κυψελίδων εν σειρά	36	18	36	18	36	18	36	18	36
Ισχύς αιχμής, (Watts), (P_{min})	100	100	90	90	50	50	75	75	70
Ελαχ. Ισχύς (Watts), (P_{min})	90	90	80	80	45	45	70	70	65
Τάση ανοικτού Κυκλωμ. (V_{oc})	22	11	21.6	10.8	21.6	10.8	21.7	10.85	21.4
Ρεύμα βραχυκυκλώσεις (I_{sc})	6.3	12.6	61	12.2	3.2	6.4	4.8	9.6	4.7
Τάση υπό φορτίο	17.7	8.85	17	8.5	17	8.5	17	8.5	16.5
Ρεύμα υπό φορτίο	5.6	11.2	5.4	10.8	2.95	5.9	4.4	8.8	4.25
Υλικό PV-κυψελίδας	Mono ⁺	Mono ⁺	Mono ⁺	Mono ⁺	Mono ⁺	Mono ⁺	Mono ⁺	Mono ⁺	Mono ⁺
Μέγιστη τάση , V_{oc} του συστήματος	600	600	600	600	600	600	600	600	600
Δίοδος παράκαμψης . Υφίσταται ;	ναι	όχι	ναι	όχι	ναι	όχι	ναι	όχι	Ναι

Πίνακας 4.6 Ηλεκτρικά χαρακτηρισθήκα PV- πλαίσιων της εταιρίας Siemens.

4.2 Διαστασιολόγηση με τη μέθοδο των Ah

Ακολουθούμε και στη μεθοδολογία αυτή τα ίδια βήματα 1,2,3,4,5 και 6 όπως και προηγούμενος στην ενεργειακή μέθοδο. Στην συνέχεια έχουμε:

Βήμα 7 : Υπολογισμός Ah ανά τύπο φορτίου.

Υποθέτουμε ότι η ισχύς από την PV- γεννήτρια θα αποδίδεται υπό τάση 48 Volts ή 120 Volts για τους λόγους που εκτέθηκαν στο 12ο βήμα.

Έχοντας αυτά υπόψη, η PV- γεννήτρια θα αποδίδεται ημερησίως : α) $2500 \text{ Wh} / 48 \text{ Volts} = 2500 \text{ A} \times \text{h} / 48 \text{ V} = 52.08 \text{ Ah}$ υπό τάση 48 Volts ή β) $2500 \text{ Wh} / 120 \text{ Volts} = 20.83 \text{ Ah}$ υπό τάση 120

Volts Με βάση τις υπό κατηγορίες των φορτίων DC και AC όπως αναλύθηκαν στο 3ο βήμα έχουμε τα ακόλουθα ανά κατηγορία, Ah, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα δυο σενάρια των 48 Volts και 120 Volts μεταφοράς της DC ενέργειας στον αντιστροφέα DC / AC

α) Φορτία DC: απ' ευθείας κάλυψη από PV- γεννήτρια:

$$1) 400 \text{ Wh} / 48 \text{ Volts} = 8.33 \text{ Ah/day}$$

$$2) 400 \text{ Wh} / 120 \text{ Volts} = 3.33 \text{ Ah/day}$$

Έμμεση κάλυψη, μέσω συσσωρευτών :

$$1) 600 \text{ Wh} / 48 \text{ Volts} = 12.5 \text{ Ah/day}$$

$$\text{ή } 2) 600 \text{ Wh} / 120 \text{ Volts} = 5 \text{ Ah/day}$$

β) Φορτία AC: απευθείας κάλυψη από PV- γεννήτρια μέσω του αντιστροφέα DC / AC :

$$1) 600 \text{ Wh} / 48 \text{ Volts} = 12.5 \text{ Ah/day} \text{ ή}$$

$$2) 600 \text{ Wh} / 120 \text{ Volts} = 5 \text{ Ah/day}$$

Έμμεση κάλυψη από PV- γεννήτρια μέσω του αντιστροφέα DC / AC:

$$1) 900 \text{ Wh} / 48 \text{ Volts} = 18.75 \text{ Ah/day} \text{ ή}$$

$$2) 900 \text{ Wh} / 120 \text{ Volts} = 7.5 \text{ Ah/day}$$

Επομένως, το σύνολο θα είναι: 52.08 Ah/day, εάν η ηλεκτρική διάταξη είναι υπό τάση DC: 48 Volts.

Η ίδια τιμή θα προέκυπτε εάν διαιρούσαμε τα 2500 Wh δια της τάσεως των 48 Volts, ήτοι : $Q \text{ (Ah)} = E / V_s = 2500 \text{ Wh} / 48 \text{ Volts} = 52.08 \text{ Ah}$

Βήμα 8 : Διορθώσεις στις τιμές των Ah λόγω απωλειών στα επί μέρους σημεία του PV-συστήματος. Οι απώλειες θεωρούνται ίδιες όπως και προηγουμένως με την μέθοδο των Wh, εκτός από την πλευρά του κλάδου των συσσωρευτών, όπου στην προσεγγιστική αυτή μέθοδο η απόδοση σε Ah, (Ah)εισόδου/ (Ah)εξόδου , του συσσωρευτή, θεωρείται ίση με 100 %. • Στη

συνεχεία υπολογίζονται οι διορθωμένες τιμές των Ah ανά τύπο φορτίου (AC ή DC) και ανάλογα με την διαδρομή του ρεύματος μέχρι το φορτίο.

