

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

# **ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΤΑΓΜΕΝΩΝ ΣΕ ΣΤΕΓΕΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΑΤLAB**

**Περωνικολής Μιχαήλ**



Εξεταστική Επιτροπή: Καθ. Σταυρακάκης Γεώργιος (Επιβλέπων)  
Καθ. Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος  
Επίκ. Καθ. Μπούχερ Ματτίας

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Σταυρακάκη Γεώργιο, για την καθοδήγησή του, τη συνεργασία και την πολύτιμη συμβολή του σε κάθε φάση της δημιουργίας της, τον Καθηγητή κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο και τον Καθηγητή κ. Μπούχερ Ματτία για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Τσικαλάκη Αντώνιο για τις πολύτιμες συμβουλές του για την εκπόνηση της διπλωματικής μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η μελέτη εγκατάστασης απομονωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων αλλά και συστημάτων συνδεδεμένων στο εθνικό δίκτυο για την Ιεράπετρα Κρήτης. Με τη χρήση του λογισμικού Matlab έφτιαξα σε δύο αρχεία m-file δύο προγράμματα. Στο πρώτο πραγματοποιήθηκε με όλες τις παραμέτρους η μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων τόσο απομονωμένων όσο και συνδεδεμένων στο εθνικό δίκτυο για την περιοχή Ιεράπετρας. Στο δεύτερο πραγματοποιήθηκε μια μέθοδος στην οποία βελτιστοποιείται η διαχείριση της ενέργειας σε φωτοβολταϊκά συστήματα συνδεδεμένα στο εθνικό δίκτυο με στόχο την αύξηση του κέρδους του παραγωγού φωτοβολταϊκών από την πώληση της ενέργειας στο δίκτυο και μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται απ' το δίκτυο χάρις τις συμπληρωματικές πηγές.

***Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν είναι απλώς εναλλακτικές μορφές ενέργειας, αλλά η νομοτελειακή συνέχεια ενός πλανήτη που δεν αντέχει περισσότερη ενεργειακή αφαίμαξη με τρόπους που ούτως ή άλλως τον καταπονούν.***

Σωτήρης Χιωτάκης

# Περιεχόμενα

|                                                                                                    |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.1 Εισαγωγή .....                                                                                 | 6         |
| 1.2 Η δομή της εργασίας .....                                                                      | 8         |
| <b>2. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....</b>                                                                    | <b>9</b>  |
| 2.1 Ηλιακή ενέργεια .....                                                                          | 9         |
| 2.2 Ηλιακή ακτινοβολία.....                                                                        | 9         |
| 2.3 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας .....                                                              | 10        |
| 2.3.1 Μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας.....                                                           | 12        |
| 2.3.2 Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας.....                                                         | 12        |
| 2.4 Ακτινοβολία ενός Ήλιου.....                                                                    | 13        |
| 2.5 Υπολογισμός ακτινοβολίας σε σκιασμένες επιφάνειες.....                                         | 17        |
| 2.5.1 Ακτινοβολία σε μή σκιασμένες επιφάνειες .....                                                | 18        |
| 2.6 Μετακίνηση μεταξύ ήλιου και γής.....                                                           | 20        |
| 2.7 Ο προσανατολισμός του συλλέκτη.....                                                            | 21        |
| 2.7.1 Στοιχεία προσδιορισμού του προσανατολισμού ενός συλλέκτη.....                                | 22        |
| 2.8 Τρόποι στήριξης συλλεκτών και προσανατολισμός τους.....                                        | 23        |
| <b>3.ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ.....</b>                                                                | <b>31</b> |
| 3.1 Η δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου.....                                                        | 31        |
| 3.2 Αρχές λειτουργίας.....                                                                         | 32        |
| 3.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....                                                                 | 33        |
| 3.4 Χαρακτηριστική I-V σε συνθήκες φωτεινότητας.....                                               | 37        |
| 3.5 Ρεύμα βραχυκύκλωσης και τάση ανοικτοκύκλωσης.....                                              | 39        |
| 3.6 Ισοδύναμο κύκλωμα για το ιδανικό στοιχείο.....                                                 | 40        |
| 3.7 Σημείο μέγιστης ισχύος.....                                                                    | 40        |
| 3.8 Παράγοντας πλήρωσης (Fill Factor) και αποδοτικότητα μετατροπής ενέργειας.....                  | 43        |
| 3.9 Υλικά κατασκευής φωτοβολταϊκών διατάξεων.....                                                  | 45        |
| 3.10 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο.....                                                                     | 47        |
| 3.11 Φωτοβολταϊκά πάνελ και συστοιχίες.....                                                        | 51        |
| 3.12 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια.....                                                                   | 53        |
| 3.13 Συνδεσμολογία ΦΒ συστοιχιών.....                                                              | 54        |
| 3.14 Κατηγορίες ΦΒ συστημάτων.....                                                                 | 55        |
| 3.14.1 Φωτοβολταϊκά πάρκα.....                                                                     | 60        |
| <b>4. ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ-ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ- ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ).....</b>                        | <b>61</b> |
| 4.1 Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές.....                                                                    | 61        |
| 4.2 Παράγοντες που επιρεάζουν την απόδοση των συσσωρευτών και χαρακτηριστικά λειτουργίας τους..... | 58        |
| 4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των συσσωρευτών και χαρακτηριστικά λειτουργίας τους..... | 62        |
| 4.2.1 Εσωτερική αντίσταση και ρυθμός εκφόρτισης .....                                              | 62        |
| 4.2.2 Θερμοκρασία .....                                                                            | 64        |
| 4.2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτών.....                                                       | 65        |
| 4.3 Συσσωρευτές μολύβδου - οξέος .....                                                             | 70        |

|                                                                                             |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.1 Διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης .....                                                  | 71         |
| 4.4 Χωρητικότητα συσσωρευτή.....                                                            | 73         |
| 4.5 Χρόνος ζωής συσσωρευτή.....                                                             | 73         |
| 4.6 ρυθμιστές τάσης.....                                                                    | 74         |
| 4.7 Μετατροπείς.....                                                                        | 75         |
| 4.7.1 Μετατροπείς ισχύος DC/AC .....                                                        | 77         |
| 4.7.2 Μετατροπείς DC/DC.....                                                                | 79         |
| <b>5. ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΤΕΓΕΣ ΚΤΗΡΙΩΝ.....</b>                          | <b>82</b>  |
| 5.1 Μελέτη εγκατάστασης απομονωμένων ΦΒ συστημάτων.....                                     | 82         |
| 5.2 Μελέτη εγκατάστασης ΦΒ συστημάτων συνδεδεμένων στο εθνικό δίκτυο .....                  | 95         |
| <b>6. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ .....</b>                                | <b>100</b> |
| 6.1 Εισαγωγή.....                                                                           | 100        |
| 6.2 Ανάλυση της μεθόδου.....                                                                | 101        |
| 6.2.1 Αρχιτεκτονική συστήματος.....                                                         | 101        |
| 6.2.2 Αντίκτυπος των χαρακτηριστικών διακοπής.....                                          | 102        |
| 6.2.3 Διατύπωση του προβλήματος.....                                                        | 103        |
| 6.2.4 Περιγραφή περιορισμών.....                                                            | 104        |
| 6.3 Μελέτη εγκατάστασης ΦΒ συστημάτων με τη χρήση Matlab.....                               | 108        |
| <b>7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>                                                                | <b>110</b> |
| 7.1 Αποτελέσματα μελέτης.....                                                               | 110        |
| 7.1.2 Ο ρόλος της βελτιστοποίησης στο σχεδιασμό κατανάλωσης.....                            | 111        |
| 7.1.3 Ο ρόλος της βελτιστοποίησης όσον αφορά την αβεβαιότητα.....                           | 115        |
| 7.2 Αποτελέσματα μελέτης εγκατάστασης ΦΒ.....                                               | 117        |
| 7.2.1 Αποτελέσματα μελέτης εγκατάστασης απομονωμένων ΦΒ συστημάτων....                      | 117        |
| 7.2.2 Αποτελέσματα μελέτης εγκατάστασης ΦΒ συστημάτων διασυνδεδεμένα στο εθνικό δίκτυο..... | 120        |
| <b>8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>                                          | <b>124</b> |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>                                                                   | <b>125</b> |
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>                                                                       | <b>127</b> |

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας έχουν εμφανιστεί πρωτόγνωρες κλιματικές καταστάσεις σε όλες τις περιοχές του πλανήτη μας καθώς οι ειδικοί επιστήμονες κρούουν τον κώδωνα του κινδύνου για τις βλαβερές συνέπειες που επιφέρει η ευρεία χρήση των παραγώγων του πετρελαίου. Ταυτόχρονα όμως, εντείνονται και οι προσπάθειες εξεύρεσης νέων ενεργειακών πόρων, καθώς το ενεργειακό πρόβλημα αποκτά συνεχώς μεγαλύτερες διαστάσεις. Τα κοιτάσματα πετρελαίου κάποια στιγμή θα εξαντληθούν (σχήμα 1.1) συνεπώς επιβάλλεται η αναζήτηση νέων πηγών ενέργειας.

Η ενέργεια αποτελεί βασικό όρο για κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα. Ανέκαθεν γίνονταν προσπάθειες ώστε να χρησιμοποιείται η ενέργεια προς όφελος της βελτίωσης της ποιότητας ζωής του ανθρώπου. Η παραγωγή ενέργειας πλέον έχει να επιδείξει μεγάλη ποικιλία μεθόδων οι οποίες εξελίσσονται ανάλογα με τα αποτελέσματα της νεότερης επιστήμης. Λόγω της εκτιμώμενης ανεπάρκειας των συμβατικών μορφών ενέργειας εμφανίστηκαν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες αναπτύσσονται με ταχύτατο ρυθμό.

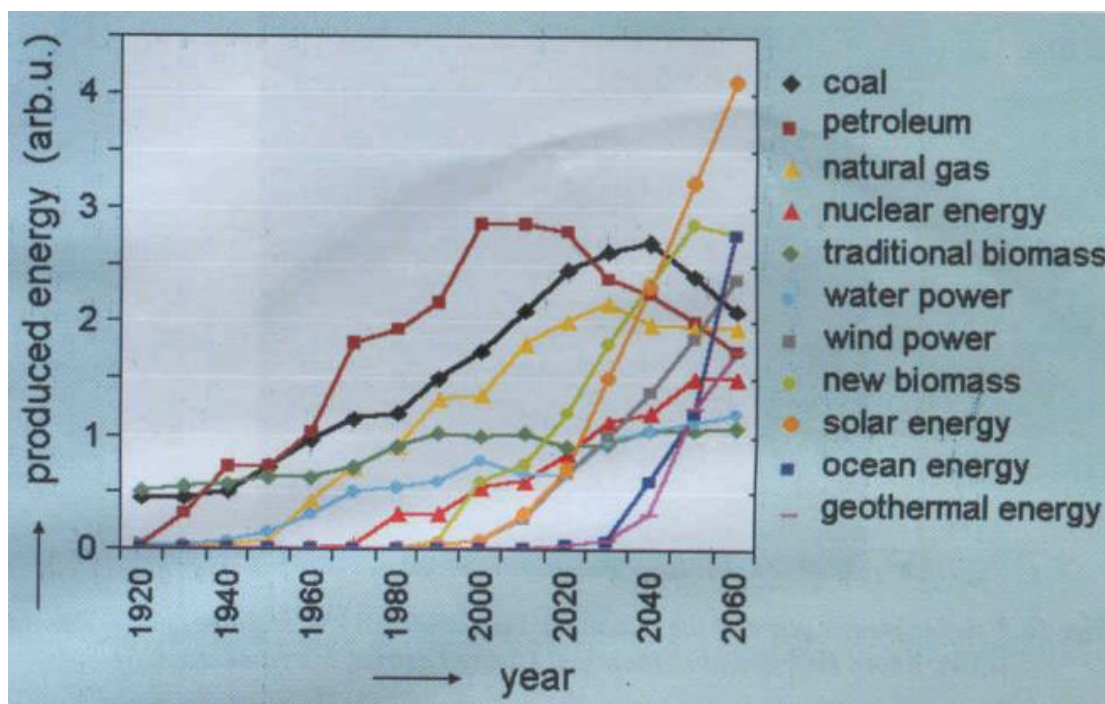
Η παγκόσμια ζωή και οικονομία εξαρτάται δραματικά από την χρήση των συμβατικών μορφών ενέργειας. Υπάρχουν κοινωνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα όπως: η μελλοντική ανάπτυξη τρίτου κόσμου, η ρύπανση και οι κλιματικές μεταβολές, η οικονομικής και πολιτικής εξάρτησης και ισορροπίας, οι καταστροφές στην γήινη χλωρίδα και πανίδα, η απειλή της ανθρώπινης υγείας.

Η σπουδαιότητα των ΑΠΕ είναι στο ότι είναι «καθαρές» πηγές ενέργειας με ελάχιστη επίδραση στο περιβάλλον και κατά κανόνα είναι ανεξάντλητες σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα που προβλέπεται να αρχίσουν να εξαντλούνται από το 2020-2060. Ενισχύουν την εθνική οικονομία αφού συχνά μπορούν να βασιστούν σε επενδύσεις μέσα στην ίδια την χώρα, σε αντίθεση με τις αυξημένου κόστους εισαγωγές ενέργειας. Επίσης ενισχύουν την ενεργειακή ασφάλεια αφού ανεξαρτητοποιούν ενεργειακά την χώρα.

Η φωτοβολταϊκή ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί μια από τις χρησιμότερες φυσικές πηγές ενέργειας επειδή είναι δωρεάν, άφθονη, δεν μολύνει και κατανέμεται σε όλη την γη. Έγιναν έρευνες οι οποίες στράφηκαν όχι μόνο σε διαστημικές αποστολές αλλά και σε επίγειες με σκοπό την αναζήτηση πηγών ενέργειας. Παρά όλα αυτά όμως η αποδοτικότητα της ενεργειακής μετατροπής του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ακόμα χαμηλή.

Το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο μπορεί να τροφοδοτήσει έναν ηλεκτρονικό εξοπλισμό μεταφέρει μεταβατικά φαινόμενα τα οποία είναι διαταραχές της ηλεκτρικής ενέργειας όπως αιχμές τάσης και ηλεκτρονικό θόρυβο τα οποία μεταφέρονται μέσω

της κεντρικής παροχής και εισβάλλουν στα συστήματα. Κατα το πέρασμα αυτού του θορύβου διαμέσου των ηλεκτρονικών μερών του συστήματός θα επηρεάσει τους μικροεπεξεργαστές και θα προκαλέσει αρχικά δυσλειτουργία και τελικά βλάβη. Επίσης ο ηλεκτρικός θόρυβος μπορεί να προκληθεί από έντονα καιρικά φαινόμενα όπως αστραπές, καταιγίδες. Έτσι, σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα καθίσταται πολλές φορές απαραίτητο να περιλαμβάνονται συσκευές Προστασίας και Ελέγχου με σκοπό να προστατεύσουν το σύστημα ή να συμβάλουν στη μείωση απωλειών. Έτσι εξασφαλίζεται στη φωτοβολταϊκή γεννήτρια να λειτουργεί όσο πιο κοντά γίνεται στο σημείο μέγιστης ισχύος. Επίσης στο σύστημα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοιχεία ελέγχου φορτίου για να προστατεύσουν την μπαταρία από υπερφόρτιση ή αποφόρτιση. Σε ένα σύστημα που τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκό σύστημα είναι απαραίτητη η χρήση της τεχνικής ανίχνευσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας (MPPT: Maximum Power Point Tracking) η οποία εξάγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ καθώς παρουσιάζει μια εξαιρετικά μη γραμμική χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-έντασης (V-I) το φωτοβολταϊκό σύστημα.



Σχήμα 1.1 Τάση παραγωγής ενέργειας απ' τις μεμονωμένες πηγές από το 1920 και η πρόγνωση για μελλοντική ανάπτυξη μέχρι το 2060 [16].

## 1.2 Η δομή της εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην ηλιακή ακτινοβολία και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Εξετάζονται τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης και αναλύεται ο τρόπος που υπολογίζεται, ενώ διερευνάται και η επίδραση του προσανατολισμού και της κλίσης του συλλέκτη στην ενεργειακή του απόδοση.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, αναλύεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, γίνεται αναφορά στα ΦΒ πλαίσια, πάνελ στην ΦΒ γεννήτρια και στις κατηγορίες ΦΒ συστημάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των συσσωρευτών, των ρυθμιστών τάσης και των μετατροπέων. Εξετάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των συσσωρευτών και διασαφηνίζονται βασικές έννοιες που σχετίζονται με τη λειτουργία τους. Επίσης αναλύεται η μέθοδος φόρτισης-εκφόρτισης των συσσωρευτών και οι παράγοντες που συσχετίζονται με τη διαδικασία αυτή.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η μελέτη εγκατάστασης ΦΒ συστημάτων σε απομονωμένα συστήματα αλλά και σε συστήματα συνδεδεμένα στο εθνικό δίκτυο.

Το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται στη μέθοδο που αναπτύχθηκε η οποία βελτιστοποιεί τη διαχείριση της ενέργειας σε ΦΒ συστήματα συνδεδεμένα στο εθνικό δίκτυο με στόχο την αύξηση του κέρδους του χρήστη ΦΒ από την πώληση της ενέργειας στο δίκτυο και μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται απ' το δίκτυο χάρις τις συμπληρωματικές πηγές. Αναφέρεται επίσης στη μελέτη εγκατάστασης ΦΒ συστημάτων σε στέγες με τη χρήση Matlab.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την εφαρμογή της μεθόδου που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία και της μελέτης που έγινε με τη χρήση της Matlab.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες συγκρίσεις των αποτελεσμάτων στη μελέτη των απομονωμένων συστημάτων αλλά και των συνδεδεμένων συστημάτων στο δίκτυο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία με τα αποτελέσματα της μελέτης να παρουσιάζονται στο πέμπτο κεφάλαιο. Επίσης αναλύονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε.

## 2. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### 2.1 Ηλιακή Ενέργεια

Ανεξάντλητη πηγή ενέργειας αποτελεί ο ήλιος, απ' την οποία έχουμε ένα μεγάλο πλήθος εκμεταλεύσιμων μορφών όπως: Φωτοβολταϊκά συστήματα, Ενεργειακά ηλιακά συστήματα, Βιοκλιματικός αρχιτεκτονικός σχεδιασμός κτηρίων κ.α. Η πιο διαδεδομένη πηγή ενέργειας είναι η ηλιακή και αυτό διότι μέσω φωτοβολταϊκών μπορούμε να την μετατρέψουμε απ' ευθείας σε ηλεκτρική και να την αξιοποιήσουμε. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές όπως είναι η αξιοποίηση των τοπικών κλιματικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων για την θέρμανση, την ψύξη και τον φωτισμό στον οικιακό τομέα με την ανάπτυξη του βιοκλιματικού αρχιτεκτονικού σχεδιασμού των κτηρίων όπως επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την θέρμανση νερού.

### 2.2 Ηλιακή Ακτινοβολία

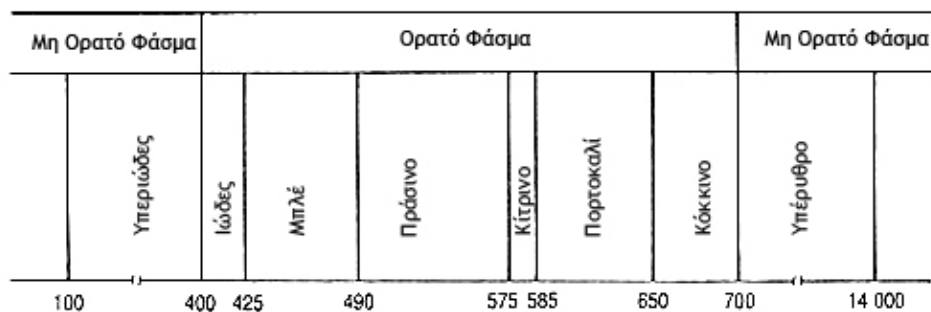
Ο Ήλιος μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τεράστιος θερμοπυρηνικός αντιδραστήρας που μετατρέπει το υδρογόνο σε ήλιο μέσω αυτοσυντηρούμενων πυρηνικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στο εσωτερικό του:



Η ηλιακή ενέργεια που δέχεται η Γη σε 10 μέρες είναι ισοδύναμη με την ενέργεια που μπορούν να παράγουν τα παγκόσμια αποθέματα σε καύσιμα (λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο). Η διαπίστωση αυτή υποδεικνύει το πόσο μεγάλη πηγή ενέργειας είναι ο Ήλιος. Η εκπεμπόμενη ενέργεια απομακρύνεται ακτινικά προς το διάστημα ενώ η επιφανειακή θερμοκρασία του είναι της τάξης των 5800 °K και η εσωτερική του θερμοκρασία είναι 15.000.000 °K.

Το φάσμα του ηλιακού φωτός, η κατανομή δηλαδή της έντασης της ακτινοβολίας στα διάφορα μήκη κύματος, εκτείνεται πρακτικά από 100 nm μέχρι 1400 nm. Το ορατό φάσμα είναι από 400 έως 700 nm και αποτελεί το 44% της ηλιακής ακτινοβολίας. Άνω των 700 nm, πέραν του ερυθρού, δηλαδή στην περιοχή του υπέρυθρου, βρίσκεται το 50 % της ηλιακής ακτινοβολίας ενώ το υπόλοιπο 6% βρίσκεται στην περιοχή του υπεριώδους φωτός που είναι μικρότερη των 400 nm και αποτελεί την υπεριώδη ακτινοβολία (Σχήμα 2.1).

Η ακτινοβολία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας είναι αυτή που βρίσκεται στις μεγάλες συχνότητες. Σε αυτές τις συχνότητες αντιστοιχούν φωτόνια μεγάλης ενέργειας που είναι δυνατό να προκαλέσουν την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο. Οι συχνότητες αυτές αποτελούν το 75% του φάσματος περίπου, ενώ οι υπόλοιπες δεν προκαλούν αξιοσημείωτα αποτελέσματα ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα φωτοβολταϊκά στοιχεία [2].



Σχήμα 2.1 Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας (nm).

## 2.3 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι από τις βασικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων καθώς καθορίζει την ενέργεια που περιέχεται στο φως του Ήλιου. Ως ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας,  $B$ , ορίζεται το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε  $1 \text{ m}^2$  επιφάνειας σε  $1 \text{ sec}$  και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$B = \frac{E}{S \cdot t} = \frac{P}{S} (\text{W} / \text{m}^2) \quad (2.2)$$

όπου:

$E$  είναι η προσπίπτουσα ενέργεια,

- S το εμβαδό της επιφάνειας,
- t ο χρόνος και
- P η ισχύς που προσπίπτει στην επιφάνεια.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ του Ήλιου και της επιφάνειας της Γης δίνεται από τη σχέση:

$$B_r = \frac{E_o}{4\pi r^2 t} = \frac{P_o}{4\pi r^2} \quad (2.3)$$

όπου:

- $E_o$  είναι η ολική ενέργεια που εκπέμπεται από τον Ήλιο σε χρόνο t και  $4\pi r^2$  το εμβαδόν της εσωτερικής επιφάνειας της νοητής σφαίρας με ακτίνα r.

Παρατηρείται ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση από τον Ήλιο. Η γεωγραφική θέση (γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος) ενός τόπου καθώς και το υψόμετρό του από την επιφάνεια της θάλασσας είναι παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Τέλος, η μείωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται στην αλλαγή της πορείας της σε σχέση με την αρχική κατεύθυνση. Η αλλαγή της κατεύθυνσης οφείλεται σε δύο αιτίες:

**α)** Την ελαστική σκέδαση του φωτός στα ηλεκτρόνια των ατόμων ή μορίων του αερίου, όπου γίνεται επανεκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από τα ηλεκτρόνια των μορίων. Η σκέδαση στα μόρια της ατμόσφαιρας ακολουθεί το νόμο του Rayleigh, σύμφωνα με τον οποίο η ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από τα ηλεκτρόνια των μορίων των αερίων της ατμόσφαιρας είναι αντιστρόφως ανάλογη της τέταρτης δύναμης του μήκους κύματος  $\lambda$  και εξαρτάται από τη γωνία παρατήρησης,  $\theta$ , σε σχέση με την αρχική κατεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

$$E_{\text{σκεδ.}} \sim (1 + \cos^2 \theta)(1 + n^2)^2 \quad (2.4)$$

όπου:

n είναι ο δείκτης διάθλασης του μέσου.

**β)** τις μοριακές απορροφήσεις συντονισμού, όπου παρατηρείται μείωση της έντασης του καταμετρούμενου ηλιακού φωτός σ' όλο το εύρος του φάσματος. Τέτοιες

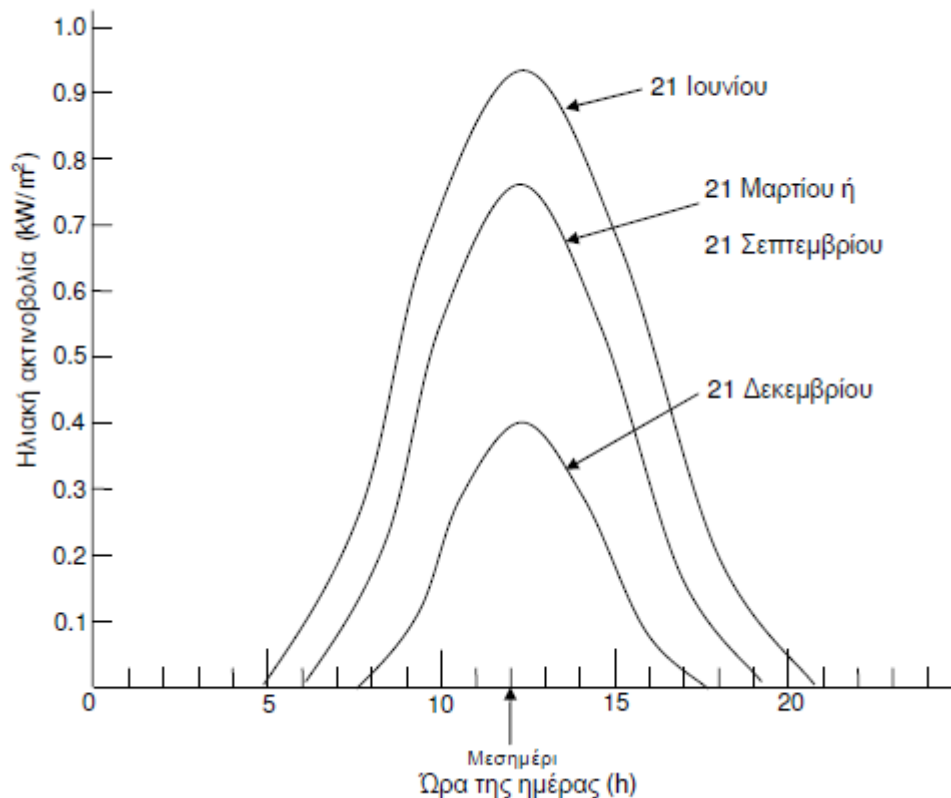
απορροφήσεις προέρχονται από υδρατμούς ( $H_2O$ ), οξυγόνο ( $O_2$ ), όζον ( $O_3$ ), διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ), οξείδια του αζώτου ( $NO_x$ ) κ.α. που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Για παράδειγμα, το όζον απορροφά την ακτινοβολία η οποία έχει μήκος κύματος μικρότερο από 400 nm [3].

### 2.3.1 Μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας

Κατά τη διάρκεια του έτους η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει αυξομειώσεις. Για μια ηλιόλουστη μέρα μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει ομαλή μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας με την προϋπόθεση ότι οι μεταβολές στην τιμή της ακτινοβολίας δεν μπορούν να υπερβούν τα  $50 \text{ Wm}^{-2}\text{min}^{-1}$ . Σε αντίθεση με μια συννεφιασμένη μέρα όπου η μεταβολή αυτή δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από  $150 \text{ Wm}^{-2}\text{min}^{-1}$ . Επίσης πολλές εξισώσεις που περιγράφουν τις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας έχουν αναπτυχθεί σαν μια συνάρτηση κατανομής η οποία μπορεί να οριστεί ως η υπέρθεση δυο εκθετικών συναρτήσεων με διαφορετικούς εκθέτες. Από την μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας και από το ποσοστό σκίασης των ηλιακών συστημάτων εξαρτάται η απόδοση.

### 2.3.2 Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα με την εποχή του χρόνου αλλά και κατά την διάρκεια μίας ημέρας. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια μίας μέρας για τέσσερις ενδεικτικές διαφορετικές ημερομηνίες. Η μέγιστη τιμή της έντασης της που αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος της, απαντάται στο ηλιακό μεσημέρι, τη στιγμή δηλαδή που ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ και δεν συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι.

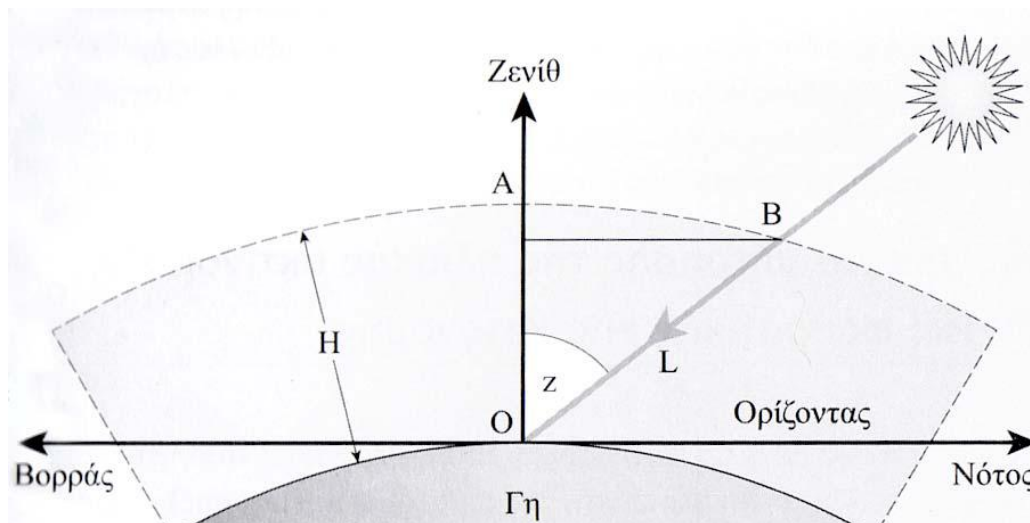


Σχήμα 2.2: Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας [7].

## 2.4 Ακτινοβολία ενός Ήλιου

Εκτός από τους παράγοντες που έχουν περιγραφεί στην προηγούμενη παράγραφο, η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά καταλήγει στην επιφάνεια της Γης επηρεάζεται δυναμικά από τη θέση του Ήλιου. Το μήκος της διαδρομής μέχρι τη στάθμη της θάλασσας χαρακτηρίζεται από την κλίμακα μάζας αέρα AM (air mass). Η κλίμακα μάζας αέρα δείχνει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας από την κατακόρυφη διαδρομή (τη διαδρομή που θα έκανε ο Ήλιος αν βρισκόταν στο ζενίθ). Τα πεδία AM1, AM1.5 και AM2 αφορούν στο Ηλιακό φως, όπως αυτό υπολογίζεται στην επιφάνεια της Γης και αφού το φως διαγράψει τροχιά μήκους μία φορά, μία και ήμισυ και δύο φορές, αντίστοιχα το πάχος της ατμόσφαιρας. Θεωρώντας ότι το Ηλιακό φως διαγράφει ευθύγραμμη τροχιά μέσα στην ατμόσφαιρα, στις τρεις προηγούμενες περιπτώσεις, οι ακτίνες σχηματίζουν γωνίες  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  και  $60^\circ$ , αντίστοιχα, με την κατακόρυφη του τόπου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 (γωνία  $z$ ). Το μηδέν της κλίμακας (AM0) συμβολίζει την πλήρη απουσία ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, σε θέση που απέχει όση είναι η μέση απόσταση της Γης από τον Ήλιο. Η πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια

της Γης αντιστοιχεί σε AM1 και έχει τυπική τιμή περίπου  $950 \text{ W/m}^2$ , ενώ για AM1.5 είναι περίπου  $935 \text{ W/m}^2$  και για AM2 είναι περίπου  $700 \text{ W/m}^2$ . Η πυκνότητα ισχύος AM1.5 αποτελεί μια αντιπροσωπευτική προσέγγιση της μέσης μέγιστης ισχύος που δέχεται μια επιφάνεια κάθετη προς την διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας και στις ευνοϊκότερες δυνατές συνθήκες αιχμής (καλοκαίρι, μεσημέρι και καθαρός ουρανός). Για απλοποίηση, η παραπάνω πυκνότητα στρογγυλοποιείται στα  $1000 \text{ W/m}^2$  και ονομάζεται συμβατικά ακτινοβολία ενός Ήλιου (ή ενός πλήρους Ήλιου). Η ακτινοβολία ενός Ήλιου χρησιμοποιείται ως μονάδα σύγκρισης της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία καθώς και ως μονάδα αναφοράς για τον καθορισμό της ισχύος αιχμής των φωτοβολταϊκών διατάξεων.



Σχήμα 2.3 Το μήκος  $L$  που διανύουν οι ηλιακές ακτίνες μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης πάχους  $H$ .

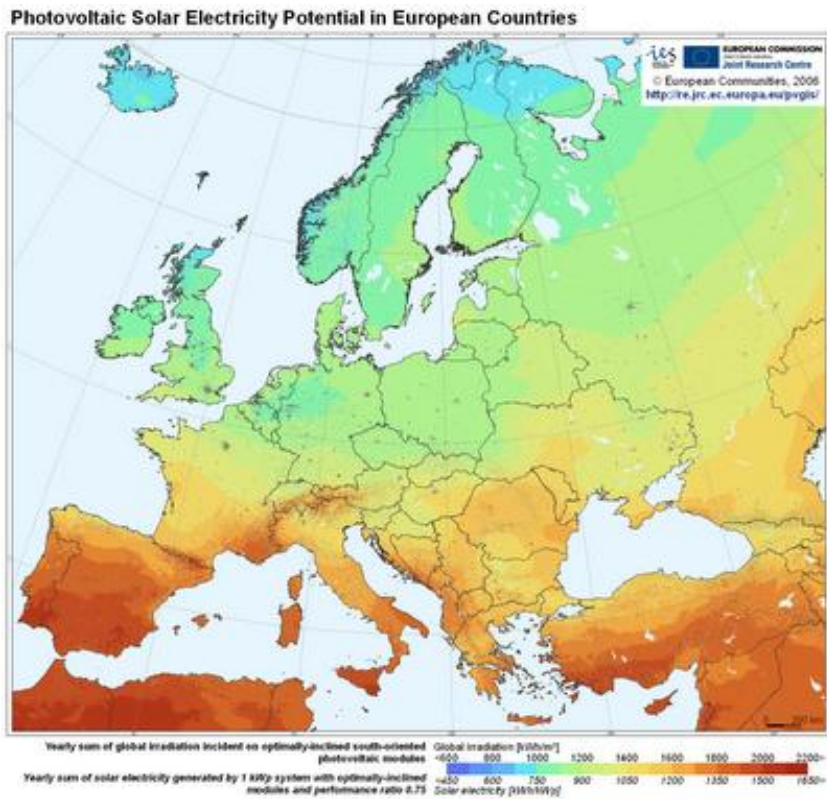
Για να υπολογιστεί ο αριθμός που τοποθετείται μετά το ακρωνύμιο AM, χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

$$L_x = H \quad (2.5)$$

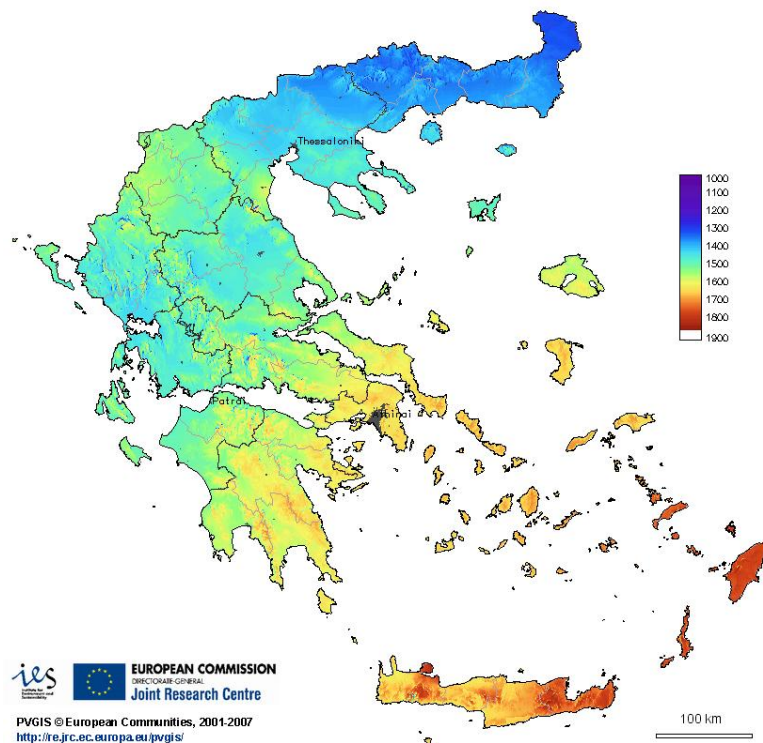
όπου:

$L$  είναι το μήκος της διαδρομής που διανύουν οι ακτίνες μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης και

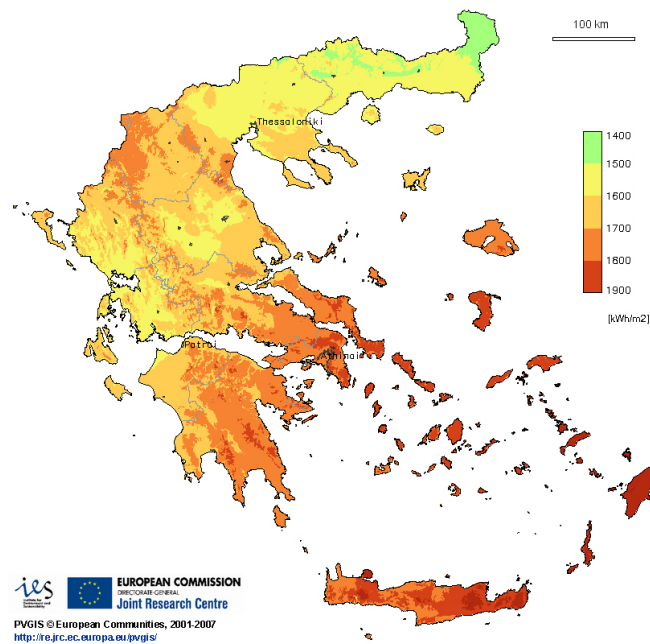
$H$  το πάχος της ατμόσφαιρας της Γης [2].



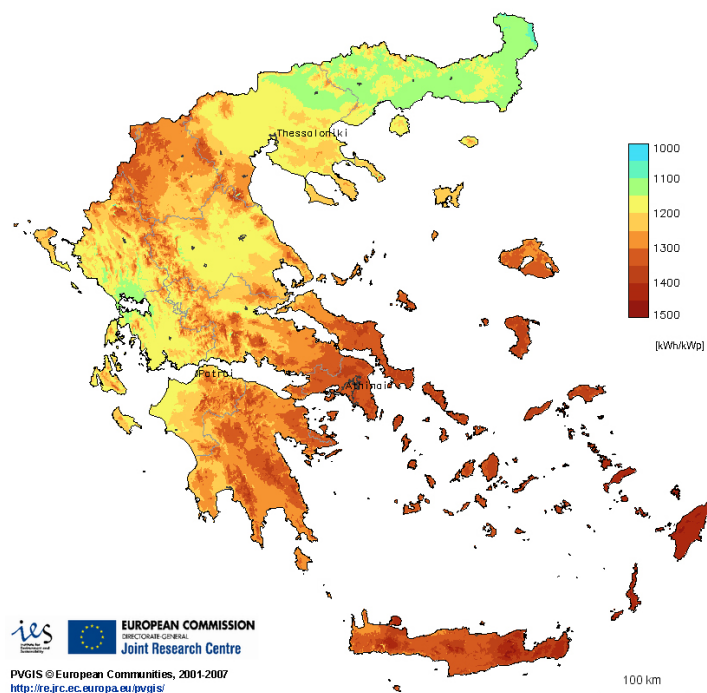
Σχήμα 2.4 : Χάρτης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας των χωρών της Ευρώπης.



