



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΟΙΚΙΑΚΗ
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΟΛΟΒΟΣ ΑΙΜΙΛΙΟΣ-ΣΤΑΥΡΟΣ

Επιβλέπων : Μαρία Γ. Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβρης 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΟΛΟΒΟΣ ΑΙΜΙΛΙΟΣ-ΣΤΑΥΡΟΣ

Επιβλέπων: Μαρία Γ. Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Μαρία Γ. Ιωαννίδου

Νικόλαος Θεοδώρου

Παναγιώτης Τσαραμπάρης

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2014

.....

Κολοβός Αιμίλιος-Σταύρος

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κολοβός Αιμίλιος-Σταύρος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Ε.Μ.Π. κυρία Μαρία Γ. Ιωαννίδου για την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου καθώς και για την δυνατότητα που μου προσέφερε να παρουσιάσω ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης όλα τα δικά μου άτομα που με στήριξαν και πίστεψαν σε μένα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ.....	7
1.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ-ΚΡΙΣΗ.....	7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

2.1 Ο ΗΛΙΟΣ.....	12
2.1.1 Η σύσταση του ηλιακού φάσματος.....	13
2.1.2 Διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	15
2.2 ΗΛΙΑΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ.....	17
2.3 ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.....	18
2.3.1 Ορισμοί.....	18
2.3.2 Σφαιρικές Συντεταγμένες.....	21
2.4 Ο ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΚΑΙ Ο ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΟΥ.....	26
2.4.1 Η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη.....	28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	32
3.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ.....	34
3.3 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ.....	36
3.4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	39
3.5 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ.....	40
3.6 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ.....	46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	47
4.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ.....	48
4.2.1 Σχεδιαστική δομή και αρχή λειτουργίας των συσσωρευτών.....	49
4.2.2 Τύποι συσσωρευτών.....	52
4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ,ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ-ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ..	54
4.3.1 Χωρητικότητα.....	55
4.3.2 Εκφόρτιση και επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης.....	57
4.3.3 Αυτοεκφόρτιση.....	58
4.3.4 Φόρτιση.....	59
4.3.5 Συντελεστής φόρτισης και απόδοση ισχύος.....	60
4.3.6 Έκλυση ατμών,δημιουργία κρυστάλλων και διάβρωση στους συσσωρευτές μολύβδου.....	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

5.1 ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	62
5.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ(DC/DC CONVERTER).....	63
5.2.1 Έλεγχος με την τεχνική PWM.....	66
5.3 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ(MPPT).....	67
5.3.1 Έμμεσοι ανιχνευτές MPP.....	67
5.3.2 Άμεσοι ανιχνευτές MPP.....	68
5.4 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ DC/AC.....	71
5.4.1 Γενικά.....	71
5.4.2 Τύποι αντιστροφών.....	72

5.4.3	Αντιστροφέας γέφυρας.....	73
5.4.4	Ρυθμιστής τάσης σε έναν αντιστροφέα.....	74
5.5	ΑΝΩΤΕΡΕΣ ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ.....	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΚΑΤΟΙΚΙΑ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

6.1	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΠΙΤΙΟΥ.....	77
6.1.1	Τοποθεσία φωτοβολταϊκών.....	77
6.1.2	Αρχιτεκτονική σπιτιού.....	78
6.2	ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ.....	80
6.2.1	Μέση κατανάλωση.....	81
6.3	ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ.....	82
6.4	ΕΠΙΛΟΓΗ INVERTER.....	83
6.5	ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΗΛΙΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	84
6.5.1	Μηνιαίες ανάγκες ρεύματος.....	85
6.5.2	Μηνιαία παραγωγή.....	86
6.5.3	Διαστασιολόγηση και διάταξη φωτοβολταϊκής συστοιχίας.....	89
6.6	ΕΠΙΛΟΓΗ-ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ.....	91
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	93
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ενεργειακή μελέτη ενός οικισμού που βρίσκεται εντός δικτύου ΔΕΗ και τροφοδοτείται ενεργειακά από υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα. Ξεκινώντας, θα αναλυθεί όλο το φυσικό υπόβαθρο που κρύβεται πίσω από τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων, δηλαδή το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και πως το εκμεταλλευόμαστε για να παράγουμε ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης θα εξηγηθεί η λειτουργία των ηλεκτρικών συσσωρευτών που αποτελούν το μέσο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Ακόμη θα περιγραφούν ένα προς ένα όλοι οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς που είναι υπεύθυνοι για την προσαρμογή και μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα στο φορτίο, και θα αναλυθεί η λειτουργία τους και ο έλεγχός τους. Κατόπιν, θα γίνει η παρουσίαση της ενεργειακής λειτουργίας του οικισμού και ο σχεδιασμός του φωτοβολταϊκού συστήματος που απαιτείται για την τροφοδότησή του.