Σημείωση : Του διάφορους συντελεστές διορθώσεις εξετάσαμε προηγούμενος στην ενεργειακή μέθοδο. Επαναλαμβάνουμε την διόρθωση των φορτίων (Ah) σύμφωνα με τις προδιαγραφές της μεθόδου των Ah.

α) φορτία DC που καλύπτονται απευθείας από την PV- γεννήτρια, βλέπε 7ο βήμα : $8.33 \text{ Ah} \times 1.05 = 8.75 \text{ Ah}$

β) Φορτία DC που καλύπτονται μέσω συσσωρευτή : $12.5 \text{ Ah} \times 1.05 = 13.13 \text{ Ah}$

Σημείωση : Στην περίπτωση αυτή στη μέθοδο των Wh υποθέσαμε ως συντελεστή διόρθωσης το 1.25, καθώς λάβαμε υπ' όψιν την ενεργειακή απόδοση (Wh) του συσσωρευτή ,(Wh)εισόδου / (Wh)εξόδου , ίση με 0.8 βλέπε βήμα 7.

γ) Φορτία AC που καλύπτονται μέσω μετατροπής: $12.5 \text{ Ah} \times 1.2 = 15 \text{ Ah}$

δ) Φορτία AC που καλύπτονται μέσω συσσωρευτή και μετατροπέα: $18.75 \text{ Ah} \times 1.2 = 22.5 \text{ Ah}$

• Το σύνολο των Ah που θα πρέπει να παράγει η PV-γεννήτρια ώστε να αποδίδονται στα φορτία DC και AC, τα Ah που έχουν υπολογισθεί, όπως προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους ανωτέρων τιμών ισούται με : 59.38 Ah .

Βήμα 9 : Προσδιορισμός της μέσης ετήσιας έντασης ρεύματος από την PV- γεννήτρια.

Στο προηγούμενο βήμα (8ο) υπολογίσαμε το ολικό φορτίο σε Ah ανά ημέρα : 59.38 Ah . Επίσης γνωρίζουμε ότι η μέση ετήσια τιμή του (PSH)= 4.61 h . Επομένως η μέση τιμή ρεύματος i_{pn} που θα αποδίδει η PV- γεννήτρια κατά την διάρκεια του έτους όταν λειτουργεί θα ισούται με :

$$i_{pn} = 59.38 \text{ Ah} / 4.61 \text{ h} = 12.88 \text{ A}$$

Βήμα 10 : Προσδιορισμός των παραμέτρων $N_p, p, N_p, s,$ και N_p .

Ο αριθμός των παράλληλων σειρών PV- πλαϊσίων δίδεται από το λόγο της μέσης ετήσιας τιμής i_{pn} που θα δίνει η PV- γεννήτρια, στην περίπτωση μας 12.88 A , προς το ρεύμα i_m , που για τον τύπο των PV- πλαϊσίων που επιλέξαμε, είναι ίσο με $i_m = 3.15 \text{ A}$.

Επομένως : $(N_p) = 12.88 \text{ A} / 3.15 \text{ A} = 4.09$ Επειδή, το N_p πρέπει να είναι ακέραιο επιλέγουμε τον άμεσο πλησιέστερο ακέραιο. Προτιμούμε $N_p=4$. Από την γνωστή σχέση $P_m = i_m \times V_m$, παίρνουμε : $V_m = P_m / i_m = 47.65 \text{ W} / 3.15 \text{ A} = 15.13 \text{ Volts}$

Σημείωση 1 : Στο βήμα 9, στην ενεργειακή μέθοδο είχαμε υπολογίσει ότι $V_m = 17.4 \text{ Volts}$ χωρίς την διόρθωση λόγω της επίδρασης της αυξημένης θερμοκρασίας του PV- πλαισίου. Σύμφωνα με τον ανώτερο υπολογισμό η αύξηση της T_c προκαλεί ελάττωση της V_m στα 15.13 Volts. Εκεί στο βήμα 9 είχαμε υπολογίσει τη νέα τιμή P_m με βάση τη μεταβολή της V_{oc} λόγω της αύξησης της T_c .

Σημείωση 2 : Στην ενεργειακή μέθοδο, βήμα 10, υπολογίσαμε ότι λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας, η ισχύς που κάθε PV- πλαίσιο θα αποδίδει είναι 47.64 W ,ενώ η V_m , όπως ανώτερα υπολογίσαμε, ισούται 15.13 Volts. Επειδή αποφασίσαμε το φορτίο να αποδίδεται υπό 48 Volts ,ο αριθμός των PV- πλαισίων, εν σειρά, ισούται με: $N_s = 47.65 \text{ Volts} / 15.13 \text{ Volts} = 3.15$ Το N_s πρέπει να είναι ακέραιος. Για τούτο επιλέγουμε τον άμεσο πλησιέστερο ακέραιο, ήτοι $N_s=4$ Επομένως $N = 4 \times 4 = 16$ PV- πλαίσια Παρατηρούμε, ότι την ίδια λύση είχαμε και με την ενεργειακή μέθοδο (Wh) προσέγγιση του προβλήματος.

Παρατηρήσεις : 1.