Σχήμα 2.5 : ετήσια ποσότητα ενέργειας ( $\text{kWh/m}^2$ ) που προέρχεται από την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε φωτοβολταϊκούς συλλέκτες σε οριζόντια θέση



Σχήμα 2.6 : ετήσια ποσότητα ενέργειας (kWh/m<sup>2</sup>) που προέρχεται από την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε φωτοβολταϊκούς συλλέκτες σε άριστη γωνία κλίσης



Σχήμα 2.7 : Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εκφρασμένη σε kWh από φωτοβολταϊκό σύστημα, με συλλέκτες πυριτίου (c-Si) ισχύος 1kWp υπό άριστη γωνία κλίσης.[4]

## 2.5 Υπολογισμός ακτινοβολίας σε σκιασμένες επιφάνειες

Κρίνεται σκόπιμο να γνωρίζουμε την μείωση της απόδοσης των ηλιακών συστημάτων τα οποία σκιάζονται, καθώς κυρίως στις πόλεις που τα περισσότερα κτήρια είναι κτισμένα το ένα δίπλα στο άλλο έχουν πολλές πιθανότητες να σκιάζονται τα ηλιακά συστήματα που θα είναι τοποθετημένα στις στέγες.

Από πειράματα που έγιναν σε πρόσφατα κατασκευασμένα ηλιακά συστήματα έδειξαν ότι η σκίαση μπορεί να προκαλέσει μεγάλες απώλειες στην απόδοση τους. Επομένως απαιτούνται μέθοδοι ικανές να υπολογίσουν την μειωμένη ακτινοβολία έτσι ώστε να μπορούν να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Υπάρχουν πολλά μοντέλα για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια. Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτές δεν περιλαμβάνουν στους υπολογισμούς τους τα φαινόμενα που προκαλούνται από τα αντικείμενα του περιβάλλοντος. Έτσι έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι που περιλαμβάνουν το φαινόμενο της σκίασης στον υπολογισμό της απευθείας και της διάχυτης ακτινοβολίας. Πριν χρησιμοποιηθούν αυτές οι μέθοδοι θα πρέπει να μελετηθούν τα αντικείμενα του περιβάλλοντος. Μια επαρκής μέθοδος είναι αυτή που περιγράφεται στη συνέχεια, η ακρίβεια της οποίας τεκμηριώνεται με ένα παράδειγμα.

Η σκίαση στα ηλιακά συστήματα μπορεί να μειώσει δραματικά την παραγόμενη ενέργεια τους. Απώλειες στην απόδοση λόγω σκίασης έχει αναφερθεί σε πολλά καινούργια φωτοβολταϊκά συστήματα. Πειραματικές μετρήσεις που έχουν γίνει σε συγκεκριμένα συστήματα έχουν δείξει πως τα μισά από τα φωτοβολταϊκά συστήματα που μελετήθηκαν σκιάζονται μερικώς κατά τη διάρκεια ενός έτους και αυτό οδηγεί σε ετήσιες απώλειες γύρω στο 10%. Σαν παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί το φωτοβολταϊκό πάρκο του Πανεπιστημίου της Northumbria ισχύος 40 KW, όπου τουλάχιστον το 10% των μονάδων σκιάζεται ενώ μέχρι και 30% αυτών επηρεάζεται από τη μειωμένη ακτινοβολία. Αυτό είναι ένα απλό παράδειγμα που δείχνει πως η μείωση της ακτινοβολίας εξαιτίας της σκίασης έχει σημαντική επίδραση στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των ηλιακών συστημάτων. Η σκίαση είναι ένας παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν σχεδιάζονται ή εξομοιώνονται ηλιακά συστήματα. Ειδικά τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι περισσότερο ευαίσθητα στη σκίαση από τα θερμικά ηλιακά συστήματα.

Υπάρχουν αρκετά ικανοποιητικά υπολογιστικά προγράμματα, τα οποία μπορούν να αναλύσουν τις συνθήκες σκίασης σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία ακόμα και όταν η τοπογραφία του περιβάλλοντος είναι πολύπλοκη (ύπαρξη κτιρίων ή δέντρων). Υπάρχουν κάποιες μέθοδοι, οι οποίες χρησιμοποιούν εξαιρετικά χρονοβόρες διαδικασίες για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας και εξάλλου ο τρόπος περιγραφής των αντικειμένων του περιβάλλοντος δεν είναι επαρκής. Άλλες μέθοδοι που υπάρχουν υπολογίζουν την σκίαση κάνοντας απεικόνιση πολυγώνων, όπου είναι εξίσου δύσκολο να περιγραφεί ακριβώς το περιβάλλον. Σε γενικές γραμμές μια

ακριβής περιγραφή των ακανόνιστων αντικειμένων, όπως δέντρα ή κτίρια, είναι δύσκολη και ίσως και αδύνατη στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν απεικόνιση πολυγώνων είναι λιγότερο χρονοβόροι από άλλους γνωστούς αλγορίθμους, δεν παύουν όμως να απαιτούν ισχυρά υπολογιστικά συστήματα. Ωστόσο η μέθοδος που ακολουθεί αποτελεί έναν εύκολο τρόπο περιγραφής του περιβάλλοντος χώρου καθώς προσφέρει το πλεονέκτημα των γρήγορων υπολογισμών.[6]

## 2.5.1 Ακτινοβολία σε μη σκιασμένες επιφάνειες

Υπάρχουν πολλές γνωστές μέθοδοι για να υπολογιστεί η ακτινοβολία σε μια σκιασμένη επιφάνεια. Ο καλύτερος τρόπος ωστόσο είναι να μετρηθεί η ολική ακτινοβολία σε μια επίπεδη ή κεκλιμένη επιφάνεια χωρίς σκίαση. Για τους επιπλέον υπολογισμούς είναι απαραίτητο να συνυπολογιστεί όχι μόνο η ολική ακτινοβολία αλλά τόσο η απευθείας όσο και η ακτινοβολία από ανάκλαση. Εάν είναι εφικτές μόνο οι μετρήσεις της απευθείας ακτινοβολίας, τότε η ολική ακτινοβολία μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της απευθείας και της ανακλώμενης ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας στατιστικούς υπολογισμούς [4].

Η θέση του ήλιου μπορεί να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια χρησιμοποιώντας κάποιους ευρέως γνωστούς αλγορίθμους οι οποίοι επιτρέπουν ένα είδος πρόβλεψης.

Εάν είναι γνωστές η απευθείας ακτινοβολία,  $G_{b,h}$  και η ανακλώμενη ακτινοβολία,  $G_{d,h}$ , πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστεί η ολική ακτινοβολία,  $G_t$ , πάνω σε μια κεκλιμένη επιφάνεια, η οποία αποτελείται από την απευθείας ακτινοβολία,  $G_{b,t}$ , την ανακλώμενη ακτινοβολία,  $G_{d,t}$  και τον όρο  $G_{r,t}$  που εκφράζει την ακτινοβολία που ανακλάται από το έδαφος.

$$G_t = G_{b,t} + G_{d,t} + G_{r,t} \quad (2.6)$$

Η απευθείας ακτινοβολία σε μια κεκλιμένη επιφάνεια μπορεί εύκολα να παραχθεί από την απευθείας ακτινοβολία,  $G_{b,h}$ , σε μια οριζόντια επιφάνεια χρησιμοποιώντας την γωνία ύψους του ήλιου,  $\alpha_\delta$  και τη γωνία πρόσπτωσης του φωτός,  $\theta_t$ , πάνω σε κεκλιμένη επιφάνεια ως εξής :

$$G_{b,t} = G_{b,h} \max \left( \frac{\cos \theta_t}{\sin a_s} \right) \quad (2.7)$$

Η γωνία πρόσπτωσης του φωτός πάνω σε κεκλιμένη επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί από τη γωνία ύψους του ήλιου,  $\alpha_d$ , το αζιμούθιο του ήλιου,  $\gamma_d$ , την γωνία κλίσης της επιφάνειας,  $\beta$  και το αζιμούθιο της επιφάνειας,  $\gamma_A$ , ως εξής :

$$\theta_t = \arccos[\sin a_s * \cos \beta + \cos a_s * \sin \beta \cos(\gamma_d + \gamma_A)] \quad (2.8)$$

Θεωρώντας μια ισοτροπική κατανομή της ακτινοβολίας του ουρανού, υπάρχουν οι ακόλουθες εκφράσεις για την διαχέουσα ακτινοβολία,  $G_{d,t}$ , πάνω σε μια κεκλιμένη επιφάνεια και την ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία,  $G_{r,t}$ , οι οποίες χρησιμοποιούν την ολική ακτινοβολία,  $G_h$  σε οριζόντιο επίπεδο, την διαχέουσα ακτινοβολία,  $G_{d,h}$ , σε οριζόντιο επίπεδο και το λόγο του ανακλώμενου φωτός από το περιβάλλον έδαφος,  $A$  :

$$G_{a,t} = 0.5G_{d,h}(1 + \cos \beta) \quad (2.9)$$

$$G_{r,t} = 0.5G_h A(1 - \cos \beta) \quad (2.10)$$

Πιο ακριβή μοντέλα για τον υπολογισμό της διαχέουσας ακτινοβολίας χρησιμοποιούν ανισοτροπικά μοντέλα διάχυτης ακτινοβολίας έτσι ώστε να υπολογίσουν την ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο βασιζόμενα σε δεδομένα για την ακτινοβολία που προσπίπτει σε επίπεδη επιφάνεια. Αυτά τα μοντέλα, ωστόσο δεν λαμβάνουν υπόψιν τους φαινόμενα σκίασης. Επομένως αν χρησιμοποιηθούν αυτές οι μέθοδοι σε προσομοιώσεις συστημάτων, η θεωρητικά παραγόμενη ισχύς που υπολογίζεται θα είναι συνήθως πολύ υψηλή, λόγω της αδυναμίας των συγκεκριμένων μοντέλων να συμπεριλάβουν τα φαινόμενα σκίασης.

Ο υπολογισμός της μειωμένης λόγω σκίασης ακτινοβολίας περιγράφεται στη συνέχεια. Ωστόσο πριν γίνει αυτό θεωρείται απαραίτητο να γίνει μια αναφορά στον τρόπο που μπορούν να περιγραφούν τα αντικείμενα που περιβάλλουν την μελετούμενη επιφάνεια [6].

## 2.6 Μετακίνηση της γής ως προς τον ήλιο

Η γη περιστρέφεται σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τον ήλιο και χρόνος που χρειάζεται η γη για να ολοκληρώσει αυτήν την τροχιά καθορίζει το έτος. Επίσης περιστρέφεται την ημέρα μία φορά γύρω από τον κεντρικό της άξονα, τον πολικό ο οποίος έχει τροχιά γύρω από τον ήλιο και έχοντας σταθερή γωνία με το ελλειπτικό επίπεδο ίση με  $23.45^\circ$ . Με αυτό τον τρόπο αλλάζει συνεχώς η γωνία μεταξύ του ισημερινού επιπέδου και μιας ευθείας γραμμής που σύρεται μεταξύ του κέντρου της γης και του κέντρου του ήλιου, η οποία είναι γνωστή ως ηλιακή απόκλιση  $\delta$  και μπορεί να θεωρηθεί περίπου σταθερή κατά τη διάρκεια μιας οποιασδήποτε ημέρας. Στη διάρκεια μίας ημέρας η γωνία  $\delta$  μπορεί να μεταβληθεί λιγότερο από  $0.5^\circ$ .

Ισημερία είναι το ημερονύκτιο κατά το οποίο έχουν ίση διάρκεια η μέρα και η νύχτα. Είναι διαρκές φαινόμενο στον ισημερινό της γής και συμβαίνει δύο φορές το χρόνο για όλες τις άλλες περιοχές. Την πρώτη φορά την άνοιξη στις 20/21 Μαρτίου, οπότε έχουμε την εαρινή ισημερία και ο ήλιος βρίσκεται στο εαρινό ισημερινό σημείο. Τη δεύτερη φορά, στις 22/23 Σεπτεμβρίου, οπότε έχουμε τη φθινοπωρινή ισημερία και ο Ήλιος βρίσκεται στο φθινοπωρινό ισημερινό σημείο. Το καλοκαίρι στις 21/22 Ιουνίου έχουμε το θερινό ηλιοστάσιο και τον Χειμώνα στις 21/22 Δεκεμβρίου το χειμερινό. Στο Θερινό η γωνία ηλιακής απόκλισης  $\delta$  είναι ίση με  $23.45^\circ$  και ο ήλιος βρίσκεται επάνω από τον τροπικό κύκλο του καρκίνου και στο βόρειο ημισφαίριο επικρατεί η μακρύτερη ημέρα και η πιο σύντομη νύχτα ολόκληρου του έτους. Στο χειμερινό η γωνία ηλιακής απόκλισης  $\delta$  είναι ίση με  $-23.45^\circ$  και ο ήλιος είναι άμεσα επάνω από τον τροπικό κύκλο του Αιγόκερου. Επίσης στο βόρειο ημισφαίριο επικρατεί η πιο σύντομη ημέρα και η μακρύτερη νύχτα ολόκληρου του έτους.



Σχήμα 2.8: Έχουμε τα σημεία γ και γ' είναι τα σημεία όπου ο ουράνιος ισημερινός τέμνει την εκλειπτική. Το σημείο γ είναι η αφετηρία για τη μέτρηση της ορθής αναφοράς ενός ουράνιου αντικειμένου[5].

## 2.7 Ο προσανατολισμός του συλλέκτη

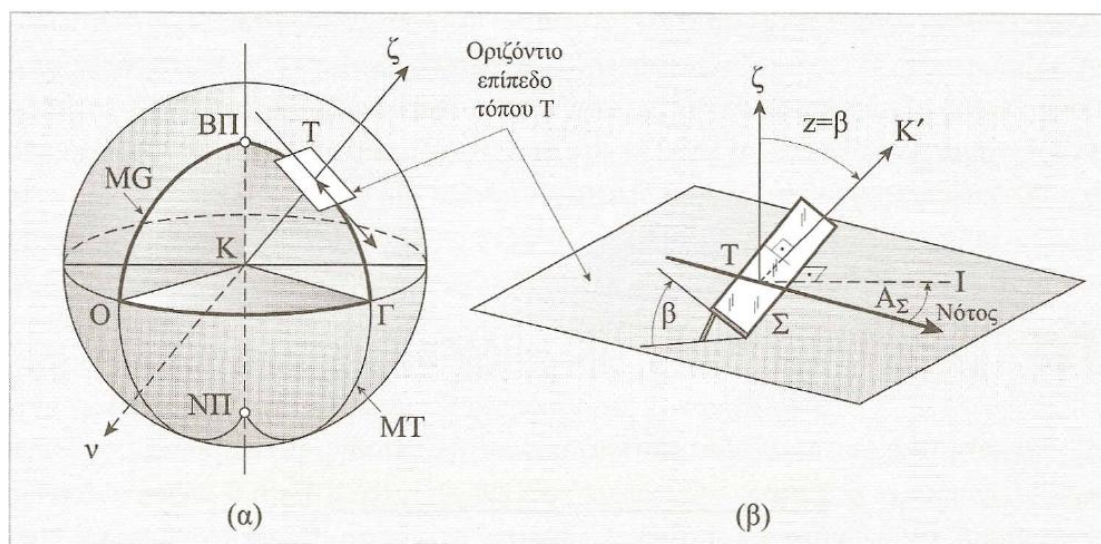
Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε, κατ' αρχήν, σε μια απλή μέθοδο προσδιορισμού του προσανατολισμού του συλλέκτη και στη συνέχεια θα εξετάσουμε σε συντομία τους διάφορους τρόπους τοποθέτησης των συλλεκτών, με βασική απαίτηση τη μεγιστοποίηση της ημερησίως συλλεγόμενης ηλιακής ενέργειας.

## 2.7.1. Στοιχεία προσδιορισμού του προσανατολισμού ενός Συλλέκτη

Κάθε τόπος πάνω στην επιφάνεια της γης, προσδιορίζεται από τις σφαιρικές συντεταγμένες του :

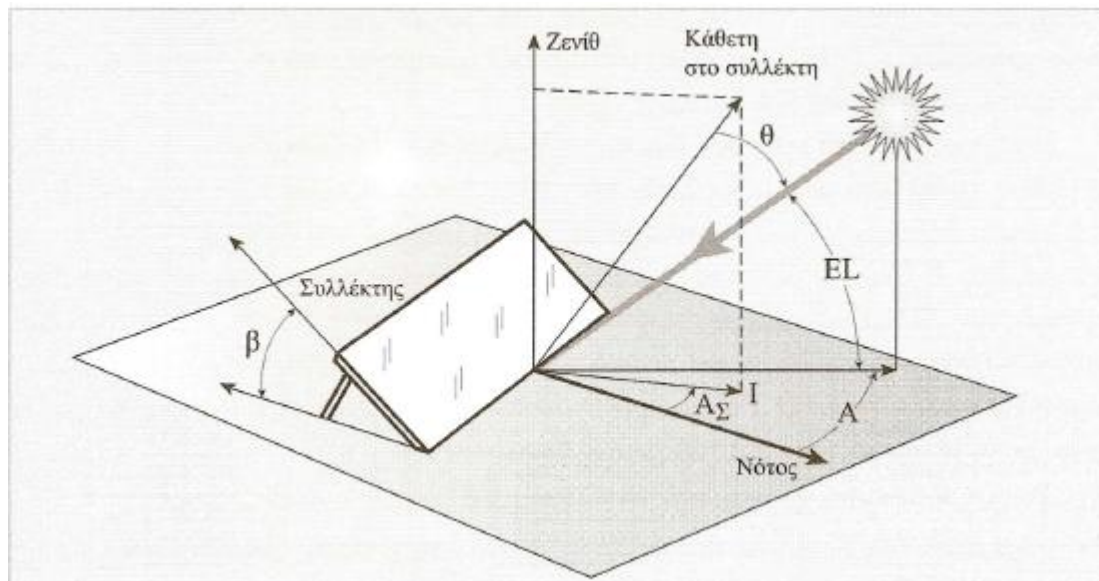
α) Το γεωγραφικό μήκος, ( $L$ ), που καθορίζεται από το τόξο  $ΟΓ$ , πάνω στον Ισημερινό ή σε άλλο παράλληλο, με αναφορά το μεσημβρινό του Greenwich ( $MG$ ), από  $0-180^\circ$  Ανατολικά και από  $0-180^\circ$  Δυτικά.

β) Το γεωγραφικό πλάτος, ( $\phi$ ), που καθορίζεται από το τόξο  $ΓΤ$ , πάνω στο μεσημβρινό του τόπου  $MT$ , με αναφορά τον Ισημερινό, από  $0-90^\circ$  Βόρεια και  $0-90^\circ$  Νότια. Ας θεωρήσουμε έναν επίπεδο συλλέκτη,  $\Sigma$ , τοποθετημένο έτσι ώστε το επίπεδό του να σχηματίζει γωνία  $\beta$ , ως προς τον ορίζοντα. Η γωνία κλίσης του συλλέκτη,  $\beta$ , ισούται με τη ζενίθια γωνία,  $z$ , της καθέτου στο επίπεδο του συλλέκτη ( $TK'$ ), η οποία μπορεί να πάρει τιμές από  $0^\circ$  (Ζενίθ) έως  $180^\circ$  (Ναδίρ).



Σχήμα 2.9 : (α) Παράδειγμα τόπου  $T$ , πάνω στην επιφάνεια της γης, ο οποίος προσδιορίζεται από το γεωγραφικό μήκος του, ίσο με το τόξο  $ΟΓ$ , και από το πλάτος του, που καθορίζεται από το τόξο  $ΓΤ$ , πάνω στο μεσημβρινό του τόπου  $MT$ . (β)  $A_z$  και  $\beta$ , αζιμούθιο και γωνία κλίσης του συλλέκτη  $\Sigma$ .

Η γωνία  $A_z$ , μεταξύ της κατακόρυφης προβολής  $TI$ , της καθέτου στο συλλέκτη,  $TK'$  πάνω στο οριζόντιο επίπεδο, με τη διεύθυνση του νότου, ονομάζεται αζιμούθιο ή αζιμουθιακή γωνία του συλλέκτη και παίρνει τιμές από  $+180^\circ$  μέχρι  $-180^\circ$ . Χαρακτηριστικές θέσεις  $+180^\circ$  (Βορράς),  $+90^\circ$  (Ανατολή),  $0^\circ$  (Νότος),  $-90^\circ$  (Δύση) και  $-180^\circ$  (Βορράς). Όταν ο συλλέκτης στραφεί ώστε οι ακτίνες του ήλιου (απευθείας ακτινοβολία), να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια του, τότε το ύψος του ήλιου  $EL$  και η γωνία κλίσης  $\beta$ , του συλλέκτη δίνουν άθροισμα  $90^\circ$  ( $EL + \beta = 90^\circ$ ).



Σχήμα 2.10 : Η γωνία  $\theta$ , μεταξύ των ακτίνων του ήλιου και της κάθετης στο συλλέκτη, μια δεδομένη χρονική στιγμή, καθορίζεται από τον προσανατολισμό του συλλέκτη (Αζιμούθιο  $A_{\Sigma}$  και γωνία κλίσης  $\beta$ ) και τις σφαιρικές συντεταγμένες της θέσης του ήλιου ως προς το σύστημα του παρατηρητή, στον τόπο T, δηλαδή αζιμούθιο A και το ύψος του (Elevation) EL.

Η στροφή του συλλέκτη, ώστε αυτός να παρακολουθεί ανά πάσα στιγμή τον ήλιο, γίνεται με μηχανισμούς, οι οποίοι οδηγούνται από κατάλληλες ηλεκτρονικές διατάξεις, με βάση τις εξισώσεις κίνησης του ήλιου στην ουράνια σφαίρα. Η γωνία  $\theta$ , που σχηματίζουν, μια δεδομένη χρονική στιγμή, οι ηλιακές ακτίνες (απευθείας ακτινοβολία), με την κάθετη σ' έναν επίπεδο συλλέκτη (σχήμα 2.10), γωνίας κλίσης  $\beta$  και αζιμουθιακής γωνίας  $A_{\Sigma}$ , δίδεται από τη σχέση

$$\cos \theta = \cos EL \cdot \sin \beta \cdot \cos (A - A_{\Sigma}) + \sin EL \cdot \cos \beta \quad (2.11)$$

όπου A, η αζιμούθια γωνία και EL το ύψος του ήλιου την ίδια χρονική στιγμή.

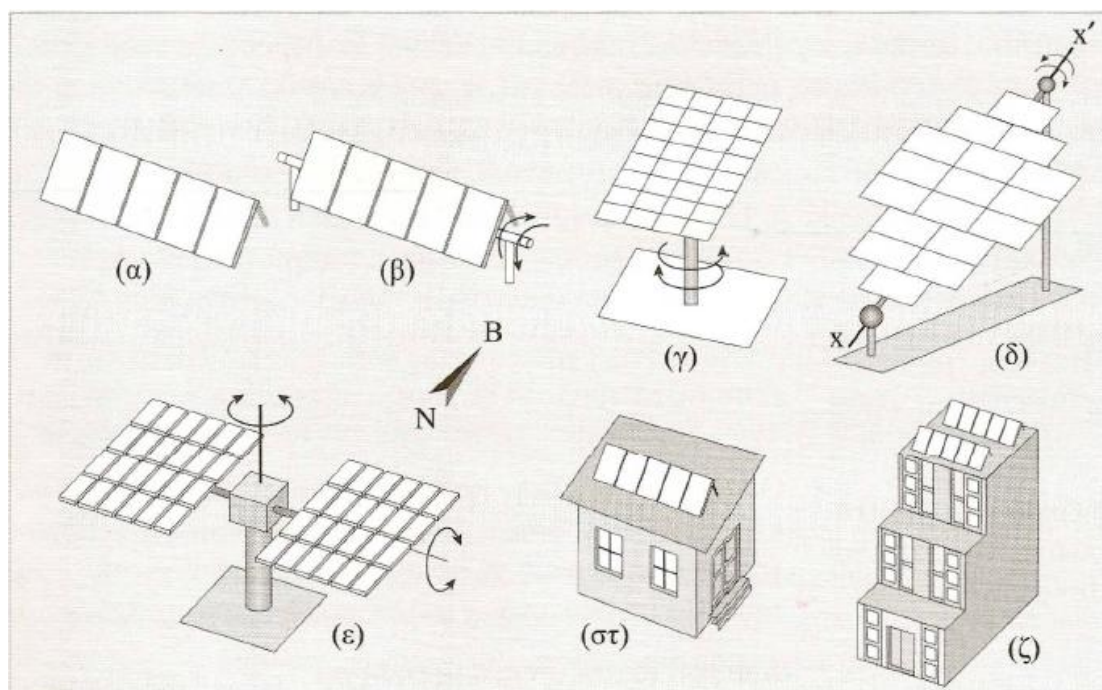
## 2.8 Τρόποι στήριξης των συλλεκτών και προσανατολισμός τους

Διακρίνουμε τρεις διαφορετικούς τρόπους στήριξης συλλεκτών. Σταθερής στήριξης, εποχιακά ρυθμιζόμενης στήριξης και συνεχούς παρακολούθησης της θέσης του

ήλιου, με διάταξη που ονομάζεται ηλιοτρόπιο (Solar Tracker). Το σχήμα 3.10 δείχνει μερικούς χαρακτηριστικούς τρόπους στήριξης ΦΒ συστοιχιών [3].

#### α). Στήριξη του συλλέκτη με σταθερή γωνία κλίσης. Γωνία κλίσης για βέλτιστη ενεργειακή απολαβή

Η απουσία κινητών μερών κατά την στήριξη της συστοιχίας με σταθερή κλίση, προσδίδει στη διάταξη επαρκή μηχανική αντοχή, ιδιαίτερα μάλιστα αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές όπου επικρατούν ισχυροί άνεμοι. Στατικές συλλεκτικές επιφάνειες χρησιμοποιούνται επίσης ενσωματωμένες σε κτίρια (σχήμα 2.11, περιπτώσεις (α), (στ), (ζ)). Η πιο αποδοτική περίπτωση είναι εκείνη κατά την οποία ο χώρος εγκατάστασης της συστοιχίας των συλλεκτών, δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, όλο το έτος. Κατά κανόνα επιλέγουμε νότιο αζιμουθιακό προσανατολισμό για τη συστοιχία και γωνία κλίσης κοντά στο γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης (σχήμα 2.12). Όταν η γωνία κλίσης ισούται ακριβώς με το γεωγραφικό πλάτος  $\phi$  του τόπου, οι ακτίνες του ήλιου πέφτουν κάθετα στο συλλέκτη δύο φορές το χρόνο (το μεσημέρι των ισημεριών).



Σχήμα 2.11 : (α) Τοποθέτηση ΦΒ συστοιχίας με σταθερή γωνία κλίσης (β) Συστοιχία με δυνατότητα στροφής γύρω από οριζόντιο άξονα (αλλαγή ζενίθιας γωνίας της συστοιχίας) (γ) Συστοιχία σε ηλιοτρόπιο αζιμουθιακής στροφής, με σταθερή γωνία κλίσης (δ) Συστοιχία με δυνατότητα στροφής ως προς τον άξονα (χχ'), ο οποίος διατηρείται κεκλιμένος συνήθως υπό γωνία ίση (ή μερικές φορές, λίγο μικρότερη) του γεωγραφικού πλάτους του τόπου, δηλαδή ως προς άξονα παράλληλο προς τον πολικό άξονα της γης. (ε) Τυπική διάταξη ηλιοτροπίου (Tracker) δύο αξόνων. (στ) ΦΒ συστοιχία στη στέγη κατοικίας (ζ) ΦΒ πλαίσια τοποθετημένα σε διάφορες θέσεις σε μεγάλη οικοδομή (τοποθέτηση υπό κλίση στη στέγη και σε προβόλους και κατακόρυφα (facade) σε όψεις νότιου προσανατολισμού).

Στον πίνακα 2.12 δίνονται ενδεικτικές τιμές γωνιών κλίσης συλλεκτών σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη. Αν δε διατίθενται μετεωρολογικά δεδομένα για τον τόπο εγκατάστασης του ΦΒ συστήματος, ο οποίος δεν πρέπει να σκιάζεται από εμπόδια, κατά τη διάρκεια της ημέρας το καλύτερο που έχουμε να κάνουμε είναι να επιλέξουμε γωνία κλίσης συλλέκτη ίση με  $\beta = \phi$  ( $5^\circ$  έως  $10^\circ$ ). Κατά πάσα

πιθανότητα, προσεγγίζει τη θέση της καλύτερης δυνατής εκμετάλλευσης της ημερήσιας ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, ετησίως.

Τέλος, αν ο συλλέκτης πρέπει να εγκατασταθεί σε περιοχές με φυσικά εμπόδια, που τον σκιάζουν ορισμένη περίοδο της ημέρας, πχ. κτίρια ή δένδρα, τότε ο συλλέκτης προσανατολίζεται έτσι ώστε να προκύπτει η βέλτιστη απόδοση. Κατά τη σύνταξη της σχετικής μελέτης, λαμβάνεται υπόψη, αφενός το τμήμα του ουρανού που αποκόπτεται από τα εμπόδια, αφετέρου, το μικροκλίμα της περιοχής.

| Περιοχή τιμών γεωγραφικού πλάτους (φ) του τόπου                         | Ενδεικτικές τιμές γωνίας κλίσης συλλέκτη με νότιο προσανατολισμό για το βόρειο ημισφαίριο και αντιστοίχως βόρειο προσανατολισμό για το νότιο ημισφαίριο                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Μικρά γεωγραφικά πλάτη, γύρω απ' τον Ισημερινό, $\varphi \leq 20^\circ$ | Ουσιαστικά $0^\circ$ . Στην πράξη συνίσταται μια μικρή γωνία κλίσης, $5^\circ$ - $10^\circ$ , ώστε η ροή του νερού πλύσης ή της βροχής, να απομακρύνει τα σώματα που επικάθονται στην όψη του ΦΒ πλαισίου (σκόνη, φύλλα, περιττώματα πουλιών κ.ά. )                                                                                                                                                                                                                                          |
| Μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, $\varphi > 20^\circ$                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● Σταθερή τοποθέτηση, απαίτηση για μέγιστη αποδοτικότητα ετησίως. <math>\rightarrow \varphi</math>-(<math>5^\circ</math> έως <math>10^\circ</math>)</li> <li>● Σταθερή τοποθέτηση. Κύρια απαίτηση κατά τη χειμερινή περίοδο. <math>\rightarrow \varphi + 10^\circ</math></li> <li>● Ρυθμιζόμενη κλίση δυο θέσεων ετησίως.<br/>Θερινή <math>\rightarrow \varphi - 15^\circ</math><br/>Χειμερινή <math>\rightarrow \varphi + 15^\circ</math></li> </ul> |

Πίνακας 2.13: Ενδεικτικές τιμές γωνιών κλίσης σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη [3].

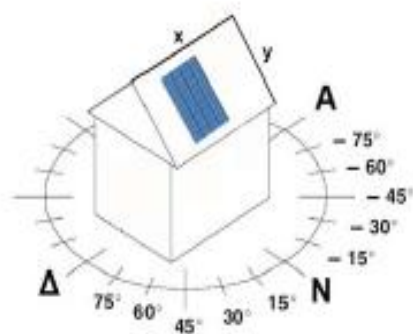
Σε περιπτώσεις όπου η στέγη του κτηρίου δεν έχει οριζόντια κλίση έχουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις:

I) Εφόσον έχει νότιο προσανατολισμό τότε:

α) Αν η γωνία κλίσης της στέγης είναι μικρότερη απ' την επιθυμητή τότε τοποθετούνται τα πλαίσια με κλίση ίση με το συμπλήρωμα της γωνίας.

Β) Αν η γωνία κλίσης της στέγης είναι μεγαλύτερη απ' την επιθυμητή τότε σ' αυτή τη περίπτωση τα πλαίσια τοποθετούνται σε οριζόντια κλίση πάνω στη στέγη.

II) Εφόσον έχει διαφορετικό προσανατολισμό τότε τα πλαίσια τοποθετούνται πάνω στη στέγη σε οριζόντια κλίση αλλά με μειωμένη απόδοση. Στον πίνακα 2.14 φαίνεται ενδεικτικά η απόδοση σε διάφορες κλίσεις.



Ενδεικτική απόδοση φωτοβολταϊκών σε διάφορες κλίσεις και προσανατολισμούς  
(με νότιο προσανατολισμό και στη βέλτιστη κλίση, παίρνετε το 100% της απόδοσης)

| Προσανατολισμός                  | Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο                                                 |                                                                                     |                                                                                      |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                                  | 0 °                                                                                | 30 °                                                                                | 90 °                                                                                 |
|                                  |  |  |  |
| Ανατολικός - Δυτικός             | 90%                                                                                | 85%                                                                                 | 50%                                                                                  |
| Νοτιοανατολικός - Νοτιοδυτικός   | 90%                                                                                | 95%                                                                                 | 60%                                                                                  |
| Νότιος                           | 90%                                                                                | 100%                                                                                | 60%                                                                                  |
| Βορειοανατολικός - Βορειοδυτικός | 90%                                                                                | 67%                                                                                 | 30%                                                                                  |
| Βόρειος                          | 90%                                                                                | 60%                                                                                 | 20%                                                                                  |

Πίνακας 2.14: Ενδεικτική απόδοση φωτοβολταϊκών σε διάφορες κλίσεις και προσανατολισμούς.[8]

## **β). Στήριξη με δυνατότητα εποχιακής ρύθμισης της κλίσης του συλλέκτη**

Στο σχήμα 2.12 παριστάνεται μια διάταξη συλλεκτών, με νότιο προσανατολισμό ( $A_S=0$ ), η οποία εκ κατασκευής έχει τη δυνατότητα εποχιακής ρύθμισης της κλίσης. Προσδιορίζονται οι κατάλληλες κλίσεις και ο χρόνος των αλλαγών. Οι τυπικές θέσεις του συλλέκτη είναι δύο : μια για το θερινό εξάμηνο (21 Μαρτίου-21 Σεπτεμβρίου), με κλίση ίση με  $\beta_{\theta}=\{\phi-(10^\circ \text{ έως } 15^\circ)\}$ , τιμή δηλαδή μικρότερη του γεωγραφικού πλάτους του τόπου κατά  $10^\circ$  έως  $15^\circ$ , και μια για το χειμερινό (22 Σεπτεμβρίου – 21 Μαρτίου), με κλίση ίση με  $\beta_{\chi}=\{\phi+(10^\circ \text{ έως } 15^\circ)\}$ . Όπως και στην περίπτωση συλλέκτη σταθερής κλίσης όλο το έτος, έτσι και στην περίπτωση επιλογής χειμερινής και θερινής θέσης, η επιλογή της βέλτιστης γωνίας για το συλλέκτη σε κάθε περίοδο, απαιτεί γνώση των τοπικών μετεωρολογικών συνθηκών (θερμοκρασίας- υγρασίας- ηλιοφάνειας) και της μορφολογίας και κάλυψης του εδάφους, που καθορίζει τη διάχυτη ανακλαστικότητα του (albedo) [3].

## **γ). Στήριξη με δυνατότητα στροφής του συλλέκτη γύρω από έναν ή δύο άξονες**

### **I. Στροφή γύρω από έναν άξονα**

Η συστοιχία περιστρέφεται με κατάλληλο μηχανισμό, γύρω από έναν άξονα, και στο τέλος της ημέρας, ο συλλέκτης επιστρέφει σε θέση αναμονής, συνήθως στο νοτιά. Το πρωί με την ανατολή του ήλιου, στρέφεται, έτσι ώστε να δέχεται από τον ήλιο το μέγιστο της διαθέσιμης ενέργειας του. Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

α) Αζιμουθιακό ηλιοτρόπιο : Η περιστροφή γίνεται ως προς κατακόρυφο άξονα (σχήμα 2.11 γ), έτσι ώστε ο ήλιος να βρίσκεται στο κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει την κάθετη στο συλλέκτη, του οποίου η γωνία κλίσης παραμένει σταθερή κατά την ημερήσια κίνησή του.

β) Ηλιοτρόπιο πολικού άξονα : Η συστοιχία έχει τη δυνατότητα στροφής γύρω από άξονα  $\chi\chi'$ , με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (σχήμα 2.11 ε). Έτσι, κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο ήλιος βρίσκεται συνεχώς στο επίπεδο που είναι κάθετο στο συλλέκτη και περιέχει τον άξονα  $\chi\chi'$ . Κατά τη διάρκεια του έτους, η γωνία μεταξύ των ακτίνων του ήλιου και της κάθετης στο συλλέκτη, κυμαίνεται στο διάστημα  $-23.5^\circ$  έως  $+23.5^\circ$ .

### **II. Στροφή γύρω από δύο άξονες**

Η παρακολούθηση του ήλιου με περιστροφή γύρω από δύο (2) άξονες, επιτυγχάνεται μέσω δύο, συνήθως διαδοχικών, κινήσεων του συλλέκτη με ηλεκτρικούς κινητήρες, είτε βηματικούς είτε κινητήρες συνεχούς περιστροφής, με μειωτήρες και έλεγχο στροφών, για τον προσανατολισμό του επιπέδου, κάθετα

στην απευθείας ηλιακή ακτινοβολία (σχήμα 2.11 ε). Ο προσδιορισμός των κατάλληλων γωνιών στροφής γίνεται με ειδικές διατάξεις (Encoders). Όμοιο μηχανικό σύστημα, σε πολύ μικρότερες διαστάσεις, χρησιμοποιείται για τη στροφή του πυρηλιομέτρου, οπτικού οργάνου παρακολούθησης του ήλιου και καταγραφής της πυκνότητας ισχύος της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας. Η διάταξη που περιγράψαμε, ονομάζεται ηλιοτρόπιο (Tracker) δυο αξόνων και χαρακτηρίζεται από το ότι ο συλλέκτης προσανατολίζεται συνεχώς προς τον ήλιο, έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να προσπίπτουν κάθετα (ή σχεδόν κάθετα) στην επιφάνεια του. Η διάταξη, με τη δύση του ήλιου, επιστρέφει σε θέση αναφοράς, που χαρακτηρίζεται από νότιο προσανατολισμό και μικρή γωνία κλίσης, προκειμένου να προφυλαχθεί από πιθανό ισχυρό άνεμο, μέχρι την ανατολή. Λίγο πριν την ανατολή του ήλιου, ο μηχανισμός στρέφει το συλλέκτη, έτσι ώστε οι ηλιακές ακτίνες τότε, να προσπίπτουν κάθετα σ' αυτόν. Από τη χρονική στιγμή αυτή, αρχίζει η παρακολούθηση του ήλιου. Όσο μικρότερη η περίοδος ενεργοποίησης του μηχανισμού στροφής, τόσο καλύτερα προσεγγίζεται η κατάσταση συνεχούς κάθετης πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων, χωρίς αυτό να είναι εξαιρετικά κρίσιμο. Μια γωνία  $10^\circ$ , μεταξύ των ακτίνων του ήλιου και της καθέτου στο επίπεδο του συλλέκτη, προκαλεί μείωση  $\sim 1.5\%$ , στην πυκνότητα ισχύος της απευθείας συνιστώσας στο επίπεδο του συλλέκτη, ακτινοβολίας. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια κίνησης της διάταξης προέρχεται από την παραγόμενη από τη συστοιχία, ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια.

Μειονέκτημα μιας τέτοιας διάταξης παρακολούθησης του ήλιου, δύο αξόνων, είναι η οικονομική επιβάρυνση για την κατασκευή των μηχανολογικών και ηλεκτρικών τμημάτων της καθώς και η έκθεση της συστοιχίας στον κίνδυνο καταστροφής, εξαιτίας ισχυρού ανέμου. Για το λόγο αυτό, σε συστήματα με μηχανική κίνηση για τον προσανατολισμό των συλλεκτών προς τον ήλιο, ελέγχεται η ταχύτητα του ανέμου, έτσι ώστε, στην περίπτωση ισχυρών ανέμων, οι συλλεκτικές επιφάνειες να διατάσσονται οριζόντια. Σ' αυτή τη θέση παρουσιάζουν μικρή μετωπική επιφάνεια προς τον άνεμο.