1.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ

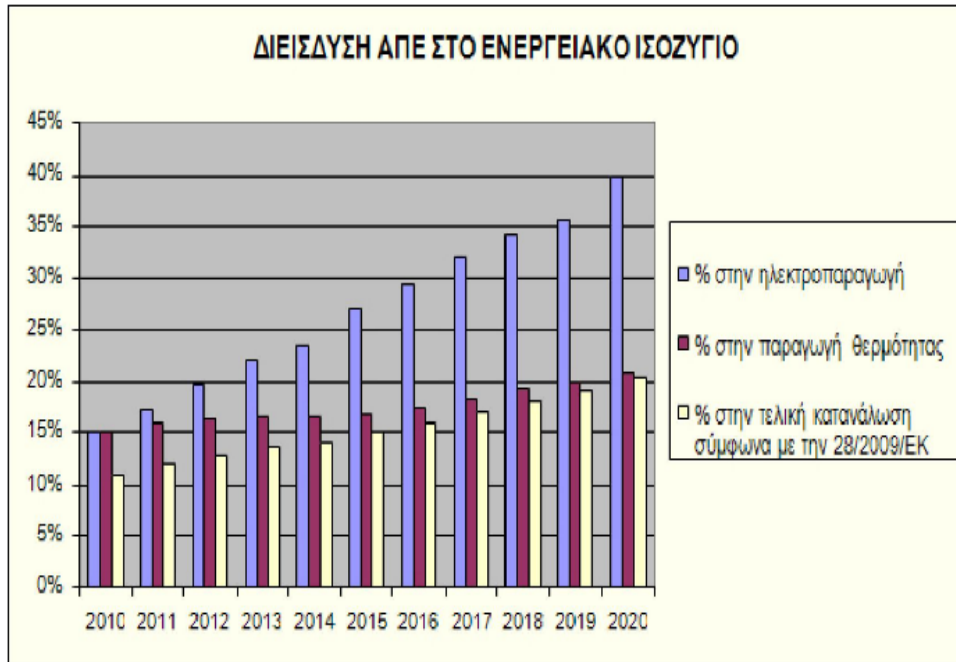
Η προσπάθεια για κάλυψη των τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας που απαιτούνται από το σύγχρονο τρόπο ζωής της ανθρώπινης κοινωνίας έχουν οδηγήσει σε εντονότερες παρεμβάσεις στο φυσικό περιβάλλον με πολλαπλές και συχνά μη αναστρέψιμες συνέπειες. Από την παραγωγή αγαθών έως τη θέρμανση, την ηλεκτροδότηση και τις μεταφορές –τομείς απαραίτητους σε κάθε χώρα – οι δραστηριότητες του ανθρώπου σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με την κατανάλωση ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια έχει προκύψει μία συνειδητοποίηση του πεπερασμένου των ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με μια ευαισθητοποίηση για τις περιβαλλοντικές συνέπειες της αλόγιστης χρήσης αυτών με ορόσημο τη βιομηχανική επανάσταση στα τέλη του 18^{ου} αιώνα. Η αναζήτηση της ανθρωπότητας για λύσεις στο χειροπιαστό, πλέον, ενεργειακό πρόβλημα επέφερε μια στροφή προς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε).

Ως Α.Π.Ε θεωρούμε τις μη ορυκτές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας,δηλαδή την αιολική και τη γεωθερμική ενέργεια,την ηλιακή,την ενέργεια κυμάτων, την παλιρροϊκή ενέργεια,την υδραυλική ενέργεια, τα αέρια τα εκλυόμενα από χώρους υγειονομικής ταφής,από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και τα βιοαέρια,όπως ορίζει η οδηγία 2001/77/ΕΚ.Τα τελευταία χρόνια από την Ευρωπαϊκή Ένωση,αλλά κι από πολλά μεμονωμένα κράτη, υιοθετούνται νέες πολιτικές για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας,που προάγουν τέτοιες εσωτερικές πολιτικές και για τα κράτη μέλη.

Η Έκθεση του Εθνικού Σχεδίου Δράσης για την επίτευξη της συμβολής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% έως το 2020,απορρέει από την Οδηγία 2009/28/ΕΚ και περιλαμβάνει εκτιμήσεις για την εξέλιξη του ενεργειακού τομέα και τη διεύθυνση των τεχνολογιών ΑΠΕ έως το 2020.Ειδικότερα για το σύνολο των κρατών-μελών της Ε.Ε μέχρι το 2020 προβλέπεται:

- 20% μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 σύμφωνα με την οδηγία 2009/29/ΕΚ
- 20% διεύθυνση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/ΕΚ και
- 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας.

Ειδικά για την Ελλάδα ο στόχος για τις εκπομπές αέριων ρύπων του θερμοκηπίου είναι μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005, και 18% διεύθυνση ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση (**Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος,Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής,Επιτροπή 20-20-20,2010**).Η επένδυση κεφαλαίου στις ΑΠΕ θεωρητικά ακολουθεί τις αρχές της οικονομίας κλίμακας, υπό την έννοια ότι το μέσο κόστος μειώνεται με την αύξηση του παραγόμενου όγκου.Με άλλα λόγια, όση περισσότερη ενέργεια παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, τόσο χαμηλότερο θα είναι το κόστος ανά μονάδα της ενέργειας αυτής.



Σχήμα 1.1

Στον ακόλουθο πίνακα δίνεται η εγκατεστημένη ισχύς ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από ΑΠΕ στον ελλαδικό χώρο μέχρι το 2009.

Εκτός από την ανησυχία για την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, η βασική αιτία πίσω από την επένδυση στις ΑΠΕ είναι η ανερχόμενη τιμή του πετρελαίου. Καθώς η τιμή του πετρελαίου αυξάνεται, η ιδέα της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές φαντάζει όλο και πιο ελκυστική. Για παράδειγμα ο σταθμισμένος μέσος όρος της τιμής της ατομικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των φόρων παραγωγής, το 2009 ήταν περί τα 0,44USD/KWh – τιμή που είναι άμεσα ανταγωνίσιμη εκείνης της ενέργειας που παράγεται από τα ορυκτά καύσιμα.

Πίνακας:Εγκατεστημένη ισχύς ηλεκτρικής ενέργειας(MW) στην Ελλάδα μέχρι το 2009 (Πηγή: 5^η Εθνική Έκθεση για το επίπεδο διείσδυσης της ανανεώσιμης ενέργειας το 2010)

Τεχνολογία ΑΠΕ	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
ΜΥΗΣ	42	45	45	50	59	64	>77	95	158	180
Φωτοβολταϊκά	0	1	1	1	1	1	5	9	12	37
Αιολικά	226	270	287	371	472	491	749	846	1.022	1.140
Βιομάζα	1	22	22	22	24	24	24	39	40	41
Σύνολο	269	338	335	444	556	581	855	989	1.232	1.398

Πίνακας 1.2

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με μια από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και πιο συγκεκριμένα την ηλιακή. Άμεσα η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί είτε σε θερμική με τους ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες είτε σε ηλεκτρική με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τα οποία θα μας απασχολήσουν εκτενέστερα. Όπως είναι γνωστό η θερμική ενέργεια δε μπορεί να μεταφερθεί χωρίς απώλειες σε μεγάλες αποστάσεις γι'αυτό και προτιμάται να παράγεται τοπικά, κοντά στην τοποθεσία κατανάλωσης. Πάντως άμεση χρήση της θερμικής ενέργειας που παίρνουμε από τον ήλιο έχουμε σε παρά πολλές εφαρμογές όπως σε ηλιακούς φούρνους, ηλιακούς θερμοσίφωνες κ.α. Αντίθετα η ηλεκτρική ενέργεια είναι εξαιρετικά βολική μορφή. Μπορεί να μεταφέρεται εύκολα με σχετικά μικρές απώλειες, μπορεί να μετατρέπεται σε άλλες μορφές αλλά και να αποθηκεύεται σε κάποιες μονάδες με ικανοποιητική απόδοση.