Οι δυο μέθοδοι που παρουσιάζουμε δεν δίνουν ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα. Γενικά η μέθοδος των Wh δίνει αποτέλεσμα ελαφρώς πιο αισιόδοξα σε σύγκριση με την μέθοδο των Ah. Γιατί;

Απάντηση :

- Η μέθοδος των Wh αντιμετωπίζει το πρόβλημα της διαστασιολόγησης ως εάν η PV-γεννήτρια λειτουργεί πάντα περί το MPP και συνεπώς περί τη τάση V_m . Τούτο δεν συμβαίνει πάντα, αν και διορθώνεται κατά πολύ με το ηλεκτρικό σύστημα παρακολουθήσεις του MPP, καθώς : α) Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος, κυρίως το καλοκαίρι, η V_m μετατοπίζεται σε χαμηλότερες τιμές. β) Το χειμώνα όταν η τιμή της κατάστασης φόρτισης SOC, των συσσωρευτών είναι χαμηλή, τότε η τάση της PV- γεννήτριας, δηλαδή το σημείο λειτουργίας είναι μακριά από το MPP. • Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος των Ah λαμβάνει ως δεδομένο για την διαστασιολόγηση ότι το i_m είναι αυτό που δίνει ο κατασκευαστής για τις συνθήκες STC το οποίο μάλιστα ελαφρά αυξάνεται με την θερμοκρασία. • Γενικά μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι οι δυο μέθοδοι δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα και ότι οι πραγματικές τιμές

που δίνει η PV- γεννήτρια ευρίσκονται στο ενδιάμεσο των δυο μεθόδων. 2. Η διαστασιολόγηση θα μπορούσε να αντιμετωπισθεί ακόμη αναλυτικότερα απ' ότι ανώτερα με την μέθοδο των Ah ως εξής: Γνωρίζοντας το ολικό φορτίο (ανά μήνα) και το (PSH) ανά μήνα, ο λόγος τους δίνει το ρεύμα i_m που η PV- γεννήτρια πρέπει να δώσει για να φορτίσει τους συσσωρευτές καλύπτοντας τις ανάγκες ανά μήνα. Στην περίπτωση αυτή θα έχουμε τιμές του i_{rn} ανά μήνα και οικοδομούμε μια εξομοίωση του PV- συστήματος υπό μηνιαία λειτουργία.

- Ο μελετητής για τις διάφορες κλίσεις θα προσπαθήσει να βρει την κλίση εκείνη που του δίνει το μέγιστο ρεύμα i_{rn} . Τότε ο αριθμός N_p ευρίσκεται από το λόγο του i_{rn} προς το i_m , $N_p = i_{rn} / i_m$ ή καλλίτερα από την διορθωμένη τιμή I_{rn} όπου $I_{rn} = i_{rn} / 0.9$, ώστε να ληφθεί υπόψη η γήρανση των PV- πλαισίων και η επικαθίσει σκόνης επί των PV- πλαισίων.
- Αναλυτικά αυτή η μέθοδος των Ah δεν βασίζεται στη μέση ετήσια ή μηνιαία τιμή του PSH. Ακολουθείται ως μεθοδολογία όταν απαιτείται μια σοβαρή μελέτη για τη διαστασιολόγηση των συσσωρευτών, ώστε να ληφθεί υπ' όψιν η εποχιακή φόρτιση καθώς η αποδιδόμενη ενέργεια τον χειμώνα είναι μικρότερη του φορτίου ενώ κατά τη περίοδο του καλοκαιριού υψηλότερη.
- Η αναλυτική μέθοδος των Ah βασίζεται στη ελάχιστη τιμή του ρεύματος i_{rn} κατά τους μήνες του έτους όποτε δίνει μεγαλύτερη διάσταση στη PV- γεννήτρια ώστε να καλύπτει πάντα το φορτίο και τον χειρότερο μήνα. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η επιπλέον παραγόμενη εν

4.3 Διαστασιολόγηση συσσωρευτών

Βήμα 1 :

Εφαρμόζουμε τις σχέσεις και το σκεπτικό περί κρίσιμων και μη- κρίσιμων φορτίων για το πρόβλημα που αναλύσαμε στο προηγούμενο πρόβλημα. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι επειδή τα φορτία μας τα θεωρούμε μη- κρίσιμα και καθώς θα ενσωματώσουμε συμπληρωματική συμβατική πηγή ενέργειας στο σύστημα των συσσωρευτών που θα χρησιμοποιηθεί έχει τόση χωρητικότητα ώστε να δίνει ενεργειακή αυτοδυναμία 3 ημερών, δηλαδή $d= 3$ ημέρες.

$$d_{cr} = -1.9 \times (PSH)_{min} + 18.3 \text{ (days)}$$

$$d_{n-cr} = -0.48 \times (PSH) + 4.58 \text{ (days)}$$

Βήμα 2: Προσδιορισμός του φορτίου αποθήκευσης για $d= 3$ ημέρες.

α) Μέθοδος Wh

Το πρόβλημα, καθώς υπολογίσαμε, απαιτεί κάλυψη ημερήσιου φορτίου ενέργειας 2.5 kWh το οποίο θα μεταφέρεται υπό τάση 48 Volts. Επομένως : $2500 \text{ Wh/day} \times 3 \text{ days} / 48 \text{ Volts} = 156.25 \text{ Ah}$