Οι διατάξεις πλήρους παρακολούθησης του ήλιου, με επίπεδα ΦΒ πλαίσια, έχουν εν γένει περιορισμένη χρήση και χρησιμοποιούνται κυρίως σε συγκεντρωτικά συστήματα, τα οποία λειτουργούν, ουσιαστικά, με την απ' ευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. Σε πολλές περιπτώσεις επιλέγεται η μερική παρακολούθηση, με αζιμουθιακούς συλλέκτες σταθερής γωνίας κλίσης, επειδή είναι απλούστερη, φθηνότερη και πιο αξιόπιστη κατασκευή, σε σχέση με το ηλιοτρόπιο δύο αξόνων ή αυτό του πολικού άξονα. Η στατική κατασκευή, παρότι σχετίζεται με χαμηλότερη ετήσια ενεργειακή απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας από τους συλλέκτες που τοποθετούνται σ' αυτή, αποτελεί απλούστερη και πιο αξιόπιστη κατασκευή. Το κόστος των ειδικών μηχανολογικών κατασκευών και ηλεκτρονικών οδήγησης του ηλιοτροπικού συστήματος παραμένει σημαντικό σε σύγκριση με το κόστος των ΦΒ πλαισίων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, σε κάθε περίπτωση προέχει η αξιόπιστη και ασφαλής λειτουργία του συστήματος συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας, το στατικό σύστημα αποτελεί, στις περισσότερες των περιπτώσεων, την πιο ενδεδειγμένη λύση, ιδιαίτερα στην περίπτωση εφαρμογών μικρής ισχύος, με χρήση επίπεδων ΦΒ πλαισίων [3].



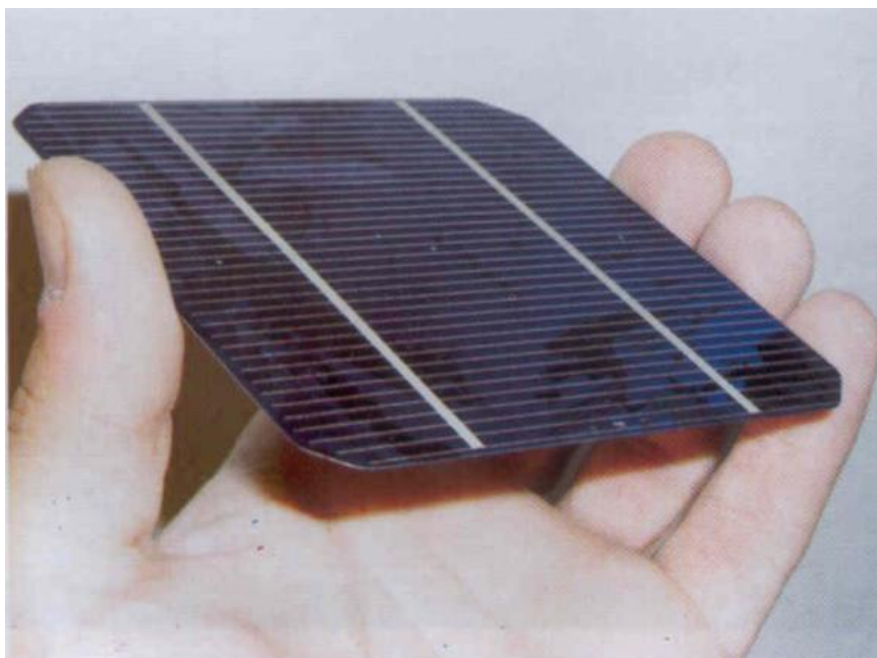
Παραδείγματα εφαρμογών

[8]

### 3. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

#### 3.1 Η δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Στα συνηθισμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία [9], το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται στην ένωση μεταξύ δύο περιοχών ενός κρυσταλλικού ημιαγωγού που είναι αντίθετου τύπου (π.χ.  $p$  και  $n$ ). Εάν ο ημιαγωγός είναι από πυρίτιο, η περιοχή τύπου- $n$  συνήθως εμπλουτίζεται με φώσφορο, που έχει πέντε ηλεκτρόνια σθένους (ένα περισσότερο από το πυρίτιο). Αυτή η περιοχή παρουσιάζει μεγάλη συγκέντρωση ηλεκτρονίων σε σχέση με τις οπές. Η περιοχή τύπου- $p$  εμπλουτίζεται με βόριο, που έχει τρία ηλεκτρόνια σθένους, ένα λιγότερο από το πυρίτιο. Εδώ η συγκέντρωση των οπών είναι μεγαλύτερη. Η μεγάλη διαφορά ηλεκτρονίων από την μια περιοχή στην άλλη δημιουργεί ένα μόνιμο ηλεκτρικό πεδίο με φορά από την περιοχή τύπου- $n$  προς την περιοχή τύπου- $p$ . Αυτό το πεδίο είναι υπεύθυνο για την κίνηση των ηλεκτρονίων, που παράγονται όταν το φως πέφτει πάνω στο στοιχείο, προς μια κατεύθυνση. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα αποτελούν ουσιαστικά διόδους  $p$ - $n$  ημιαγωγικών ενώσεων που λειτουργούν κάτω από συνθήκες ορθής πόλωσης [17].



**Σχήμα 3.1** φωτοβολταϊκό κύτταρο ημιαγωγών βασισμένο στο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο [16].

## 3.2 Αρχές λειτουργίας

Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο συνδεθεί με ένα φορτίο και εκτεθεί σε Ακτινοβολία δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού στο φορτίο και θα ρέει ρεύμα. Από το θετικό τμήμα αφήνει το ρεύμα το στοιχείο και επιστρέφει στο αρνητικό τμήμα. Κάτω από αυτές τις συνθήκες το φωτοβολταϊκό στοιχείο λειτουργεί σαν μια πηγή ενέργειας. Η διαδικασία που γίνεται στο στοιχείο μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

Απορροφώνται από το κύριο σώμα του ημιαγωγού τα φωτόνια που φτάνουν το εσωτερικό του στοιχείου έχοντας ενέργεια ίση ή μεγαλύτερή από το κενό ζώνης δημιουργώντας ζευγάρια ηλεκτρονίων και οπών που λειτουργούν σαν φορείς ρεύματος.

Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από τις διαφορετικές περιοχές p και n, ευθύνεται για τον διαχωρισμό των φορτίων πριν αυτά έχουν την δυνατότητα να ξαναενωθούν. Ως αποτέλεσμα είναι ότι αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού και ρέει ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα.

Η παρουσία της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος των τμημάτων της συσκευής παράγει, όπως σε κάθε ένωση p-n, φαινόμενα έγχυσης και ανασυνδυασμού των ηλεκτρονίων και των οπών.

Όταν ένα φορτίο είναι συνδεδεμένο σε ένα ακτινοβολούμενο φωτοβολταϊκό στοιχείο το ρεύμα που ρέει είναι το καθαρό αποτέλεσμα δύο συνιστωσών του εσωτερικού ρεύματος:

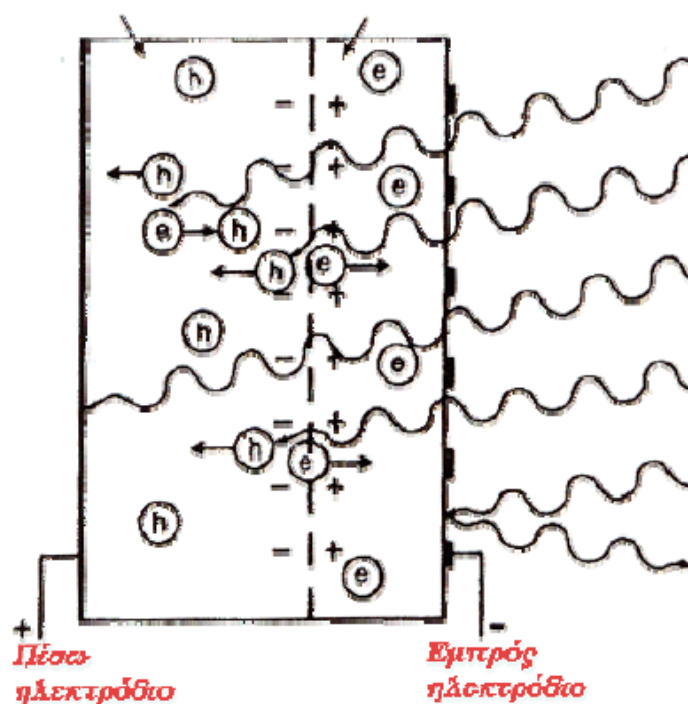
- Το φωτογενές ρεύμα ή απλά φωτόρευμα,  $I_L$ , λόγω της παραγωγής των φορτίων από το φως.
- Το σκοτεινό ρεύμα, dark current  $I_D$ , λόγω του ανασυνδυασμού των φορτίων. Θεωρώντας το φωτόρευμα σαν θετικό, μπορεί να γραφτεί ότι:

$$I = I_L - I_D(V) \quad (3.1)$$

όπου  $I$  είναι το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου και  $V$  η τάση εξόδου του. Αυτή είναι η θεμελιώδης χαρακτηριστική εξίσωση του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

### 3.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου, (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) οι οποίοι καθώς κυκλοφορούν στο στερεό μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου  $\Omega$  και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.



Σχήμα (3.1) Αναπαράσταση φωτοβολταϊκού φαινομένου

Η ενέργεια ενός φωτονίου  $E$  :

$$E = h \cdot \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.2)$$

Όπου

$h$ : η σταθερά του Planck ( $h=6.3 \cdot 10^{-34}$  Js) και

$c$  :η ταχύτητα του φωτός ( $c = 3 \cdot 10^8$ m/s)

αν το ενεργειακό διάκενο είναι σε μονάδες ηλεκτρονιοβόλτ (eV) και το μήκος κύματος σε μικρόμετρα ( $\mu\text{m}$ ), τότε το μέγιστο χρησιμοποιήσιμο μήκος κύματος ακτινοβολίας σε ένα ημιαγωγό, ενεργειακού διακένου  $E_g$  , θα είναι :

$$\lambda_g = \frac{1.238}{E_g} \quad (3.3)$$

Η ροή των φωτονίων ( $\Phi$ ), δηλαδή το πλήθος των φωτονίων ανά μονάδα επιφανείας και χρόνου, θα είναι :

$$\Phi = \frac{H}{h\nu} = \frac{H\lambda}{hc} \quad (3.4)$$

Νόμος του BEER:

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-ax) \quad (3.5)$$

Όπου:

$\Phi(x)$ : Η τιμή της ροής των φωτονίων

$\Phi_0$  : Η αρχική τιμή της ροής των φωτονίων στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού

$x$  : Η απόσταση που διανύει η ακτινοβολία μέσα στον ημιαγωγό

$a$  : συντελεστής απορρόφησης (αντίστροφες μονάδες μήκους)

η τιμή του  $a$  μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας ή την ενέργεια των φωτονίων.

Φωτορεύμα δημιουργείται όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται μια κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα  $I_\Phi$ , που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Για την πυκνότητα του φωτορεύματος, ισχύει ικανοποιητικά η σχέση:

$$I_\Phi = e \cdot g(L_n + L_p) \quad (3.6)$$

Όπου:

$e$  : το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

$g$  : ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών φορέων

$L_n, L_p$  : τα μέσα μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών, αντίστοιχα.

φασματική απόκριση ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, σε σχέση με τη φωτονική ροή  $\Phi$ , δηλαδή με το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου για ακτινοβολία μήκους κύματος  $\lambda$ , η φασματική απόκριση  $S(\lambda)$  θα είναι :

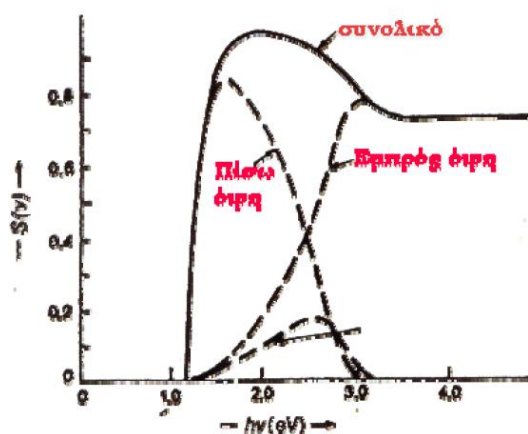
$$S(\lambda) = \frac{I_{\Phi}(\lambda)}{e \cdot \Phi(\lambda)} \quad (3.7)$$

Όπου:

$\Phi(\lambda)$  : το πλήθος των φωτονίων με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από  $\lambda$  μέχρι  $\lambda+d\lambda$ , επομένως το συνολικό φωτόρευμα του στοιχείου όταν δέχεται πολυχρωματική ακτινοβολία θα είναι :

$$I_{\Phi} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda \quad (3.8)$$

Η τιμή της φασματικής απόκρισης εκαρτάται από πολλούς κατασκευαστικούς παράγοντες όπως: ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου, ο συντελεστής απορρόφησης και το πάχος του ημιαγωγού, το πλήθος των επανασυνδεδεμένων φορέων κ.τ.λ.



Σχήμα 3.2: Φαίνεται η μεταβολή της φασματικής απόκρισης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου του εμπορίου σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται.

Όταν το ποσοστό της επιφάνεια του στοιχείου δεν είναι αμελητέο γράφεται :

$$I_{\Phi} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda)[1 - R(\lambda)]\Phi(\lambda)d\lambda \quad (3.9)$$

όπου  $R(\lambda)$  είναι ο δείκτης ανάκλασης για την ακτινοβολία μήκους κύματος  $\lambda$  [1].

### 3.4 Η χαρακτηριστική I-V σε συνθήκες φωτεινότητας

Το ρεύμα που τροφοδοτείται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο σε κάποιο φορτίο σύμφωνα με τη σχέση (3.1) είναι αυτό που δίνεται από τη διαφορά μεταξύ του φωτορεύματος  $I_L$  και του ανασυνδυασμένου ρεύματος  $I_D(V)$ . Με το  $I_L$  να οφείλεται στην τάση πόλωσης από την παραγόμενη τάση. Για χάριν απλοποίησης το ρεύμα μπορεί να εκφραστεί από μια εκθετική συνάρτηση, η χαρακτηριστική εξίσωση για την συσκευή είναι:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(q_e \frac{V}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (3.10)$$

όπου

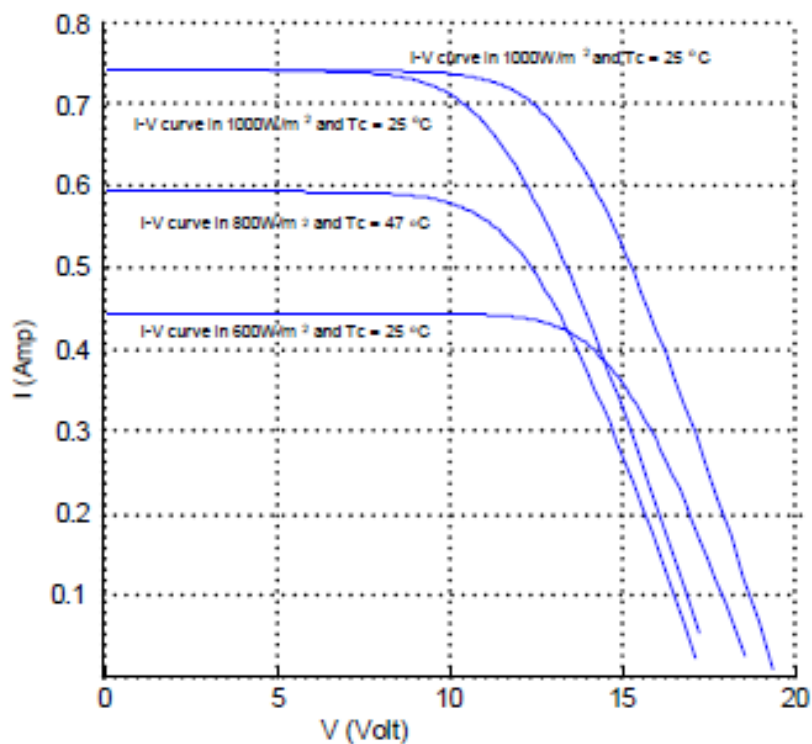
m παράγοντας ιδανικότητας,

k είναι η σταθερά Boltzman,

$q_e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου

T η θερμοκρασία του στοιχείου.

Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου (I-V) που αντιπροσωπεύει αυτή την εξίσωση παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3, και φαίνονται οι χαρακτηριστικές για διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας.



Σχήμα 3.3

Αυτός ο τρόπος αναπαράστασης υιοθετεί μία σύμβαση προσήμου η οποία θεωρεί το ρεύμα που παράγεται σαν θετικό. Με αυτή την σύμβαση, το πρώτο τεταρτημόριο του I-V επιπέδου αντιστοιχεί στην περιοχή όπου το στοιχείο παραδίδει το ρεύμα στο φορτίο στο οποίο εφαρμόζεται θετική τάση. Με άλλα λόγια, το στοιχείο λειτουργεί σαν μια πηγή ενέργειας.

### 3.5 Ρεύμα Βραχυκύκλωσης και Τάση Ανοιχτοκύκλωσης

Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.3, η μεγαλύτερη τιμή του ρεύματος με το στοιχείο να λειτουργεί σαν γεννήτρια (στο πρώτο τεταρτημόριο) εμφανίζεται κάτω από συνθήκες βραχυκύκλωσης, όταν  $V = 0$ . Σύμφωνα με την εξίσωση (3.1), το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , δίνεται από την σχέση:

$$I_{sc} \equiv I(V=0) = I_L \quad (3.11)$$

Εάν το φωτοβολταϊκό στοιχείο βρίσκεται σε συνθήκη ανοιχτοκύκλωσης, έτσι ώστε  $I = 0$ , τότε η τιμή της τάσης είναι η μεγαλύτερη που μπορεί να εμφανιστεί στο πρώτο τεταρτημόριο. Αυτή ονομάζεται τάση ανοιχτοκύκλωσης,  $V_{oc}$ . Τότε από την σχέση (3.10), εξάγεται η σχέση:

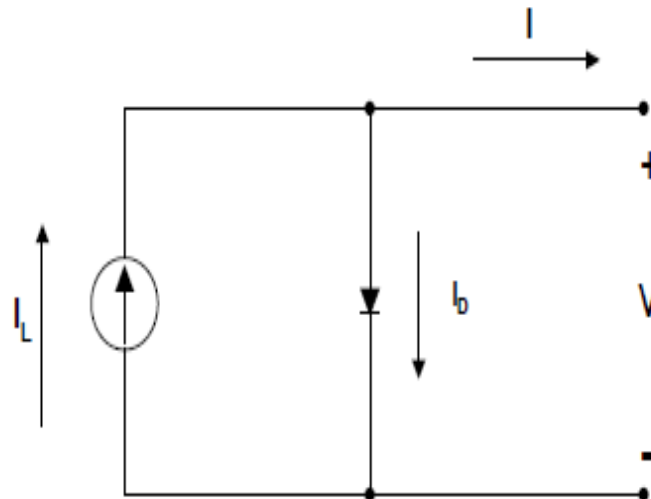
$$V_{oc} = m \frac{kT}{q_e} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (3.12)$$

Ο προσδιορισμός των δύο παραπάνω παραμέτρων λειτουργίας επιτρέπει να γραφτεί η χαρακτηριστική εξίσωση του στοιχείου στην παρακάτω μορφή:

$$I = I_{sc} \left[ 1 - \exp \left( -q_e \frac{(V_{oc} - V)}{mkT} \right) \right] \quad (3.13)$$

### 3.6 Ισοδύναμο κύκλωμα για το ιδανικό στοιχείο

Στο σχήμα 3.4 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του ιδανικού στοιχείου που περιγράφεται από την εξίσωση (3.10). Αποτελείται από μια ιδανική δίοδο p-n που έχει ανάστροφο ρεύμα κόρου  $I_0$  και μια ιδανική πηγή ρεύματος  $I_L$ .



Σχήμα 3.4 Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου.

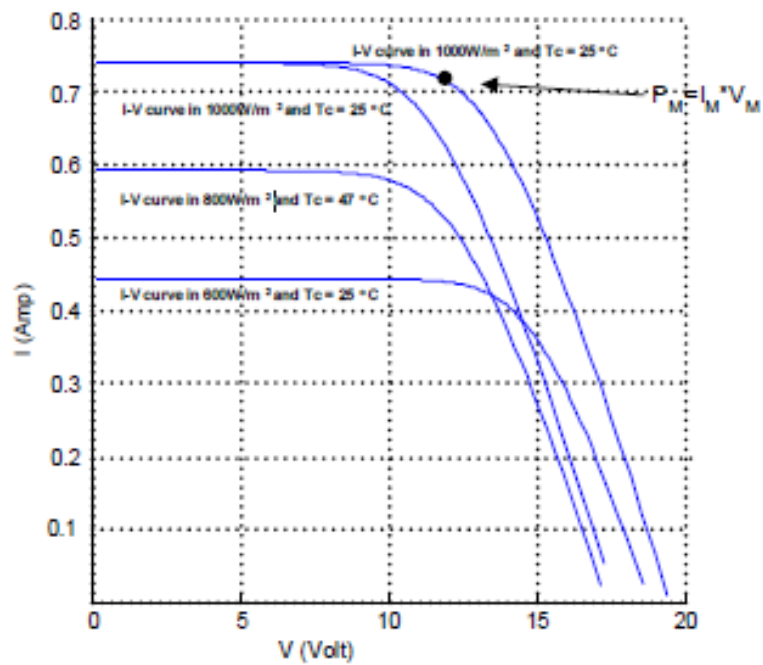
### 3.7 Σημείο μέγιστης ισχύος

Η περιοχή της καμπύλης μεταξύ  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$  αντιστοιχεί στην λειτουργία του στοιχείου σαν γεννήτρια. Η ισχύς,  $P$ , που παράγεται είναι το γινόμενο  $P = IV$ . Υπάρχει ένα σημείο στο οποίο η ισχύς που παράγεται είναι μέγιστη όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5 στην χαρακτηριστική του φωτοβολταϊκού στοιχείου ( $I_M$ ,  $V_M$ ). Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύος. Οι τιμές των  $I_M$  και  $V_M$  μπορούν να εξαχθούν από την συνθήκη για το μέγιστο:

$$\frac{dP}{dV}=0 \Rightarrow 0=d(IV)_M \equiv I_M dV + V_M dI \quad (3.14)$$

Η σχέση (3.14) μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\left[ \frac{dI}{dV} \right]_M = \frac{-I_M}{V_M} \quad (3.15)$$



**Σχήμα 3.5.** Σημείο μέγιστης ισχύος  $P_M$  για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο

Αυτή η σχέση αναπαριστάνει την γενική συνθήκη για το μέγιστο. Όταν εφαρμόζεται σε ένα στοιχείο τότε το αποτέλεσμα είναι το εξής:

$$I_M = I_L + \frac{I_0}{\left(1 + \frac{mkT}{(q_s V_M)}\right)} \quad (3.16)$$

Επίσης πρέπει να ικανοποιείται και η εξίσωση του στοιχείου:

$$I_M = I_L - I_0 \left[ \exp\left(q_s \frac{V_M}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (3.17)$$

Από αυτές τις δύο ταυτόσημες εξισώσεις μπορούν να υπολογιστούν τα  $I_M$  και  $V_M$ . Μία πολύ προσεγγιστική αναλυτική λύση δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{I_M}{I_L} = 1 - a^{-b} \quad (3.18)$$

$$\frac{V_M}{V_{oc}} \approx 1 - \ln \frac{(a)}{a} \quad (3.19)$$

Όπου:

$$a = 1 + \ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right) \quad \text{και} \quad b = \frac{a}{(a+1)} \quad (3.20)$$

### 3.8 Παράγοντας πλήρωσης (Fill Factor) και αποδοτικότητα μετατροπής ενέργειας

Στο σημείο μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί το γινόμενο  $I_M \cdot V_M$  που μπορεί να παραδοθεί στο φορτίο, που είναι μικρότερο από την τιμή του γινομένου του ρεύματος βραχυκύκλωσης με την τάση ανοιχτοκύκλωσης  $I_{sc} \cdot V_{oc}$ . Παράγοντας πλήρωσης (fill factor) ονομάζεται το πηλίκο αυτών των δύο γινομένων και το οποίο δίνει ένα κριτήριο ποσοτικό της μορφής της χαρακτηριστικής καμπύλης:

$$FF = \frac{(I_M V_M)}{(I_{sc} V_{oc})} \quad (3.21)$$

Για το παράγοντα πλήρωσης χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση τότε η σχέση για τη μέγιστη ισχύ που παραδίδεται από το στοιχείο είναι:

$$P_M = FF I_{sc} V_{oc} \quad (3.22)$$

Από τις εξισώσεις (3.18) και (3.19) και παίρνοντας υπόψιν ότι πρακτικά στα στοιχεία το  $a$  είναι μεγαλύτερο από 20, μπορεί να εξαχθεί η ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό του  $FF$ :

$$FF = 1 - \frac{(\ln(a) - 1)}{a} \quad (3.23)$$

ο συντελεστής  $a$  δίνεται από την σχέση (3.20).

Η σχέση αυτή δείχνει ότι το  $FF$  μπορεί να μεταβληθεί και η μεταβολή αυτή εξαρτάται από το στοιχείο και τις συνθήκες λειτουργίας. Η εξίσωση (3.22) δείχνει το ότι η μέγιστη ισχύς εξαρτάται σε σχέση με τις βασικές συνθήκες λειτουργίας που είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτού κύκλου. Η αποδοτικότητα της μετατροπής ενέργειας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ως το πηλίκο μεταξύ της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που μπορεί να προσφερθεί στο φορτίο και της ισχύος  $P_L$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

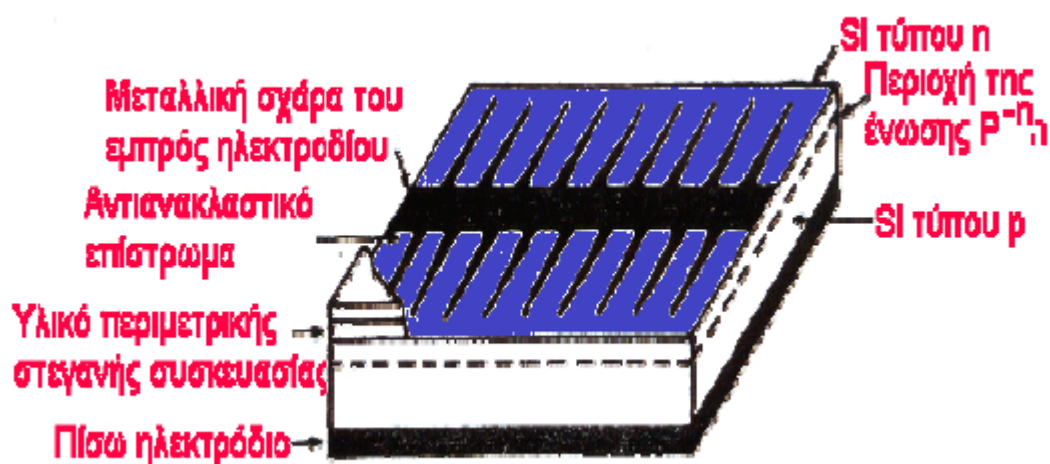
$$\eta \equiv \frac{(I_M V_M)}{P_L} \equiv \frac{(FF I_{sc} V_{oc})}{P_L} \quad (3.24)$$

Φυσικά, αυτή η αποδοτικότητα και η μέγιστη ισχύ αποκτώνται μόνο εάν η αντίσταση του φορτίου έχει την κατάλληλη τιμή  $V_M/I_M$ . Οι εξισώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω περιγράφουν την συμπεριφορά των ιδανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων, στα οποία τα μόνα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι η παραγωγή και ο ανασυνδυασμός των φορτίων.

### 3.9 Υλικά κατασκευής φωτοβολταϊκών διατάξεων

#### Ηλιακά στοιχεία πυριτίου

Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με άμεσο ενεργειακό διάκενο 1,1eV. Η θεωρητική απόδοση των ηλιακών στοιχείων πυριτίου μπορεί να φθάσει μέχρι 23,92% για συνθήκες AM1. Πειραματικά η μεγαλύτερη απόδοση ηλιακού στοιχείου πυριτίου σε συνθήκες AM1 μετρήθηκε εργαστηριακά 19%, με απώλειες ανάκλασης 3% και συντελεστή πλήρωσης 0,77. Στις πρακτικές εφαρμογές τα ηλιακά στοιχεία μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου μεγάλης επιφάνειας έχουν απόδοση περίπου 10-12% ή λίγο μεγαλύτερη.



Σχήμα 3.6 Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου

### Φωτοβολταϊκά στοιχεία θειούχου καδμίου

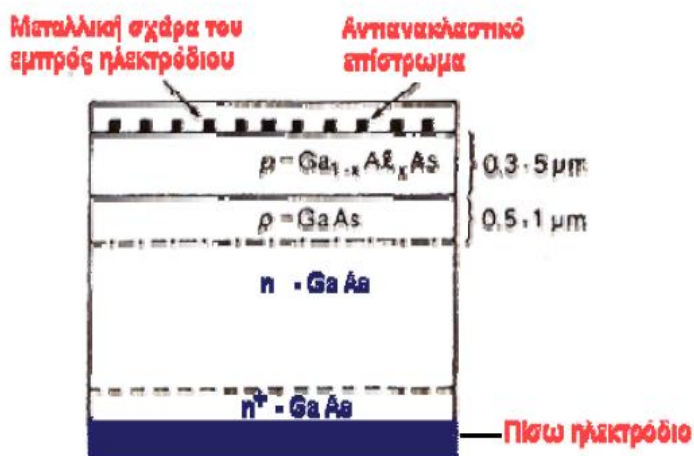
Το θειούχο κάδμιο (CdS) είναι ένας ημιαγωγός με άμεσο και σχετικά μεγάλο διάκενο ( $E_g = 2,45 \text{ eV}$ ), που έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλές οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές, όπως για την κατασκευή φωτοκυττάρων, ενισχυτών φωτός, φωσφοριτών ανιχνευτών ακτινοβολίας κ.λ.π. Το CdS συμπεριφέρεται συνήθως σαν ημιαγωγός τύπου n. Δηλαδή οι φορείς πλειονότητας είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, χωρίς να απαιτείται η προσθήκη ξένων ατόμων-δοτών. Η λειτουργία των ΦΒ στοιχείων από CdS οφείλεται στην ετεροένωση μεταξύ του στρώματος θειούχου χαλκού, που σχηματίζεται με την επίδραση του CdS στον Cu (χαλκός), από τον οποίο, είναι κατασκευασμένο το εμπρός ηλεκτρόδιο. Το  $\text{Cu}_x\text{S}$  είναι επίσης ημιαγωγός, με έμμεσο ενεργειακό διάκενο 1,2 eV και έχει χαρακτήρα τύπου p. Η πυκνότητα του παραγόμενου φωτορεύματος στα ηλιακά στοιχεία  $\text{Cu}_x\text{S}/\text{CdS}$ , είναι μικρή, η μισή περίπου σε σύγκριση με τα ηλιακά στοιχεία πυριτίου. Τα ηλιακά στοιχεία  $\text{Cu}_x\text{S}/\text{CdS}$  έχουν αρκετά ικανοποιητική απόδοση, περίπου 10%. Δεν εξασφαλίζουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής (πάνω από 20 χρόνια) που αναμένεται για τα ηλιακά στοιχεία πυριτίου.



Σχήμα 3.7 Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου θειούχου καδμίου

### Ηλιακά στοιχεία Αρσενικού Γαλλίου

Το ασηνικούχο γάλλιο (GaAs) είναι ένας ημιαγωγός με ενεργειακό διάκενο 1,43 eV και με θεωρητική απόδοση περίπου 25%. Το σχετικά μεγάλο ενεργειακό διάκενο του GaAs έχει σαν αποτέλεσμα την καλή του συμπεριφορά στις κάπως υψηλές θερμοκρασίες. Τις μεγαλύτερες αποδόσεις, από τα ηλιακά στοιχεία GaAs, έχουν δώσει τα στοιχεία ετεροενώσεων με τα ημιαγωγιμα κράματα του συστήματος Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As' όπου το x παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1. Σε πειραματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία της μορφής αυτής μετρήθηκαν αποδόσεις περίπου 24% που είναι πολύ κοντά στο θεωρητικό τους μέγιστο (26-27%).



Σχήμα 3.8 Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου ασηνικού γαλλίου

### 3.10 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Η τάση που εκδηλώνει ένα συνηθισμένο ΦΒ στοιχείο πυριτίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι 0,5V περίπου και η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μόλις 0,4W περίπου. Για αυτό, τα ΦΒ στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση ΦΒ γεννητριών τοποθετούνται, ανά 10 ως 50 περίπου, σε ένα πλαίσιο, με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Στο πλαίσιο, τα στοιχεία συνδέονται στη σειρά σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση μιας επιθυμητής τάσης. Διαμορφώνεται

έτσι το ΦΒ πλαίσιο, που είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση των ΦΒ γεννητριών. Σε συμβατικές συνθήκες αιχμής έχουν συνήθως, ανάλογα με τον τύπο και τον κατασκευαστή, τάση εξόδου από 4 V μέχρι 22 V , και ένταση ρεύματος από περίπου 0,5 A μέχρι 2,5A.

#### Η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ο συντελεστής απόδοσης του ΦΒ πλαισίου ( $\eta_{\pi}$ ) εκφράζει τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ΦΒ πλαίσιο ( $P_{\pi}$ ), προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του  $S$ .

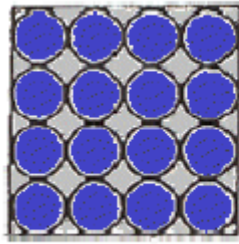
$$\eta_{\pi} = \frac{P_{\pi}}{H \cdot S} \left[ \frac{W}{(W / m^2) \cdot m^2} \right] \quad (3.25)$$

$$\eta_{\pi} = \frac{E}{\Pi \cdot S} \left[ \frac{kWh}{(kWh / m^2) \cdot m^2} \right] \quad (3.26)$$

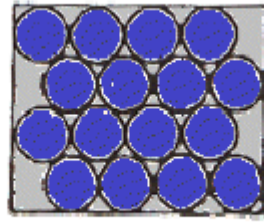
όπου  $\Pi$  είναι η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που πέφτει στην επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου. Η τιμή του  $\Pi$  εξαρτάται και από τον συντελεστή κάλυψης του πλαισίου ( $\sigma_{\kappa}$ ), που ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας του ημιαγωγού όπου γίνεται η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, προς την συνολική επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου. Θα ισχύει η σχέση :

$$\eta_{\pi} = \eta \cdot \sigma_{\kappa} \quad (3.27)$$

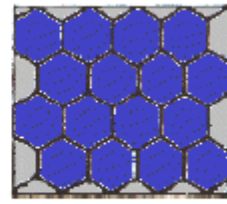
Η τιμή του  $\sigma_{\kappa}$  εξαρτάται κυρίως από το σχήμα και την πυκνότητα της τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων πάνω στο ΦΒ πλαίσιο. Συνήθως κυμαίνεται από περίπου 0,78, για κυκλικά στοιχεία σε παράλληλες στοιχισμένες σειρές φτάνει μέχρι σχεδόν 1,00 για τα μεγαλύτερου κόστους τετραγωνικά ή εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία



(α)



(β)



(γ)

#### Η επίδραση της θερμοκρασίας και της ρύπανσης

Για θερμοκρασίες διαφορετικές από τη συμβατική, ως συντελεστή απόδοσης των ΦΒ πλαισίων παίρνουμε το γινόμενο:

$$\eta_{\pi} \cdot \sigma_{\theta}$$

Σε συμβατική θερμοκρασία ο  $\sigma_{\theta}=1$ , και για τα συνηθισμένα ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από αυτή. Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή των ΦΒ πλαισίων, ιδίως όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειας του από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από την θάλασσα κ.α.Ο αδιάστατος συντελεστής καθαρότητας ( $\sigma_{\rho}$ ), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο ΦΒ πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ που όταν η επιφάνεια του είναι τελείως καθαρή. Η τιμή του  $\sigma_{\rho}$  είναι τόσο μικρότερη από τη μονάδα, όσο εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του ΦΒ πλαισίου, όσο σπανιότερες είναι οι βροχές στην περιοχή κτλ.

$$E = \Pi \cdot S \cdot \eta_{\pi} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\rho} \quad (3.28)$$

#### Η ισχύς αιχμής του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Η ισχύς αιχμής ( $P_{\alpha}$ ), αντιστοιχεί στην παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν το ΦΒ πλαίσιο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1 ήλιου, δηλαδή 1 kW/m<sup>2</sup>. Από την σχέση που δίνει την απόδοση ηπείναι φανερό ότι :

$$P_a(kWp) = 1(kW / m^2) \cdot S(m^2) \cdot \eta_{\pi} \quad (3.29)$$

Στην περίπτωση, που γνωρίζουμε μόνο την ισχύ αιχμής  $P_a$  για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του ΦΒ πλαισίου, αντί για την παραπάνω σχέση χρησιμοποιούμε την ισοδύναμη σχέση :

$$E(kWh / d) = \Pi(kWh / m^2 d) \cdot \frac{P_a(kWp)}{1(kW / m^2)} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\rho} \quad (3.30)$$

Η ισχύς αιχμής του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Η ισχύς αιχμής ( $P_a$ ), αντιστοιχεί στην παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν το ΦΒ πλαίσιο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1 ήλιου, δηλαδή 1 kW/m<sup>2</sup>. Από την σχέση που δίνει την απόδοση  $\eta_{\pi}$  είναι φανερό ότι :

$$P_a(kWp) = 1(kW / m^2) \cdot S(m^2) \cdot \eta_{\pi} \quad (3.31)$$

Στην περίπτωση, που γνωρίζουμε μόνο την ισχύ αιχμής  $P_a$  για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του ΦΒ πλαισίου, αντί για την παραπάνω σχέση χρησιμοποιούμε την ισοδύναμη σχέση :

$$E(kWh / d) = \Pi(kWh / m^2 d) \cdot \frac{P_a(kWp)}{1(kW / m^2)} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\rho} \quad (3.32)$$

### 3.11 Φωτοβολταϊκά πάνελ και συστοιχίες

Ένα πάνελ μπορεί να αποτελείται από περισσότερα χωριστά πλαίσια (το ένα δίπλα στο άλλο), που είναι σε κοινή συσκευασία και κοινή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους. Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός ΦΒ συστήματος, οι συνδέσεις των ΦΒ στοιχείων μέσα στα πλαίσια, αλλά και στα πάνελ ή ανάμεσα στα γειτονικά πλαίσια και πάνελ, δεν είναι μόνο στη σειρά αλλά και παράλληλες. Στις μεγάλες ΦΒ εγκαταστάσεις π.χ. συνολικής ισχύος αιχμής πάνω από 20 kWp, πολλές ΦΒ συστοιχίες σχηματίζουν ένα υποσυγκρότημα συστοιχιών (arrays subfield) και το σύνολο των υποσυγκροτημάτων αποτελεί το συγκρότημα συστοιχιών (array field) ή το ΦΒ πάρκο του ΦΒ σταθμού. Κάθε ΦΒ πλαίσιο πρέπει να έχει ανοικτό ορίζοντα. Σε μία τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $\pi^{\circ}$ , η προϋπόθεση του ανοικτού ορίζοντα θεωρείται ότι εξασφαλίζεται όταν η γωνία του ύψους ( $\beta_{\varepsilon}$ ) των γειτονικών συστοιχιών, δέντρων, κτιρίων, ή άλλων εμποδίων ικανοποιεί μέσα σε μια αζιμούθια γωνία από  $-60^{\circ}$  μέχρι  $+60^{\circ}$  προς το Νότο, τη σχέση :

$$\beta_{\varepsilon} \leq 48^{\circ} - \pi^{\circ}$$

Για παράδειγμα στη Αθήνα, που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος  $38^{\circ}$  η γωνία του ύψους των διαφόρων εμποδίων δεν πρέπει να ξεπερνά τις  $10^{\circ}$ .