Κάθε ώρα ο πλανήτης λαμβάνει από τον ήλιο ενέργεια της τάξης των 150 με 200 δισεκατομμύρια MWh. Βέβαια στην επιφάνεια δεν φτάνει όλη αυτή η ποσότητα

καθώς ένα ποσοστό ανακλάται από την ατμόσφαιρα, τα σύννεφα, τους ωκεανούς, το έδαφος ή και απορροφάται για να θερμάνει την επιφάνεια της γης . Έστω πάντως ότι η ωφέλιμη ενέργεια είναι το 1/5 αυτής που φθάνει στα όρια της ατμόσφαιρας αρκεί και με το παραπάνω για να καλύψει τις ανάγκες της ανθρωπότητας σε ενέργεια, τουλάχιστον με τα σημερινά δεδομένα κατανάλωσης. Βέβαια ο άνθρωπος εννοείται πως είναι αδύνατον και πάλι να εκμεταλλευτεί με τέτοιο τρόπο την ηλιακή ενέργεια, ώστε να εξαρτάται αποκλειστικά από αυτή, καθώς κάτι τέτοιο θα απαιτούσε την κάλυψη τεράστιων εκτάσεων γης με ηλιακά στοιχεία.

Η ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε) και κυρίως της αιολικής και της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας προωθείται και ενισχύεται με ισχυρά κίνητρα και υψηλούς ρυθμούς σε όλον τον ανεπτυγμένο κόσμο. Μεταξύ των δυο αυτών μορφών η αιολική εμφανίζεται οικονομικότερη άρα και περισσότερο προσιτή, κυρίως με την μορφή αιολικών πάρκων συνδεδεμένων στο δίκτυο της ΔΕΗ. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους όπως ότι δεν έχουν κινούμενα μέρη, παρουσιάζουν ακόμα υψηλό κατασκευαστικό κόστος. Στα πλαίσια ενίσχυσης του ρυθμού διείσδυσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε εφαρμογές στον βιομηχανικό τομέα, η ευρωπαϊκή ένωση προωθεί σχετικά προγράμματα με ισχυρά οικονομικά κίνητρα. Στο γεγονός αυτό έχει συμβάλει και η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλά κράτη. Αυτό σημαίνει ότι δύναται να υπάρχουν κάθετα οργανωμένες εταιρίες που να καλύπτουν και τους τρεις τομείς της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έχοντας την δυνατότητα να ανεξαρτητοποιήσουν αυτούς τους τομείς και οποιοσδήποτε ιδιώτης μπορεί να έχει καταρχάς πρόσβαση στο δίκτυο μεταφοράς ή τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας, να παράγει με δικό του τρόπο κάποιο ποσό ενέργειας και μπορεί είτε να το καταναλώνει ο ίδιος, είτε να το πουλά στον τοπικό οργανισμό παροχής ενέργειας, όπως η Δ.Ε.Η στην Ελλάδα, με την προϋπόθεση ότι η ισχύς που παράγει πληρεί ορισμένες προδιαγραφές. Οι σημαντικότερες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, κυρίως η ηλιακή και η αιολική, κρίνονται ιδανικές για ιδιοπαραγωγή καθώς τα επίπεδα ηλιοφάνειας και αιολικού δυναμικού στη χώρα μας είναι εξαιρετικά υψηλά, συγκρινόμενα με αυτά σε βορειότερα κράτη και

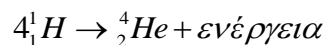
δεν έχουν έξοδα καυσίμων, αλλά μόνο τα αρχικά έξοδα εγκατάστασης και ελάχιστα έξοδα συντήρησης. Επίσης στην χώρα μας αναμένεται σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος μονάδων ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε., καθώς 1.6GW αιολικών πάρκων αναμένεται να εγκατασταθούν έως το 2020 σαν αποτέλεσμα του πλούσιου αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα και των πολιτικών υποστήριξης που εφαρμόζονται από την ελληνική κυβέρνηση. Παρατηρείται λοιπόν σήμερα σε παγκόσμια κλίμακα μια αυξημένη δραστηριοποίηση στον ευρύτερο τομέα των Α.Π.Ε, που προοιωνίζει την αλματώδη ανάπτυξη τους και πλήρη ενσωμάτωση τους στη ενεργειακή παραγωγή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΟΒΟΛΙΑ

2.1 Ο Ήλιος

Ο ήλιος αποτελείται από 80% υδρογόνο (H₂), 19% ήλιο(He) και το υπόλοιπο 1% είναι μείγμα περισσότερων από 100 χημικών στοιχείων.Ο ήλιος είναι ένα τυπικό αστέρι με μάζα 2X10³⁰ kg, ακτίνα 700.000 km, ηλικία 5X10⁹ χρόνια και υπολογίζεται ότι έχει μπροστά του άλλα 5 δισεκατομμύρια χρόνια ζωής.Η επιφανειακή θερμοκρασία του είναι ~ 5.800 K, ενώ η εσωτερική είναι περίπου 15.000.000 K.Η υψηλή θερμοκρασία του ήλιου οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του κατά τις οποίες μετατρέπεται το υδρογόνο σε ήλιο.Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, η πυρηνική αντίδραση:

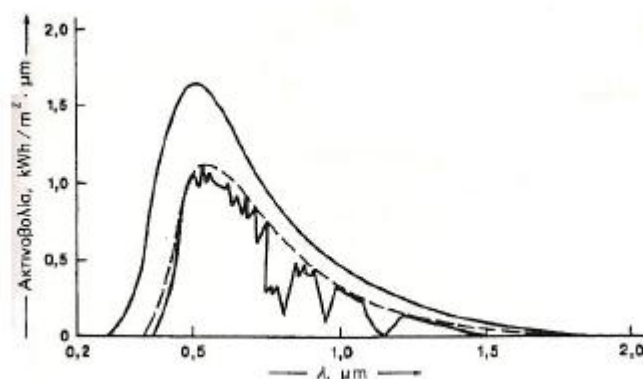


δικαιολογεί, με το έλλειμα μάζας, την εκλυόμενη ενέργεια, με βάση τη γνωστή σχέση E=Δm *c², από την ειδική θεωρία της σχετικότητας.Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο υδρογόνου,που μετατρέπεται σε He, εκλύεται ενέργεια ίση με U=1,67 x10⁵KWh. Η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται στο σύμπαν κυρίως με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλλά και με σωματιδιακή μορφή.