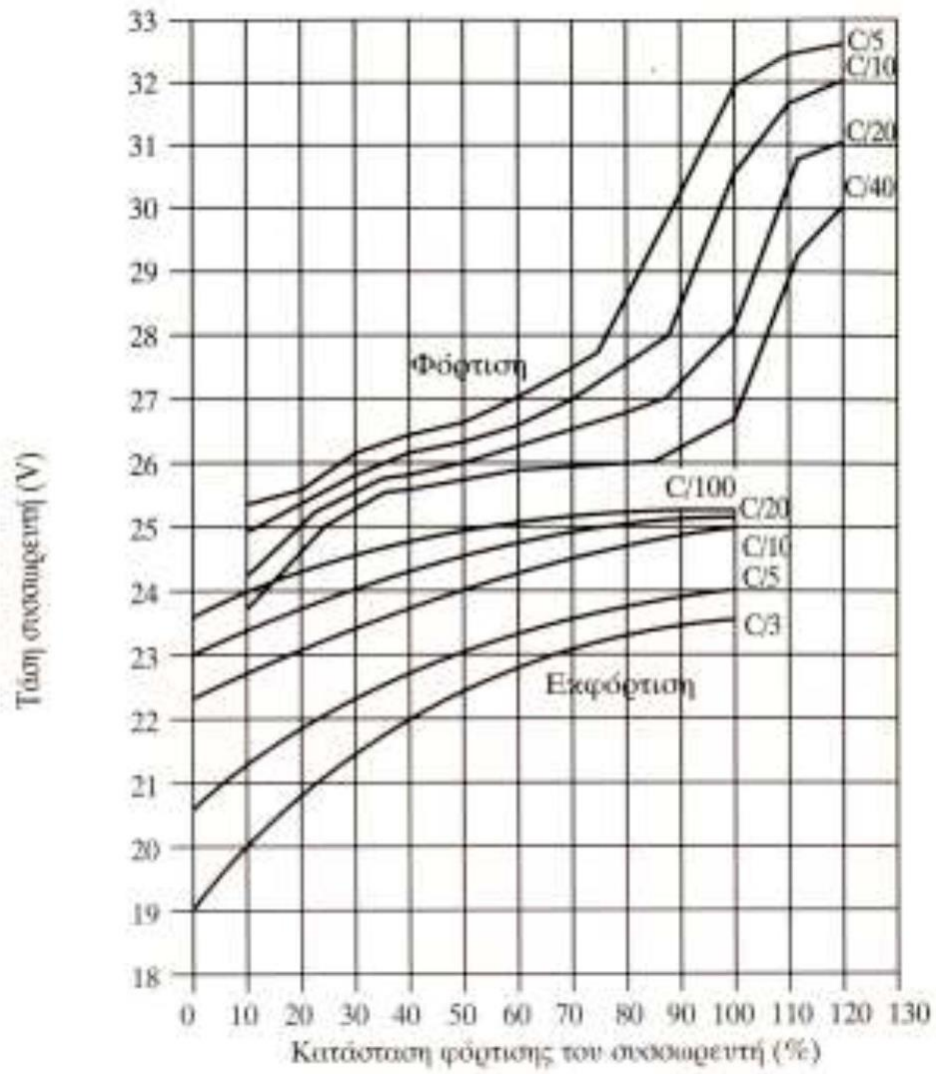
β) Μέθοδος Ah

Όπως είδαμε στο βήμα 7 της μεθόδου Ah, τα Ah ανά ημέρα που θα αποδοθούν στους καταναλωτές / φορτία ή στην αποθήκη / συσσωρευτές είναι ίσα με 52.08 Ah. Επομένως για 3 ημέρες θα αποθηκευθούν: $52.08 \text{ Ah} \times 3 \text{ days} = 156.25 \text{ Ah}$ Παρατηρούμε την σύμπτωση των δυο μεθόδων στον προσδιορισμό του ημερήσιου φορτίου προς αποθήκευση.

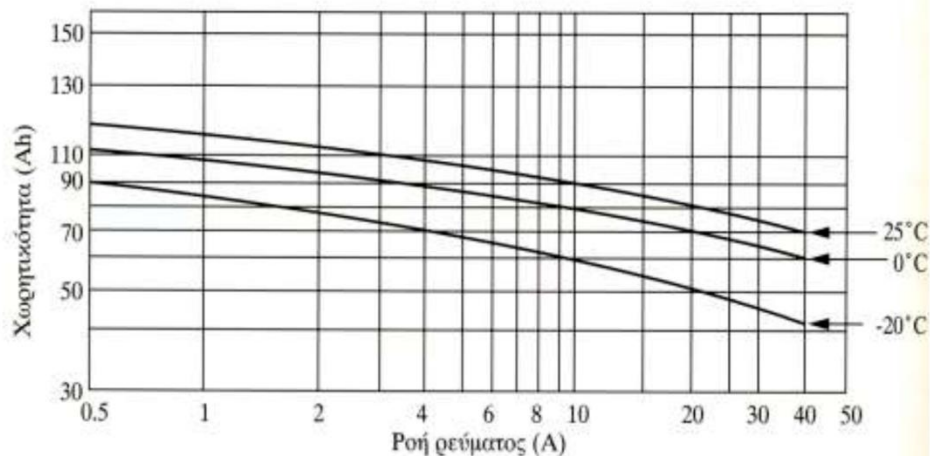
Παρατήρηση : Στο βήμα αυτό δεν έγιναν διορθώσεις λόγω απωλειών στις διάφορες διαδρομές βλέπε σχήμα 4.6 ούτε λόγω γήρανση ή ταχύτητας φόρτισης ή εκφόρτισης, θερμοκρασίας κ.λ.π..

Βήμα 3: Διορθώσεις στην τιμή των Ah συσσωρευτών.