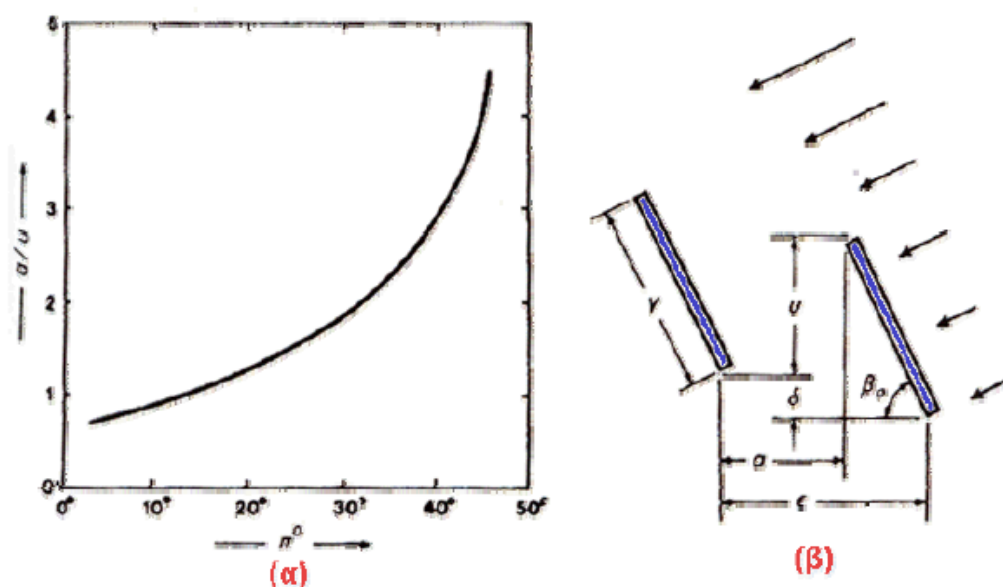
Το ακόλουθο διάγραμμα μας βοηθά στον προσδιορισμό της απόστασης ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των ηλιακών συλλεκτών στις ΦΒ συστοιχίες, ώστε η μια σειρά να μη σκιάζει αισθητά την επόμενη. Συγκεκριμένα, το διάγραμμα δίνει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή του λόγου της ελεύθερης απόστασης ανάμεσα στις δύο σειρές ( $\alpha$ ) προς την επικάλυψη του ύψους της κατασκευής στήριξης του συλλέκτη ( $u$ ). Αν  $\gamma$  είναι το πλάτος το στηρίγματος (που συμπίπτει με το πλάτος του συλλέκτη, δηλαδή του ΦΒ πλαισίου, ή του πάνελ),  $\beta_{\sigma}$  είναι η κλίση του, και  $\delta$  είναι η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στα στηρίγματα των δύο σειρών, τότε το  $u$  δίνεται προφανώς από την σχέση :

$$u = \gamma \cdot \sin \beta_{\sigma} - \delta \quad (3.33)$$

Με την βοήθεια του διαγράμματος την αντίστοιχη του  $\alpha$ , και από τη σχέση :

$$\varepsilon = a + \gamma \cdot \cos \beta_{\sigma} \quad (3.34)$$

υπολογίζουμε το  $\varepsilon$ , δηλαδή την ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση των σειρών [1].



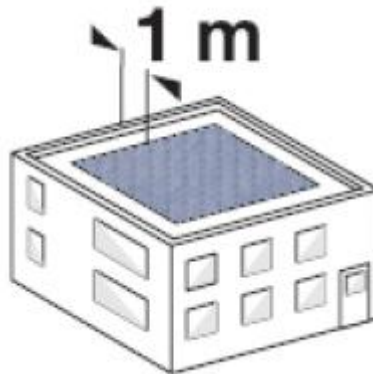
Σχήμα 3.9. α) Η καμπύλη του λόγου της ελεύθερης απόστασης  $a$  ανάμεσα στις γειτονικές σειρές των ηλιακών συλλεκτών μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας προς την επικάλυψη του ύψους του  $u$ , σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου  $\pi^\circ$  ώστε να μην εμποδίζεται ουσιαστικά η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας. β) Η έννοια των μηκών  $a, \gamma, \delta$  και  $\varepsilon$ , και της γωνίας κλίσης  $\beta_\sigma$  για την διάταξη των ηλιακών συλλεκτών στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες [10].

Σε περίπτωση τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών σε υπάρχουσες στέγες, θα πρέπει αυτή να γίνεται εντός του όγκου της στέγης ακολουθώντας την κλίση τους και να απέχει μισό μέτρο από τη περιγράμμά της (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10 τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε στέγες

Αν τα φωτοβολταϊκά τοποθετούνται σε δώμα, θα πρέπει η απόσταση από το στηθαίο του δώματος να είναι ένα (1) μέτρο εσωτερικά αυτού για λόγους ασφαλείας (Σχήμα 3.11)



Σχήμα 3.11 Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε δώμα [8].

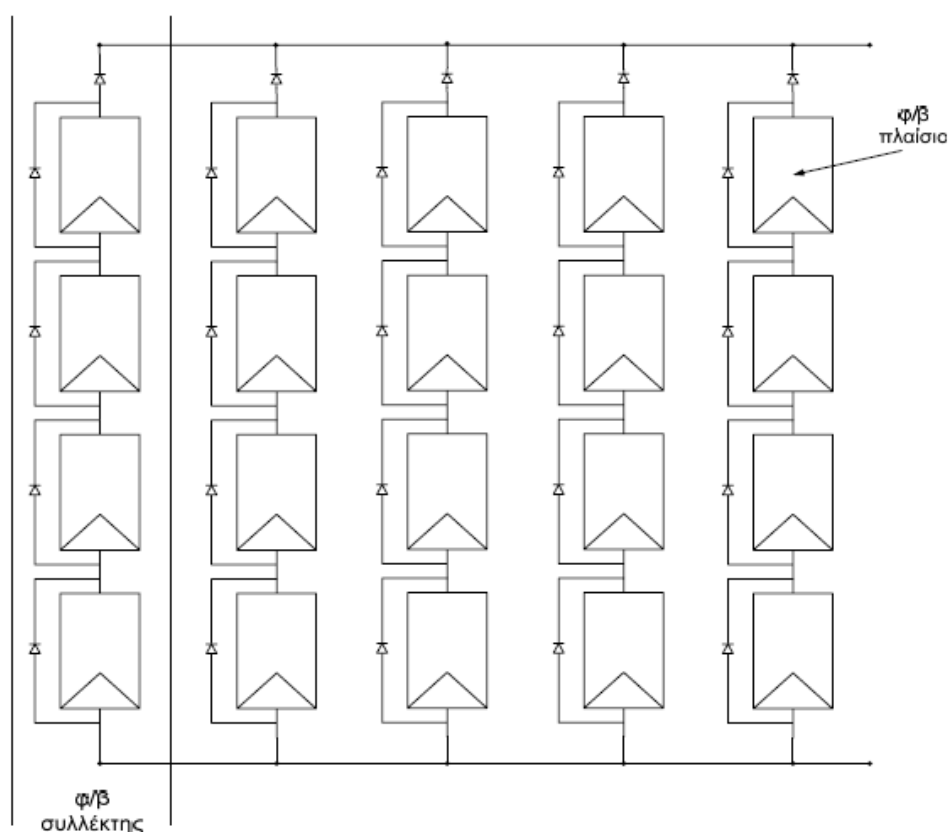
## 3.12 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια

Η ΦΒ γεννήτρια είναι το βασικό χαρακτηριστικό συστατικό κάθε φωτοβολταϊκής εφαρμογής. Καλείται έτσι διότι μέσω των ηλιακών στοιχείων που περιλαμβάνει είναι η μονάδα παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Μπορεί να αποτελείται από ένα μόνο πλαίσιο ή ένα πάνελ. Σε μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, ωστόσο, αποτελείται από ομάδες περισσότερων ΦΒ πλαισίων ή πάνελ, δηλαδή από ΦΒ συστοιχίες.

### 3.13 Συνδεσμολογία ΦΒ συστοιχιών

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι σύνδεσης των συστατικών στοιχείων μιας ΦΒ γεννήτριας. Αυτοί αποτελούνται από συνδυασμούς παράλληλης και σε σειρά σύνδεσης των στοιχείων αυτών, κατά τρόπο ώστε η παραγόμενη τάση να είναι σύμφωνη με τις δοθείσες απαιτήσεις (π.χ. σύνδεση της γεννήτριας με φορτίο που έχει ονομαστική τάση λειτουργίας  $V$  volts). Φυσικά, τα χαρακτηριστικά που θα διακρίνουν τη γεννήτρια, είναι συνάρτηση των ονομαστικών χαρακτηριστικών των στοιχείων που την αποτελούν.

Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζεται σαν παράδειγμα μιας ΦΒ γεννήτριας, αποτελούμενης από 5 ΦΒ συλλέκτες, κάθε ένας από τους οποίους αποτελείται από 4 ΦΒ πλαίσια. Τα 4 πλαίσια του συλλέκτη είναι συνδεδεμένα στη σειρά, ενώ οι συλλέκτες συνδέονται παράλληλα. Ακόμα, όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα, παράλληλα σε κάθε πλαίσιο συνδέεται και μια δίοδος, η οποία εξασφαλίζει τη συνεχή ροή του ρεύματος, ακόμα και στη περίπτωση που ένα από τα πλαίσια υποστεί βλάβη, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία της γεννήτριας [10]. Τέλος, διακρίνονται οι συνδέσεις διόδων σε σειρά με κάθε συλλέκτη, διασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό την αποφυγή κυκλοφορίας εσωτερικών ρευμάτων μεταξύ των συλλεκτών, ειδικά στην περίπτωση βλάβης ενός πλαισίου.

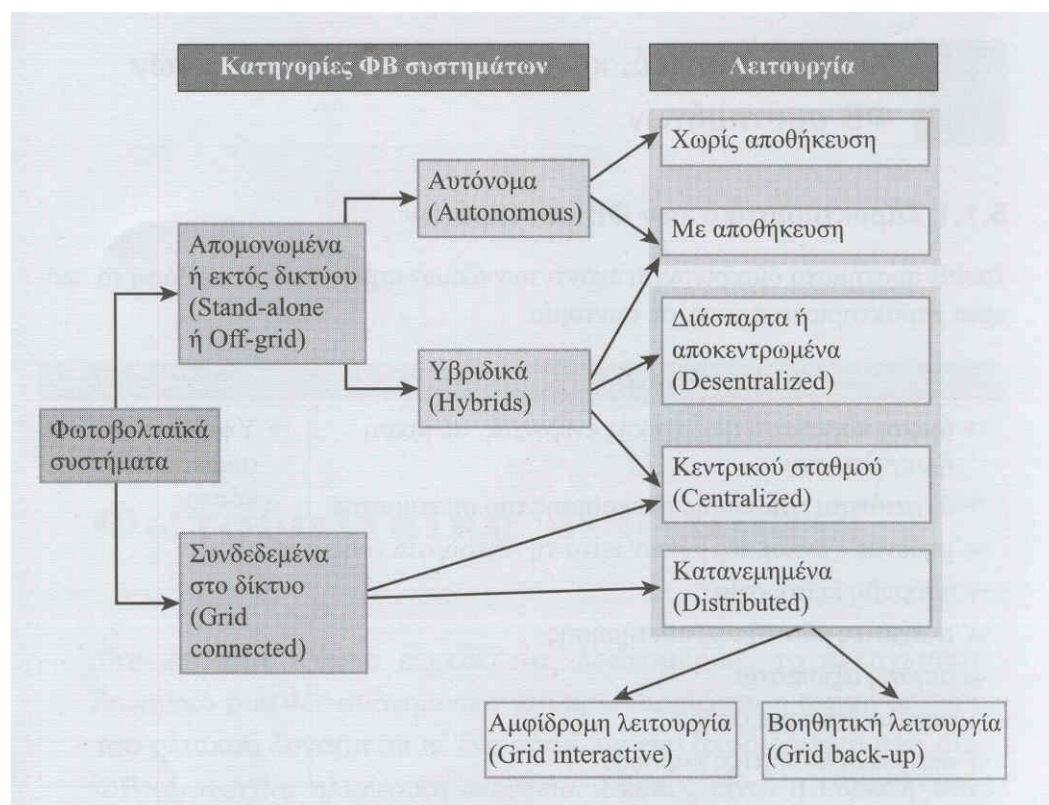


Σχήμα 3.10 Παράδειγμα συνδεσμολογίας ΦΒ συστοιχιών σε ΦΒ γεννήτρια

### 3.14 Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα ΦΒ στοιχεία μπορούν να αξιοποιηθούν σε πλήθος ηλεκτρικών εφαρμογών. Καλύπτουν ευρεία περιοχή ισχύος απ' 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 αναφέρεται ο όρος δίκτυο εννοείται το εθνικό (ή διακρατικό, πλέον) ή τοπικό δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές πηγές. Τα ΦΒ συστήματα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα παρονομαζόμενα η εκτός δικτύου συστήματα και τα συνδεδεμένα στο δίκτυο. Τα απομονωμένα ΦΒ συστήματα διακρίνονται επίσης σε αυτόνομα και υβριδικά. Το κριτήριο για τον προσδιορισμό της σύνθεσης του καταλληλότερου ΦΒ συστήματος στις κατηγορίες αυτές, προκύπτει με βάση την απαίτηση για πλήρη ή μερική κάλυψη (αυτονομία) των ενεργειακών καταναλώσεων της εφαρμογής, από το ΦΒ σύστημα, μηνιαίως ή ετησίως.



Σχήμα 3.11 Κατηγορίες και λειτουργία ΦΒ συστημάτων

## **A. Εκτός δικτύου ή Απομονωμένα ΦΒ συστήματα (Off-grid ή Stand alone systems)**

Χαρακτηρίζονται έτσι τα ΦΒ συστήματα τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να είναι συνδεδεμένα στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Διακρίνονται σε αυτόνομα, στα οποία η ΦΒ συστοιχία αποτελεί την αποκλειστική πηγή ενέργειας και σε υβριδικά στα οποία περιλαμβάνεται και άλλη πηγή Α.Π.Ε. ή συμβατική ηλεκτρική πηγή (π.χ. Η/Ζ).

### **I. Αυτόνομα ΦΒ συστήματα**

Η απαιτούμενη, από την εφαρμογή, ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται εξ ολοκλήρου από τη ΦΒ 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 είτε εναλλασσόμενης τάσεως. Τα αυτόνομα ΦΒ συστήματα διακρίνονται σε:

- Αυτόνομα ΦΒ συστήματα άμεσης τροφοδοσίας του φορτίου της εφαρμογής, στα οποία η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αποδίδεται απευθείας στην κατανάλωση, όσο φωτίζεται η ΦΒ συστοιχία χωρίς αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άντληση για πότισμα καλλιεργειών που δεν απαιτούν αυστηρά τακτική λειτουργία του συστήματος.
- Αυτόνομα συστήματα με αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, π.χ. αυτόνομα ΦΒ συστήματα φωτισμού οδών, αρχαιολογικών χώρων, υποστήριξη συστημάτων πυρανίχνευσης δασικών εκτάσεων, τηλεπικοινωνιακών αναμεταδοτών, διατάξεων καταγραφής δεδομένων κ.α. Σχεδιάζονται με πρόβλεψη ορισμένων ημερών αυτονομίας του συστήματος, με βάση το κατάλληλο μέγεθος των συσσωρευτών.

### **II. Υβριδικά ΦΒ συστήματα**

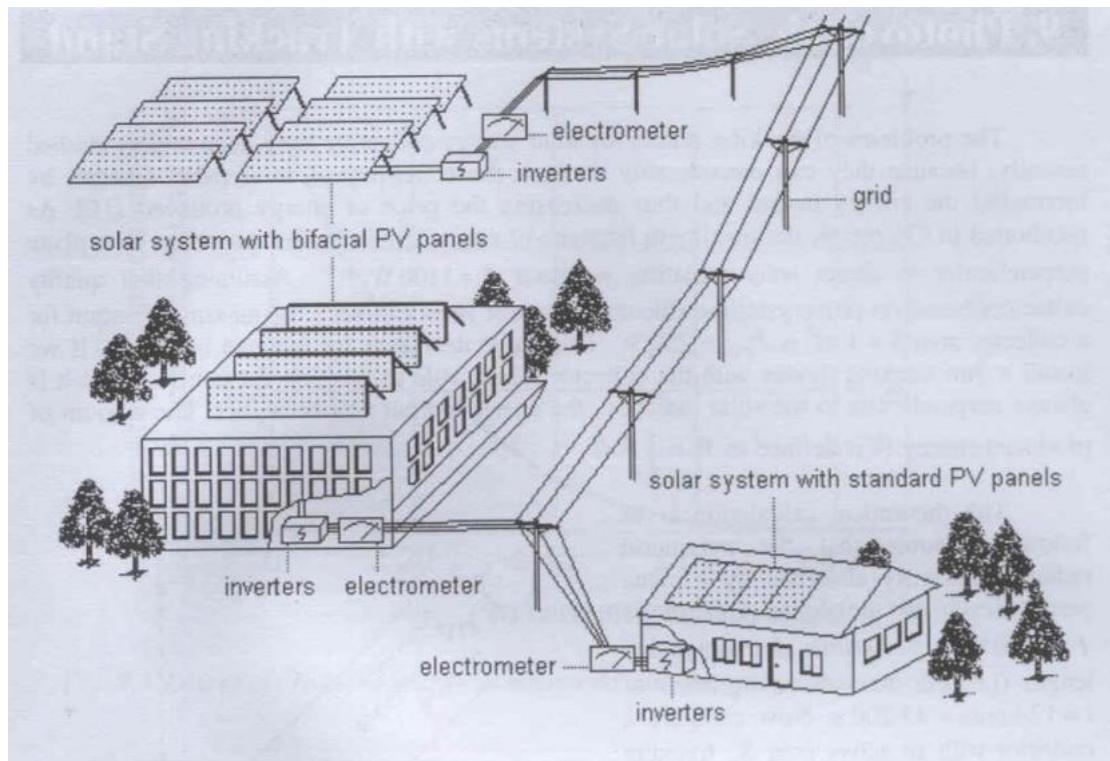
Στα υβριδικά ΦΒ συστήματα η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται από το συνδυασμό ΦΒ συστοιχίας με άλλες πηγές ενέργειας, δηλαδή, Α.Π.Ε. (π.χ. ανεμογεννήτρια, ΑΓ) ή πηγές συμβατικών καυσίμων (ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, Η/Ζ). Ο προσδιορισμός των συνιστωσών Α.Π.Ε. προκύπτει με ολοκληρωμένη οικονομοτεχνική μελέτη του συστήματος, με κριτήριο το βαθμό συμμετοχής του Η/Ζ στη διασφάλιση της κάλυψης των ενεργειακών απαιτήσεων της εφαρμογής. Στις

περισσότερες των περιπτώσεων στο σύστημα προβλέπεται η αποθήκευση της ενέργειας σε συσσωρευτές.

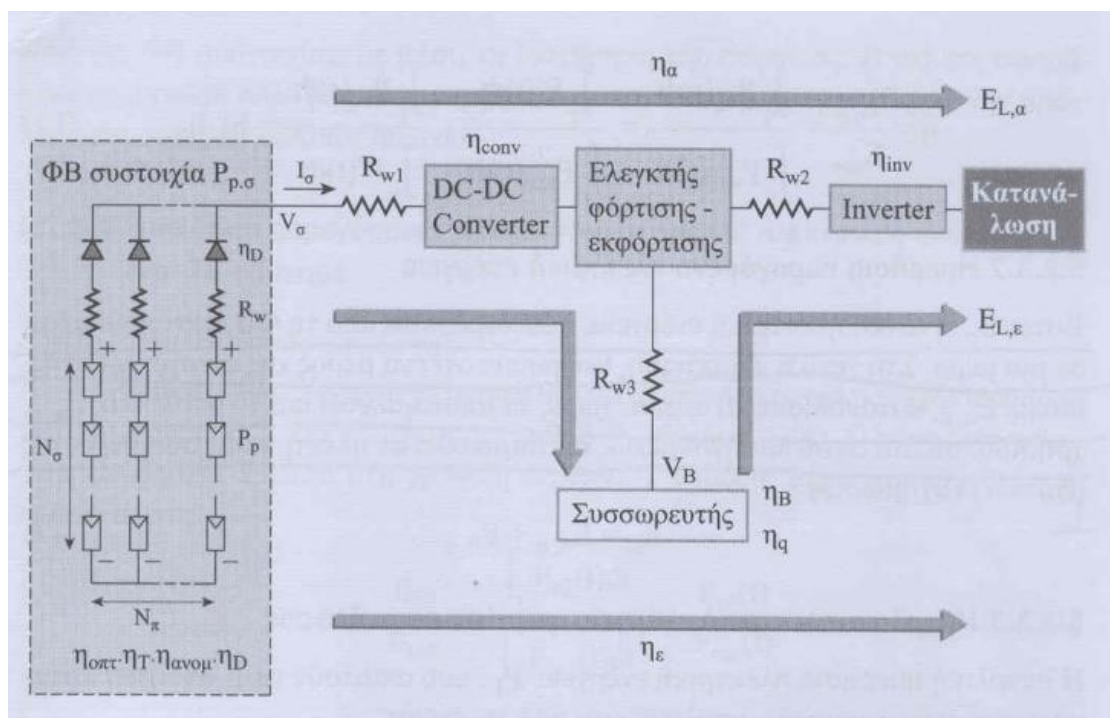
## **B. ΦΒ συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο**

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 κατανεμημένα συστήματα και σε εκείνα που συνιστούν κεντρικούς ΦΒ σταθμούς μεγάλης ισχύος, των οποίων η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο. Στην κατηγορία των κεντρικών ΦΒ συστημάτων ανήκουν και τα μεγάλα ΦΒ συγκροτήματα των οποίων η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται κατ' ευθείας στο δίκτυο.

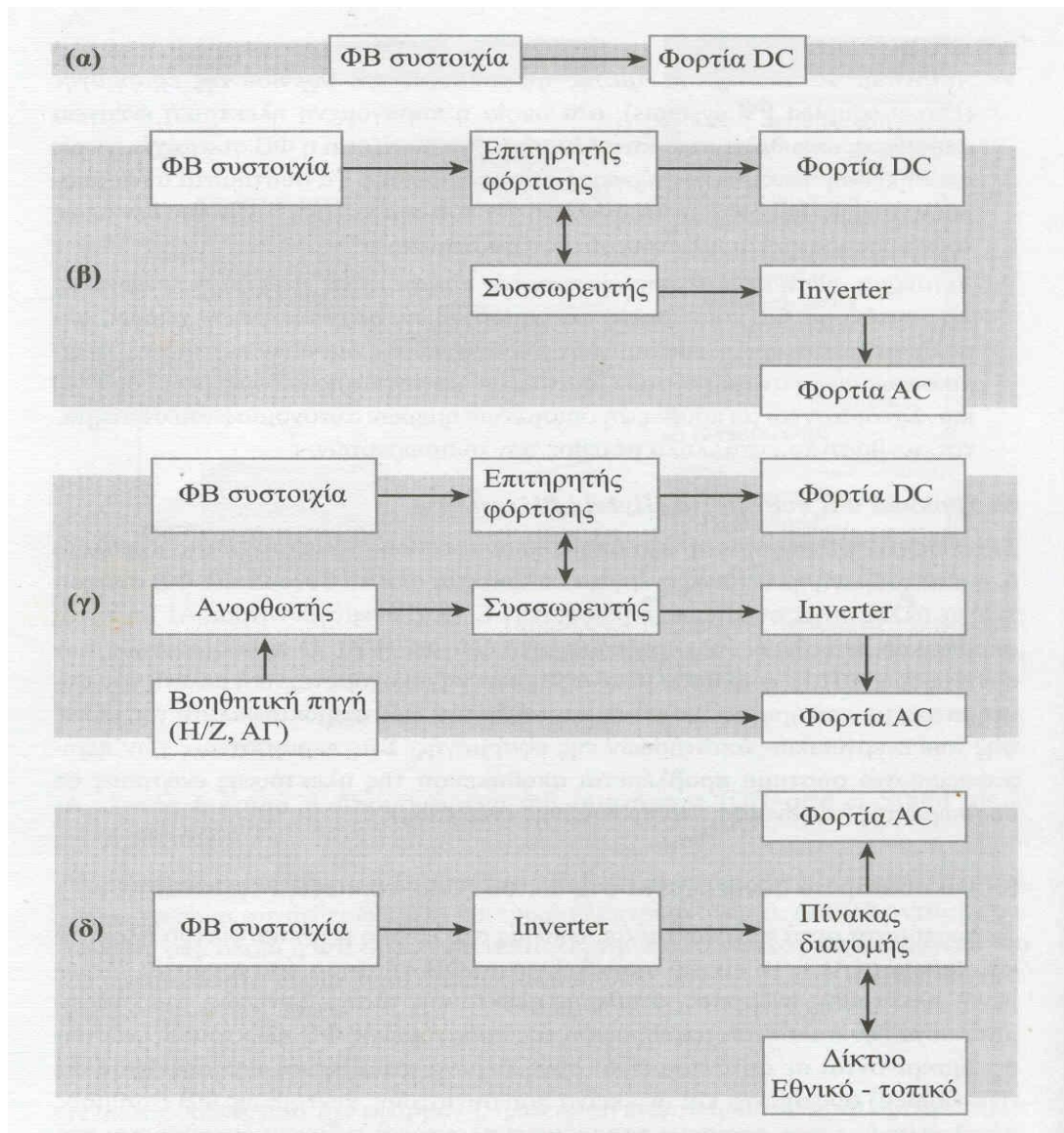
Τα κατανεμημένα ΦΒ συστήματα διακρίνονται σε αυτά που χρησιμοποιούν το δίκτυο ως βοηθητική πηγή ενέργειας και σε εκείνα που λειτουργούν σε συνεχή αλληλεπίδραση με το δίκτυο, διοχετεύοντας την επιπλέον παραγόμενη ενέργεια σ' αυτό. Στην πρώτη περίπτωση το ΦΒ σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε να καλύπτει κατά μέσο όρο τις μηνιαίες απαιτήσεις της εφαρμογής. Το δίκτυο καλύπτει έκτακτη ενεργειακή ζήτηση ή καταστάσεις αστοχίας του ΦΒ συστήματος. Στη δεύτερη περίπτωση το βασικότερο κριτήριο αφορά την 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 κάλυψη καταναλώσεων της εφαρμογής η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται απ' το 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.



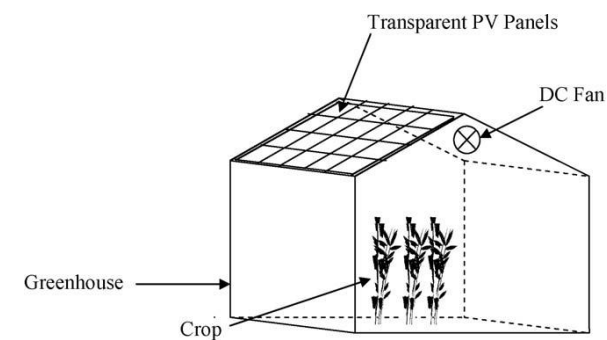
Σχήμα 3.12 Διάφορα συστήματα μεσαίου μεγέθους συνδεδεμένα στο δίκτυο [16].



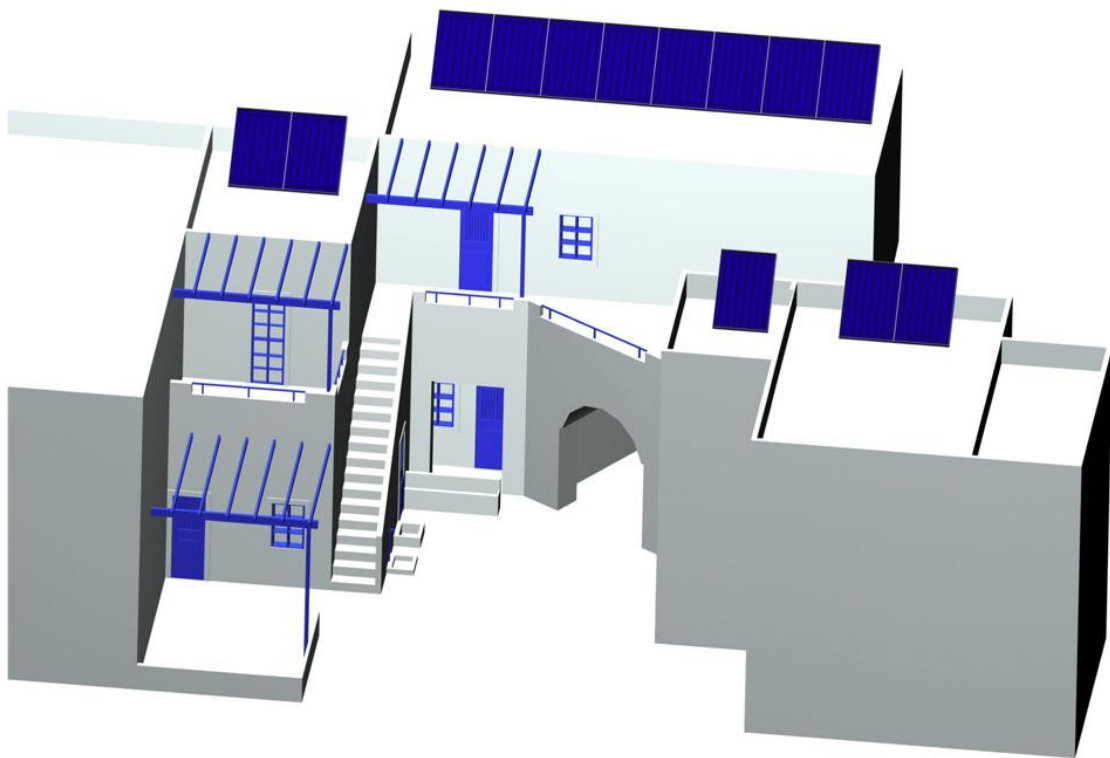
Σχήμα 3.13 Γραμμικό ηλεκτρολογικό διάγραμμα ενός τυπικού ΦΒ συστήματος [3].



Σχήμα 3.14 Βασικά είδη ΦΒ συστημάτων. (α) Αυτόνομο ΦΒ σύστημα με συστοιχία συνδεδεμένη απ' ευθείας στο φορτίο (DC). (β) Αυτόνομο ΦΒ σύστημα με αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και τροφοδοσία φορτίων συνεχούς και εναλλασσομένης τάσεως. (γ) Αυτόνομο ΦΒ υβριδικό σύστημα. (δ) ΦΒ σύστημα συνδεδεμένο στο εθνικό ή τοπικό δίκτυο [3].



Εικόνα 3.15 Τυπικό παράδειγμα αυτόνομου πράσινου σπιτιού [20].



Εικόνα 3.16 ΦΒ συλλέκτες στη στέγη ενός σπιτιού σε ένα νησί των Κυκλάδων [21].

### 3.14.1 Φωτοβολταϊκά πάρκα

Οι απαιτήσεις σε ισχύ (π.χ. πάνω από 20 kWp) από μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση φθάνουν πολλές φορές σε τέτοια επίπεδα, ώστε είναι αναγκαίο για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα να συνενωθούν πολλές ΦΒ συστοιχίες μαζί. Το σύνολο αυτών των συνενούμενων συστοιχιών, ονομάζεται υποσυγκρότημα συστοιχιών, ενώ όλα τα υποσυγκροτήματα μαζί συνθέτουν το συγκρότημα συστοιχιών ή το ΦΒ πάρκο της ΦΒ εγκατάστασης. Σε κάθε τέτοια εγκατάσταση, τα ΦΒ πλαίσια, πανέλα ή συστοιχίες, τοποθετούνται σπονδυλωτά και με τρόπο ώστε να μη σκιάζονται αισθητά μεταξύ τους, αλλά ούτε και από τα γύρω εμπόδια (δένδρα, βουνά, κτίρια κλπ). Γενικά, ένα ΦΒ πάρκο διαιρείται σε επιμέρους, παράλληλα συνδεδεμένες, μονάδες. Μέσω των μετατροπένων και άλλων κατάλληλων διατάξεων, το ρεύμα διαρρέει το σύστημα ή οδεύει στους συσσωρευτές. Όλες οι λειτουργίες στο ηλιακό πάρκο ελέγχονται από μια μονάδα ελέγχου.

## 4. ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ – ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ – ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ)

### 4.1 Ηλεκτρικοί συσσωρευτές

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται απ' την φωτοβολταϊκή συστοιχία μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απ' ευθείας είτε σε χρόνο μεταγενέστερο της παραγωγής της. Από πλευράς κόστους πυκνότητας αποταμιευμένης ενέργειας ανά μονάδας βάρους και όγκου διάταξης αυτή τη στιγμή η καλύτερη λύση θεωρείται η χρησιμοποίηση των διαφόρων τύπων ηλεκτρικών συσσωρευτών που χαρακτηρίζονται από αντιστρεπτότητα των χημικών δράσεων στα ηλεκτρόδια τους.

Ο συσσωρευτής (μπαταρία) είναι μια διάταξη που μέσω αντιδράσεων οξείδωσης και αναγωγής μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η βασική ηλεκτροχημική μονάδα του συσσωρευτή είναι το στοιχείο. Κάθε συσσωρευτής αποτελείται από ένα ή περισσότερα στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά, παράλληλα ή σε συνδυασμό ανάλογα με την επιθυμητή τάση ή χωρητικότητα εξόδου. Το στοιχείο αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

Το πρώτο μέρος είναι η άνοδος (το αρνητικό ηλεκτρόδιο) που δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Το δεύτερο μέρος είναι η κάθοδος (το θετικό ηλεκτρόδιο) που δέχεται ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και ανάγεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης και το τρίτο μέρος είναι ο ηλεκτρολύτης που δημιουργεί το κατάλληλο περιβάλλον για να γίνει η μεταφορά των ιόντων μεταξύ των ηλεκτροδίων. Συνήθως ο ηλεκτρολύτης είναι υγρό, νερό ή άλλος διαλύτης που συμβάλλει στην ιονική αγωγιμότητα της διάταξης. Η άνοδος επιλέγεται με βάση την αγωγιμότητα, την ευκολία κατασκευής και το κόστος. Το καταλληλότερο στοιχείο για την άνοδο είναι το υδρογόνο. Στην πράξη τα μέταλλα χρησιμοποιούνται για την άνοδο. Ο ψευδάργυρος είναι το πιο δημοφιλές, μιας και έχει όλες τις παραπάνω απαιτήσεις. Επίσης χρησιμοποιείται το λίθιο το οποίο είναι το πιο ελαφρύ μέταλλο με ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο, το οποίο το χάνει εύκολα για να γίνει ιόν.

Η κάθοδος θα πρέπει να είναι ένα καλός οξειδωτικός παράγοντας και να μην αλληλεπιδρά με τον ηλεκτρολύτη. Το οξυγόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις περιπτώσεις των συσσωρευτών zinc-air με άμεση εισαγωγή του από το περιβάλλον. Παρά ταύτα, συνήθως οξείδια μετάλλων (ενώσεις του οξυγόνου με μέταλλα) χρησιμοποιούνται για την κάθοδο ενώ αλογόνα και σουλφίδια (ενώσεις που

περιέχουν  $S^{2-}$ ) μαζί με τα οξείδιά τους χρησιμοποιούνται για ειδικά συστήματα συσσωρευτών.

Ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει ιονική αγωγιμότητα και να μην είναι ηλεκτρικά αγώγιμος ώστε να μην προκληθεί βραχυκύκλωμα. Πρέπει να μην προκαλεί ηλεκτροχημικές αντιδράσεις με τα υλικά των ηλεκτροδίων, να μην επηρεάζεται από την αλλαγή της θερμοκρασίας, να είναι ακίνδυνος στη χρήση του και να έχει χαμηλό κόστος. Είναι ηλεκτρικά απομονωμένες η άνοδος και η κάθοδος (στο κελί, cell) ώστε να αποφεύγεται η μεταξύ τους αντίδραση που προκαλεί βραχυκύκλωμα και είναι βυθισμένες στον ηλεκτρολύτη. Κατασκευαστικά χρησιμοποιείται ένα διαπερατό από τον ηλεκτρολύτη χώρισμα. Το στοιχείο μπορεί να κατασκευαστεί σε διάφορα σχήματα (επίπεδο, πρισματικό, κυλινδρικό), ενώ σφραγίζεται ώστε να αποφευχθεί η διαρροή του ηλεκτρολύτη.

Υπάρχουν δύο είδη στοιχείων, τα πρωτογενή στοιχεία ή στοιχεία πρώτης τάξης και τα επαναφορτιζόμενα ή στοιχεία δεύτερης τάξης. Τα πρωτογενή στοιχεία δεν επαναφορτίζονται γι' αυτό αποσύρονται μόλις εκφορτιστούν. Είναι μια φθηνή επιλογή που δε χρειάζεται συντήρηση έχοντας μεγάλη διάρκεια ζωής και μεγάλη πυκνότητα ενέργειας για μικρούς και μεσαίους ρυθμούς εκφόρτισης.

Αντίθετα τα δευτερογενή στοιχεία μπορούν να επαναφορτιστούν μόλις εκφορτιστούν και γίνεται με εφαρμογή ρεύματος με φορά αντίθετη της φοράς εκφόρτισης. Όταν ο ρυθμός εκφόρτισης διατηρείται χαμηλός έχουν υψηλό ρυθμό εκφόρτισης, υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και καλή ενεργειακή απόδοση.

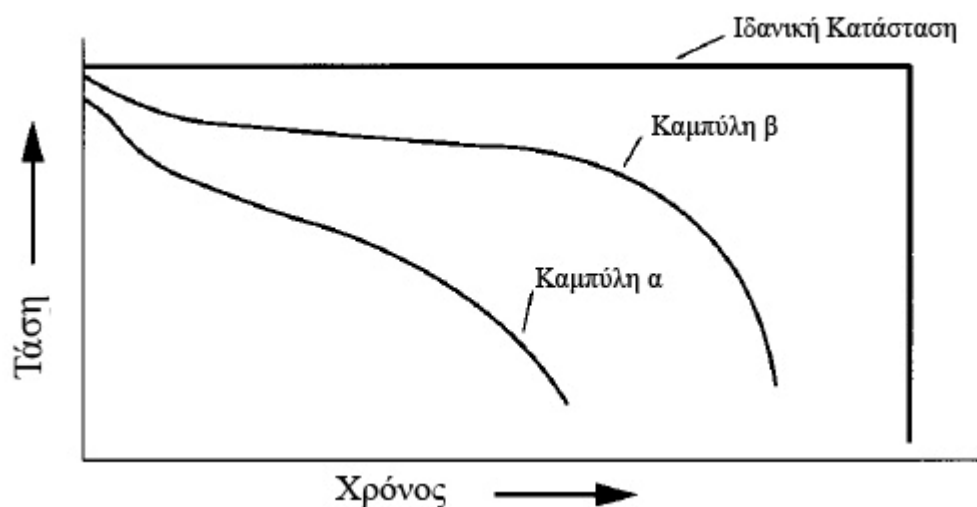
## **4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των συσσωρευτών και χαρακτηριστικά λειτουργίας τους**

### **4.2.1 Εσωτερική αντίσταση και ρυθμός εκφόρτισης**

Η απόδοση ενός συσσωρευτή είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων οι οποίοι δεν μπορούν εξ' αρχής να οριστούν, με αποτέλεσμα οι συσσωρευτές να έχουν διαφορετική συμπεριφορά από αυτή που αναγράφει ο κατασκευαστής τους. Για παράδειγμα, οι συνθήκες αποθήκευσης (θερμοκρασία, υγρασία) ή ο χρόνος αποθήκευσης δε μπορούν να εξεταστούν αυστηρά. Αν ο χρόνος αποθήκευσης είναι μεγάλος ο συσσωρευτής θα αποφορτίζεται γρηγορότερα υπό συνθήκες γρήγορης εκφόρτισης απ' ότι ένας καινούριος συσσωρευτής.

Όταν ένα στοιχείο εκφορτίζεται η τάση του είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής. Αυτό οφείλεται στην εσωτερική αντίσταση του στοιχείου και στην πόλωση. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η πτώση τάσης σε σχέση με τη θεωρητική (ιδανική) κατάσταση και την πραγματική (καμπύλη α, β). Παρατηρείται ότι η τάση δεν είναι σταθερή, αλλά καθώς περνά ο χρόνος, μειώνεται μέχρι να εκφορτιστεί πλήρως ο συσσωρευτής, ενώ στην ιδανική περίπτωση η τάση είναι σταθερή. Η πτώση τάσης οφείλεται στην πόλωση των ηλεκτροδίων και στην εσωτερική αντίσταση των στοιχείων.