2.1.1 Η Σύσταση του Ηλιακού Φάσματος

Η διαμόρφωση του φάσματος του φωτός που εκπέμπει ο ήλιος προσομοιάζεται συνήθως με την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος θερμοκρασίας περίπου 5.800K, όσο είναι κατά μέσο όρο, η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας του ήλιου. Η προσέγγιση αυτή είναι επαρκής για τη μελέτη των θερμικών εφαρμογών της ηλιακής ακτινοβολίας, όχι όμως και για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της, αφού αυτή καθορίζεται από τη φωτονική σύσταση της ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει επειδή η δυνατότητα απορρόφησης των φωτονίων της ακτινοβολίας σε έναν ημιαγωγό εξαρτάται ουσιαστικά από τη σύγκριση της τιμής της ενέργειας τους με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού.

Η ανάγκη για λεπτομερή εξέταση της φασματικής σύστασης της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται φανερή παρατηρώντας τις διαφορές του πραγματικού φάσματος του ηλιακού φωτός σε σχέση με αυτό του μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5.800K, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα:



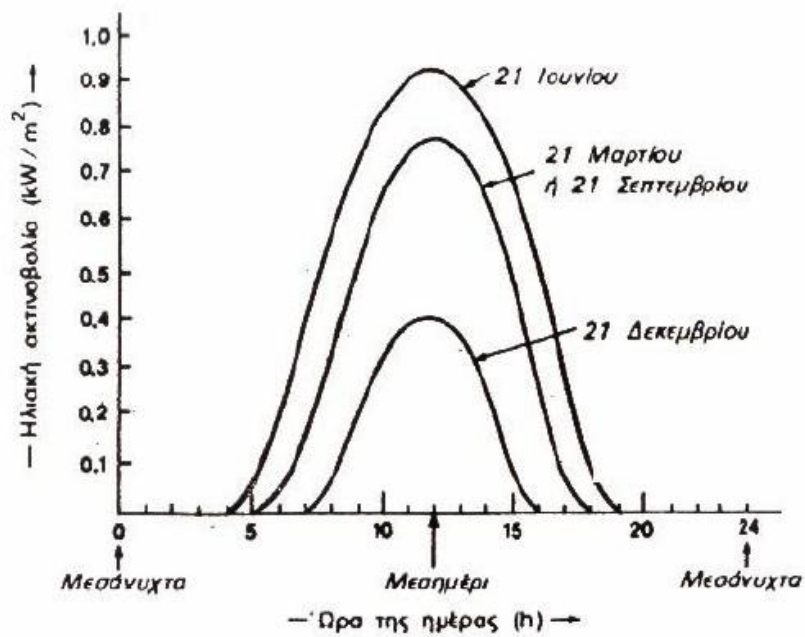
Σχήμα 2.1: το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην εκπομπή μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5.800K(εξωτερική συνεχής γραμμή), το φάσμα της ίδιας πηγής μετά ύστερα από απορροφήσεις από το όζον και από σκεδάσεις από τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας(ασυνεχής γραμμή) και το πραγματικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της γης σε συνθήκες μέτριας υγρασίας(εσωτερική συνεχής γραμμή)

Ενδεικτική άλλωστε της επίδρασης της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία είναι η εξάρτηση της έντασης της από το υψόμετρο της τοποθεσίας που δέχεται την ακτινοβολία. Έτσι έχει μετρηθεί ότι, ενώ στην επιφάνεια της θάλασσας η μέγιστη τιμή της έντασης της ηλιακή ακτινοβολίας είναι 900-1000 W/m², η τιμή της αυξάνεται κατά περίπου 7 W/m² για κάθε 100 μέτρα ύψους της τοποθεσίας, επειδή μειώνεται αντίστοιχα το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας που διασχίζουν οι ηλιακές ακτίνες.

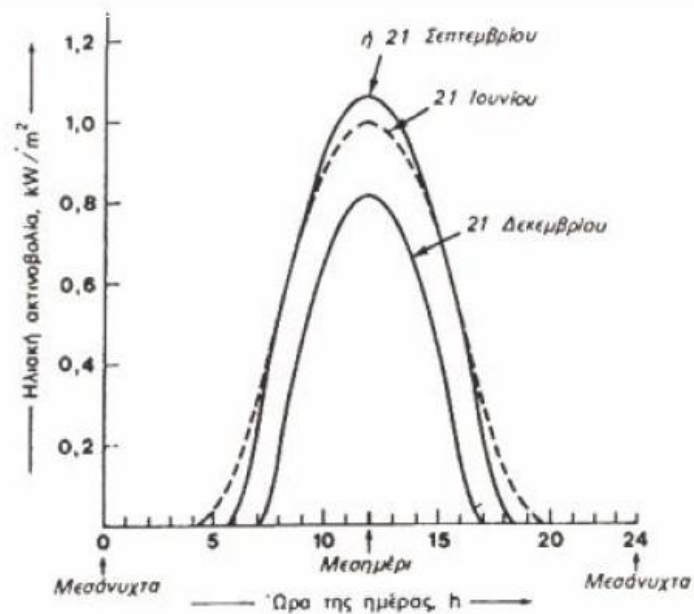
Το όζον, που είναι άφθονο στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, απορροφά έντονα την υπεριώδη ακτινοβολία και ειδικότερα στην περιοχή 0,2-0,35 μm, το μοριακό οξυγόνο απορροφά κυρίως στην περιοχή του ερυθρού (πχ 0,63 και 0,69 μm), το διοξείδιο του άνθρακα στο υπέρυθρο (2,7 και 4,3 μm) και οι υδρατμοί στο ερυθρό και στο υπέρυθρο. Επίσης, από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης συνήθως λιγότερο από το 60% είναι άμεση, σε μορφή δέσμης ακτινών, που μπορούν πχ να εστιαστούν με κάτοπτρα ή φακούς. Η υπόλοιπη είναι διάχυτη, διότι έχει προηγουμένως σκεδαστεί και ανακλαστεί στα διάφορα σωματίδια και σταγονίδια που αιωρούνται στον αέρα, ανάλογα βέβαια με τη σύσταση της ατμόσφαιρας και το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας μέσα σε αυτήν.