Η θερμοκρασία των συσσωρευτών επηρεάζει την απόδοση του όπως επίσης και η ταχύτητα φόρτισης / εκφόρτισης σχήμα 4.7 . Ακόμη είδαμε ότι η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή ελαττώνεται για μικρότερες θερμοκρασίες από την κανονική. Ομοίως για μεγάλους ρυθμούς φόρτισης / εκφόρτισης όπως δείχνει το σχήμα 4.8 .



Σχήμα 4.7 Η πολική τάση ως συνάρτηση του ρυθμού φόρτισης και εκφόρτισης και της κατάστασης φόρτισης, (SOC) , για πολική τάση 24 Volts.



Σχήμα 4.8 Διάγραμμα που δείχνει την μεταβολή της χωρητικότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και του ρυθμού εκφόρτισης για τον συσσωρευτή Delco 2000.

Για τους συσσωρευτές ισχύει η ακολουθεί διόρθωση της χωρητικότητας λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας : $f_{b,T} = C / C_0 = \text{χωρητικότητα σε } T \text{ } ^\circ\text{C} / \text{χωρητικότητα στους } 25 - 27 \text{ } ^\circ\text{C} = 0.001035 \times \text{oC} + 0.724 = 1$

Βήμα 4 : Προσδιορισμός του συντελεστή διόρθωσης λόγω ταχύτητας φόρτισης /εκφόρτισης $f_{b,cd}$.

Εάν προβλέπεται από την ανάλυση των φορτίων ότι κατά την εκφόρτισης των συσσωρευτών προς τα φορτία, ο ρυθμός εκφόρτισης θα υπερβεί αυτόν που συνιστά ο κατασκευαστής, για χρονικό διάστημα των 10', τότε θα πρέπει να εισάγουμε διόρθωση στην χωρητικότητα των συσσωρευτών. Σύμφωνα με την διαστασιολόγηση της PV- γεννήτριας έχουμε 4 σειρές PV-πλαισίων, εν παραλλήλω. Επομένως το ρεύμα φόρτισης θα είναι ίσο με :

$$i = i_m (\text{το ρεύμα κάθε σειράς}) \times 4 \text{ σειρές} = 3.15 \text{ A} \times 4 = 12.6 \text{ A}$$

Εαν ο ρυθμός φόρτισης των συσσωρευτών από την PV- γεννήτρια πολλαπλασιασθεί επί 10 h και δώσει τιμή Ah υψηλότερη αυτής που δίνει η επόμενη σχέση (Cr) τούτο συνεπάγεται ότι η PV-γεννήτρια φορτίζει τους συσσωρευτές σε λιγότερο από 10 h που είναι η κανονική περίοδος φόρτισης του συσσωρευτή.

$$(i_{ch} \times 10 \text{ h}) \text{ Ah} = 12.6 \text{ A} \times 10 \text{ h} = 126 \text{ Ah}$$

Επόμενος η διορθωμένη χωρητικότητα του συσσωρευτή υπολογίζεται από την σχέση :

$$Cr = C (Ah/day) / fb,T \times fc,cd \times DODCr = 52.08 Ah/day \times 3 days / 1 \times 1 \times 0.8 = 195.3 Ah$$

Επόμενος σύμφωνα με τα ανώτερα, η τιμή της Cr θα είναι 195.3 Ah, με την προϋπόθεση ότι $fc,cd = 1$ δηλαδή ότι ο ρυθμός φόρτισης δεν υπερβαίνει αυτόν που συνιστά ο κατασκευαστής για τον τύπο που θα επιλέξουμε. Τέλος επειδή $Cr > ich \times 10h = 126 Ah$, δεχόμεθα ότι η χωρητικότητα του συσσωρευτή είναι 195.3 Ah και δεν θα πρέπει να επιφέρουμε άλλη διόρθωση.

Βήμα 5 : Προσδιορισμός του τύπου του συσσωρευτή.

Ο τύπος αυτός θα προσδιοριστεί ως βέλτιστη λύση που θα καλύπτει προ- διαγραφές αλλά και προϋποθέσεις όπως εκτίθενται στην συνέχεια:

1. Η συνολική χωρητικότητα που στην περίπτωση μας είναι 195.3 Ah ήτοι περίπου 200 Ah.
2. Η τάση υπό την οποία το φορτίο αποδίδεται στους καταναλωτές μέσω του μετατροπέα DC/AC ή απευθείας. Στην περίπτωση μας είναι 48 Volts.
3. Επίσης θα πρέπει ο τύπος του συσσωρευτή να ικανοποιεί την προϋπόθεση για την τιμή DOD. Εάν δηλαδή το DOD θα έχει αντίστοιχα τιμή 0.8 ή 0.2 ή 0.5 κ.λ.π. . Σε εφαρμογές όπου τα φορτία-καταναλωτές θεωρούνται κρίσιμα για να αυξήσουμε το χρόνο ζωής του συσσωρευτή προτιμούνται συσσωρευτές με $DOD > 0.2$.
4. Η απόφαση να χρησιμοποιήσουμε περισσότερους συσσωρευτές μικρούς σε όγκο, βάρος αλλά και χωρητικότητα αντί ενός ή δυο μεγάλων συσσωρευτών έστω και αν το κόστος στην δεύτερης περίπτωσης είναι μικρότερο δεν είναι ήσσονος σημασίας. Η απόφαση θα εξαρτηθεί από την ευκολία συντήρησης των συσσωρευτών και την διάθεση τους ανά πάσα στιγμή στη αγορά. Επίσης πρέπει να εξετασθεί η περίπτωση όπου εάν ένας συσσωρευτής βγει εκτός τότε το σύστημα αποτελείται από πόλους (μικρούς) συσσωρευτής, το PV- σύστημα δεν θα υποστεί πλήγμα αλλά θα λειτουργεί πρόσκαιρα με μικρότερη, χωρητικότητα αποθήκευσης, έναντι της περίπτωσης 1 ή 2 μεγάλων συσσωρευτών.
5. Από την πραγματική αξία των συσσωρευτών λαμβανομένου υπ' όψιν του αριθμού κύκλων ζωής, του χρόνου ζωής κ.λ.π. .