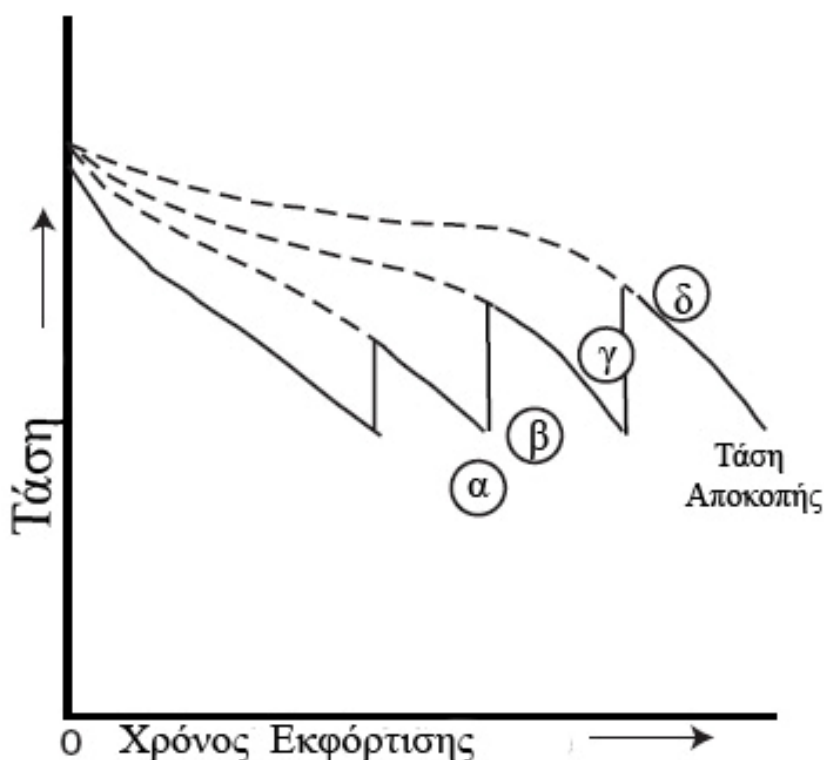
Η χαρακτηριστική καμπύλη α είναι παρόμοια της καμπύλης β, αλλά αναπαριστά ένα στοιχείο με μεγαλύτερη εσωτερική αντίσταση ή υψηλότερο ρυθμό εκφόρτισης. Όσο η εσωτερική αντίσταση ή ο ρυθμός εκφόρτισης αυξάνεται τόσο η τάση μειώνεται και η χαρακτηριστική της τάσης προς το χρόνο παρουσιάζει καμπύλη.



**Σχήμα 4.1** Χαρακτηριστική τάσης στοιχείου για διαφορετικό ρυθμό εκφόρτισης και διαφορετική εσωτερική αντίσταση.[2]

Όσο ο ρυθμός εκφόρτισης του συσσωρευτή αυξάνεται, η τελική τάση εκφόρτισης (τάση αποκοπής) ελαττώνεται και ο χρόνος ζωής του συσσωρευτή μειώνεται. Αν ο συσσωρευτής βρίσκεται στη τάση αποκοπής υπό συγκεκριμένο ρυθμό εκφόρτισης, τότε αν μειώσουμε το ρυθμό εκφόρτισης, η τάση της θα αυξηθεί. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της διαθέσιμης χωρητικότητας και του χρόνου ζωής, μέχρι τη νέα τάση αποκοπής για το καινούριο ρυθμό εκφόρτισης. Παραδείγματος χάρη, ένας συσσωρευτής που χρησιμοποιείται για το φλας μιας φωτογραφικής μηχανής έχει

πολύ υψηλό ρυθμό εκφόρτισης. Αν προσεγγίσει τη τάση αποκοπής κατά το τέλος της διάρκειας ζωής του μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άλλη συσκευή (π.χ. ρολόι) που έχει μικρότερο ρυθμό εκφόρτισης. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2 ο συσσωρευτής εκφορτίζεται αρχικά με τον υψηλότερο ρυθμό (καμπύλη α) μέχρι την τάση αποκοπής και διαδοχικά ο ρυθμός εκφόρτισης μειώνεται. Η τάση παρατηρούμε ότι αυξάνεται για το νέο ρυθμό εκφόρτισης και μειώνεται μέχρι να προσεγγίσει πάλι τη τάση αποκοπής.

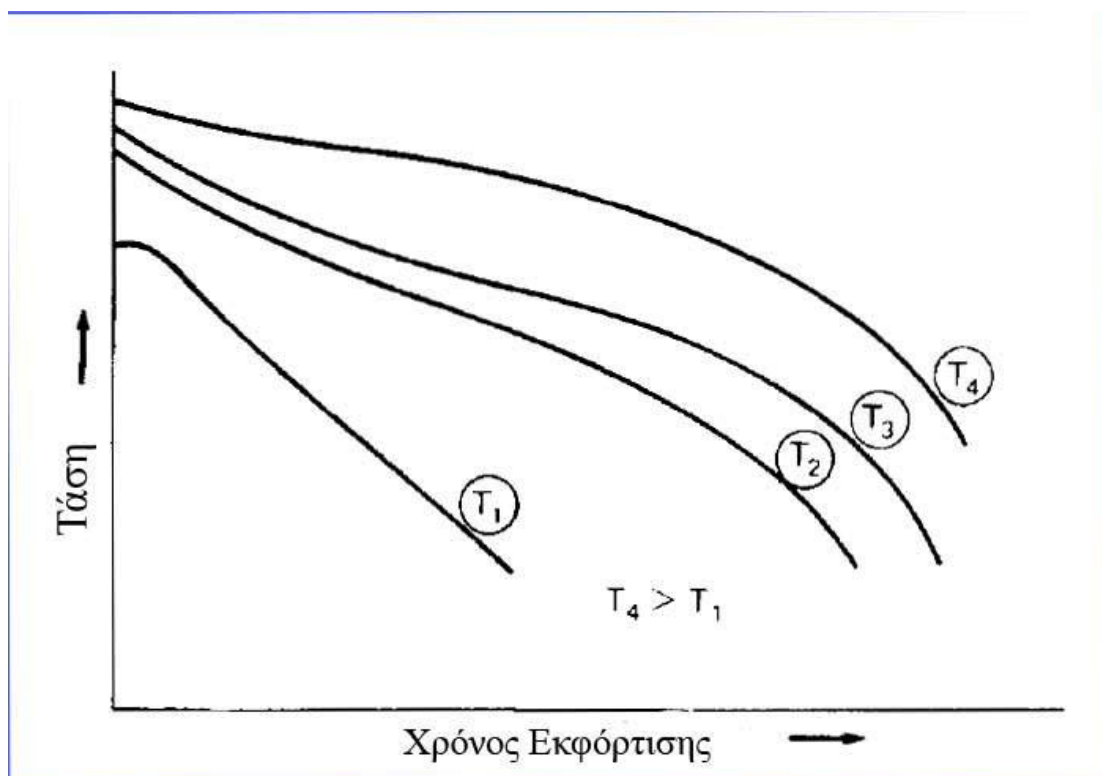


Σχήμα 4.2 Χαρακτηριστική τάσης εκφόρτισης στοιχείου για (επαναλαμβανόμενους) διαφορετικούς ρυθμούς εκφόρτισης  $\alpha > \beta > \gamma > \delta$ .

## 4.2.2 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία κατά την οποία ο συσσωρευτής εκφορτίζεται έχει άμεση συνέπεια στη διαθέσιμη χωρητικότητα του συσσωρευτή και τη τάση του. Αυτό οφείλεται στην εξασθένιση της χημικής δραστηριότητας (ηλεκτρολύτης, χημικές διεργασίες) και στην αύξηση της εσωτερικής αντίστασης στις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό παρατηρείται και στο Σχήμα 4.3 όπου εφαρμόζεται ο ίδιος ρυθμός εκφόρτισης σε

διαφορετικές θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία  $T_4$  αντιστοιχεί στη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου. Η καταλληλότερη θερμοκρασία για τη λειτουργία του συσσωρευτή είναι μεταξύ 20 °C και 40 °C. Στις υψηλότερες θερμοκρασίες η εσωτερική αντίσταση μειώνεται και η αρχική τάση εκφόρτισης αυξάνεται με αποτέλεσμα την αύξηση της παρεχόμενης ενέργειας. Στον αντίποδα όμως, ενώ η χημική δραστηριότητα αυξάνεται παρατηρείται το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης (self-discharge), κατά το οποίο μειώνεται η διαθέσιμη χωρητικότητα του συσσωρευτή ακόμα και όταν δεν παρέχεται ενέργεια.



Σχήμα 4.3 Χαρακτηριστική εκφόρτισης τάσης στοιχείου για διαφορετικές θερμοκρασίες  $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$ . [2]

### 4.2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτών

Οι έννοιες που χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν ή να περιγράψουν την κατάσταση των συσσωρευτών ποικίλουν και οι πιο σημαντικές είναι οι παρακάτω:

**Εσωτερική αντίσταση (Internal resistance):** Είναι η αντίσταση που προκύπτει μεταξύ των ηλεκτροδίων του στοιχείου και οφείλεται στον ηλεκτρολύτη (Σχήμα 4.4).

Κυκλωματικά η εσωτερική αντίσταση είναι συνδεδεμένη σε σειρά με τη πηγή προκαλώντας πτώση τάσης (Σχήμα 4.5),

**Κατάσταση φόρτισης (State Of Charge):** Ορίζει τη διαθέσιμη χωρητικότητα του συσσωρευτή εκφρασμένη σε ποσοστό της συνολικής χωρητικότητας. Η χωρητικότητα (Capacity) των ηλεκτρικών στοιχείων μετράται σε Ah. Η μονάδα Ah μετρά ηλεκτρικό φορτίο (1 Ah=3600 Cb),

**Βάθος εκφόρτισης (Depth Of Discharge):** Ορίζει το επίπεδο εκφόρτισης ενός συσσωρευτή εκφρασμένο σε ποσοστό της συνολικής χωρητικότητάς του. Ο βαθμός εκφόρτισης είναι ανεξάρτητος της χωρητικότητας του συσσωρευτή και συνήθως κυμαίνεται από 20% έως 90% και

**Κύκλος ζωής (battery cycle life):** Είναι το σύνολο των πλήρων κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης που μπορεί να αποδώσει ένας συσσωρευτής. Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού της διάρκειας ζωής του συσσωρευτή βασίζεται στην εσωτερική αντίσταση. Σε αυτή την περίπτωση υπολογίζονται οι κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης μέχρι η εσωτερική αντίσταση να γίνει 1.3 φορές μεγαλύτερη από την αρχική της τιμή. Η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή είναι, συνήθως, μεγαλύτερη από αυτή που δηλώνει ο κατασκευαστής μιας και μπορεί να συνεχίζεται η λειτουργία του συσσωρευτή με χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση, δηλαδή να εκφορτίζεται σε συντομότερο διάστημα.

Τα συνολικά Ah που μπορούν να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν από έναν συσσωρευτή, υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας τη μέση τιμή των κύκλων πλήρους ενέργειας με την ονομαστική χωρητικότητα. Ένας κύκλος πλήρους ενέργειας είναι ένας κύκλος πλήρους φόρτισης-εκφόρτισης. Στην παρακάτω εξίσωση υπολογίζονται τα συνολικά Ah:

$$Ah_{battery\ life} = C_{nom} \sum_{i=0.2}^{i=0.8} DOD(i) NoCycles(i) \quad (4.1)$$

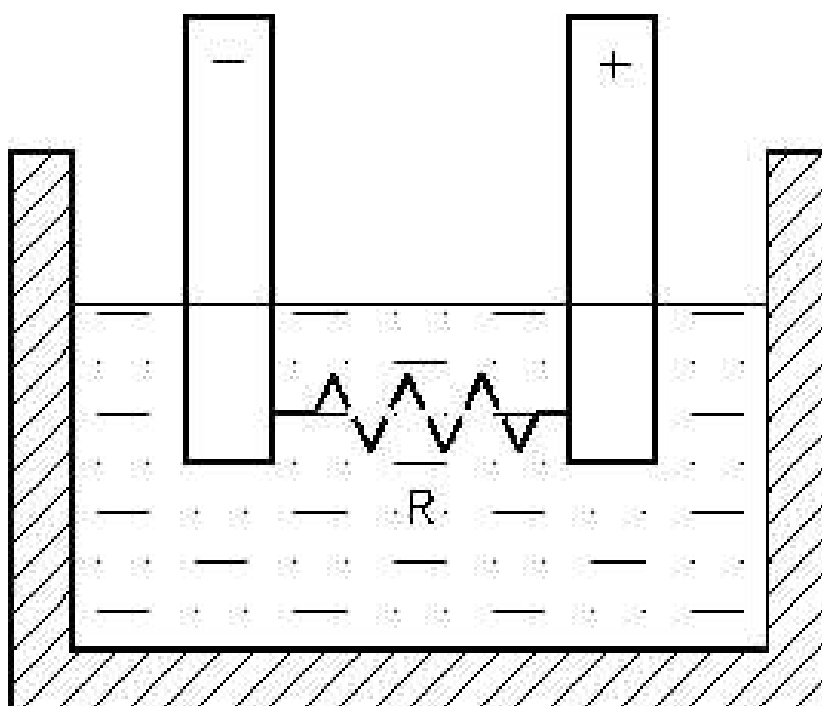
όπου:

$Ah_{battery\ life}$  είναι τα συνολικά Ah που μπορούν να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν από το συσσωρευτή,

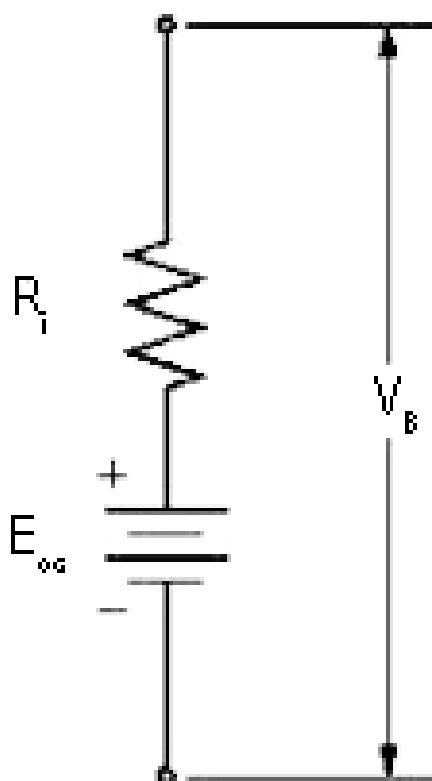
$C_{nom}$  η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή (Ah),

DOD το βάθος εκφόρτισης (%) και

NoCycles ο αριθμός των κύκλων ζωής για το συγκεκριμένο DOD.



Σχήμα 4.4 Εσωτερική αντίσταση ενός στοιχείου συσσωρευτή.

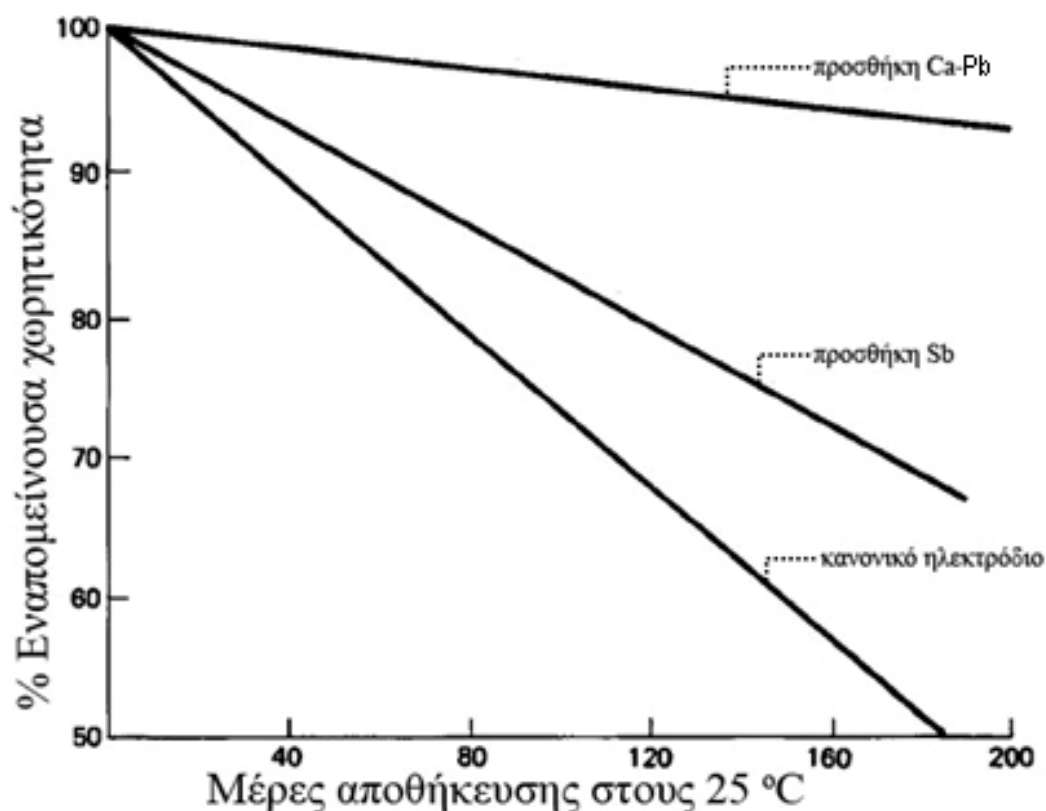


Σχήμα 4.5 Κυκλωματική αναπαράσταση της εσωτερικής αντίστασης ενός στοιχείου συσσωρευτή.

**Ρυθμός εκφόρτισης (Discharge Rate):** είναι η αναλογία φόρτισης ή εκφόρτισης ενός συσσωρευτή. Για παράδειγμα, αν ένας συσσωρευτής έχει χωρητικότητα 250 Ah και εκφορτίζεται με σταθερό ρεύμα 50 A, τότε εκφορτίζεται με 0.2C ή C/5 και

**Αυτοεκφόρτιση (Self-Discharge):** είναι το φαινόμενο κατά το οποίο εσωτερικές χημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα στο συσσωρευτή με αποτέλεσμα τη βαθμιαία αποφόρτισή του. Για τους συσσωρευτές Μολύβδου-οξέος ο βαθμός αυτοεκφόρτισης είναι πολύ μικρότερος του 0.5% ανά ημέρα στους 25 °C.

Η αυτοεκφόρτιση του αρνητικού πόλου είναι πιο γρήγορη ειδικά αν το στοιχείο έχει επικολλημένα μεταλλικά ιόντα που λειτουργούν ως καταλύτες. Για παράδειγμα, το αντιμόνιο (Sb) από το θετικό ηλεκτρόδιο λόγω διαβρώσεως αντιδρά με το αρνητικό ηλεκτρόδιο, όπου και επικάθεται, προκαλώντας αντιδράσεις εκφόρτισης. Για να προστατέψουμε το συσσωρευτή από την αυτοεκφόρτιση χρησιμοποιούμε ένα πλέγμα από αντιμόνιο (Sb) ή κράμα αντιμονίου, όπως το Ca-Pd. Η διαφορετικές καταστάσεις χωρητικότητας των συσσωρευτών ανάλογα με την προσθήκη αντιμονίου και κράματος αντιμονίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6.



**Σχήμα 4.6** Κατάσταση χωρητικότητας συσσωρευτή κατά τη διάρκεια αποθήκευσής του.

Άλλο ένα χαρακτηριστικό των συσσωρευτών είναι οι διάφορες τάσεις που προσδιορίζουν τη λειτουργία τους και για συσσωρευτή μολύβδου-οξέος δίνονται στον Πίνακα 4.1:

**Τάση Ανοικτοκύκλωσης** (*open-circuit voltage*): τάση όταν δε διαρρέεται από ρεύμα και προσεγγίζει τη θεωρητική τάση,

**Ονομαστική Τάση** (*nominal voltage*): είναι η χαρακτηριστική τάση λειτουργίας ενός συσσωρευτή, π.χ. 1.5 V για συσσωρευτή Zn-Mn,

**Τάση Λειτουργίας** (*operating voltage*): τάση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας (φόρτισης-εκφόρτισης) του συσσωρευτή, η οποία είναι μικρότερη της τάσης ανοικτοκύκλωσης,

**Μέση Τάση** (*average voltage*): είναι η τιμή της μέσης τάσης κατά την εκφόρτιση,

**Τάση Μέσου Σημείου** (*midpoint voltage*): είναι η κεντρική τάση κατά την εκφόρτιση του στοιχείου ή του συσσωρευτή και

**Τάση Αποκοπής** (*end or cut-off voltage*): είναι η οριακή τιμή τάσης όταν έχει εκφορτιστεί πλήρως ο συσσωρευτής. Όταν η τάση μειωθεί πέραν της τιμής αυτής, πρέπει να σταματά η εκφόρτιση του συσσωρευτή.

| Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικές τιμές τάσεων για συσσωρευτή μολύβδου-οξέος |         |     |
|------------------------------------------------------------------------|---------|-----|
| Τάση Ανοικτοκύκλωσης (V)                                               | 2.1     |     |
| Ονομαστική Τάση (V)                                                    | 2.0     |     |
| Τάση Λειτουργίας (V)                                                   | 1.8-2.0 |     |
| Τάση Αποκοπής* (V)                                                     | 1.75    | 1.5 |

\*Στην τάση αποκοπής οι δύο τιμές που προκύπτουν είναι για μεσαίο και υψηλό ρυθμό εκφόρτισης, αντίστοιχα [2].

## 4.3 Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος (Pb-Acid)

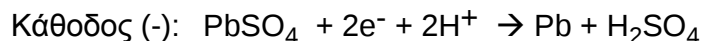
Υπάρχουν διάφορα είδη συσσωρευτών ανάλογα με το υλικό των ηλεκτροδίων τους και ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιούνται π.χ. συσσωρευτές νικελίου – καδμίου ή αργύρου – ψευδαργύρου . Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος είναι οικονομικότεροι για την χρήση σε ΦΒ συστήματα και ίσως ο δημοφιλέστερος τύπος ηλεκτρικού συσσωρευτή γνωστός από τις αρχές του εικοστού αιώνα. Είναι υψηλής μηχανικής αντοχής και συνακόλουθα, αυξημένης δυνατότητας για βαθιές εκφορτίσεις, με δυνατότητα παροχής μεγάλων ρευμάτων. Τα ηλεκτρόδιά του είναι πλάκες από κράματα μολύβδου οι οποίες είναι βυθισμένες σε διάλυμα θειικού οξέος ή αποσταγμένο νερό. Διακρίνονται στους συσσωρευτές με ηλεκτρολύτη υγρής κατάστασης και σε συσσωρευτές με παχύρευστο ηλεκτρολύτη (*gel*) αεροστεγώς σφραγισμένους (*sealed*) οι οποίοι δεν απαιτούν συμπλήρωση νερού. Οι συσσωρευτές αυτοί πλεονεκτούν των πρώτων, γιατί δεν χρειάζονται συντήρηση και έχουν τη δυνατότητα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κλειστούς χώρους, που περιέχουν ευαίσθητα μηχανήματα ή ηλεκτρονικά όργανα. Μπορούν ακόμα να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές υπό κλίση, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος διαρροής ηλεκτρολυτικού υγρού. Σε σχέση με τους συσσωρευτές υγρής κατάστασης υστερούν όσον αφορά την αξιοποιήσιμη χωρητικότητά τους σε θερμοκρασίες κάτω από τους 0 °C. Η κατασκευή των ηλεκτροδίων των βιομηχανικών συσσωρευτών γίνεται από πλάκες Μολύβδου με τη μορφή κυψελών. Στην αρνητική πλάκα οι κυψέλες πληρώνονται με πορώδη μόλυβδο, σε αντίθεση με τη θετική όπου πληρώνονται με φαιά οξείδια μολύβδου έτσι ώστε η ενεργός επιφάνεια κάθε μολύβδινης πλάκας να είναι αυξημένη και κατα συνέπεια να είναι αυξημένη και η χωρητικότητα του συσσωρευτή.

### 4.3.1 Διαδικασία φόρτισης - εκφόρτισης

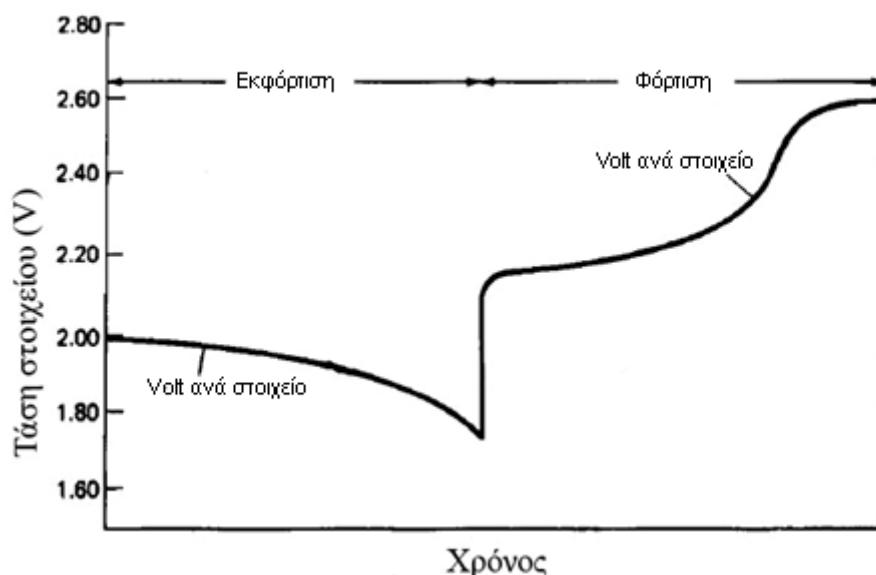
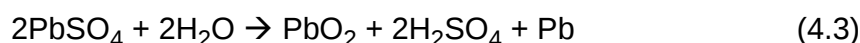
Η διαδικασία φόρτισης γίνεται με εφαρμογή σταθερής τάσης, ή σταθερού ρεύματος στους πόλους του συσσωρευτή. Η χαρακτηριστική της τάσης ενός στοιχείου συσσωρευτή μολύβδου-οξέος φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Για να πετύχουμε ομοιόμορφη φόρτιση ελέγχουμε αν έχουμε παράλληλες συστοιχίες συσσωρευτών. Τότε η πρώτη είναι καλύτερη μέθοδος μιας και η τάση του συστήματος είναι

σταθερή, ενώ αν έχουμε σε σειρά σύνδεση ενδείκνυται η δεύτερη, μιας και έχουμε σταθερό ρεύμα. Από χημικής πλευράς οι αντιδράσεις

που προκύπτουν κατά τη φόρτιση είναι οι παρακάτω:



Η ολική δράση κατά τη φόρτιση περιγράφεται από την αντίδραση:



**Σχήμα 4.7** Χαρακτηριστική τάσης στοιχείου ενός συσσωρευτή Μολύβδου-οξέος για φόρτιση-εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα.

Στους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος κατά το στάδιο της φόρτισης διασπάται ο θειικός μόλυβδος και σχηματίζεται υπεροξείδιο του μολύβδου στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων και μεταλλικός Pb στις πλάκες των αρνητικών. Αντίστροφα, κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή και την τροφοδότηση των ηλεκτρικών καταναλώσεων, ο Pb οξειδώνεται στις πλάκες των αρνητικών ηλεκτροδίων προς ιόντα  $\text{Pb}^{2+}$  και δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα, ενώ στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων, ο  $\text{Pb}^{4+}$  ανάγεται σε  $\text{Pb}^{2+}$  παίρνοντας ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα. Τα προϊόντα των δύο αντιδράσεων, δηλ. τα ιόντα  $\text{Pb}^{2+}$ , ενώνονται με θειικά ιόντα ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) από το διάλυμα και σχηματίζουν ξανά τον θειικό

μόλυβδο επάνω στις πλάκες των κυψελίδων. Έτσι, καταναλώνεται θειικό οξύ, παράγεται νερό και αραιώνεται το διάλυμα. Με τη φόρτιση που επακολουθεί, τα θειικά ιόντα επιστρέφουν στο διάλυμα και η περιεκτικότητα του διαλύματος αποκαθίσταται στην κανονική τους τιμή. Η ονομαστική τάση για κάθε στοιχείο είναι 2V, ενώ η τάση αποκοπής για μεσαίου ρυθμού εκφόρτιση είναι 1.75V και μπορεί να φτάσει το 1V σε περίπτωση πολύ υψηλού ρυθμού εκφόρτισης. Αν στα άκρα του συσσωρευτή συνδεθεί ένα εξωτερικό φορτίο τότε συμβαίνει εκφόρτιση. Δημιουργείται ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο, η οποία οξειδώνεται, προς την κάθοδο (οξειδίο μετάλλου) που ανάγεται. Το ηλεκτρικό κύκλωμα ολοκληρώνεται στον ηλεκτρολύτη με τη ροή ανιόντων και κατιόντων στην άνοδο και τη κάθοδο αντίστοιχα. Η ολική δράση κατά την εκφόρτιση περιγράφεται από την αντίδραση:



## 4.4 Χωρητικότητα συσσωρευτή

Η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή μετράται συνήθως σε αμπερώρια (Ah) που ιδανικά είναι το γινόμενο της μέσης έντασης του ρεύματος  $I$  που δίνει ο συσσωρευτής (ανεξαρτήτως απ την τάση) επί το πλήθος των ωρών μέχρι να εκφορτιστεί ξεκινώντας απ' την πλήρη φόρτιση. Όμως η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε έναν συσσωρευτή εξαρτάται απ' την τάση που δίνει ο συσσωρευτής. Για παράδειγμα ένας συσσωρευτής με χωρητικότητα  $C=100 \text{ Ah}$  και τάση  $V=12 \text{ V}$  τότε έχει ονομαστική ικανότητα αποθήκευσης ίση με :  $100 \text{ Ah} * 12\text{V} = 1200 \text{ Wh} = 1.2 \text{ kWh}$ .

Η χωρητικότητα των συσσωρευτών μειώνεται εξ' αιτίας του ότι οι πλάκες διαβρώνονται και όταν η χωρητικότητα πέχει κάτω απ' το 80% της αρχικής τιμής τότε ο συσσωρευτής θεωρείται άχρηστος. Οι φορτισμένοι συσσωρευτές αυτοεκφορτίζονται με ρυθμό 2 έως 5% της χωρητικότητας τους τον μήνα. Ο ρυθμός με τον οποίο αυτοεκφορτίζει ένας συσσωρευτής εξαρτάται απ' την ηλικία του και συγκεκριμένα αυξάνει με την ηλικία του συσσωρευτή.

## 4.5 Χρόνος ζωής συσσωρευτή

Οι συσσωρευτές δεν πρέπει να υφίστανται παρατεταμένη φόρτιση σε πολύ υψηλή τάση γι αυτούς αλλά ούτε και να εκφορτίζονται κάτω απο ένα όριο. Είναι πολύ σημαντικό και καθορίζει τον χρόνο ζωής του συσσωρευτή. Ο χρόνος ζωής

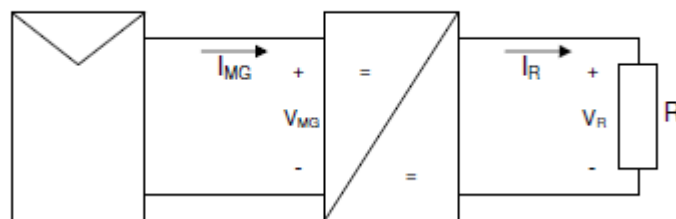
εκφράζεται σε κύκλους λειτουργίας και κάθε κύκλος περιλαμβάνει διαδοχικές διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης. Όσο αυξάνουν οι κύκλοι λειτουργίας μειώνεται η χωρητικότητα  $C$  του συσσωρευτή. Ένας κανόνας πρακτικός που προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά των συσσωρευτών και περιγράφει τον χρόνο ζωής τους είναι ο ακόλουθος:

Το γινόμενο βάθους εκφόρτισης επί τους κύκλους λειτουργίας είναι με καλή προσέγγιση σταθερό:  $\beta_{εκφ} * N_K = \text{σταθερό}$  [3].

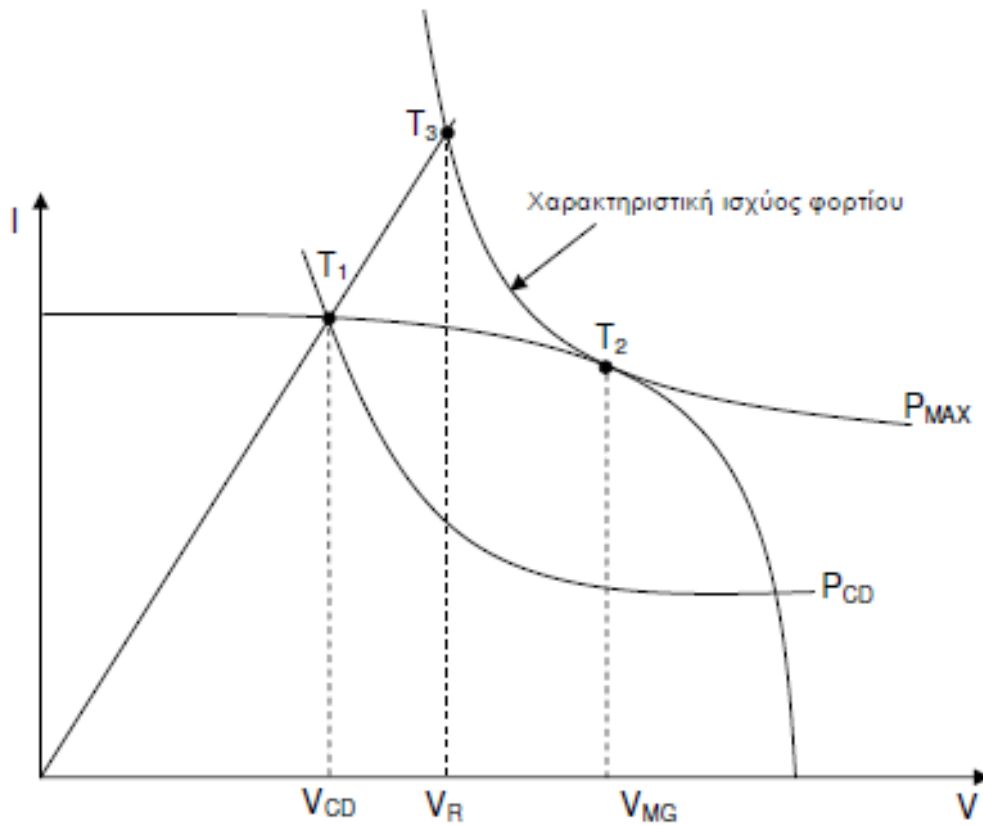
Όπου  $N_K$  το πλήθος των κύκλων λειτουργίας του συσσωρευτή.

## 4.6 Ρυθμιστές τάσης

Η χρήση των ρυθμιστών τάσης είναι στη προστασία του συσσωρευτή αφού εξασφαλίζουν τη σωστή φόρτιση του. Εκτός απ' τον έλεγχο της σωστής φόρτισης του κάποιοι ρυθμιστές τάσης με χρήση κατάλληλων ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος μπορούν να απορροφήσουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ από τα ΦΒ πλαίσια. Οι συσκευές αυτές ονομάζονται Maximum Power Point Trackers (MPPT). Στο σχήμα 4.8 φαίνεται η αρχή λειτουργίας του MPPT όπου εικονίζεται μία ΦΒ γεννήτρια, μία διάταξη MPPT και σαν φορτίο ένας αντιστάτης. Στο σχήμα 4.9 η χαρακτηριστική του φορτίου τέμνει την χαρακτηριστική του ΦΒ στο σημείο T1 το οποίο βρίσκεται μακριά απ' το σημείο μέγιστης ισχύος T2. Ως αποτέλεσμα να χάνεται ένα μεγάλο ποσοστό της ενέργειας που θα μπορούσε να παραχθεί. Χάρη την MPPT διάταξη που έχει την χαρακτηριστική καμπύλη που περνά απ' τα σημεία T2 και T3 μετατοπίζεται το σημείο λειτουργίας του συστήματος στο T2 που είναι το σημείο μέγιστης ισχύος της ΦΒ γεννήτριας. Συνεπώς με αυτόν τον τρόπο παράγεται απ' το φωτοβολαϊκό στοιχείο το μέγιστο ποσό ενέργειας.



Σχήμα 4.8 Σύστημα παραγωγής ενέργειας απ' το ΦΒ στοιχείο με διάταξη MPPT



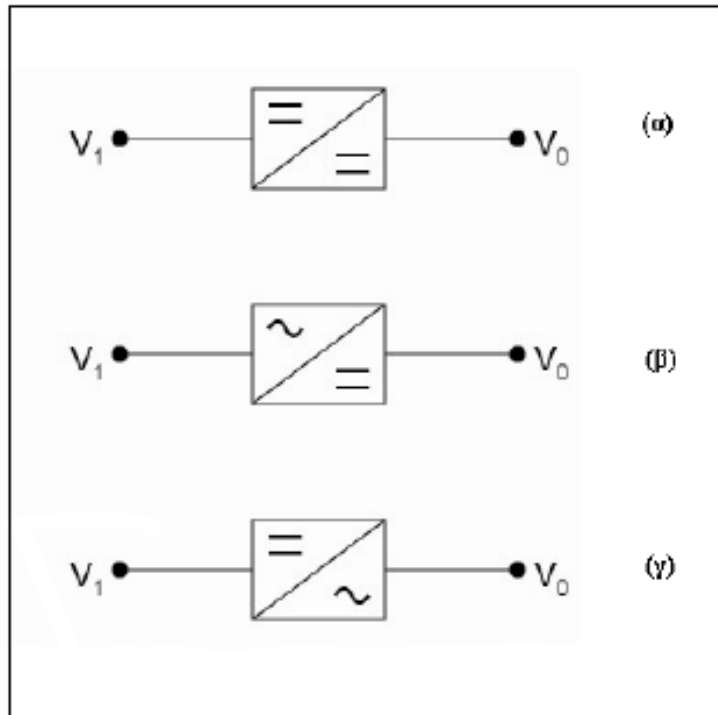
Σχήμα 4.9 Η αρχή λειτουργίας του συστήματος με MPPT

## 4.7 Μετατροπείς

Οι μετατροπείς είναι ηλεκτρονικές διατάξεις, μετατροπής:

- συνεχούς ρεύματος σε συνεχές (DC-DC converter), οποιασδήποτε τάσης
- συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (DC-AC converter), οποιουδήποτε πλάτους
- εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή (AC-DC converter)

Το Σχήμα 4.10 δείχνει τις συμβολικές ηλεκτρολογικές παραστάσεις των τριών τύπων μετατροπέων



Σχήμα 4.10: Συμβολικές παραστάσεις των τριών τύπων μετατροπέων (α) συνεχούς τάσεως σε συνεχή, (β) εναλλασσόμενης σε συνεχή, (γ) συνεχούς σε εναλλασσόμενη.

Ένας DC-DC μετατροπέας, μόνος του ή σε συνδυασμό με τους άλλους τύπους (DC-AC, AC-DC), μπορεί να αποτελεί χωριστή μονάδα ή να αποτελεί τμήμα του ελεγκτή φόρτισης. Στην τελευταία περίπτωση, η λειτουργία του έγκειται στο να προσαρμόζει την τάση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στην τάση του συστήματος αποθήκευσης, ώστε να εκμεταλλεύεται πλήρως η παραγόμενη ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια. Η όλη διαδικασία έχει ομοιότητα με την μετατροπή του εναλλασσόμενου σε εναλλασσόμενο διαφορετικού πλάτους, μέσω μετασχηματιστή (transformer), η οποία ως γνωστόν, βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στο φαινόμενο της επαγωγής. Στην περίπτωση αυτή, το κύκλωμα εξόδου είναι ηλεκτρικά μονωμένο από το κύκλωμα εισόδου. Στην περίπτωση των μετατροπέων DC-DC, δεν είναι υποχρεωτική η χρησιμοποίηση μετασχηματιστή.

### 4.7.1 Μετατροπείς ισχύος DC/AC

Οι μετατροπείς ισχύος DC/AC που ονομάζονται inverters (αντιστροφείς) είναι συσκευές που η λειτουργία τους είναι να μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο και κρίνονται απαραίτητες σ' ένα σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μιας και μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα των φωτοβολταϊκών και συσσωρευτών σε εναλλασσόμενο ώστε να τροφοδοτηθεί το φορτίο. Σε δύο κατηγορίες μπορούν να χωριστούν:

- Η μία κατηγορία είναι μετατροπείς DC/AC που εγκαθίστανται σε αυτόνομα συστήματα.
- Η δεύτερη κατηγορία είναι μετατροπείς DC/AC που συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο (π.χ. το ηλεκτρικό δίκτυο της Δ.Ε.Η).