2.1.2 Διακύμανση της Ηλιακής Ακτινοβολίας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται παραδείγματα της ομαλής μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας για 3 ενδεικτικές ημερομηνίες (καλοκαίρι, άνοιξη και φθινόπωρο, χειμώνα) σε συνθήκες ιδανικά καθαρού καιρού. Χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (ένταση αιχμής), που μετράται στο ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος του ορίζοντα, το οποίο δεν είναι αναγκαστικό να συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι, πχ στην Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολόι δείχνει 12:25 το χειμώνα και 13:25 το καλοκαίρι, όταν ισχύει η θερινή ώρα.



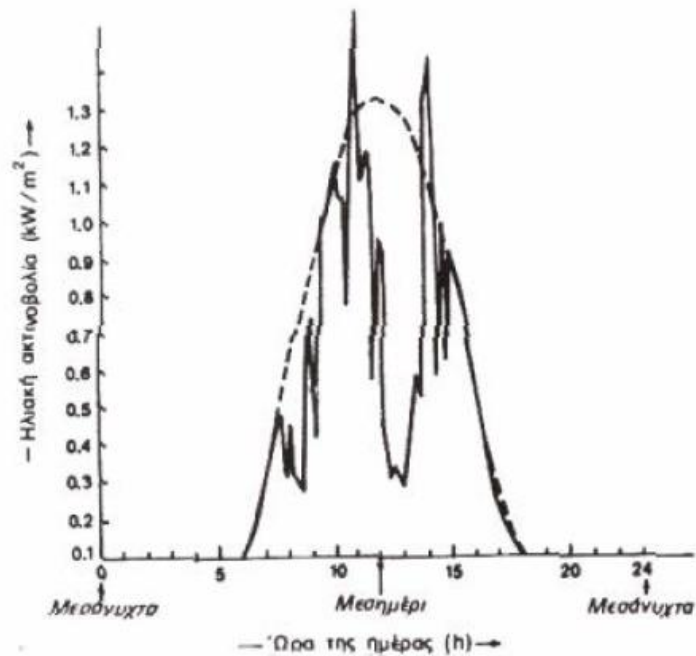
Σχήμα2.2 : Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια στη διάρκεια 3 χαρακτηριστικών ημερών του έτους(οι ώρες είναι σε ηλιακές τιμές).



Σχήμα2.3 : Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας με τον ηλιακό συλλέκτη σε κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου.

Έχουμε ήδη τονίσει ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μία επίπεδη επιφάνεια γίνεται σημαντικά μεγαλύτερη όταν βρίσκεται σε κατάλληλη κλίση, ώστε η πρόσπτωση των ακτινών να γίνεται κάθετα. Στην περίπτωση αυτή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέγιστη ισχύς της ακτινοβολίας το ηλιακό μεσημέρι στις ευνοϊκότερες ημέρες του έτους δε διαφέρει πάρα πολύ από τόπο σε τόπο και η τιμή $1\text{KW}/\text{m}^2$ αποτελεί μία πολύ χονδρική, αλλά πάντως γενικά αποδεκτή προσεγγίση.

Στη διάρκεια του έτους, στο βόρειο ημισφαίριο, ο αριθμός των φωτεινών ωρών της ημέρας, η μέγιστη ισχύς καθώς και η συνολική ημερήσια ενέργεια που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια, φτάνουν στις μέγιστες τιμές τους στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο) και πέφτουν στις αντίστοιχες ελάχιστες τιμές τους στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Στις επιφάνειες, όμως πχ που βρίσκονται σε κλίση ίση με το γεωγραφικό παράλληλο του τόπου, η μέγιστη τιμή της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας είναι στα ηλιακά μεσημέρια των ισημεριών (21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου), διότι τότε δέχονται κάθετα τις ακτίνες του ήλιου.



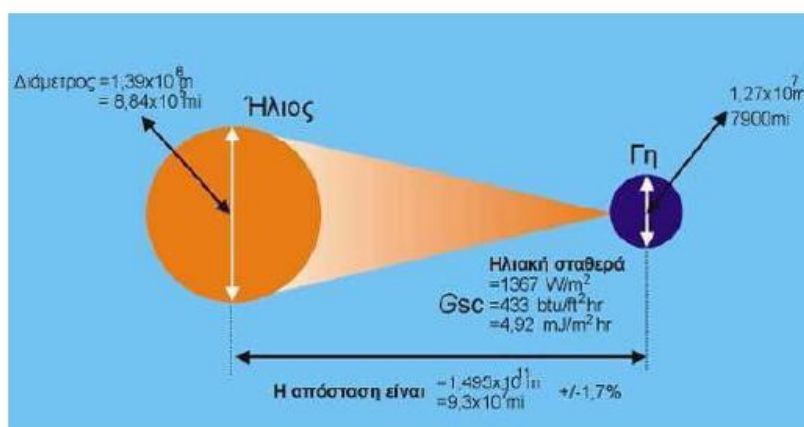
Σχήμα 2.4: Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια των ωρών μιας ημέρας με μερική νέφωση. Η ασυνεχής καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη διακύμανση για καθαρό ουρανό.

Όταν ο ουρανός έχει σύννεφα, η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης γίνεται ανώμαλη, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Οι παρατηρούμενες απότομες πτώσεις της έντασης οφείλονται στην παρεμβολή ενός νέφους που μετακινεί ο άνεμος. Επίσης, το γρήγορο πέρασμα ενός σμήνους πουλιών ή ενός αεροπλάνου μέσα από τη δέσμη του ηλιακού φωτός που δέχεται ο συλλέκτης καταγράφεται σε μία πολύ οξεία στιγμιαία πτώση της έντασης της ακτινοβολίας. Παρατηρούμε, ακόμα, εξάρσεις που ξεπερνούν τις κανονικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Προφανώς στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα θα συμβαίνει αθροιστική επίδραση της άμεσης ακτινοβολίας από τον ήλιο, μέσα από ένα άνοιγμα των νεφών, και της ανακλώμενης από τα σύννεφα.