Μετά από όλα αυτά προχωρούμε στην τελική φάση επιλογής του τύπου των συσσωρευτών και της συνδεσμολογίας τους.

α. GNB Absolyte με:

C (Ah)	V (Volts)	DOD	Κύκλος εκφόρτισης / φόρτισης	Χρόνος ζωής (έτη)
42	6	0.5	1000	2.7
59	12	0.8	1000	2.7
202	12	0.8	3000	8

β. Exide Tubular Modylar με:

C (Ah)	V (Volts)	DOD	Κύκλος εκφόρτισης / φόρτισης	Χρόνος ζωής (έτη)
192	12	0.15	4100	10

γ. Delco – Remy Photovoltaic με:

C (Ah)	V (Volts)	DOD	Κύκλος εκφόρτισης / φόρτισης	Χρόνος ζωής (έτη)
105	12	0.2	850	2.3

δ. Globe με:

C (Ah)	V (Volts)	DOD	Κύκλος εκφόρτισης / φόρτισης	Χρόνος ζωής (έτη)
80	12	0.8	250	<1

Πίνακας 4.7 Τύποι συσσωρευτών και τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών τους

Από τους ανωτέρω διαθέσιμους τύπους συσσωρευτών αυτός με χαρακτηρίσθηκα C= 59 Ah, V= 12 Volts, DOD= 0.8 ικανοποιεί τους ανωτέρω συνδυασμούς προϋπο- θέσεων καθώς απαιτούνται 4 συσσωρευτές αυτού του τύπου εν σειρά 12 Volts × 4 = 48 Volts για φόρτιση / εκφόρτισης μέσω αντιστροφέα DC / AC. Επίσης με 4 συσσωρευτές εν παραλλήλω επιτυγχάνουμε συνολική χωρητικότητα 4 × 59 Ah = 236 Ah που ακριβώς υπερκαλύπτει τα 195.3 Ah. Αντίθετα οι άλλοι τύποι έχουν μεγάλη χωρητικότητα π.χ. 192 Ah ή 202 Ah ακόμα και 105 Ah και η ολική

απαιτούμενη χωρητικότητα των 195.3 Ah καλύπτει από 1 ή 2 τέτοιου τύπου συσσωρευτές που σύμφωνα με τις προδιαγραφές του πίνακα 4.7. δίδουν τάση 12 Volts αλλά έχουν χαμηλό DOD. Αν η λύση αυτή προκριθεί τότε απαιτούνται DC/DC μετατροπείς ώστε η τάση των 12 Volts ή 24 Volts να ανυψωθεί σε 48 Volts και αντίστροφος η τάση της PV- γεννήτριας που είδαμε ότι είναι 48 Volts να υποβιβάζεται στα 12 Volts όταν φορτίζει τους συσσωρευτές. Όλα αυτά βέβαια εξαρτώνται από την τελική συνδεσμολογία της PV- διάταξης

Βήμα 6 : Επιβεβαίωση ότι κατά την εκφόρτισης η τιμή του DOD δεν ξεπερνά τα όρια που δίνει ο κατασκευαστής.

Υπολογίσαμε προηγούμενος στο βήμα 7 της μεθόδου των Ah, ότι ημερησίως απαιτούνται 52.08 Ah. Το σύστημα των 4 συσσωρευτών που επιλέξαμε στο προηγούμενο βήμα (59 Ah έκαστος και DOD = 0.8) θα πρέπει να συνδεθούν εν παραλλήλω και εν σειρά ως εξής :

A) Εν σειρά : $N_{b,s} = V_s / V_b = 48 \text{ Volts} / 12 \text{ Volts} = 4$ συσσωρευτές

B) Εν παραλλήλω : $N_{b,p} = Q_L \times d / DOD \times C = (2500 \text{ Wh/day} / 48 \text{ Volts}) \times 3 \text{ days} / 0.8 \times 59 \text{ Ah} = 3.31$ Λαμβάνοντας τον πλησιέστερο προς τα άνω ακέραιο προκύπτει $N_{b,p} = 4$

Το ποσοστό εκφόρτισης σε μια ημέρα ισούται με : $52.08 \text{ Ah} / 236 \text{ Ah}$ (λόγω του ότι έχουμε 4 συσσωρευτές εν παραλλήλω) = 0.22 ή 22 % τιμή που ευρίσκεται κάτω του ορίου του 80 % που δίνει ο κατασκευαστής

4.4 Οικονομική ανάλυση και σχετικά μεγέθη

Ωστόσο ένα μεγάλο ζήτημα που ο μηχανικός θα πρέπει να εξετάσει συν τοις άλλοις, είναι αυτό της Παρούσας Άξιας (Π.Α.) των συσσωρευτών, αφού λάβει υπ' όψιν του και την διάρκεια ζωής τους αλλά και τον κύκλο εκφόρτισης / φόρτισης. Η Π.Α. θα υπολογισθεί με το εξής σκεπτικό:

1. Έστω ότι ο δείκτης πληθωρισμού , π , είναι 2 % και

2. ότι ένα κεφαλαίο A_0 το οποίο είναι αναγκαίο για την προμήθεια ενός αγαθού π.χ. PV-πλαισίων, συσσωρευτών κ.λ.π. μπορεί να τοκισθεί με επιτόκιο ϵ %.