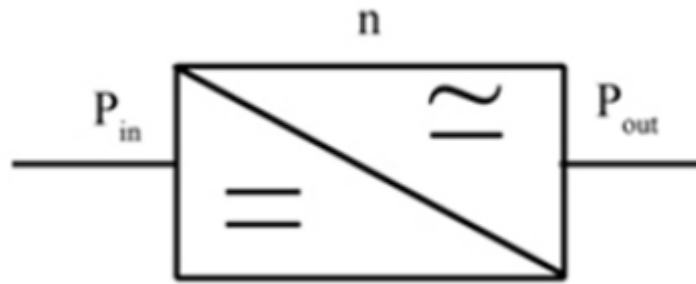
Επιπλέον οι μετατροπείς DC/AC μπορούν να χωριστούν σε άλλες δύο κατηγορίες, σε αυτούς που ως είσοδο δέχονται μια DC πηγή τάσης (αντιστροφείς πηγής τάσης, voltage source inverters) και σε αυτούς που μια DC πηγή ρεύματος είναι η είσοδός τους (current source inverters) και οι οποίοι χρησιμοποιούνται μόνο σε AC κινητήρια συστήματα μεγάλης ισχύος.

Ο βαθμός απόδοσης,  $\eta$ , ενός μετατροπέα ισχύος DC/AC υπολογίζεται από το πηλίκο της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου και δίνεται από την σχέση (4.5). Η απόδοση μετατροπής ισχύος των αντιστροφέων μπορεί να προσεγγίζει το 95% όταν λειτουργούν στην ονομαστική τους ισχύ, ενώ σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας η απόδοσή τους μειώνεται

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4.5)$$

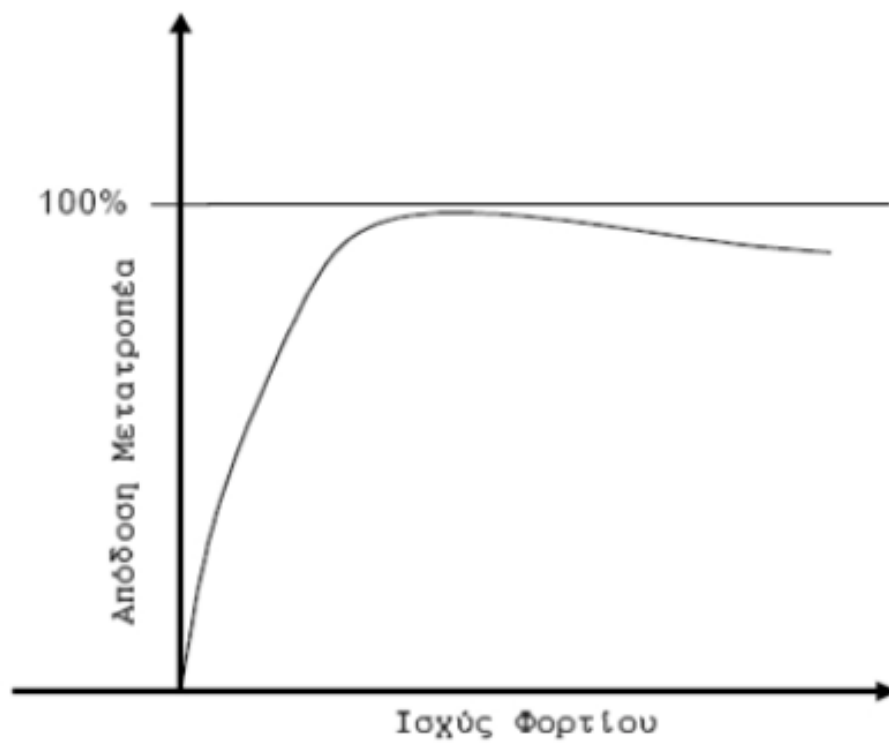
όπου:

$P_{out}$  είναι η ισχύς στην AC πλευρά του αντιστροφέα και  
 $P_{in}$  η ισχύς στην DC πλευρά του αντιστροφέα.



Σχήμα 4.11 Μετατροπέας ισχύος DC/AC

Στο Σχήμα 4.12 φαίνεται η καμπύλη του βαθμού απόδοσης ενός μετατροπέα σε συνάρτηση με την ισχύ του φορτίου εξόδου.



Σχήμα 4.12 Απόδοση μετατροπέα DC/AC συναρτήσει της ισχύος του φορτίου.

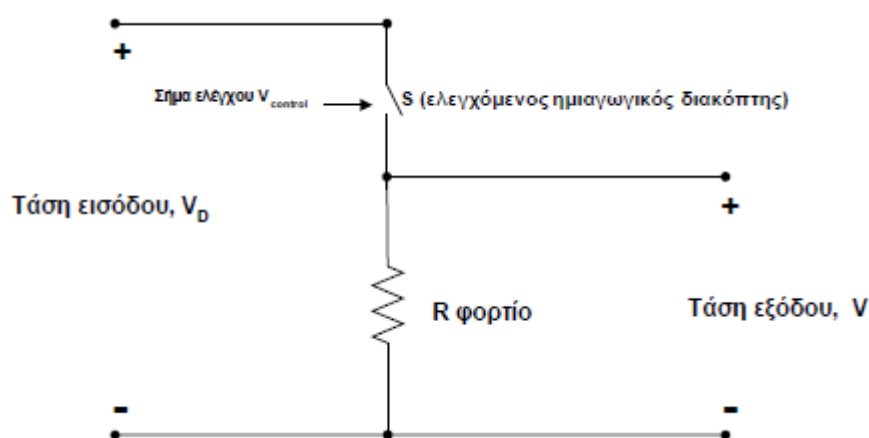
## 4.7.2 Μετατροπέας DC-DC

Οι μετατροπείς dc-dc χρησιμοποιούνται ευρέως σε διακοπτικά dc τροφοδοτικά και σε εφαρμογές ελέγχου dc κινητήρων. Η τάση εισόδου σε αυτούς τους μετατροπείς είναι μη σταθεροποιημένη dc τάση, που προκύπτει από την ανόρθωση και το φιλτράρισμα της τάσης του δικτύου και για αυτό έχει διακυμάνσεις λόγω των αλλαγών στο πλάτος της τάσης του δικτύου. Οι διακοπτικοί μετατροπείς dc-dc χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της μη-σταθεροποιημένης dc τάσης εισόδου σε μια ελεγχόμενη dc τάση εξόδου με το επιθυμητό επίπεδο τάσης.

Διάφοροι τύποι μετατροπών dc-dc είναι οι παρακάτω:

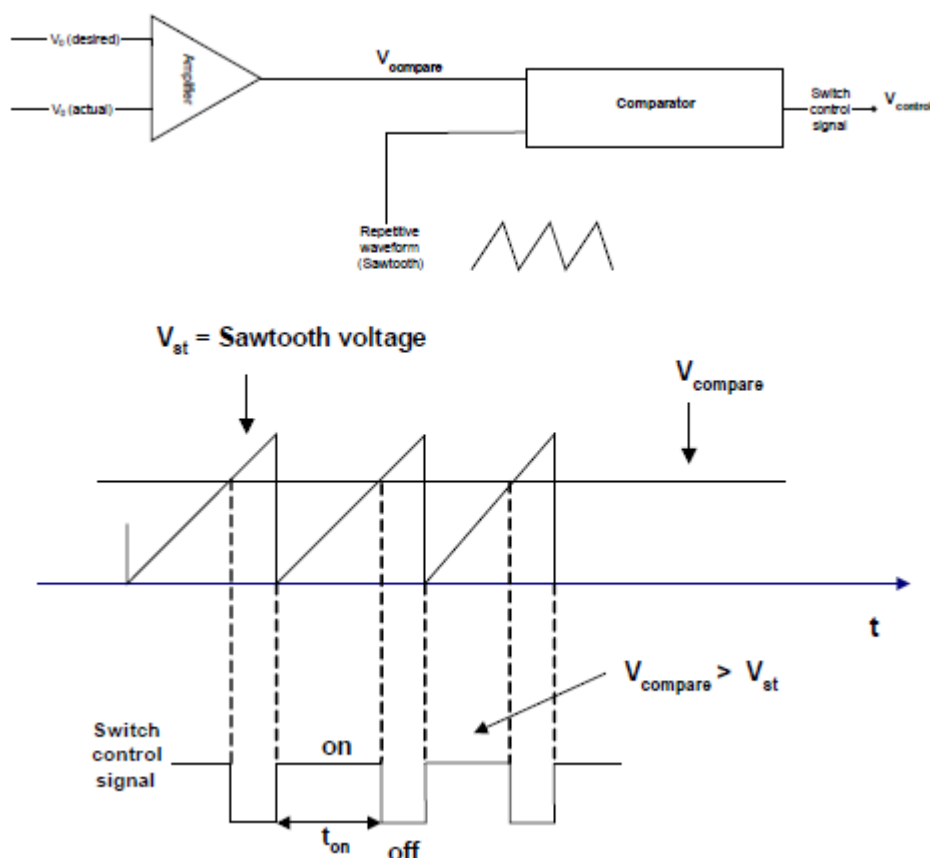
- 1) Step-down (buck) converter,
- 2) Step-up (boost) converter,
- 3) Step-down/step-up (buck – boost) converter,
- 4) Cuk converter και
- 5) Full-bridge converter.

Στους μετατροπείς dc-dc, η dc τάση εξόδου πρέπει να ελεγχθεί έτσι ώστε να φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο, παρόλο που το φορτίο εξόδου μπορεί να μεταβάλλεται. Οι διακοπτικοί μετατροπείς dc-dc χρησιμοποιούν ένα ή παραπάνω διακόπτες έτσι ώστε να μετατρέψουν την τάση dc από το ένα επίπεδο σε κάποιο άλλο. Στους μετατροπείς dc-dc με δεδομένη τάση εισόδου, η μέση τιμή της τάσης εξόδου ελέγχεται με την ελεγχόμενη διάρκεια του ανοίγματος και του κλεισίματος του διακόπτη  $S$  ( $t_{on}$  και  $t_{off}$  αντίστοιχα) όπως φαίνεται στο σχήμα 23. Έτσι, η διάρκεια που παραμένει ανοιχτός ο διακόπτης καθορίζει και την τιμή της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα.



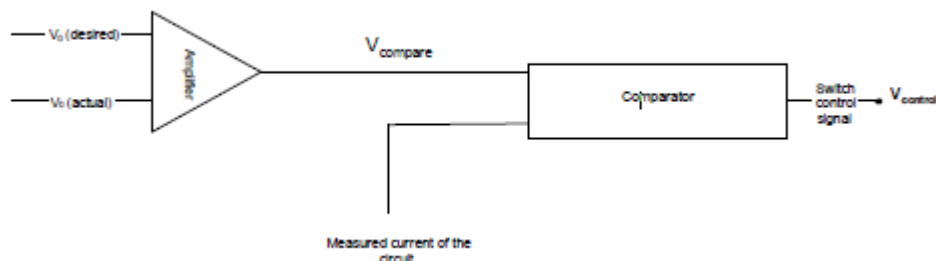
Σχήμα 23. Μετατροπέας dc-dc.

Μία από τις μεθόδους για τον έλεγχο της τάσης εξόδου είναι να ανοιγοκλείνει ο διακόπτης με σταθερή συχνότητα (σταθερή εναλλαγή με περίοδο  $T_s = t_{on} + t_{off}$ ) ενώ ταυτόχρονα ελέγχεται η διάρκεια που ο διακόπτης παραμένει ανοιχτός, έτσι ώστε να φτάσει η τάση εξόδου στην επιθυμητή τιμή. Στην μέθοδο αυτή, που ονομάζεται Διαμόρφωση Εύρους Παλμού (Pulse-Width Modulation, PWM), μεταβάλλεται το duty ratio  $D$ , όπου  $D = t_{on}/T_s$ . Στον έλεγχο PWM με σταθερή συχνότητα, το σήμα που κάνει τον έλεγχο δημιουργείται συγκρίνοντας ένα σήμα  $V_{compare}$  με μια περιοδική κυματομορφή όπως φαίνεται στο σχήμα 24 που συνήθως είναι μια πριονωτή τάση. Το σήμα ελέγχου  $V_{compare}$  δημιουργείται από την ενίσχυση του σφάλματος μεταξύ της τάσης εξόδου και της επιθυμητής τάσης εξόδου. Η συχνότητα της πριονωτής κυματομορφής,  $V_{st}$ , που έχει σταθερή τιμή κορυφής, καθορίζει την συχνότητα εναλλαγής. Αυτή η συχνότητα είναι σταθερή και επιλέγεται να είναι από λίγα kHz έως μερικές εκατοντάδες kHz. Όταν το ενισχυμένο σήμα σφάλματος,  $V_{compare}$ , που μεταβάλλεται πολύ πιο αργά σε σχέση με την συχνότητα εναλλαγής, είναι μεγαλύτερο από την στιγμιαία τιμή της πριονωτής κυματομορφής, το σήμα ελέγχου εναλλαγής γίνεται ένα, με αποτέλεσμα ο διακόπτης να ανοίξει (on), αλλιώς είναι κλειστός (off).



Σχήμα 24. Διάγραμμα λειτουργίας dc-dc μετατροπέα με Voltage control.

Μία άλλη μέθοδος ελέγχου των μετατροπέων dc-dc είναι με τη μέτρηση του ρεύματος εξόδου του κυκλώματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 25. Το γεγονός ότι ελέγχεται το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα έχει επίδραση στη δυναμική συμπεριφορά της ανάρτασης του βρόγχου ελέγχου.



Σχήμα 25. Διάγραμμα λειτουργίας dc-dc μετατροπέα με έλεγχο ρεύματος.

Ο έλεγχος με τη μέτρηση του ρεύματος έχει μερικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον συμβατικό τρόπο ελέγχου του duty-cycle του PWM:

1) Αφαιρεί τον ένα πόλο από την συνάρτηση μεταφοράς έξοδο-προς-έλεγχο  $v(s)/v_c(s)$ , με αποτέλεσμα να απλοποιείται η αντιστάθμιση του συστήματος αρνητικής-ανάδρασης.

2) Επιτρέπει την σχεδίαση τροφοδοτικών με υπομονάδες που λειτουργούν παράλληλα και συνεισφέρουν ίσα ρεύματα στο φορτίο εξόδου.

Ένας από τους στόχους στην σχεδίαση των τροφοδοτικών είναι η μείωση του όγκου τους και η αύξηση της αξιοπιστίας τους. Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας των ημιαγωγών έχουν σαν αποτέλεσμα να προτιμάται η χρήση διακοπτόμενων τροφοδοτικών αντί των γραμμικών διότι είναι μικρότερα και πιο αξιόπιστα σε σχέση με τα γραμμικά. Στα διακοπτικά τροφοδοτικά η μετατροπή της dc τάσης από ένα επίπεδο σε κάποιο άλλο επιτυγχάνεται με την χρήση ενός dc-dc μετατροπέα. Επειδή τα στοιχεία ισχύος δεν χρειάζεται να λειτουργούν στην ενεργό περιοχή τους, ο συγκεκριμένος τρόπος λειτουργίας έχει πολύ χαμηλή απώλεια ενέργειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υψηλή ενεργειακή απόδοση σε ένα ποσοστό της τάξης του 70 με 90%. Επιπρόσθετα η αυξημένη συχνότητα εναλλαγής, οι υψηλές τιμές λειτουργίας τάσης και ρεύματος και το χαμηλό κόστος είναι οι παράγοντες που κάνουν τα διακοπτικά τροφοδοτικά να χρησιμοποιούνται ευρέως. Τέλος ένα MOSFET που λειτουργεί σαν διακόπτης έχει πολύ μεγαλύτερη ικανότητα να χειρισμού της ισχύς σε σύγκριση με το γραμμικό τρόπο λειτουργίας.

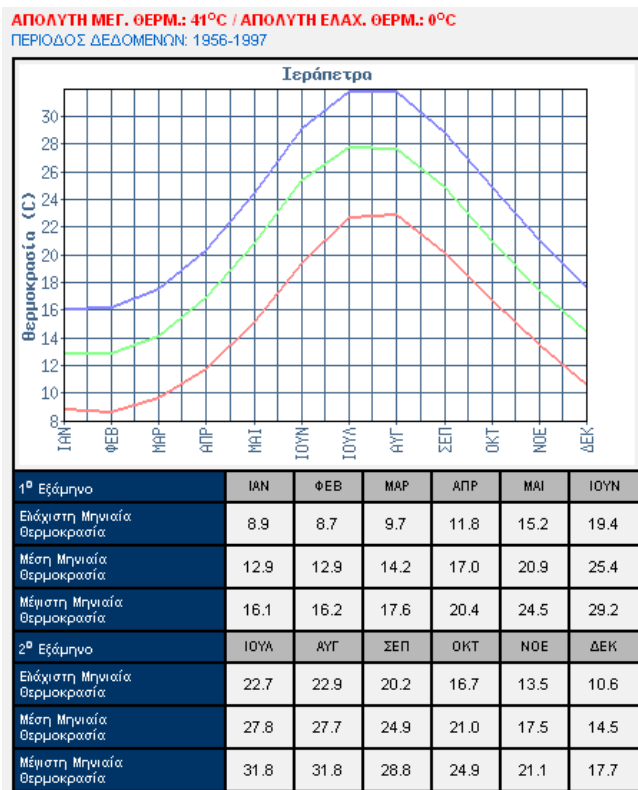
Στον αντίποδα, τα διακοπτόμενα τροφοδοτικά είναι πολύ πιο σύνθετα και πρέπει να λειφθούν συγκεκριμένα μέτρα για τη μείωση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής λόγω της υψηλής συχνότητας εναλλαγής [11].

## **5. ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΗΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΤΕΓΕΣ ΚΤΗΡΙΩΝ**

### **5.1 Μελέτη εγκατάστασης απομονωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων**

Στη παρούσα ενότητα μελετάται η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες κτηρίων για την ηλεκτροδότηση και την ανάπτυξη οικιακών, παραγωγικών και άλλων δραστηριοτήτων στην πόλη της Ιεράπετρας. Συγκεκριμένα πραγματοποιείται η κάλυψη αναγκών για μια μέση οικογένεια (4 ατόμων) και με αυτονομία 5 ημερών το μήνα.

Η Ιεράπετρα έχει γεωγραφικό πλάτος  $35^{\circ}$  και γεωγραφικό μήκος  $25.45^{\circ}$  [12]. Είναι η νοτιότερη πόλη της Ευρώπης, απέναντι από την Αφρικανική Ήπειρο, με το προτέρημα ενός ήπιου ξηροθερμικού κλίματος (το θερμόμετρο κατεβαίνει στους  $12^{\circ}\text{C}$  με μέση θερμοκρασία να κυμαίνεται στους  $20^{\circ}\text{C}$ ), με τη μεγαλύτερη ηλιοφάνεια και το μικρότερο ύψος βροχοπτώσεων στην Ελλάδα [15].



Σχήμα 5.1 [14]

### Ηλεκτρικές Καταναλώσεις

Καταχωρούμε τα στοιχεία ημερήσιας κατανάλωσης σε μια κατοικία για μία οικογένεια στους πίνακες 5.2 και 5.3.

Υπολογισμός ημερήσιας ηλεκτρικής κατανάλωσης σε μία κατοικία με μία οικογένεια

#### **ΧΕΙΜΩΝΑΣ**

| Ηλεκτρική Συσκευή  | Ισχύς σε watt | Ώρες λειτουργίας |
|--------------------|---------------|------------------|
| 5 λάμπες φθορισμού | 20            | 6                |
| 7 λάμπες φθορισμού | 11            | 6                |
| Πληντύριο ρούχων   | 2800          | 0.5              |
| Ψυγείο με κατάψυξη | 90            | 5.5              |
| Πληντύριο πιάτων   | 3200          | 0.5              |
| Τηλεόραση          | 180           | 5                |
| Η/Υ                | 400           | 5                |
| Ηλεκτρική κουζίνα  | 2700          | 1                |
| Άλλες χρήσεις      | 1000          | 1                |

Πίνακας 5.2

## ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ

| Ηλεκτρική Συσκευή  | Ισχύς σε watt | Ώρες λειτουργίας |
|--------------------|---------------|------------------|
| 5 λάμπες φθορισμού | 20            | 4                |
| 7 λάμπες φθορισμού | 11            | 4                |
| Πληντύριο ρούχων   | 2800          | 0.5              |
| Ψυγείο με κατάψυξη | 90            | 7                |
| Πληντύριο πιάτων   | 3200          | 0.5              |
| Τηλεόραση          | 180           | 3                |
| H/Y                | 400           | 3                |
| Ηλεκτρική κουζίνα  | 2700          | 1                |
| Άλλες χρήσεις      | 1000          | 1                |

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3

Έχουμε κατανάλωση τον Χειμώνα ίση με 11.16 kwh και κατανάλωση το Καλοκαίρι ίση με 9.78 kwh. Συνεπώς θα υπολογίσουμε για ημερήσια κατανάλωση ίση με την μεγαλύτερη, δηλαδή ίση με 11.16 KWh και με την ελάχιστη ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία τον μήνα Ιανουάριο ίση με: 3.02 KWh/m<sup>2</sup>d [13].

Συνολική καταναλωση  $E_L = 11.16 \text{ KWh}$

Συνολική ισχύς φορτίων  $P_L = 10.4 \text{ KW}$

Συντελεστής περιθωρίου υπολογισμού ηλεκτρικών φορτίων  $m = 1.1$ .

Απο την ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια των 11.16 kwh οι 4 KWh αφορούν άμεση τροφοδοσία ( $E_{L,\alpha} = 4 \text{ KWh}$ ) των φορτίων κατα την διάρκεια της ημέρας και το υπόλοιπο αποθηκεύεται στον συσσωρευτή ( $E_{L,\epsilon} = 7.16 \text{ kwh}$ ).

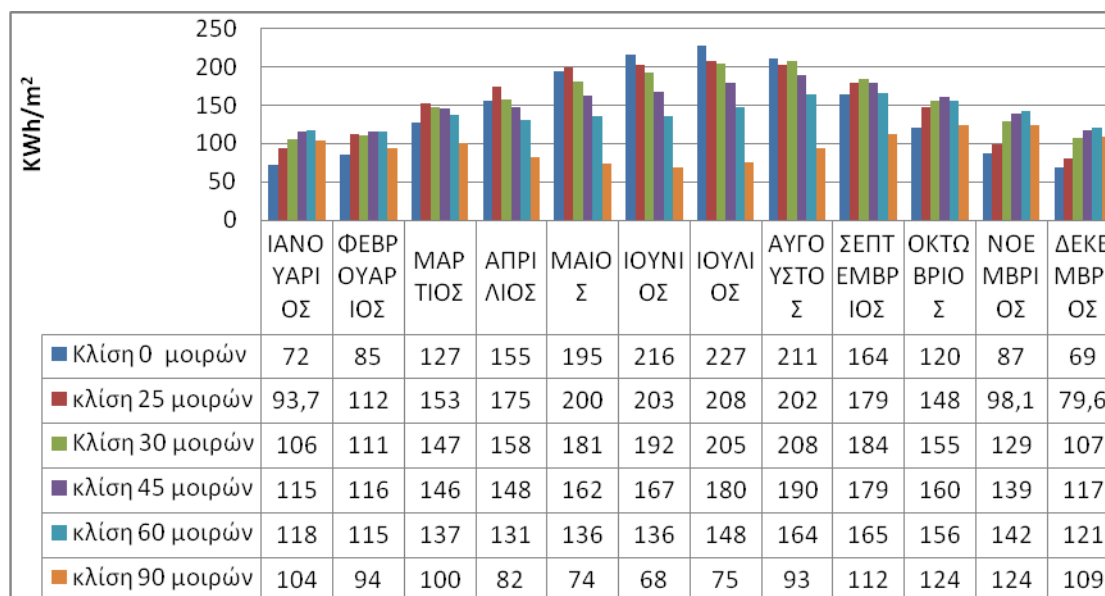
Τα τμήματα της ΦΒ εγκατάστασης είναι η ΦΒ συστοιχία, ο Inverter και το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος.

### Αναλυτικοί υπολογισμοί

#### **A. Τοπικά δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας**

Η ηλιοφάνεια εκφράζεται σε πλήθος ωρών ανά μήνα και ανά έτος, κατά τις οποίες ο ήλιος είναι ορατός στον ουρανό. Στην Ελλάδα, η περιοχή με την μεγαλύτερη ηλιοφάνεια είναι η περιοχή της Ιεράπετρας στο νοτιοανατολικό μέρος της Κρήτης (3108 ώρες ετησίως). Επειδή στην Ιεράπετρα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους έχει δυνατούς βόρειους άνεμους είναι προτιμώτερο να χρησιμοποιήσουμε μία σταθερή κλίση στα πάνελ και ίση με:  $35^\circ - 10^\circ = 25^\circ$  [3].

Μέση ετησίως ημερήσια πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας με γωνία κλίσης  $\beta = 25^\circ$  ίση με  $H_{\text{tm}} = 5.07 \text{ kWh/m}^2\text{d}$  [13]. Απ' τον πίνακα 5.1 η μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα είναι:  $\theta_{\text{am}} = 20^\circ\text{C}$ .



Σχήμα 5.4 Μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία ( $\text{KWh/m}^2$ ) σε διάφορες κλίσεις.

Δεν μπορούμε να τοποθετήσουμε τα ΦΒ πάνελ σε οριζόντια κλίση καθώς κάθετα σκόνη, συνεπώς αγνοώντας την οριζόντια κλίση και παρατηρώντας το σχήμα 5.4 έχουμε για κλίση  $25^\circ$  μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία για 5 μήνες τον χρόνο. Συνεπώς η καλύτερη γωνία τοποθέτησης είναι  $25^\circ$ .

## Β. Ενεργειακές καταναλώσεις

| ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ<br>ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ         | ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΒ<br>ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ |                            |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|
| $E_{L,\alpha} = 4 \text{ KWh}$      | $n_\alpha = 0.92$                               | $n_{\gamma,\sigma} = 0.90$ |
| $E_{L,\epsilon} = 7.16 \text{ KWh}$ | $n_\epsilon = 0.76$                             | $n_{\text{inv}} = 0.94$    |
| $E_L = 11.16 \text{ KWh}$           |                                                 | $n_{\text{εκφ}} = 0.91$    |
| $m = 1.1$                           |                                                 | $n_{\gamma,\beta} = 0.8$   |
|                                     |                                                 | $\text{PR}_\sigma = 0.8$   |

Πίνακας 5.5

|                        |                                                              |
|------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $\eta_{\alpha}$        | Συντελεστής απολειών μεταφοράς ενέργειας (Άμεση αξιοποίηση)  |
| $\eta_{\varepsilon}$   | Συντελεστής απολειών μεταφοράς ενέργειας (Έμμεση αξιοποίηση) |
| $\eta_{\gamma,\sigma}$ | Συντελεστής γήρανσης συστήματος                              |
| $\eta_{inv}$           | Συντελεστής απόδοσης inverter                                |
| $\eta_{εκφ}$           | Συντελεστής εκφόρτισης συσσωρευτή                            |
| $\eta_{\gamma,\beta}$  | Συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή                              |
| $PR_{\sigma}$          | Λόγος επίδοσης ΦΒ συστοιχίας                                 |

## Γ. Υπολογισμός χαρακτηριστικών του ΦΒ συστήματος

### 1. Ισχύς αιχμής του ΦΒ συστήματος

Υπολογισμός της ισχύος αιχμής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με την ελάχιστη ετησίως ημερήσια πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας ( $H_t = 3.02 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ ).

$$P_{\rho,\sigma}(n) = \frac{1}{PR_{\sigma}} * \frac{G_{STC}}{H_t} * m * \left( \frac{E_{L,\alpha}}{n_c} + \frac{E_{L,\varepsilon}}{n_c} + \left( \frac{n}{N-n} \right) * \frac{E_L}{n_c} \right) \quad (5.1)$$

Όπου:

$n$  Αριθμός ημερών αυτονομίας,

$G_{STC}$  Πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας σε πρότυπες συνθήκες ακτινοβολίας:  
 $1 \text{ kW/m}^2$ ,  $\theta_c = 25^\circ\text{C}$ ,  $AM = 1.5$ .

Απο τη σχέση 5.1 έχουμε:

$$P_{\rho,\sigma} = 7.597 \text{ kW}$$

### 2. Πλήθος ΦΒ πλασιών

Χρησιμοποιούμε ΦΒ πλαίσια που διαθέτει η εταιρεία <<Mitsubishi>> MF120 EC3LF και είναι πολυκρυσταλλικού πυριτίου με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Ισχύ: 120 Watts

Μέγιστη τάση ισχύος: 17 Volts

Μήκος πλαισίου: 1495 mm

Πλάτος πλαισίου: 674 mm

Πάχος πλαισίου: 46 mm

Βέρρος πλαισίου: 13.5 kg

Βαθμός απόδοσης Module:

$$n_r = \frac{120 \text{ W}}{A(m^2) * 1000 (\frac{W}{m^2})} = 0.12 = 12\%$$

$$\text{Πλήθος ΦΒ πλαισίων: } N = \frac{7597W}{120W} \approx 63.31, \quad N = 64$$

Οι συσσωρευτές λειτουργούν σε ονομαστική τάση  $V=48\text{Volt}$  με βαθμό εκφόρτισης 80%. Το βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών επιρεάζει τη διάρκεια ζωής η οποία εκφράζεται σε κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης. Μεγάλο βάθος εκφόρτισης συνεπάγεται μικρή διάρκεια ζωής και αντίστροφα.

Φροντίζουμε η τάση να υπερκαλύπτει την μέγιστη επιτρεπτή τάση φόρτισης του συσσωρευτή η οποία προσεγγιστικά ισούται με  $\sim 1.2 V_B$ , όπου  $V_B$  η ονομαστική τάση του συσσωρευτή.

Στην περίπτωση μας έχουμε  $V_B = 48 \text{ Volt}$ , συνεπώς πρέπει να υπερκαλύπτει η τάση εξόδου της ΦΒ συστοιχίας την  $1.2 * 48 = 57.6 \text{ Volt}$ . Άρα προφανώς κάθε κλάδος της ΦΒ συστοιχίας θα αποτελείται από 4 ΦΒ πλαίσια καθώς  $4 * 17 \text{ V} = 68 \text{ V}$  που υπερκαλύπτει το άνω όριο.

Κάθε κλάδος της ΦΒ συστοιχίας αποτελείται από 4 ΦΒ πλαίσια, άρα η ΦΒ συστοιχία θα αποτελείται από:  $\frac{64}{4} = 16$  παράλληλους κλάδους.

Εν τέλει θα δίνει τάση ίση με:  $4 * 17 = 68 \text{ Volt}$

Συνολικό πλήθος ΦΒ πλαισίων:  $4 * 16 = 64 \text{ ΦΒ πλαίσια}$

Με ονομαστική ισχύ αιχμής:  $120 \text{ W} * 64 = 7.68 \text{ KWp}$ .

Ιδανικά απαιτούμενη ολική επιφάνεια μόνο των φωτοβολταϊκών πλαισίων

$$S_{ολ} = \frac{E}{H_t * n_s * \sigma_{\theta} * \sigma_p} \quad (5.2)$$

$$\sigma_{\theta} = 1 - (T_{ci} - T_r) \quad (5.3)$$

$$T_{ci} = T_i + 30^{\circ}\text{C} \quad (5.4)$$

Όπου:

- $\sigma_{\theta}$  Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης,
- $\sigma_{\rho}$  συντελεστής ρύπανσης που λαμβάνεται ίσος με 0.9,
- $T_i$  μέση θερμοκρασία του μήνα,
- $T_r$  ιδανική θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_r=25^{\circ}\text{C}$ ),
- $n_e$  βαθμός απόδοσης του ΦΒ πλαισίου.

Για τον μήνα Ιανουάριο έχουμε μέση θερμοκρασία:  $T_i = 12.9^{\circ}\text{C}$ . Συνεπώς από τη σχέση 5.4 έχουμε:

$$T_{ci} = 12.9^{\circ}\text{C} + 30^{\circ}\text{C} = 42.9^{\circ}\text{C}$$

Από την 5.3 έχουμε:

$$\sigma_{\theta} = 1 - (42.9 - 25) = 0.92.$$

Ο βαθμός απόδοσης του ΦΒ πλαισίου:  $n_e = n_r * \sigma_{\theta} = 0.12 * 0.92 = 0.11$

και στη συνέχεια από τη σχέση 5.2 έχουμε:

$$S_{ολ} = \frac{11.16}{3.02 * 0.11 * 0.9} = \frac{11.16}{0.299} = 37.324 \text{ m}^2$$

#### Πραγματικά απαιτούμενη ολική επιφάνεια μόνο των ΦΒ πλαισίων

Οι ηλεκτρικές απώλειες στο σύστημα (συσσωρευτές, μετατροπείς ισχύος, τάσης κ.τ.λ.) είναι 24% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την έξοδο της φωτοβολταϊκής γεννήτριας μέχρι την έξοδο προς κατανάλωση, συνεπώς ο συντελεστής ενεργειακής μεταφοράς είναι ίσος με 0.76 ( $n_{μετ} = 0.76$ ). Άρα η πραγματικά απαιτούμενη ολική επιφάνεια των ΦΒ πλαισίων είναι:

$$S'_{ολ} = \frac{37.324 \text{ m}^2}{n_{μετ}} = 49.11 \text{ m}^2$$

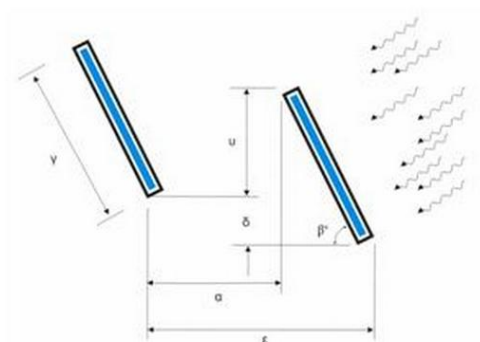
### Απαιτούμενη επιφάνεια στέγης κτηρίου για την εγκατάσταση ΦΒ πάνελ

Κάθε ΦΒ πλαίσιο πρέπει να έχει ανοικτό ορίζοντα. Η γωνία του ύψους των γειτονικών συστοιχειών, δέντρων, κτηρίων ή άλλων εμποδίων ικανοποιεί μέσα σε αζιμούθια γωνία από  $-60^\circ$  έως  $+60^\circ$  προς νότο την σχέση:  
 $\beta_\epsilon \leq 48^\circ - \pi^\circ = 48^\circ - 35^\circ = 13^\circ$  δηλαδή  $\beta_\epsilon \leq 13^\circ$ .

Απ'τη καμπύλη του λόγου ελεύθερης απόστασης  $\alpha$  ανάμεσα στις γειτονικές σειρές των ηλιακών συλλεκτών μιάς φωτοβολταϊκής συστοιχείας προς την επικάλυψη του ύψους  $u$  σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος έχουμε:

$$\frac{\alpha}{u} = 2.2$$

Θεωρούμε πως τοποθετούμε σε κάθε πάνελ μόνο ένα πλαίσιο και ότι τοποθετούνται σε οριζόντιο επίπεδο ( $\delta=0$ ).



Σχήμα 5.6

Υπολογίζουμε τις αποστάσεις μεταξύ των πάνελ έτσι ώστε να μην σκιάζονται μεταξύ τους κατά την τοποθέτησή τους. Από τις σχέσεις 3.33 και 3.34 έχουμε:

$$u = \gamma * \eta\mu\beta_\sigma - \delta = 0.674 * \eta\mu 25^\circ = 0.285 \text{ m}$$

$$\frac{\alpha}{u} = 2.2 \quad \text{δηλαδή} \quad \alpha = 0.627 \text{ m}$$

$$\epsilon = \alpha + \gamma * \sigma\upsilon\nu\beta_\sigma = 0.627 + 0.674 * 0.906 = 1.238 \text{ m}$$

Σε γενικές γραμμές το εμβαδόν θα είναι:

$$E = 4 * (\text{μήκος πλαισίου}) * 16 * \epsilon = 4 * 1.495 * 16 * 1.238 = 118.45 \text{ m}^2 \sim 120 \text{ m}^2$$

Δηλαδή το εμβαδόν της στέγης που θέλουμε να έχουμε διαθέσιμο για την τοποθέτηση των πάνελ πρέπει να είναι τουλάχιστον 120 m<sup>2</sup>. Όμως θα πρέπει η απόσταση από το στηθαίο του δώματος να είναι ένα (1) μέτρο εσωτερικά αυτού για λόγους ασφαλείας συνεπώς θα πρέπει να είναι συνολικά τουλάχιστον 162 m<sup>2</sup>.

Στην περίπτωση που κάθε πάνελ αποτελείται από 4 ΦΒ πλαίσια έχουμε από τις σχέσεις 3.33 και 3.34:

$$\gamma = 4 * 0.674 = 2.696 \text{ m}$$

$$v = \gamma * \eta \mu \beta_{\sigma} - \delta = 1.13 \text{ m}$$

$$\alpha = 2.486 \text{ m}$$

$$\varepsilon = \alpha + \gamma * \sigma \nu \nu \beta_{\sigma} = 4.94 \text{ m}$$

Συνεπώς σε γενικές γραμμές το εμβαδόν θα είναι:

$$E = 16 * (\text{μήκος πλαισίου}) * \varepsilon = 16 * 1.495 * 4.94 \approx 119 \text{ m}^2$$

Παρατηρούμε ξανά ότι το εμβαδόν της στέγης που θέλουμε να έχουμε διαθέσιμο για την τοποθέτηση των πάνελ πρέπει να είναι τουλάχιστον 120 m<sup>2</sup>. Όμως θα πρέπει η απόσταση από το στηθαίο του δώματος να είναι ένα (1) μέτρο εσωτερικά αυτού για λόγους ασφαλείας συνεπώς θα πρέπει να είναι συνολικά τουλάχιστον 162 m<sup>2</sup>.

### 3. Ηλεκτρικοί συσσωρευτές

Οι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται σαν αποθηκευτικό σύστημα προκειμένου να τροφοδοτήσουν με ενέργεια τα φορτία κατά τη διάρκεια της νύχτας και σε περιόδους όπου η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι επαρκής.

Η χωρητικότητα των συσσωρευτών που θα χρησιμοποιηθούν δίδεται απ'την σχέση 5.5 .

$$C(n) = \frac{(n+b)*m*EL}{n\gamma, \beta * n \varepsilon \kappa \varphi * \beta \varepsilon \kappa \varphi * V \beta} \quad (5.5)$$

Όπου:

|                           |                                           |
|---------------------------|-------------------------------------------|
| $\eta_{\gamma,\beta}=0.8$ | συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή,          |
| $\eta_{εκφ}=0.91$         | συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας, |
| $\beta_{εκφ}=80\%$        | είναι το βάθος εκφόρτισης,                |
| $m=1.1$                   | συντελεστής επάρκειας,                    |
| $V_{\beta}=48(V)$         | ονομαστική τάση συσσωρευτών,              |
| $E_L(kWh)$                | συνολική κατανάλωση ενέργειας.            |

Προκύπτει πώς η χωρητικότητα των συσσωρευτών είναι:

$$C(n) = 2476.3 \text{ Ah}$$

Θα χρησιμοποιηθούν συσσωρευτές τύπου SOLAR ανοικτού τύπου και σε διαφανή δοχεία, χαμηλής συγκέντρωσης αντιμονίου και συγκεκριμένα τον τύπο SOLAR 200pzS 2500 2V. Απαρτίζεται από κυψελίδες 2 Volt με χωρητικότητα 2500 Ah , 14-15 χρόνια διάρκεια ζωής, κλειστού τύπου 1200 κύκλοι βαθιάς εκφόρτισης. Για τάση εξόδου 48Volt και χωρητικότητα 2476.3 Ah χρειαζόμαστε 24 cells των 2 Volts τα οποία τα συνδέουμε σε σειρά, δηλαδή ο θετικός πόλος του ενός με τον αρνητικό πόλο του άλλου έτσι ώστε να έχουμε 48 Volts. Η τελική χωρητικότητα παραμένει σταθερή και ίση με 2500 Ah, επειδή τα συνδέουμε σε σειρά δεν αλλάζει η χωρητικότητα.