2.2 Ηλιακή Σταθερά

Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της Γης που δέχεται την ακτινοβολία. Ως ηλιακή σταθερά ορίζεται η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ήλιου στο όριο της ατμόσφαιρας:

$G_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2$ τιμή που έχει προταθεί με αβεβαιότητα 1%.



Σχήμα 2.5: το σχήμα δείχνει σχηματικά τη γεωμετρική σχέση ηλίου-γης, η εκκεντρότητα της τροχιάς της γης είναι τέτοια, ώστε η απόσταση μεταξύ τους να μεταβάλλεται κατά 1,7% στη μέση απόσταση των $1,495 \times 10^{11} \text{ m}$

Όπως είναι γνωστό η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του 24ωρου, λόγω περιστροφής της γης περί τον άξονά της και κατά τη διάρκεια του έτους, λόγω της περιστροφής της γης γύρω από τον ήλιο σε ελλειπτική τροχιά, το επίπεδο της οποίας ονομάζεται εκλειπτική. Η μεταβολή της απόστασης της γης από τον ήλιο έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας. Αν είναι G_{on} η ένταση της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ήλιου και G_{sc} η μέση τιμή της ηλιακής σταθεράς, θα είναι:

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0,33 \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right]$$

Όπου:

n : οι μέρες του έτους $n=1,2,3...365$ με αρχή την 1^η Ιανουαρίου.

G : η ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας και κάθετο στις ακτίνες του ήλιου.

Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή την 1^η Ιανουαρίου. Αυτό συμβαίνει διότι τότε η απόσταση ήλιου-γης είναι η μικρότερη από όλη τη διάρκεια του έτους. Όμως, για μια οριζόντια επιφάνεια τοποθετημένη στο βόρειο ημισφαίριο η ακτινοβολία που προσπίπτει είναι μικρότερη το χειμώνα κι αυτό οφείλεται στην κλίση της γης. Η κλίση της γης έχει ως αποτέλεσμα η μεγαλύτερη ενέργεια από τον ήλιο να φτάνει όταν οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν κάθετα στην περιοχή την οποία εξετάζουμε. Για το βόρειο ημισφαίριο αυτό συμβαίνει τους καλοκαιρινούς μήνες.

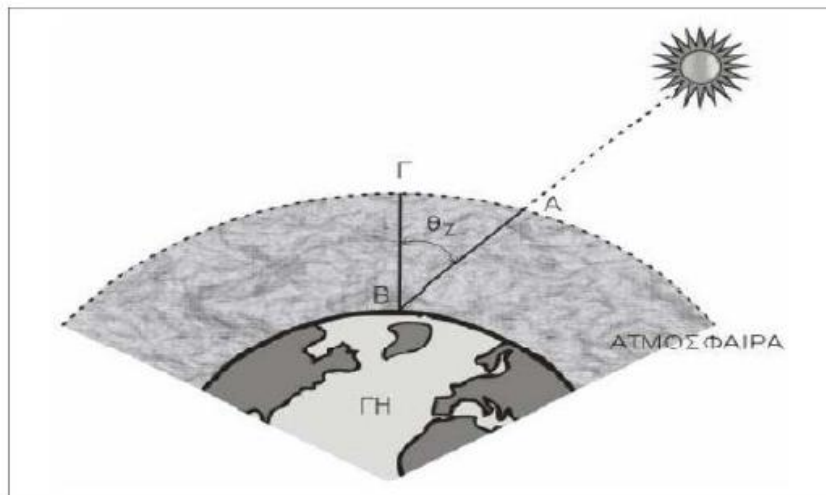
2.3 Ηλιακή Γεωμετρία

2.3.1 Ορισμοί

- ✓ **Αέριος Μάζα AM:** το ποσοστό που αναλογεί από το μήκος της μάζας της ατμόσφαιρας το οποίο διασχίζει η δέσμη της άμεσης ακτινοβολίας ως προς

το μήκος της μάζας της ατμόσφαιρας που θα περνούσε εάν ο ήλιος ήταν στο ζενίθ του(δηλαδή άμεσα από πάνω).Κατά συνέπεια στη στάθμη της θάλασσας, $\mu=1$ όταν είναι ο ήλιος στο ζενίθ και $\mu=2$ για γωνία ζενίθ 60° . Για γωνίες ζενίθ από 0 έως 70° στη στάθμη της θάλασσας,κατά προσέγγιση ισχύει:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

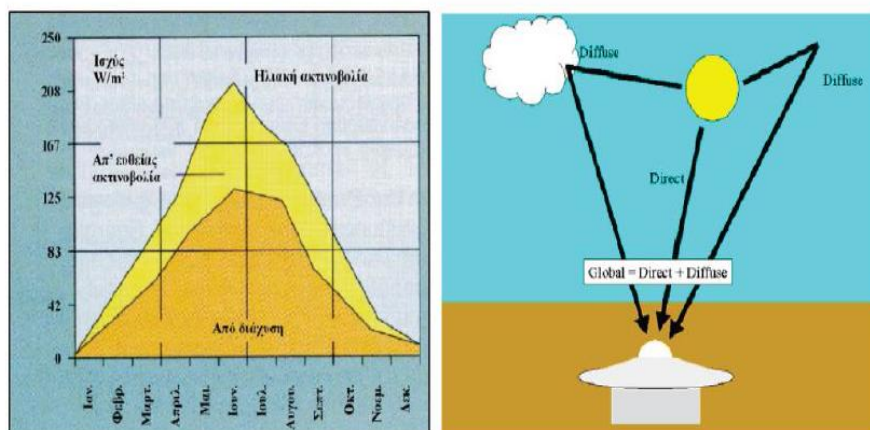


Σχήμα2.6 :Μάζα του αέρα

Τιμή AM	Συμβατικές συνθήκες	Ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας (W/m ²)
AM0	Στο διάστημα, έξω από την ατμόσφαιρα.	1350
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	1060
AM2	Απόσταση ήλιου 60° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	880
AM3	Απόσταση ήλιου 70,5° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	750

Πίνακας: Πρότυπες Τιμές των AM

- ✓ **Άμεση ακτινοβολία:** η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει απ' ευθείας από τον ήλιο χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα(η άμεση ακτινοβολία αναφέρεται συχνά ως direct ή beam ακτινοβολία).
- ✓ **Διάχυτη ακτινοβολία:** η ηλιακή ακτινοβολία που έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα(αναφέρεται και ως diffuse ακτινοβολία).
- ✓ **Συνολική ακτινοβολία(total solar radiation):** το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια(συνήθως οι μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας είναι μετρήσεις της συνολικής ακτινοβολίας σε μία οριζόντια επιφάνεια, συχνά καλούμενη κοσμική επιφάνεια).