3. Έστω ότι το αγαθό κοστίζει N_0 ευρώ το χρόνο που αποφασίζεται η εγκατάσταση του PV-συγκροτήματος

Προφανώς : $A_0 = N_0$ Ωστόσο αν το κεφάλαιο A_0 τοκισθεί , τότε μετά από n έτη θα γίνει : $A(n) = A_0 (1 + \epsilon)^n$

Ενώ το κόστος του αγαθού μετά n έτη θα απαιτεί ποσό για να αγορασθεί ίσο με : $N(n) = N_0 (1 + \pi)^n$

4. Βέβαια, σύμφωνα με την ορολογία της αγοραστικής δύναμης αποφαινόμεστε ότι εάν με A_0 ευρώ αγοράζουμε σήμερα αντικείμενα αξίας N_0 ευρώ τούτο δεν θα ισχύει μετά από την πάροδο n ετών, δηλαδή : $A_n \neq N_n$

5. Προφανώς ισχύει η θέση ότι, εάν η δαπάνη για την προμήθεια ενός αντικειμένου αυξάνει με ρυθμό μεγαλύτερο της αύξησης του κεφαλαίου (επιτόκιο ϵ %) τότε πρέπει η αγορά να γίνει άμεσα.

Ωστόσο, το αντίστροφο δεν είναι ισοδύναμο γιατί εάν κάποιος περιμένει να αυξηθεί το κεφαλαίο για να αγοράσει το αντικείμενο π.χ. PV- πλαίσια, συσσωρευτές κ.λ.π. τότε πιθανόν αυτά να μην είναι στη διάθεση της αγοράς όποτε το αποφασίζει αλλά να έχουν αντικατασταθεί από άλλα είδη ή τύπους.

6. Με αυτά τα δεδομένα ορίζουμε τον συντελεστή παρούσας αξίας c_n ως το λόγο των $A(n) / N(n)$ ήτοι : $c_n = A(n) / N(n) = (1 + \pi / 1 + \epsilon)^n$ που βοηθά στον προσανατολισμό της Π.Α. σε σημερινές τιμές για αγορά αντικειμένων (π.χ. συσσωρευτές), n χρόνια αργότερα π.χ. $n = 2, 3, 4$, όπου δηλαδή θα πρέπει να αγοραστούν (νέοι) συσσωρευτές λόγω πέρατος της ζωής του

7. Η πραγματική αξία σε σημερινές τιμές από την σχέση : Π.Α. = $c_n \times N_0$

1 η . Λύση Ας θεωρήσουμε ότι η 1η λύση έδωσε 4 συσσωρευτές των 59 Ah , που έχουν χρόνο ζωής 2.7 έτη ο καθένας. Ας υποθέσουμε κόστος ανά συσσωρευτή 150 ευρώ .

2 η . Λύση Ας θεωρήσουμε ότι η δεύτερη λύση έδωσε 1 συσσωρευτή των 200 Ah και με χρόνο ζωής 8 έτη. Ας υποθέσουμε ως κόστος του συσσωρευτή τα 850 ευρώ. Επειδή η εγκατάσταση θα έχει διάρκεια ζωής περίπου τα 15 - 20 χρόνια, ας θεωρήσουμε για λόγους απλούστευσης τα 16 χρόνια για να γίνουν ευκολότερα οι υπολογισμοί. Κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου θα αντικαταστάσιμου 5 φορές τους συσσωρευτές των 59 Ah και μόνο 1 φορά αυτόν των 200 Ah. Η Π.Α. αγοράς των συσσωρευτών με 2.7 χρόνια ζωής των , και αυτήν των συσσωρευτών (2η λύση) με 8 χρόνια και με την υπόθεση ότι ο πληθωρισμός είναι 2 % και με ένα επενδυτικό επιτόκιο περίπου 10 %, θα υπολογισθεί ως ακολούθως. Από την σχέση ο συντελεστής Π.Α. , c_n ισούται με :

$$c_n = A(n) / N(n) = (1 + \pi / 1 + \epsilon)^n \quad c_n = (1 + 0.02) / (1 + 0.1) = 0.92727$$

Λαμβάνουμε $n = 2.7, 5.4, 8.1, 10.8, 13.5$ χρόνια (1 η λύση)

n = 8 χρόνια (2 η λύση)

Σημείωση : Οι αριθμοί δείχνουν τους χρόνους κατά τους οποίους θα γίνουν οι αντικαταστάσεις των συσσωρευτών των δυο ανώτερων τύπων. Υπολογίζουμε την τιμή cv^n και στην συνέχεια την παρούσα αξία (Π.Α.) αγοράς των συσσωρευτών για τις τιμές του, n , που αναφέρονται στην ανωτέρω με βάση τις δυο τελευταίες σχέσεις που αναφέραμε. Νο είναι η τιμή της αγοράς των συσσωρευτών το χρόνο της μελέτης ή της πρώτης εγκατάστασης. Έστω ότι $No = 150$ Euros ανά συσσωρευτή των 50 Ah και $No = 850$ Euros ανά συσσωρευτή των 200 Ah Μετά τα ανωτέρω προκύπτει ο ακόλουθος Πίνακας για την οικονομική σύγκριση της αγοράς των συσσωρευτών.