#### 4. Επιλογή μετατροπέα DC/AC (Inverteter)

Θα χρειαστούμε 2 μετατροπείς DC/AC της εταιρείας << Studer >> μοντέλου HPC 6000-48 των 5000 VA/ 48V. Με μεταλλικό ρελέ και φορτιστή μπαταριών καθαρού ημιτόνου.

Χαρακτηριστικά:

Ισχύς: 5000 VA,  
Απόδοση τριπλάσιας ισχύος αιχμής για τουλάχιστον 5 sec,  
Τάση εισόδου/εξόδου – Συχνότητα 48 V/220 Vac – 50 Hz,  
Φορτιστής μπαταριών: 70A,  
Τάση μπαταριών: 48V.

#### 5. Ηλεκτροπαράγωγο ζεύγος

Με την προσθήκη Η/Ζ έχουμε Υβριδικό ΦΒ σύστημα και όχι αυτόνομο. Η ισχύς του Η/Ζ πρέπει να καλύπτει παράλληλα τα φορτία της εφαρμογής και τη φόρτιση των συσσωρευτών. Στο κύκλωμα παρεμβάλλεται κατάλληλα ο ανορθωτής ο οποίος μπορεί να είναι ενσωματωμένος στο Η/Ζ.

Αναλυτικά το Η/Ζ πρέπει να καλύπτει :

- Την ισχύ  $P_o$  κανονικής λειτουργίας, δηλαδή  $P_o = 10.4 \text{ Kw}$ .
- Την φόρτιση συσσωρευτών χωρητικότητας 2500 Ah, μέσω ανορθωτή με ρεύμα φόρτισης μέχρι  $\frac{C}{10} = 250 \text{ A}$ .

#### Τεχνικά χαρακτηριστικά του Η/Ζ

Μόνο για φόρτιση συσσωρευτή:

A) Χρόνος φόρτισης με  $I_\phi$  :

$$t_\phi = \frac{\beta_{εκφ} \cdot C}{\eta q \cdot I_\phi} = \frac{0.8 \cdot 2500}{0.9 \cdot 70} = 31.7 \text{ h}$$

Η ισχύς του Η/Ζ πρέπει να είναι αρκετή για την ηλεκτροδότηση φορτίων πρώτης προτεραιότητας αλλά και για την φόρτιση συσσωρευτών σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα 1 ή 2 ημερών. Στην προκειμένη περίπτωση χρειαζόμαστε λίγο παραπάνω από μία ημέρα.

B) Ισχύς Η/Ζ απαιτούμενη για την φόρτιση συσσωρευτή:

$$P_\phi = I_\phi \cdot V_\phi = 70 \text{ A} \cdot 48 \text{ V} = 3.36 \text{ kW}$$

Όπου:

$V_\phi$  Τάση εξόδου του Η/Ζ προς το συσσωρευτή

Άρα η ισχύς του Η/Ζ τουλάχιστον είναι:

$$P_{HZ} = P_o + P_\phi = 13.76 \text{ kW}$$

Θα χρησιμοποιηθεί Η/Ζ ανοικτού τύπου, μοντέλο GEP Z-19 ισχύος 14.4 kW με χειροκίνητο πίνακα.

#### Δ. Οικονομικά στοιχεία εφαρμογής

Υπολογίζεται το κόστος της εγκατάστασης και η ποσοστιαία συμμετοχή κάθε τμήματος στο συνολικό αρχικό κόστος της εγκατάστασης το οποίο αφορά τον χρόνο ζωής των συσσωρευτών, τυπική τιμή του οποίου μπορεί να θεωρηθεί η δεκαετία (ο χρόνος ζωής των ΦΒ πλαϊσίων υπερβαίνει τα 25 έτη για ΦΒ πλαίσια c-Si).

| α/α | Υποσύστημα                 | Τιμή μονάδας | Ποσότητα | Συνολικό κόστος |
|-----|----------------------------|--------------|----------|-----------------|
| 1   | ΦΒ πλαίσια c-Si 120 Wp     | 389.00       | 64       | 24896.00        |
| 2   | Συσσωρευτές 200pzS 2500 2V | 697.00       | 24       | 16728.00        |
| 3   | Inverter +Ελεκτής φόρτισης | 2799.00      | 2        | 5598.00         |
| 4   | Εγκατάσταση                | 800.00       | -        | 800.00          |
| 5   | H/Z 14.4 kW GEP Z-19       | 7700.00      | 1        | 7700.00         |
|     |                            |              | Σύνολο   | 55722.00        |

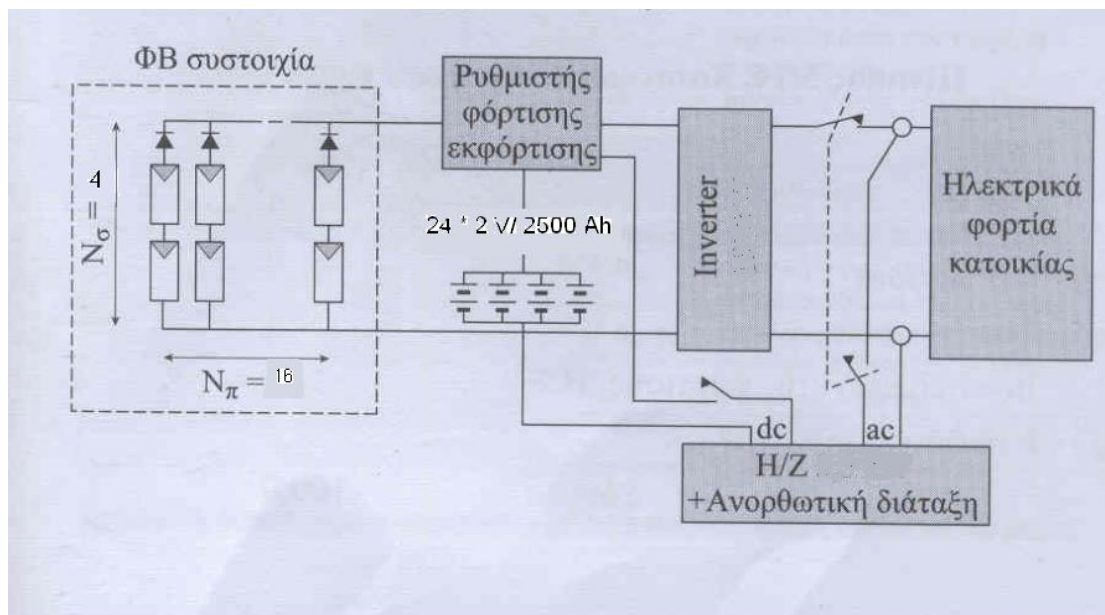
Πίνακας 5.5 Συγκεντρωτικός πίνακας κόστους αρχικής δαπάνης επιμέρους συστημάτων και εργασιών εγκατάστασης του ΦΒ συστήματος.

Συνολικό κόστος εγκατάστασης: 55722.00 € .

Αναλογία κόστους συστήματος ανά kWp: 7255€/kWp ή 7.26 €/Wp

| Υποσύστημα                 | Ποσοστιαία συμμετοχή ανά υποσύστημα(%) |
|----------------------------|----------------------------------------|
| ΦΒ πλαίσια c-Si 120 Wp     | 44.68                                  |
| Συσσωρευτές 200pzS 2500 2V | 30.02                                  |
| Inverter +Ελεκτής φόρτισης | 10.04                                  |
| Εγκατάσταση                | 1.44                                   |
| H/Z 14.4 kW GEP Z-19       | 13.82                                  |
| Σύνολο                     | 100.00                                 |

Πίνακας 5.6 Κατανομή κόστους ανά τμήμα έργου



Σχήμα 5.7 Ηλεκτρολογικό διάγραμμα εγκατάστασης

## 5.2 Μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων συνδεδεμένων στο εθνικό δίκτυο

Στη παρούσα ενότητα μελετάται η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες κτηρίων συνδεδεμένων στο εθνικό δίκτυο, για την ηλεκτροδότηση και την ανάπτυξη οικιακών, παραγωγικών και άλλων δραστηριοτήτων στην πόλη της Ιεράπετρας. Όπως και στην ενότητα 5.1 γίνεται η μελέτη για τις απαιτήσεις μίας οικογένειας 4 ατόμων με τις ίδιες ηλεκτρικές καταναλώσεις τόσο για τον Χειμώνα όσο και για το Καλοκαίρι που φαίνονται στους πίνακες 5.2 και 5.3. Επειδή είναι συνδεδεμένα στο εθνικό δίκτυο θα έχουν μόνο μία μέρα αυτονομίας (και δε χρειαζόμαστε H/Z).

### Α. Υπολογισμός χαρακτηριστικών του ΦΒ συστήματος

#### 1. Ισχύ αιχμής ΦΒ συστοιχίας

Υπολογισμός της ισχύος αιχμής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με την ελάχιστη ετησίως ημερήσια πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας ( $H_t = 3.02 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ ).

$$P_{\rho, \sigma} = \frac{1}{PR_{\sigma}} * \frac{G_{\text{inc}}}{H_t} * m * \left( \frac{E_{1,s}}{n_s} + \frac{E_{1,e}}{n_e} \right) \quad (5.6)$$

Απο την σχέση 5.6 έχουμε:

$$P_{\rho, \sigma} = \frac{1}{0.8} * \frac{1}{3.02} * 1.1 * \left( \frac{4}{0.92} + \frac{7.16}{0.76} \right) = 6.27 \text{ kW}$$

#### 2. Πλήθος φωτοβολταϊκών πλαισίων

Χρησιμοποιούμε όπως και στη προηγούμενη ενότητα ΦΒ πλαίσια που διαθέτει η εταιρεία <<Mitsubishi>> MF120 EC3LF και είναι πολυκρυσταλλικού πυριτίου με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Ισχύ: 120 Watts

Μέγιστη τάση ισχύος: 17 Volts

Μήκος πλαισίου: 1495 mm

Πλάτος πλαισίου: 674 mm

Πάχος πλαισίου: 46 mm

Βέρρος πλαισίου: 13.5 kg

Βαθμός απόδοσης Module:

$$\eta_r = 12\%$$

Πλήθος ΦΒ πλαισίων:  $N = \frac{6270W}{120W} = 52.25$  , δηλαδή N = 53 ΦΒ πλαίσια.

Όπως και προηγουμένως οι συσσωρευτές λειτουργούν σε ονομαστική τάση V=48Volt με βαθμό εκφόρτισης 80%.

Φροντίζουμε η τάση να υπερκαλύπτει την μέγιστη επιτρεπτή τάση φόρτισης του συσσωρευτή η οποία προσεγγιστικά ισούται με  $\sim 1.2 V_B$ , όπου  $V_B$  η ονομαστική τάση του συσσωρευτή.

Στην περίπτωση μας έχουμε  $V_B = 48$  Volt, συνεπώς πρέπει να υπερκαλύπτει η τάση εξόδου της ΦΒ συστοιχίας την  $1.2 * 48 = 57.6$  Volt. Άρα προφανώς κάθε κλάδος της ΦΒ συστοιχίας θα αποτελείται από 4 ΦΒ πλαίσια καθώς  $4 * 17 V = 68 V$  που υπερκαλύπτει το άνω όριο.

Κάθε κλάδος της ΦΒ συστοιχίας αποτελείται από 4 ΦΒ πλαίσια, άρα η ΦΒ συστοιχία θα αποτελείται από:  $\frac{53}{4} = 13.25$  δηλαδή 14 παράλληλους κλάδους.

Εν τέλει θα δίνει τάση ίση με:  $4 * 17 = 68$  Volt

Συνολικό πλήθος ΦΒ πλαισίων:  $4 * 14 = 56$  ΦΒ πλαίσια

Με ονομαστική ισχύ αιχμής:  $120 W * 56 = 6.72$  KWp.

### Απαιτούμενη επιφάνεια στέγης κτηρίου για την εγκατάσταση ΦΒ πάνελ

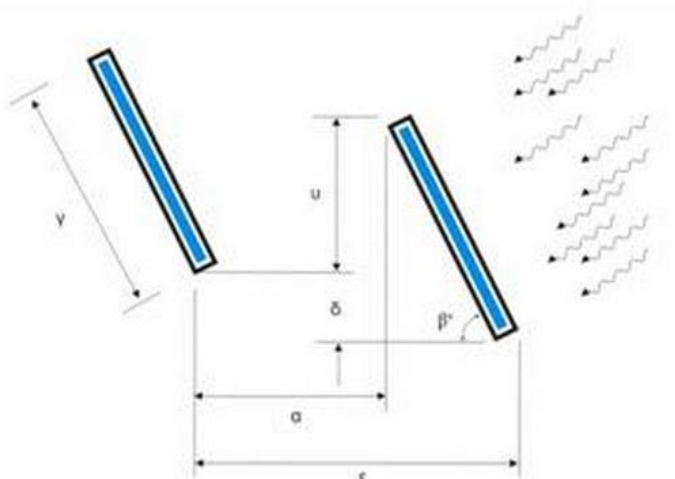
Κάθε ΦΒ πλαίσιο πρέπει να έχει ανοικτό ορίζοντα. Η γωνία του ύψους των γειτονικών συστοιχειών, δέντρων, κτηρίων ή άλλων εμποδίων ικανοποιεί μέσα σε αζιμούθια γωνία από  $-60^\circ$  έως  $+60^\circ$  προς νότο την σχέση:

$$\beta_e \leq 48^\circ - \pi^\circ = 48^\circ - 35^\circ = 13^\circ \text{ δηλαδή } \beta_e \leq 13^\circ.$$

Απ'τη καμπύλη του λόγου ελεύθερης απόστασης  $\alpha$  ανάμεσα στις γειτονικές σειρές των ηλιακών συλλεκτών μιάς φωτοβολταϊκής συστοιχείας προς την επικάλυψη του ύψους  $u$  σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος έχουμε:

$$\frac{\alpha}{u} = 2.2$$

Θεωρούμε πως τοποθετούμε σε κάθε πάνελ μόνο ένα πλαίσιο και ότι τοποθετούνται σε οριζόντιο επίπεδο ( $\delta=0$ ).



Σχήμα 5.6

Υπολογίζουμε τις αποστάσεις μεταξύ των πάνελ έτσι ώστε να μην σκιάζονται μεταξύ τους κατά την τοποθέτησή τους. Από τις σχέσεις 3.33 και 3.34 έχουμε:

Θεωρούμε ότι κάθε πάνελ αποτελείται από 4 ΦΒ πλαίσια έχουμε από τις σχέσεις 3.33 και 3.34:

$$\gamma = 4 * 0.674 = 2.696 \text{ m}$$

$$u = \gamma * \eta \mu \beta_\sigma - \delta = 1.13 \text{ m}$$

$$\frac{\alpha}{u} = 2.2 \text{ δηλαδή } \alpha = 2.486 \text{ m}$$

$$\varepsilon = \alpha + \gamma * \sigma \beta_{\sigma} = 4.94 \text{ m}$$

Συνεπώς σε γενικές γραμμές το εμβαδόν θα είναι:

$$E = 14 * (\text{μήκος πλαισίου}) * \varepsilon = 14 * 1.495 * 4.94 \approx 104 \text{ m}^2$$

Παρατηρούμε ότι το εμβαδόν της στέγης που θέλουμε να έχουμε διαθέσιμο για την τοποθέτηση των πάνελ πρέπει να είναι τουλάχιστον 104 m<sup>2</sup>. Όμως θα πρέπει η απόσταση από το στηθαίο του δώματος να είναι ένα (1) μέτρο εσωτερικά αυτού για λόγους ασφαλείας συνεπώς θα πρέπει να είναι συνολικά τουλάχιστον 144 m<sup>2</sup>.

### 3. Ηλεκτρικοί συσσωρευτές

Οι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται σαν αποθηκευτικό σύστημα προκειμένου να τροφοδοτήσουν με ενέργεια τα φορτία κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Η χωρητικότητα των συσσωρευτών που θα χρησιμοποιηθούν δίδεται απ'την σχέση 5.5 και προκύπτει ίση με:

$$C = 720 \text{ Ah}$$

Θα χρησιμοποιηθούν συσσωρευτές τύπου SOLAR ανοικτού τύπου και σε διαφανή δοχεία, χαμηλής συγκέντρωσης αντιμονίου και συγκεκριμένα τον τύπο SOLAR 9pzS 720 2V. Απαρτίζεται από κυψελίδες 2 Volt με χωρητικότητα 720 Ah , 11-13 χρόνια διάρκεια ζωής, κλειστού τύπου 1200 κύκλοι βαθιάς εκφόρτισης. Για τάση εξόδου 48Volt και χωρητικότητα 720 Ah χρειαζόμαστε 24 cells των 2 Volts τα οποία τα συνδέουμε σε σειρά, δηλαδή ο θετικός πόλος του ενός με τον αρνητικό πόλο του άλλου έτσι ώστε να έχουμε 48 Volts. Επειδή τα συνδέουμε σε σειρά δεν αλλάζει η χωρητικότητα.

### 4. Επιλογή μετατροπέα DC/AC (Inverteter)

Θα χρειαστούμε 2 μετατροπείς DC/AC της εταιρείας << Studer >> μοντέλου HPC 6000-48 των 5000 VA/ 48V. Με μεταλλικό ρελέ και φορτιστή μπαταριών καθαρού ημιτόνου.

Χαρακτηριστικά:

Ισχύς: 5000 VA,  
Απόδοση τριπλάσιας ισχύος αιχμής για τουλάχιστον 5 sec,  
Τάση εισόδου/εξόδου – Συχνότητα 48 V/220 Vac – 50 Hz,  
Φορτιστής μπαταριών: 70A,  
Τάση μπαταριών: 48V.

#### Δ. Οικονομικά στοιχεία εφαρμογής

Υπολογίζεται το κόστος της εγκατάστασης και η ποσοστιαία συμμετοχή κάθε τμήματος στο συνολικό αρχικό κόστος της εγκατάστασης το οποίο αφορά τον χρόνο ζωής των συσσωρευτών, τυπική τιμή του οποίου μπορεί να θεωρηθεί η δεκαετία (ο χρόνος ζωής των ΦΒ πλαϊσίων υπερβαίνει τα 25 έτη για ΦΒ πλαίσια c-Si).

| α/α | Υποσύστημα                    | Τιμή μονάδας | Ποσότητα | Συνολικό κόστος |
|-----|-------------------------------|--------------|----------|-----------------|
| 1   | ΦΒ πλαίσια c-Si 120 Wp        | 389.00       | 54       | 21006.00        |
| 2   | Συσσωρευτές 9pzS 720 Solar 2V | 174.50       | 24       | 4188.00         |
| 3   | Inverter +Ελεγκτής φόρτισης   | 2799.00      | 2        | 5598.00         |
| 4   | Εγκατάσταση                   | 800.00       | -        | 800.00          |
|     |                               |              | Σύνολο   | 31592.00        |

Πίνακας 5.5 Συγκεντρωτικός πίνακας κόστους αρχικής δαπάνης επιμέρους συστημάτων και εργασιών εγκατάστασης του ΦΒ συστήματος.

Συνολικό κόστος εγκατάστασης: 31592.00 € .

Αναλογία κόστους συστήματος ανά kWp: 4701€/kWp ή 4.7 €/Wp

| Υποσύστημα                    | Ποσοστιαία συμμετοχή ανά υποσύστημα(%) |
|-------------------------------|----------------------------------------|
| ΦΒ πλαίσια c-Si 120 Wp        | 66.5                                   |
| Συσσωρευτές 9pzS 720 Solar 2V | 13.3                                   |
| Inverter +Ελεγκτής φόρτισης   | 17.7                                   |
| Εγκατάσταση                   | 2.5                                    |
| Σύνολο                        | 100.00                                 |

Πίνακας 5.6 Κατανομή κόστους ανά τμήμα έργου

## 6. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΣΤΗ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ

### 6.1 Εισαγωγή

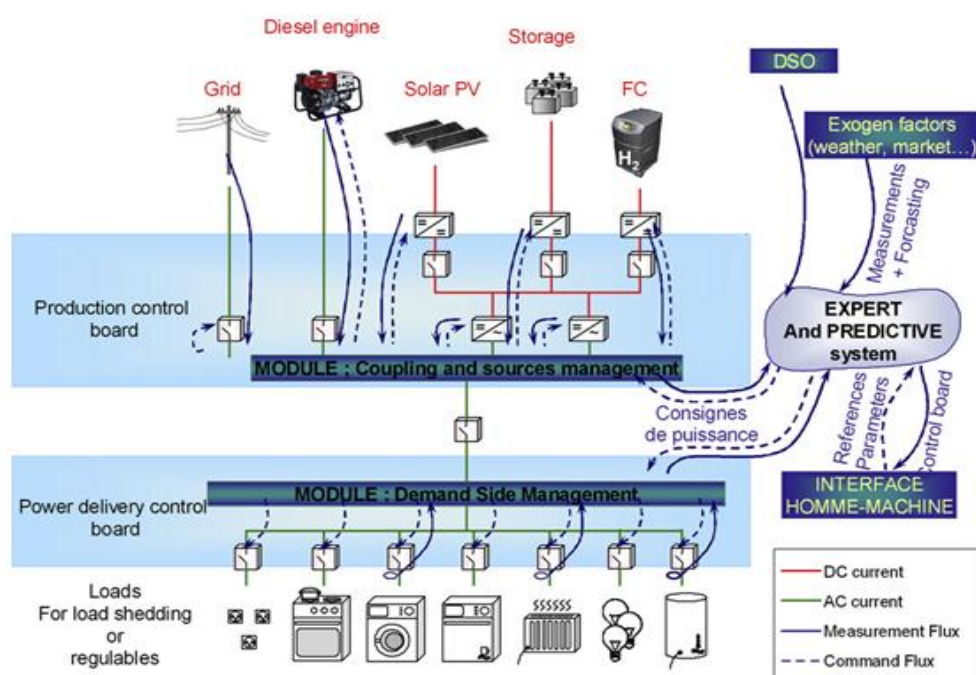
Στην Ευρώπη ο οικιακός τομέας είναι ένας από τους μεγαλύτερους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, που αποτελεί περίπου 33% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται και είναι επίσης μια σημαντική πηγή εκπομπών αερίου θερμοκηπίου. Το πρόβλημα της διαχείρισης της ενέργειας στην κατοικία έχει μελετηθεί παγκοσμίως και αυτή τη περίοδο είναι η εστίαση ιδιαίτερου ενδιαφέροντος στη διαχείριση των πλευρών προσφοράς και ζήτησης στην κατοικία. Εντούτοις δεδομένου ότι η τεχνολογική πρόοδος κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας έχει οδηγήσει σε μια ιδιαίτερη μείωση στο κόστος των φωτοβολταϊκών στοιχείων, ώθησε τη χρήση των φωτοβολταϊκών λύσεων. Υπάρχει μείωση κατά 20% κάθε φορά που αυξάνεται διπλά η παραγωγή. Τέτοια μείωση θα μπορούσε να καταστήσει την παραγωγή φωτοβολταϊκών ανταγωνιστική με μέγιστη παραγωγή μεταξύ 2010 και 2020 με τις σταθερές επιχορηγήσεις. Παρουσιάζονται επίσης διάφορα σενάρια της ανάπτυξης φωτοβολταϊκών και ένα ρεαλιστικό σενάριο είναι ότι η παραγωγή φωτοβολταϊκών θα μπορούσε να φθάσει σε 2400 GWp το 2050 στον κόσμο. Ο De Wild-Scholten και οι Jungbluth και Al έχουν δείξει ότι, για ένα σύστημα στέγης φωτοβολταϊκών στην Ευρώπη, ο χρόνος ενεργειακής επιστροφής είναι μεταξύ 1 έως 3,5 έτη. Αυτή η ενεργειακή επιστροφή χρόνου εξαρτάται από την τεχνολογία και την ακτινοβολία των φωτοβολταϊκών. Μπορούμε επίσης να σημειώσουμε ότι ο Καλδέλλης και ο Al έχουν δείξει ότι αυτός ο χρόνος ενεργειακής επιστροφής θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερος για τις νησιωτικές περιοχές. Παραγωγοί ΦΒ που επιθυμούν να ανταλλάξουν την ενέργεια με το δίκτυο αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο και με παρόμοιες υποχρεώσεις όπως οποιαδήποτε άλλη ανεξάρτητη ενέργεια παραγωγού (ipr- independent power producer). Κατά συνέπεια στην παραγωγή φβ συστημάτων, αντί μόνο να εξετάσουν τους στόχους τους, πρέπει επίσης να προγραμματίσουν και συντονιστούν στις δραστηριότητές τους με το σύστημα διανομής του χειριστή (DSO) [19].

Το πρόγραμμα που θα αναλυθεί σ' αυτό το κεφάλαιο στοχεύει στον σχεδιασμό ενός οικονομικά αποδοτικού πλαισίου για την εσωτερική διαχείριση της ενέργειας και είναι κερδοφόρο κάτω από αρκετούς όρους. Απευθύνεται στην αγορά συστήματος διανομής για τις υπηρεσίες βασισμένες στα ΦΒ συστήματα που στοχεύουν στις εσωτερικές εφαρμογές. Υπάρχει ένα γραμμικό πρόβλημα

βελτιστοποίησης ακέραιων αριθμών, στο οποίο ο στόχος είναι να μεγιστοποιηθούν τα κέρδη που προέρχονται από την παροχή της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ερευνάμε τους τρόπους με τους οποίους οι παραγωγοί ΦΒ θα μπορούν να κερδίσουν από παροχή βοηθητικών υπηρεσιών. Υπάρχουν διάφορα είδη αβεβαιότητας στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ συστήματα όπως η διακοπή λειτουργίας του συστήματος και η απρόβλεπτη καταναλωτική συμπεριφορά.

## 6.2 Ανάλυση της Μεθόδου

### 6.2.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος



Σχήμα 6.1 Αρχιτεκτονική συστήματος παλλαπλών πηγών .

Το προτεινόμενο ΦΒ σύστημα πολλαπλών πηγών με την διαχείριση ενέργειας για τις εφαρμογές κατοικίας παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1. Πραγματοποιείται χωρισμός μεταξύ της πλευράς παραγωγής και της πλευράς κατανάλωσης με μια μονάδα ελέγχου και παρακολούθησης και για τις δύο. Πόροι παραγωγής (γεννήτρια ΦΒ, δίκτυο, σύστημα αποθήκευσης μπαταριών και άλλες συμπληρωματικές πηγές) συνδέονται με τον Πίνακα ελέγχου παραγωγής ενέργειας για να παρέχουν τα φορτία μέσω μιας συμβατικής ηλεκτρικής παράδοσης μονάδας. Το Ειδικό και προφητικό σύστημα (Expert and Predictive System ) είναι ο πυρήνας που λαμβάνει τα στοιχεία (τον καιρό, την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, τα χαρακτηριστικά χρηστών, τις προτιμήσεις κ.λπ.), υπολογίζουν τη βέλτιστη στρατηγική ελέγχου και στέλνει τις οδηγίες στον εξοπλισμό [19].

## **6.2.2 Αντίκτυπος των χαρακτηριστικών διακοπής**

Οι παραγωγοί ΦΒ πρέπει να αντιμετωπίσουν δύο τύπους αβεβαιοτήτων.

- Η πρώτη αβεβαιότητα είναι παραγωγική ικανότητα ΦΒ που υπολογίζεται με την πρόβλεψη της επιτόπου ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Η αβεβαιότητα είναι σχετικά υψηλή καθώς η απόκλιση θερμοκρασίας μπορεί να κυμανθεί έως και  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Η αβεβαιότητα σχετικά με την ακτινοβολία, που καταγράφεται για μια ημέρα αναφοράς θα μπορούσε να οδηγήσει στη μέση απόκλιση τουλάχιστον 40% σε σχέση με την αξία πρόβλεψης.
- Η δεύτερη αβεβαιότητα που έχει επιπτώσεις στο προτεινόμενο σύστημα αφορά σχέδια κατανάλωσης. Οποιαδήποτε αλλαγή στην κατανάλωση πρόβλεψης απαιτεί μια αλλαγή στο λειτουργούν πρόγραμμα και απόκλιση στη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στο δίκτυο. Δυσαναλογίες μπορούν επομένως εμφανίσουν και οι γεννήτριες ΦΒ που μπορεί να μην είναι σε θέση να εκπληρώσουν τις υποχρεώσεις σχετικά με τις βοηθητικές υπηρεσίες. Εντούτοις είναι προφανές ότι η σοβαρότερη ζημία γίνεται από τη διαλείπουσα φύση της πηγής ΦΒ.

### 6.2.3 Διατύπωση προβλήματος

Δημιούργησα στην Matlab ένα αρχείο m-file για το πρόβλημα της βέλτιστης λειτουργίας ενός ΦΒ συστήματος που παρουσιάζεται και διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που πραγματοποιείται σε 2 βήματα.

**Βήμα 1:** Με βάση τις προβλέψεις στοιχείων (καιρός, τοπική απαίτηση, τιμές ηλεκτρικής ενέργειας κ.λ.π.), ο ιδιοκτήτης ΦΒ συστήματος πολλαπλών πηγών προσδοκά το λειτουργούν σχέδιο για τη δυνατότητα περιόδου 24 ωρών. Ο κύριος στόχος είναι:

- Να διαθέσει τις πηγές για να ικανοποιήσει τη ζήτηση πρόβλεψης και να γίνει σχεδιασμός της τοπικής κατανάλωσης.
- Να υπολογίσει την ενέργεια που στέλνεται στο DSO. Το λειτουργούν σχέδιο επιτρέπει στον ιδιοκτήτη να καθορίσει αναμενόμενο κέρδος MBS1 για να μεγιστοποιηθεί:

$$MBS1 = \sum_T (z(t) * cs(t) - Pg(t) * cg(t)) \quad (6.1)$$

Όπου:

- $z(t)$  Η πλεονάζουσα ισχύς,
- $cs(t)$  τιμή για την αγορά ΦΒ παραγωγής απ' το δίκτυο (€/kwh),
- $Pg(t)$  Η ισχύς που καταναλώνεται απ' το δίκτυο,
- $cg(t)$  τιμή ηλεκτρικής ενέργειας δικτύου (€/kwh).

Ο πρώτος όρος δηλώνει το κέρδος απ' την πώληση της τοπικής παραγωγής στο δίκτυο και ο δεύτερος δηλώνει το κόστος της αγοράς της ενέργειας απ' το δίκτυο για την ικανοποίηση της τοπικής απαίτησης.

**Βήμα 2:** Εξετάζεται η διακοπή των αρχικών πηγών και οι απαιτήσεις, ο ιδιοκτήτης αξιολογεί τους κινδύνους προκειμένου να κάνει σωστή απόφαση σε περίπτωση διαταραχών. Σαν οποιαδήποτε αλλαγή η ζήτηση ή η προσφορά έχει επιπτώσεις στο πλεόνασμα, δηλ. η πραγματική ενέργεια παρεχόμενη στο δίκτυο, η ενεργειακή κατανομή πρέπει να αναδιαρρυθμιστούν. Ο στόχος παραμένει να εκπληρώσει την προσφορά, ελαχιστοποιώντας κατά συνέπεια τις πιθανές δαπάνες του penalty cost:

$$\text{Ελαχιστοποίηση} \quad \sum_T (|z(t) - z^*(t)| * cpen(t)) \quad (6.2)$$

Το πραγματικό κέρδος του συστήματος MBS2 επομένως ορίζεται ως:

$$MBs2 = \sum_T (z(t) * cs(t) - Pg(t) * cg(t) - |z(t) - z^*(t)| * cpen(t)) \quad (6.3)$$

Ο πρώτος όρος στην σχέση (6.3) είναι το κέρδος της ηλεκτρικής ενέργειας που πωλείται στο δίκτυο, ο δεύτερος είναι το κόστος της αγοράς της ενέργειας απ' το δίκτυο για την ικανοποίηση της τοπικής απαίτησης. Ο τρίτος είναι το ισορροπημένο κόστος που αναλαμβάνεται εάν η προβλεπόμενη ενεργός ημερήσια ισχύς που ισορροπεί τις διαφορές στην αγορά διαφέρει από την ενεργό ισχύ που παρέχεται πραγματικά.

$$|z(t) - z^*(t)| \leq \omega(t) \quad (6.4)$$

Με την αλλαγή αυτή στη σχέση (6.4) η (6.3) γράφεται σε γραμμική μορφή ως εξής:

$$MBs2 = \sum_T (z(t) * cs(t) - Pg(t) * cg(t) - \omega(t) * cpen(t)) \quad (6.5)$$

## 6.2.4 Περιγραφή περιορισμών

Υπάρχουν οι ακόλουθοι περιορισμοί:

- Περιορισμός ισορροπίας παραγωγής και κατανάλωσης:

$$P_{PV}(t) - P_{bin}(t) + P_{bout}(t) + P_g(t) = P_{LP}(t) + P_{NLP}(t) + z(t) \quad (6.6)$$

Όπου:

$P_{bin}(t)$  Ισχύ φόρτισης ,

|               |                              |
|---------------|------------------------------|
| $P_{bout}(t)$ | Ισχύς εκφόρτισης,            |
| $P_g(t)$      | Καταναλωμένη ισχύς δικτύου , |
| $z(t)$        | Πλεονάζουσα ισχύς ,          |
| $P_{LP}(t)$   | Ελέγξιμο φορτίο ισχύος ,     |
| $P_{NLP}(t)$  | Μη-ελέγξιμο φορτίο ισχύος.   |

- Περιορισμοί σχετικοί με τη λειτουργία μπαταριών:

- Εξέλιξη της κατάστασης φόρτισης (SOC):

$$SOC(t) = SOC(t-1) + P_{bin}(t) - P_{bout}(t) \quad (6.7)$$

$$SOC_{min}(t) = SOC(t) = SOC_{max}(t) \quad (6.8)$$

Όπου:

|                |                                    |
|----------------|------------------------------------|
| $SOC_{min}(t)$ | Κατώτερο όριο χωρητικότητας (kWh), |
| $SOC_{max}(t)$ | Ανώτερο όριο χωρητικότητας (kWh).  |

- Περιορισμός διαδικασίας φόρτισης και εκφόρτισης: αυτοί οι δύο τρόποι λειτουργούν είναι αρκετά χωριστοί και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν συγχρόνως. Συνεπώς υποτίθεται ότι για όλες τις τιμές του  $t$  :

$$P_{bin} * P_{bout} = 0 \quad (6.9)$$

Αυτός ο περιορισμός δεν είναι γραμμικός. Εντούτοις, μπορεί να μεταφραστεί σε μια γραμμική μορφή με την εισαγωγή μίας δυαδικής μεταβλητής  $a(t)$ , έτσι ώστε:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{bin} \leq a(t) * \frac{S_{max} * r_{ch} * n_B}{\Delta t} \\ \frac{-S_{max} * r_{dch}}{\Delta t} * \frac{1}{n_B} * (1 - a(t)) \leq P_{bout} \leq 0 \end{cases} \quad (6.10)$$

$$\text{Av } \alpha(t) = 1 \rightarrow \begin{cases} 0 \leq P_{bin} \leq \frac{S_{max} * r_{ch} * n_B}{\Delta t} \\ P_{bout}(t) = 0 \end{cases}$$

→ Η μπαταρία είναι σε διαδικασία φόρτισης

$$\text{Av } \alpha(t) = 0 \rightarrow \begin{cases} P_{bin} = 0 \\ -\frac{S_{max} * r_{ch}}{\Delta t} * \frac{1}{n_B} \leq P_{bout} \leq 0 \end{cases}$$

→ Η μπαταρία είναι σε διαδικασία εκφόρτισης

Όπου :

$r_{ch}$  Ρυθμός φόρτισης,  
 $n_B$  Αποδοτικότητα αποθήκευσης,  
 $r_{dch}$  Ρυθμός εκφόρτισης  
 $S_{max}$  χωρητικότητα συστήματος αποθήκευσης.

- Οι περιορισμοί που αφορούν τη σύνδεση δικτύου:
- συμβατικό όριο της καταναλωμένης ενέργειας δικτύου

$$0 = P_g(t) = P_{gn}(t) \quad (6.11)$$

- Περιορισμός δυνατότητας αγοράς: κοντά στην αρχιτεκτονική συστημάτων, αυτές οι δύο διαδικασίες δεν μπορούν να εκτελεστούν συγχρόνως. Παρόμοια με την εξίσωση (6.10) και με τη χρησιμοποίηση ενός δυαδικού μεταβλητού  $\beta(t)$  έχουμε:

$$\begin{cases} 0 \leq z(t) \leq P_{PV}(t) * \beta(t) \\ 0 \leq P_g \leq P_{gmax} * (1 - \beta(t)) \end{cases}$$

$$\text{Av } \beta(t) = 1 \rightarrow \begin{cases} 0 \leq z(t) \leq P_{PV}(t) \\ P_g(t) = 0 \end{cases}$$

→ Το σύστημα τροφοδοτεί τη ΦΒ παραγωγή στο δίκτυο.

Αν  $\beta(t) = 0 \rightarrow \begin{cases} z(t) = 0 \\ 0 \leq P_g(t) \leq P_g \max \end{cases}$   
 $\rightarrow$  Το σύστημα εισάγει ενέργεια απ' το δίκτυο.

Όπου:

$P_{pv}$  Διαθέσιμη ισχύς ΦΒ (kW),

$P_{gn}$  Όριο ισχύος συμβατικού δικτύου (kW).

- Προαιρετικά η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στο δίκτυο μπορεί να περιοριστεί. Για να αποτραπούν οι αυστηροί περιορισμοί στη λειτουργία μπαταριών υποθέτουμε ότι η ενέργεια που αποθηκεύεται στις μπαταρίες δεν μπορεί να τροφοδοτηθεί στο δίκτυο. Ο μόνος ο περιορισμός στο πλεόνασμα του συστήματος είναι η διαθεσιμότητα της παραγωγής ΦΒ:

$$0 = z(t) = P_{pv}(t).$$

## 6.3 Μελέτη εγκατάστασης ΦΒ συστημάτων με τη χρήση Matlab

Στην παρούσα ενότητα δημιουργήσα ένα αρχείο m-file στη Matlab όπου γίνονται όλοι οι υπολογισμοί που αρκούν για τη μελέτη της εγκατάστασης ΦΒ σε στέγες κτηρίων για μια μέση οικογένεια στην Ιεράπετρα.

### Δίνονται ως δεδομένα εισόδου:

1. Η ισχύς των ηλεκτρικών συσκευών(Watt) (πλυντήριο ρούχων-πιάτων, ψυγείο, τηλεόραση, Η/Υ, ηλεκτρική κουζίνα, λαμπτήρες) και οι ώρες λειτουργίας τους για τον Χειμώνα και το Καλοκαίρι.
2. Οι μέρες αυτονομίας συστήματος.
3. Η ισχύς φωτοβολταϊκών πλαισίων (Watt).
4. Η τάση φωτοβολταϊκού πλαισίου (Volt).
5. Η ονομαστική τάση μπαταρίας (Volt).
6. Χαρακτηριστικά πλαισίου (μήκος, πλάτος).
7. Κλίση στέγης κτηρίου.