Σχήμα2.7: Αριστερά η κατανομή της μέσης ενέργειας ανά τετραγωνικό

μέτρο, αναλυμένη σε άμεση και διάχυτη ακτινοβολία. Δεξιά μέτρηση της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας.

- ✓ **Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας G:** (μονάδα W/m^2), είναι ο ρυθμός με τον οποίο η ακτινοβολία προσπίπτει σε μια επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας. Το σύμβολο G χρησιμοποιείται για να εκφράσει την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, με τους κατάλληλους δείκτες για την άμεση, διάχυτη ή συνολική ακτινοβολία.
- ✓ **Πυκνότητα ενέργειας ακτινοβολίας:** (μονάδα J/m^2), η προσπίπτουσα ενέργεια σε μια επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας. Υπολογίζεται από την ολοκλήρωση της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια ενός καθορισμένου χρόνου, συνήθως μία ημέρα ή μία ώρα. Η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία είναι ένας όρος που ισχύει κατά συγκεκριμένα για την ακτινοβολία ηλιακής ενέργειας.
- ✓ **Ηλιακή ώρα (solar time):** η ηλιακή ώρα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό όλων των γωνιών που αναφέρονται στον ήλιο και διαφέρει από την τοπική ώρα λόγω της κλίσης του άξονα της γης και της εκλειπτικής τροχιάς γύρω από τον ήλιο.

2.3.2 Σφαιρικές Συντεταγμένες

Η θέση του ήλιου στον ουρανό ενός τόπου περιγράφεται συνήθως με 2 γωνίες: το ύψος του ήλιου (α ή h) και το αζιμούθιο του ήλιου (γ).

- **Ύψος του ήλιου (α):** είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στον ορίζοντα.
- **Αζιμούθιο (γ):** είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Ο όρος προέρχεται από την αραβική λέξη *as summut*, που σημαίνει κατεύθυνση. Προς τα δεξιά από το νότο, το ηλιακό αζιμούθιο παίρνει θετικές τιμές και προς τα αριστερά αρνητικές τιμές. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το ύψος του ήλιου και το αζιμούθιο μεταβάλλονται συνεχώς καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό.

Το αζιμούθιο είναι:

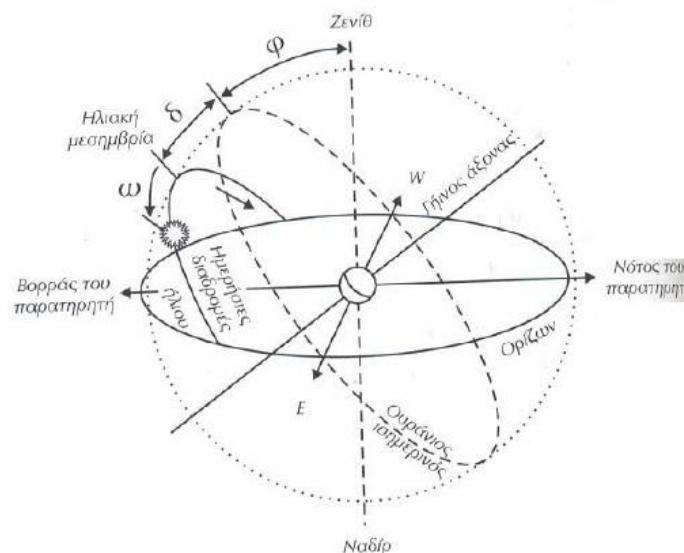
- ✓ Για νότιο προσανατολισμό $\gamma=0$.
- ✓ Για γωνίες δυτικά από το νότο παίρνει θετικές τιμές
- ✓ Για γωνίες ανατολικά από το νότο παίρνει αρνητικές τιμές.
- **Ζενιθιακή γωνία του ήλιου:** αντί για το ύψος, χρησιμοποιείται επίσης συχνά η συμπληρωματική του γωνία, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, που ονομάζεται ζενιθιακή απόσταση(ή ζενιθιακή γωνία) του ήλιου(θ_z).

Επομένως σύμφωνα με τα παραπάνω ισχύει:

$$h=90^\circ-\theta_z$$

Ζενίθ είναι το σημείο του ουρανού που συναντά η κατακόρυφος ενός τόπου και ο όρος προέρχεται από την αραβική λέξη Senit που σημαίνει ευθεία οδός.

- **Ωριαία γωνία του ήλιου:** ορίζεται ως ωριαία γωνία (ω) του ήλιου η γωνιακή απόσταση του ήλιου από την ηλιακή μεσημβρία λόγω περιστροφής της γης περί τον άξονα της. Στην ηλιακή μεσημβρία $\omega=0^\circ$, ενώ κάθε ώρα η ω μεταβάλλεται κατά 15° . Τις πρωινές ώρες η ω είναι θετική(+) και κατά τις απογευματινές γίνεται αρνητική(-).



Σχήμα2.8: το τοπικό σύστημα συντεταγμένων Ζενίθ-Ναδίρ το οποίο δείχνει τη φαινόμενη ημερήσια κίνηση του ήλιου.