	50 Ah	200 Ah
Αρχική αγορά	$4 \times 150 \text{ Euros} = 600 \text{ Euros}$	$1 \times 850 \text{ Euros}$
2.7 χρόνια	$600 \text{ Euros} \times cv^n = 456 \text{ Euros}$	
5.4 χρόνια	$600 \text{ Euros} \times cv^n = 399 \text{ Euros}$	
8.1 χρόνια	$600 \text{ Euros} \times cv^n = 325 \text{ Euros}$	465 Euros
10.8 χρόνια	$600 \text{ Euros} \times cv^n = 265 \text{ Euros}$	
13.5 χρόνια	$600 \text{ Euros} \times cv^n = 216 \text{ Euros}$	
Σύνολο	2294 Euros	1315 Euros

Πίνακας 4.8 : Σύγκριση των τιμών

Συμπέρασμα : Είναι προφανές ότι η αγορά ενός μόνο μεγάλης χωρητικότητας συσσωρευτή ο οποίος να ικανοποιεί και τα τεχνικά χαρακτηρισθήκα όπως διερευνήσαμε με το προηγούμενο πρόβλημα, φαίνεται να είναι οικονομικότερη Οικονομικότερη είναι βέβαια και από την άποψη ότι και η συντήρηση των 4 τεμαχίων είναι ακριβότερη από αυτή του ενός αλλά και οι συνδέσεις είναι περισσότερες και προφανώς μεγαλύτερη και η πιθανότητα εμφάνισης προβλημάτων. Τέλος δεν είναι ευκαταφρόνητο το υψηλότερο κόστος των καλωδιώσεων με τους 4 συσσωρευτές. Ωστόσο έχοντας υιοθετήσει την εγκατάσταση ενός μόνο συσσωρευτή, τότε μια πιθανή δυσλειτουργία ή εμφάνιση κάποιου προβλήματος, θα επηρεάσει την όλη PV-εγκατάσταση σε κρίσιμο βαθμό.

Διερεύνηση : Η ανάλυση αυτή που παρουσιάσαμε και ιδιαίτερα η 2η λύση βασίζεται σε μια αδιερεύνητη υπόθεση : Ότι δηλαδή είναι δυνατόν να λειτουργήσει το σύστημα αποθήκευσης με

έναν μόνο συσσωρευτή, έστω αν αυτός καλύπτει την απαίτηση της χωρητικότητας η ότι 200 Ah έναντι των 191 Ah;

Μήπως υπάρχουν και άλλες απαιτήσεις που πρέπει να πληροί ο συσσωρευτής ή καλύτερα το σύστημα των συσσωρευτών; Εάν επί παραδείγματι η τάση στα άκρα των συσσωρευτών θα πρέπει να είναι 48 Volts , τότε για τον συσσωρευτή του τύπου GNBAbsolute απαιτούνται 4 μονάδες εν σειρά όπως περιγράφεται στη μεθοδολογία αυτή στο 5ο βήμα, ενώ στη οικο- νομικότερη ανάλυση λάβαμε μόνο μια μονάδα αυτού του τύπου. Επομένως στην ανάλυση που ακολουθήσαμε κάναμε λάθος με το να υπο- λογίσουμε την αξία για ένα μόνο συσσωρευτή, ενώ απαιτούνται 4. Συνεπώς οι τιμές στην 2η λύση του Πίνακα 4.8 θα πρέπει να τετραπλασιαστούν και κατά συνέπεια η οικονομικότερη τελικά λύση είναι αυτή των μικρότερων, 50 Ah, συσσωρευτών. Τελικά για μια πλήρη οικονομοτεχνική ανάλυση π.χ. L. C. C. (LifeCycleCost). Ανάλυση, απαιτείται η γνώση όχι μόνο του τύπου των συσσωρευτών αλλά και η λεπτομερή συνδεσμολογία ολόκληρης της διάταξης, ώστε να προχωρήσει κανείς σε οικονομικότερη σύγκριση των τεχνικών λύσεων

Παρατήρηση : 1. Οι συσσωρευτές με την μεγαλύτερη χωρητικότητα γηράσκουν αργότερα, καθώς η εκφόρτιση τους δε είναι τόσο βαθιά. 2. Στην μελέτη μας αυτή μια εφικτή λύση θα μπορούσε να ήταν αυτή των συσσωρευτών τύπου ExideTubular των 192 Ah με 12 Volts και DOD = 0.15. 3. Για μια πλήρη μελέτη διαστασιολόγησης PV- συστημάτων με εν- σωματωμένη την L.C.C. ανάλυση με ειδικά προγράμματα σε Excel φιλικά στον μελετητή μηχανικό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μπιτζιώτης Β, & Μπιτζιώτης Δ (2011) Εναλλακτικές μορφές ενέργειας Θεσσαλονίκη: Τζιόλα
2. Καλδέλλης Ι, & Καββαδίας Κ. (2001) Εργαστηριακές μορφές ήπιων μορφών ενέργειας Αθήνα: Σταμούλη
3. Πέρδιος, Δ. Σ. (2007) Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Αθήνα ΤεΚΔΟΤΙΚΗ
4. Φραγκιαδάκης, Ι.(2006) Φωτοβολταϊκά συστήματα, Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ
5. Κάπος, Μ Μ. Φωτοβολταϊκά, αιολικά υδροηλεκτρικά, Αθήνα: Κάπος