### Υπολογίζονται:

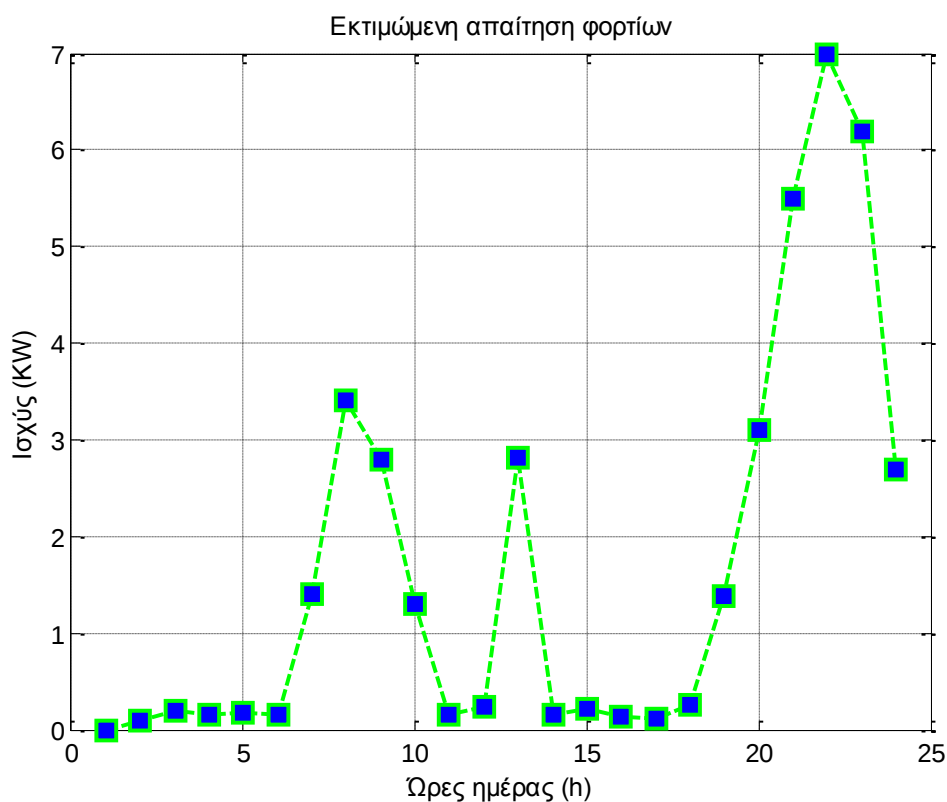
1. Η ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση τον Χειμώνα και το Καλοκαίρι (kWh).
2. Η ισχύς αιχμής του ΦΒ συστήματος (Wp).
3. Ο αριθμός των ΦΒ πλαισίων που θα χρησιμοποιηθούν.
4. Ο αριθμός των πλαισίων που θα αποτελείται κάθε κλάδος της ΦΒ συτοιχίας και ο αριθμός των παράλληλων κλάδων.
5. Την τάση που θα δίνει η ΦΒ φεννήτρια (Volt).
6. Την χωρητικότητα των συσσωρευτών (Ah).
7. Την επιφάνεια στέγης του κτηρίου ( $m^2$ ).
8. Την απόσταση ανάμεσα στα ΦΒ πάνελ (m).
9. Το εμβαδόν της διαθέσιμης επιφάνειας μόνο για την εγκατάσταση ΦΒ αλλά και το συνολικό εμβαδόν που θα χρειαστεί να είναι διαθέσιμο στη στέγη του κτηρίου (με περιθώριο ενός μέτρου).

Τα δεδομένα εισόδου που εισάγουμε είναι αναγκαία για την ακριβή μελέτη εγκατάστασης. Χρησιμοποιούμε δύο είδη λαμπτήρων (11 Watt και 20 Watt) που είναι τα πιο συνιθισμένα σε μια κατοικία. Για τον υπολογισμό της ημερήσιας ηλεκτρικής κατανάλωσης επιπλέον θεωρούμε λοιπές χρήσεις ηλεκτρικών συσκευών (π.χ. στεγνωτήρας μαλλιών, τοστιέρα κ.τ.λ. ) ισχύος 1 KW και διάρκειας μιάς ώρας. Καλύπτουμε σχεδόν το 90% των πιο συνιθισμένων ηλεκτρικών συσκευών μιας μέσης κατοικίας και η μελέτη αφορά τόσο αυτόνομα ΦΒ συστήματα όσο συνδεδεμένα στο εθνικό δίκτυο. Δεν περιορίζει στην ισχύ ΦΒ πλαισίου καθώς μπορούμε να εισάγουμε οποιαδήποτε ισχύ ΦΒ πλαισίου υπάρχει στο εμπόριο όπως και οποιαδήποτε τάση μπαταρίας, επίσης θεωρούμε πως κάθε πάνελ αποτελείται από 4 ΦΒ πλαίσια. Η μελέτη δεν περιορίζεται σε μόνο σε δώματα αλλά και σε στέγες σε οποιαδήποτε κλίση.

## 7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 7.1 Αποτελέσματα μελέτης

Η περιπτωσιολογική μελέτη εστιάζει σε ένα κατοικημένο σπίτι περίπου 144 m<sup>2</sup>, έχοντας περίπου 105 m<sup>2</sup> μέτρα διαθέσιμης επιφάνειας για την εγκατάσταση ΦΒ. Το σπίτι βρίσκεται στην Ιεράπετρα με γεωγραφικό μήκος 25.45° και γεωγραφικό πλάτος 35° και εκτίθεται κατα μέσο όρο σε καθημερινή ακτινοβολία ίση με 5.07kWh/m<sup>2</sup>d. Το ΦΒ σύστημα αποτελείται από 56 ΦΒ πλαίσια των 120 Watt, ισοδύναμη με 6.72 kWp, και ένα σύστημα αποθήκευσης μπαταριών 34.56kWh. Ο ιδιοκτήτης αγοράζει την ενέργεια από και πωλεί την ενέργεια στο δίκτυο. Η πρόβλεψη στοιχείων δείχνει την κατ' εκτίμηση την απαίτηση φορτίων και την διαθέσιμη παραγωγή ΦΒ. Στην εικόνα (7.1) φαίνεται η εκτίμηση φορτίων σε μία ημέρα για μια μέση οικογένεια.



Εικόνα 7.1 Εκτιμώμενη απαίτηση φορτίων για μια μέση οικογένεια μια ημέρα.

## 7.1.2 Ο ρόλος της βελτιστοποίησης στο σχεδιασμό κατανάλωσης

### A. Χωρίς βελτιστοποίηση

Ο ιδιοκτήτης θα μπορούσε:

- Να χρησιμοποιήσει την ηλιακή ενέργεια όταν είναι διαθέσιμη και να πουλήσει το πλεόνασμα στο δίκτυο.
- Να αγοράσει την ενέργεια από το δίκτυο για να αντισταθμίσει τις ανάγκες φορτίων όταν η ηλιακή ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη.

Έτσι,

- το κόστος συνολικής κατανάλωσης είναι: 1.16 €
- το συνολικό εισόδημα από την πώληση του πλεονάσματος είναι: 3.91 €
- το κέρδος είναι: 2.75 €

### B. Με τη βελτιστοποίηση

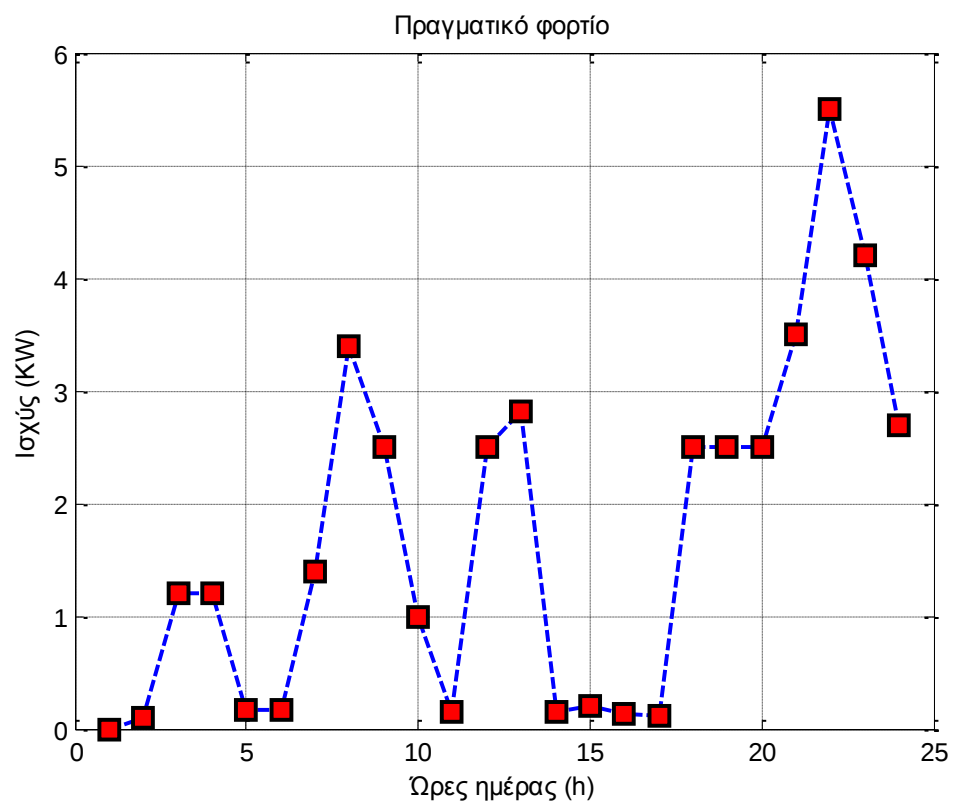
Η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος είναι υπολογισμένη με την προσθήκη επάνω της τοπικά καταναλωμένης παραγωγής ΦΒ, την καταναλωμένη ενέργεια δίκτυου, και την ενέργεια που απαλλάσσεται από την μπαταρία στο σύστημα αποθήκευσης για να ικανοποιήσει τα αιτήματα του ίδιου του σπιτιού.

Γίνεται εκτίμηση των φορτίων την προηγούμενη ημέρα και βελτιώνεται η χρήση των πηγών. Το πλεόνασμα υπολογίζεται επίσης για την επικοινωνία στο DSO.

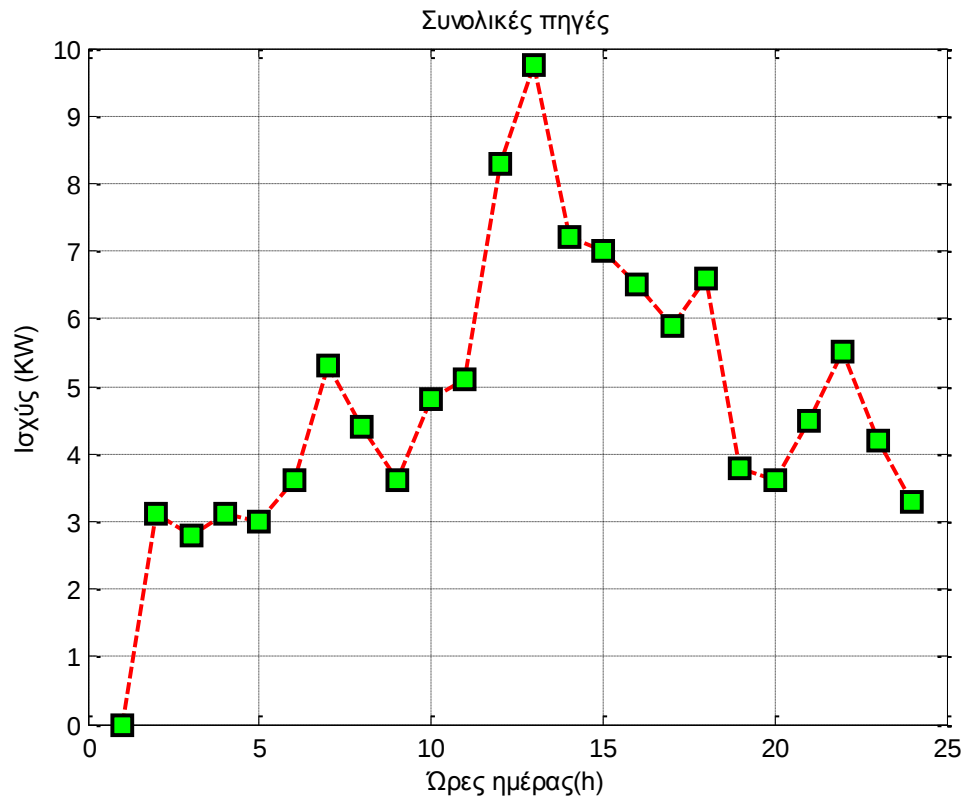
Έτσι,

- το κόστος συνολικής κατανάλωσης είναι: 0.91 €
- το συνολικό εισόδημα από την πώληση του πλεονάσματος είναι: 5.15 €
- το κέρδος είναι: 4.24 €

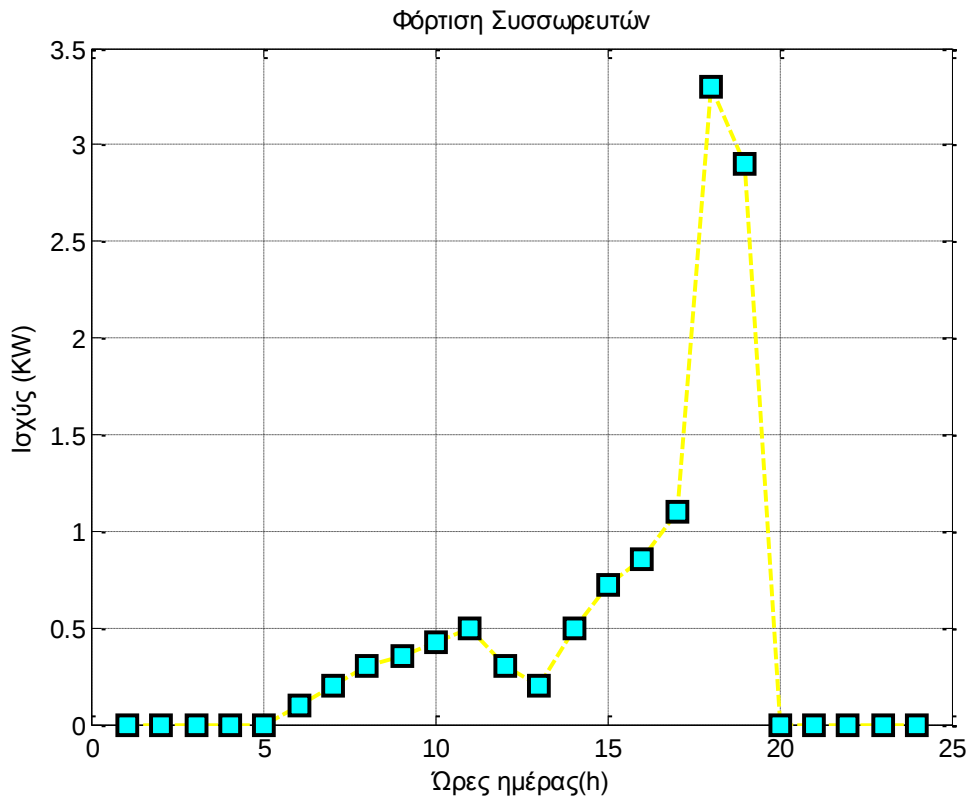
Στην εικόνα 7.2 φαίνεται η πραγματική απαίτηση του φορτίου όπου είναι μεγάλη τις πρώτες πρωινές ώρες και το μεσημέρι και πολύ μεγάλη απ' τις 8μ.μ. μέχρι της 12μ.μ. που είναι οι ώρες αιχμής. Μπορούμε να συμπεράνουμε τις διαφορές που υπάρχουν συγκριτικά με την εκτιμώμενη απαίτηση φορτίων που παρουσιάζεται στην εικόνα 7.1. Στην εικόνα 7.3 παρουσιάζεται η ισχύς των συνολικών πηγών του συστήματος και στην εικόνα 7.4 φαίνεται η φόρτιση συσσωρευτών με το πέρασμα του χρόνου.



Εικόνα 7.2 Πραγματική απαίτηση φορτίων για μιά μέση οικογένεια μία ημέρα.

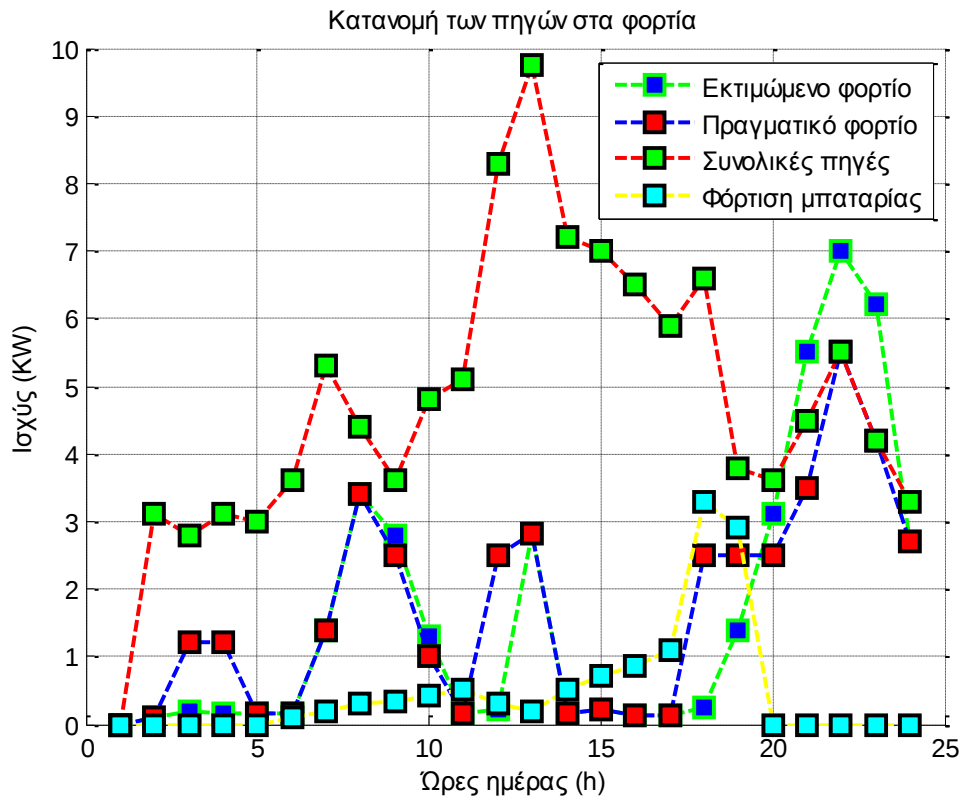


Εικόνα 7.3 Ισχύς συνολικών πηγών του συστήματος μίας ημέρας.



Εικόνα 7.4 Φόρτιση συσσωρευτών με το πέρασμα του χρόνου.

Στην εικόνα 7.5 φαίνεται η κατανομή των πηγών στα φορτία και οι αποκλίσεις που υπάρχουν σχετικά με το αρχικά εκτιμώμενο φορτίο και το πραγματικό φορτίο. Είναι ένα φυσιολογικό σενάριο όπου μέχρι τις 6 π.μ. οι ηλεκτρικές καταναλώσεις καλύπτονται κατά κύριο λόγο από από τα αποθέματα ενέργειας στους συσσωρευτές και κατά δεύτερο λόγο απ' το δίκτυο. Απ' τις 6 π.μ. που ανατέλει ο ήλιος μέχρι τις 7 μ.μ. πού δύει οι ηλεκτρικές καταναλώσεις καλύπτονται από την ΦΒ παραγωγή, γίνεται η φόρτιση των συσσωρευτών με την πλεονάζουσα ενέργεια και μετά το πέρας της φόρτισης η πλεονάζουσα πωλείται στο δίκτυο. Παρατηρούμε πως στις 10 μ.μ. που δεν υπάρχει ενέργεια απ' τη ΦΒ παραγωγή η ενέργεια απ' τους συσσωρευτές δέν αρκεί για να καλύψει τις ηλεκτρικές καταναλώσεις και έτσι εισέρχεται ενέργεια απ' το δίκτυο για την κάλυψη των απαιτήσεων, όπως και μέχρι της 6 π.μ.



Εικόνα 7.5 Κατανομή των πηγών στα φορτία σε μία ημέρα.

### 7.1.3 Ο ρόλος της βελτιστοποίησης όσον αφορά την αβεβαιότητα

Σε πραγματικό χρόνο λειτουργίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, διάφορες μορφές αβεβαιότητας αντικτυπώνουν στις διαδικασίες και το κέρδος που μπορούν να ληφθούν. Οι ακόλουθες περιπτώσεις μπορούν να εμφανιστούν:

#### (1) Μια αύξηση στην κατανάλωση:

Ο ιδιοκτήτης χρησιμοποιεί περισσότερη ενέργεια από την εκτιμώμενη. Έτσι, οποιοδήποτε διαθέσιμο πλεόνασμα θα μειωνόταν για να αντισταθμίσει την τοπική απαίτηση (με τις άλλες πηγές). Μια τέτοια αύξηση είναι μεγαλύτερη στις ώρες αιχμής ή τους χρόνους όταν η τοπική παραγωγή είναι ανεπαρκής ή μη διαθέσιμη.

#### (2) Μια μείωση στην κατανάλωση:

Δεν ασκεί καμία αρνητική επίδραση στο όφελος επειδή ο ιδιοκτήτης του συστήματος έχει διάφορες λύσεις:

- η διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας μπορεί να φορτιστεί με αχρησιμοποίητη ενέργεια για την επόμενη χρήση,
- η αχρησιμοποίητη ενέργεια μπορεί να τροφοδοτήσει το δίκτυο,
- μέρος της παραγωγής ρίχνεται.

(3) Μια αύξηση στην παραγωγή:

Λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο όπως με τη (2).

(4) Μια μείωση στην παραγωγή:

Αυτό το γεγονός ασκεί μέγιστη επίδραση στο σύστημα. Ένα χαρακτηριστικό λειτουργούν σενάριο να είναι το ακόλουθο, με τρία απρόβλεπτα γεγονότα:

- $t = 9h$  : Ο ιδιοκτήτης βγαίνει νωρίτερα από ότι ήταν προγραμματισμένα και μια συσκευή φορτίων συνεπώς δεν χρησιμοποιείται. Η ισχύς που καταναλώνεται από τις διάφορες πτώσεις φορτίων από περίπου 0,85 kW κατά τη διάρκεια μιας ώρας.
- $t = 14h$  : Μια θύελλα εμφανίζεται, σταματώντας την παραγωγή ΦΒ για μια ώρα. Η παραγωγή μειώνεται από περίπου 1,27 kW κατά τη διάρκεια της επόμενης ώρας.
- $t = 20h$  : Ο ιδιοκτήτης έχει έναν φιλοξενούμενο για γεύμα, και πρέπει να ανοίξει την ηλεκτρική σόμπα, που εκτιμάται σε περίπου 1,25 kW, για μια ώρα.

Δεδομένου ότι η κατανάλωση μειώθηκε το πρωί, φορτίζεται με την αχρησιμοποίητη ενέργεια η μπαταρία για αργότερη χρήση. Καμία αλλαγή δεν γίνεται στην ενέργεια που καταναλώνεται από το δίκτυο και το ηλεκτρικό ρεύμα που παρέχεται στο δίκτυο. Στις 14-15.00 η παραγωγή ΦΒ μειώνεται αποτελεσματικά που μειώνει τη ενέργεια για τροφοδότηση του δικτύου αλλά οποιαδήποτε απόκλιση μεταξύ του πραγματικού και προβλεπόμενου ανεφοδιασμού ελαχιστοποιείται. Τέλος, το βράδυ, όταν ούτε παραγωγή ΦΒ ούτε η μπαταρία του συστήματος αποθήκευσης είναι διαθέσιμα, η καλύτερη λύση για το σπίτι είναι να δεχτεί μια αύξηση στην ενέργεια που αποτραβιέται από το δίκτυο για να ικανοποιήσει την τοπική απαίτηση. Η λειτουργία συστημάτων βελτιστοποιείται έτσι και η διαφορά μεταξύ της προσφοράς και του πραγματικού ανεφοδιασμού ελαχιστοποιείται.

## 7.2 Αποτελέσματα μελέτης εγκατάστασης ΦΒ

Στη παρούσα ενότητα αναφέρονται τα αποτελέσματα μελέτης εγκατάστασης ΦΒ συστημάτων για απομονωμένα ΦΒ συστήματα και για συστήματα συνδεδεμένα στο εθνικό δίκτυο.

### 7.2.1 Αποτελέσματα μελέτης εγκατάστασης απομονωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων

Γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων της μελέτης που πραγματοποιήθηκε στην ενότητα 5.1 .

| Command Window                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Υπολογισμός Ημερήσιας Ηλεκτρικής κατανάλωσης τον Χειμώνα σε μια κατοικία με μία οικογένεια<br>Χρησιμοποιούμε 2 ειδών λαμπτήρων ισχύος 20 watt και 11 watt<br>Αριθμος λαμπτήρων ισχύος 20 watt: 5<br>Ώρες λειτουργίας λαμπτήρων 20 watt: 6<br>Αριθμος λαμπτήρων ισχύος 11 watt: 7<br>Ώρες λειτουργίας λαμπτήρων 11 watt: 6<br>Ισχύς πληντιριού ρούχων (watt): 2800<br>Ώρες λειτουργίας πληντιριού: 0.5<br>Ισχύς πληντιριού πιάτων (watt): 3200<br>Ώρες λειτουργίας πληντιριού: 0.5<br>Ισχύς ψυγείου (watt): 90<br>Ώρες λειτουργίας ψυγείου: 5.5<br>Ισχύς τηλεόρασης (watt): 180<br>Ώρες λειτουργίας τηλεόρασης: 5<br>Ισχύς Η/Υ (watt): 400<br>Ώρες λειτουργίας Η/Υ: 5<br>Ισχύς Ηλεκτρικής Κουζίνας (watt): 2700<br>Ώρες λειτουργίας Ηλεκτρικής Κουζίνας: 1<br>Για άλλες χρήσεις θεωρούμε ισχύ 1 kw και διάρκειας μίας ώρας<br><br>Υπολογισμός Ημερήσιας Ηλεκτρικής κατανάλωσης το Καλοκαίρι σε μια κατοικία με μία οικογένεια<br>Ώρες λειτουργίας λαμπτήρων 20 watt: 4<br>Ώρες λειτουργίας λαμπτήρων 11 watt: 4<br>Ώρες λειτουργίας πληντιριού ρούχων: 0.5<br>Ώρες λειτουργίας πληντιριού πιάτων: 0.5<br>Ώρες λειτουργίας ψυγείου: 7<br>Ώρες λειτουργίας τηλεόρασης: 3<br>Ώρες λειτουργίας Η/Υ: 3<br>Ώρες λειτουργίας Ηλεκτρικής Κουζίνας: 1<br>Για άλλες χρήσεις θεωρούμε ισχύ 1 kw και διάρκειας μίας ώρας |

Εικόνα 7.6 Μορφή αχείου εισόδου των δεδομένων ισχύος των ηλεκτρικών συσκευών με τις ώρες λειτουργίας τους.

```
Command Window
Κατανάλωση Χειμώνα (kwh) :

dc_x =

    11.1570

Κατανάλωση Καλοκαίρι (kwh) :

dc_k =

    9.7780

EL =

    11.1570

Ημερες αυτονομίας συστήματος:5
Ισχύ αιχμής:

Pps =

    7.6055

Ισχυς φωτοβολταικών πλαισίων (Watt):120
Ταση φ/β πλαισίου (Volt):17
Ονομαστική τάση μπαταρίας (Volt):48
Αριθμός πλαισίων:

ans =

    64

Καθε κλάδος της φ/β συστοιχίας αποτελείται από πλαίσια αριθμού:

ans =

    4

Η φωτοβολταική γεννήτρια θα αποτελείται από παράλληλους κλάδους αριθμού:

ans =

    16
```

Εικόνα 7.7 Μορφή αχείου εισόδου δεδομένων και εξόδου αποτελεσμάτων.

### Command Window

Εν τέλει θα δίνει τάση ίση με (Volt):

ans =

68

Συνολικό πλήθος φ/β πλαισίων:

ans =

64

Με ονομαστική ισχύ αιχμής ( $W_p$ ):

ans =

7680

Χωρητικότητα συσσωρευτών (Ah):

C =

2.4773e+003

Υπολογισμός επιφάνειας στέγης κτηρίου

Καταχώρηση χαρακτηριστικών πλαισίου

Πλάτος πλαισίου:0.674

Μήκος πλαισίου:1.495

Κλίση στέγης κτηρίου: (μοίρες):0

Κάθε πάνελ έχει 4 πλαίσια

Απόσταση ανάμεσα στα φ/β πάνελ σε μέτρα (τοποθετημένα το ένα πίσω από το άλλο):

a =

2.5066

Εμβαδόν διαθέσιμης επιφάνειας μόνο για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών ( $\mu^2$ ):

ans =

119

Με περιθώριο ενός μέτρου για αισθητικούς λόγους

Εμβαδόν διαθέσιμης επιφάνειας ( $\mu^2$ ):

ans =

162

Εικόνα 7.8 Μορφή αχείου εισόδου δεδομένων και εξόδου αποτελεσμάτων .

Στην εικόνα 7.6 έχουμε την μορφή αχείου εισόδου των δεδομένων ισχύος των ηλεκτρικών συσκευών με τις ώρες λειτουργίας τους. Στην εικόνα 7.7 έχουμε μορφή αχείου εισόδου των ημερών αυτονομίας και εξόδου των αποτελεσμάτων των ηλεκτρικών καταναλώσεων Χειμώνα-Καλοκαίρι, την ισχύ αιχμής του συστήματος, τον αριθμό των ΦΒ πλαισίων που αποτελείται κάθε κλάδος ΦΒ συστοιχίας και ο αριθμός των παράλληλων κλάδων που αποτελείται η ΦΒ γεννήτρια. Στην εικόνα 7.8 έχουμε είσοδο της κλίσης της στέγης του κτηρίου και ως έξοδο την τελική τάση που δίνει η ΦΒ γεννήτρια, το συνολικό πλήθος ΦΒ πλαισίων, την τελική ισχύ αιχμής που θα δίνει η ΦΒ γεννήτρια την χωρητικότητα των συσσωρευτών , τις αποστάσεις ανάμεσα στα ΦΒ πάνελ, το εμβαδόν της διαθέσιμης επιφάνειας για την εγκατάσταση ΦΒ αλλά και το συνολικό εμβαδόν της επιάνειας.

## 7.2.2 Αποτελέσματα μελέτης εγκατάστασης ΦΒ συστημάτων συνδεδεμένα στο εθνικό δίκτυο

Γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων της μελέτης που πραγματοποιήθηκε στην ενότητα 5.2 .

```
Command Window
Υπολογισμος Ημερήσιας Ηλεκτρικής κατανάλωσης τον Χειμώνα σε μια κατοικία με μία οικογένεια
Χρησιμοποιούμε 2 ειδών λαμπτήρων ισχύος 20 watt και 11 watt
Αριθμος λαμπτήρων ισχύος 20 watt: 5
Ώρες λειτουργίας λαμπτήρων 20 watt: 6
Αριθμος λαμπτήρων ισχύος 11 watt: 7
Ώρες λειτουργίας λαμπτήρων 11 watt: 6
Ισχύς πληντιρίου ρούχων (watt): 2800
Ώρες λειτουργίας πληντιρίου: 0.5
Ισχύς πληντιρίου πιάτων (watt): 3200
Ώρες λειτουργίας πληντιρίου: 0.5
Ισχύς ψυγείου (watt): 90
Ώρες λειτουργίας ψυγείου: 5.5
Ισχύς τηλεόρασης (watt): 180
Ώρες λειτουργίας τηλεόρασης: 5
Ισχύς Η/Υ (watt): 400
Ώρες λειτουργίας Η/Υ: 5
Ισχύς Ηλεκτρικής Κουζίνας (watt): 2700
Ώρες λειτουργίας Ηλεκτρικής Κουζίνας: 1
Για άλλες χρήσεις θεωρούμε ισχύ 1 kw και διάρκειας μίας ώρας

Υπολογισμος Ημερήσιας Ηλεκτρικής κατανάλωσης το Καλοκαίρι σε μια κατοικία με μία οικογένεια
Ώρες λειτουργίας λαμπτήρων 20 watt: 4
Ώρες λειτουργίας λαμπτήρων 11 watt: 4
Ώρες λειτουργίας πληντιρίου ρούχων: 0.5
Ώρες λειτουργίας πληντιρίου πιάτων: 0.5
Ώρες λειτουργίας ψυγείου: 7
Ώρες λειτουργίας τηλεόρασης: 3
Ώρες λειτουργίας Η/Υ: 3
Ώρες λειτουργίας Ηλεκτρικής Κουζίνας: 1
Για άλλες χρήσεις θεωρούμε ισχύ 1 kw και διάρκειας μίας ώρας
```

Εικόνα 7.9 Μορφή αχείου εισόδου των δεδομένων ισχύος των ηλεκτρικών συσκευών με τις ώρες λειτουργίας τους.

```
Command Window
Κατανάλωση Χειμώνα (kwh) :

dc_x =

    11.1570

Κατανάλωση Καλοκαίρι (kwh) :

dc_k =

    9.7780

EL =

    11.1570

Ημερες αυτονομίας συστήματος:1
Ισχύ αιχμής:

Pps =

    6.2687

Ισχυς φωτοβολταϊκών πλαισίων (Watt):120
Τάση φ/β πλαισίου (Volt):17
Ονομαστική τάση μπαταρίας (Volt):48
Αριθμός πλαισίων:

ans =

    53

Καθε κλάδος της φ/β συστοιχίας αποτελείται από πλαίσια αριθμού:

ans =

    4

Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια θα αποτελείται από παράλληλους κλάδους αριθμού:

ans =

    14
```

Εικόνα 7.10 Μορφή αχείου εισόδου δεδομένων και εξόδου αποτελεσμάτων .

```
Command Window
Εν τέλει θα δίνει τάση ίση με (Volt):

ans =

    68

Συνολικό πλήθος φ/β πλαισίων:

ans =

    56

Με ονομαστική ισχύ αιχμής (Wp):

ans =

    6720

Χωρητικότητα συσσωρευτών (Ah):

C =

    721.2359

Υπολογισμός επιφάνειας στέγης κτηρίου
Καταχώρηση χαρακτηριστικών πλαισίου
Πλάτος πλαισίου:0.674
Μήκος πλαισίου:1.495
Κλίση στέγης κτηρίου: (μοίρες):0
Κάθε πάνελ έχει 4 πλαίσια
Απόσταση ανάμεσα στα φ/β πάνελ σε μέτρα (τοποθετημένα το ένα πίσω απο το άλλο):

a =

    2.5066

Εμβαδόν διαθέσιμης επιφάνειας μόνο για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (μ^2):

ans =

    104

Με περιθώριο ενός μέτρου για αισθητικούς λόγους
Εμβαδόν διαθέσιμης επιφάνειας (μ^2):

ans =

    144
```

Εικόνα 7.11 Μορφή αχείου εισόδου δεδομένων και εξόδου αποτελεσμάτων .

Στους πίνακες 7.9 , 7.10 , 7.11 εισάγονται τα αντίστοιχα δεδομένα με την 5.2 ενότητα και εξάγονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα με την 7.2.1. Πολύ μικρές αποκλίσεις που ίσως να προκύπτουν στα αποτελέσματα συγκριτικά με τις ενότητες 5.1 και 5.2 είναι λόγο στρογγυλοποιήσεων που πραγματοποιούνται.

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ελπιδοφόρες αλλά ακόμα πρέπει να αποδείξουν την αξία τους καθώς η δυνατότητα να αποκτήσουμε ενέργεια από ανεξάντλητες πηγές χωρίς κόστος στο περιβάλλον είναι ανεκτίμητης σημασίας. Από αυτές κάποιες δεν είναι όλες εμπορικά διαθέσιμες καθώς μερικές είναι στο στάδιο της εισαγωγής τους στο εμπόριο. Φυσικά, το κόστος διάθεσής τους είναι ακόμη υψηλό, καθώς βρίσκονται ακόμη στο στάδιο της ανάπτυξης και της βελτίωσης.

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε απομονωμένα σπίτια αλλά και συνδεδεμένα στο εθνικό δίκτυο. Η ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών, καθώς και η ευελιξία τους να προσαρμόζονται σε κάθε εφαρμογή σε συνάρτηση με τη τιμή του κόστους τους ισχυροποιεί τη θέση για εφαρμογές αυτού του είδους.

Σ' αυτή τη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η μελέτη εγκατάστασης απομονωμένων ΦΒ συστημάτων και συνδεδεμένων στο εθνικό δίκτυο για την Ιεράπετρα. Παρατηρούμε πώς το κόστος εγκατάστασης απομονωμένων ΦΒ συστημάτων (55722.00 €) είναι απαγορευτικό καθώς πλησιάζει το διπλάσιο της εγκατάστασης ΦΒ συνδεδεμένων στο εθνικό δίκτυο (31592.00 €) και σ' αυτό κύριο ρόλο έχουν οι συσσωρευτές που χρειάζονται για να αποθηκεύεται η ενέργεια και να έχει περισσότερες ημέρες αυτονομίας και το Η/Ζ. Με τη χρήση του λογισμικού Matlab δημιούργησα σε δύο αρχεία m-file δύο προγράμματα.

Στο πρώτο πραγματοποιήθηκε με όλες τις παραμέτρους η μελέτη εγκατάστασης ΦΒ συστημάτων τόσο απομονωμένων όσο και συνδεδεμένων στο εθνικό δίκτυο για την περιοχή Ιεράπετρας.

Στο δεύτερο πραγματοποιήθηκε μια μέθοδος στην οποία βελτιστοποιείται η διαχείριση της ενέργειας σε ΦΒ συστήματα συνδεδεμένα στο εθνικό δίκτυο με στόχο την αύξηση του κέρδους του χρήστη ΦΒ από την πώληση της ενέργειας στο δίκτυο και μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται απ' το δίκτυο χάρις τις συμπληρωματικές πηγές. Εάν η τιμή στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται ή εάν το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας μειωθεί, το κέρδος θα ήταν μεγαλύτερο. Εάν η αβεβαιότητα ασκεί θετική επίδραση στο πλεόνασμα (θετική απόκλιση), τα κέρδη θα μείνουν θετικά, εάν στην άλλη περίπτωση ασκεί αρνητική επίδραση τότε τα κέρδη δε θα πηγαίνουν καλά. Στην 7.1.2 παρατηρούμε ότι το ενδιαφέρον της βελτιστοποίησης θα μπορούσε να μειώσει το γενικό κόστος κατανάλωσης και θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά το κέρδος του παραγωγού ΦΒ.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δρ. Γεώργιος Σ. Σταυρακάκης, Καθηγητής Τμήματος ΗΜΜΥ  
« ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΗΡΥ 416)» Σημειώσεις Μαθήματος
- [2] Νικολαΐδης Βασίλης “ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ” Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2008
- [3] Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Εκδόσεις Ζήτη, 2006.
- [4] <http://www.shielcosolarpv.gr>
- [5] <http://www.astronomia.gr>
- [6] Λούκας Νικόλαος << Μεγιστοποίηση της ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά στοιχεία που λειτουργούν υπό συνθήκες μερικής σκίασης>> Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2006
- [7] Χατζηιωάννου Αλέξης <<ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ>>
- [8] <http://www.helapco.gr/>
- [9] E.Lorenzo, “Solar Electricity : engineering of photovoltaic systems”, Universidad of Madrid, 1994.
- [10] Κ. Καγκράκης, "Φωτοβολταϊκή τεχνολογία" Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1992.
- [11] Τζιτζιλώνης Βασίλης <<Ανάπτυξη Συστήματος Εξομοίωσης Φωτοβολταϊκών Στοιχείων βασισμένο σε Αναδιατασσόμενη Λογική>> Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2005.
- [12] <http://www.buildings.gr>
- [13] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php>
- [14] <http://www.hnms.gr>
- [15] <http://www.alogos.gr>

- [16] Vladislav Poulek, Martin Libra, "SOLAR ENERGY "
- [17] Μιχαήλ Ι. Κονσολάκης, "ΓΕΝΙΚΗ ΧΗΜΕΙΑ" Εκδόσεις Αεναος
- [18] ECO GREEN LIVING " Big fish" Μάιος 2010
- [19] C. Clastres, T.T. Ha Pham, F. Wurtz, S. Bacha " Ancillary services and optimal household energy management with photovoltaic production " Energy 2009
- [20] Anand S. Joshi, Ibrahim Dincer, Bale V. Reddy " Performance analysis of photovoltaic systems " Renewable and Sustainable Energy Reviews 2008
- [21] Evanthie Michalena, Yiannis Tripanagnostopoulos "Contribution of the solar energy in the sustainable tourism development of the Mediterranean islands" Renewable Energy 2009.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παραθέτω τα είδη ηλεκτρικών συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν, τις αντίστοιχες τιμές (σε €) και τα αντίστοιχα site εταιρειών που πωλούνται τα συγκεκριμένα είδη.

**Πληντύριο ρούχων:** 60CM SLXX821 Schaub Lorenz, αξίας 299 €, [www.kotsovolos.gr](http://www.kotsovolos.gr)

**Τηλεόραση:** LCD LG 37SL8000, αξίας 949 €, [www.apothema.gr](http://www.apothema.gr)

**Ηλεκτρική κουζίνα:** Εμαγιέ HSB31322 White Pitsos, αξίας 450 €, [www.kotsovolos.gr](http://www.kotsovolos.gr) , [www.pitsos.gr](http://www.pitsos.gr).

**Ηλεκτρονικός Υπολογιστής:** Turbo-X-Sphere-E1250, αξίας 699 € , [www.plaisio.gr](http://www.plaisio.gr)

**Πληντύριο πιάτων:** Schaub Lorenz DWS4554, αξίας 290 € , [www.kotsovolos.gr](http://www.kotsovolos.gr) .