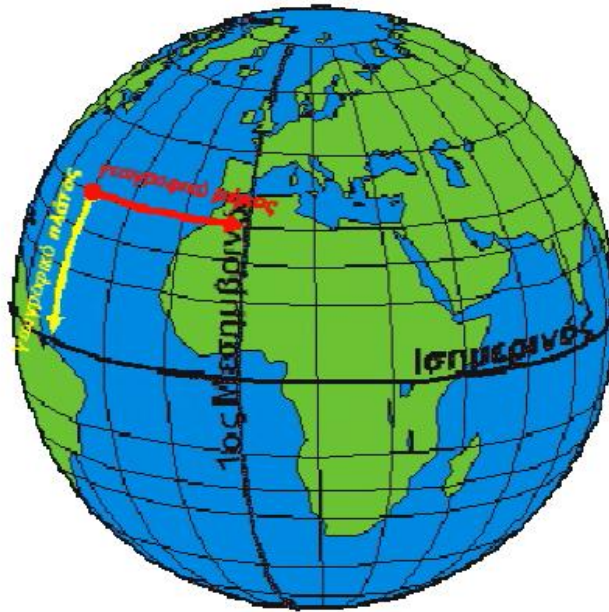
- **Γεωγραφικό πλάτος(ϕ):** του τόπου είναι μια γωνία που ορίζεται από την ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το σημείο τομής του ισημερινού και του μεσημβρινού που μας ενδιαφέρει και η ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το σημείο που μας ενδιαφέρει στο συγκεκριμένο μεσημβρινό που περνά από το σημείο αυτό. Η γωνία λοιπόν αυτή που ορίζεται με κορυφή το κέντρο της γης και ανήκει στο μεσημβρινό επίπεδο του τόπου μας ορίζει την ακριβή θέση του τόπου πάνω στην επιφάνεια της γης. Τέλος γνωρίζοντας το γεωγραφικό πλάτος και το μεσημβρινό, γνωρίζουμε και την ακριβή θέση του τόπου πάνω στην επιφάνεια της γης.

Το γεωγραφικό πλάτος είναι πάνω στους μεσημβρινούς 'ΒΟΡΕΙΑ-ΝΟΤΙΑ' και παίρνει τιμές 0° μέχρι 90° για το βόρειο ημισφαίριο και από 0° μέχρι -90° για το νότιο ημισφαίριο.

$$-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$$

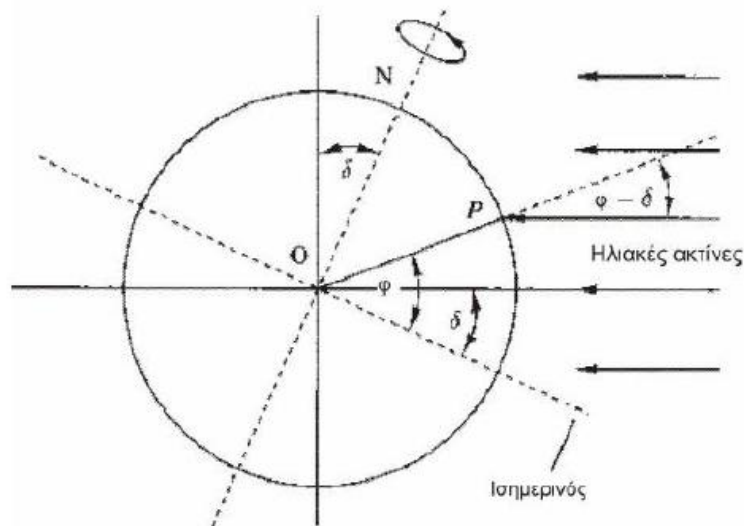
- **Γεωμετρικό μήκος** ενός τόπου είναι μια γωνία που σχηματίζεται από το μηδενικό μεσημβρινό του τόπου που μας ενδιαφέρει. Με το γεωγραφικό μήκος προσδιορίζουμε αν ο τόπος μας είναι «ανατολικά» ή «δυτικά» του μηδενικού μεσημβρινού. Το γεωγραφικό μήκος παίρνει τιμές 0° έως -180° για τόπους ανατολικά του Greenwich κι από 0° έως 180° για τόπους δυτικά του Greenwich.

Γνωρίζοντας αυτά τα μεγέθη έχουμε τη δυνατότητα στον ισημερινό να ορίσουμε επ' ακριβώς τη θέση ενός τόπου στην επιφάνεια της γης.



Σχήμα2.9: Γεωγραφικές συντεταγμένες ενός τόπου

- **Απόκλιση(δ):** είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου και στο επίπεδο του ισημερινού και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα2.10: απόκλιση στο επίπεδο του ισημερινού

Η τιμή της απόκλισης δ δεν είναι σταθερή όλη τη διάρκεια του χρόνου αλλά αλλάζει ανάλογα με τη θέση του ήλιου που κι αυτή αλλάζει ανάλογα με τις εποχές του χρόνου, έχει θετικές τιμές λοιπόν για το Βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το

Νότιο. Η τιμή που παίρνει κάθε φορά η απόκλιση δ δείχνει το ύψος το ήλιου, δηλαδή αν ο ήλιος είναι 'ψηλά' ή 'χαμηλά' στον ουρανό. Ανάλογα με την εποχή ο ήλιος περνά είτε 'ψηλά' είτε 'χαμηλά' από τον κάθε τόπο. Είναι γνωστό ότι το καλοκαίρι ο ήλιος ανατέλλει νωρίτερα το πρωί και δύει αργότερα το βράδυ και ότι βρίσκεται 'ψηλά' μακριά από τη γη. Αντίθετα το χειμώνα ανατέλλει αργότερα και δύει νωρίτερα και βρίσκεται 'χαμηλότερα' στη γη. Συνεπώς η απόκλιση δ παίρνει μεγάλες τιμές το καλοκαίρι και μικρές το χειμώνα, με μέγιστη τιμή στις 21 Ιουνίου ($\delta = +23,45^\circ$) και ελάχιστη τιμή στις 21 Δεκέμβρη ($\delta = -23,45^\circ$). Η σχέση που μας επιτρέπει τον υπολογισμό για οποιαδήποτε μέρα του έτους είναι:

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right)$$

Μήνας	Ημέρα του μήνα	Ημέρα του έτους
Ιανουάριος	17	17
Φεβρουάριος	16	47
Μάρτιος	16	75
Απρίλιος	15	105
Μάιος	15	135
Ιούνιος	11	162
Ιούλιος	17	198
Αύγουστος	16	228
Σεπτέμβριος	15	258
Οκτώβριος	15	288
Νοέμβριος	14	318
Δεκέμβριος	10	344

Πίνακας: χαρακτηριστικές ημέρες κάθε μήνα και ο αριθμός της στη διάρκεια του έτους

Όταν, όμως, απαιτείται ο υπολογισμός της μέσης μηνιαίας ηλιακής απόκλισης, τότε για κάθε μήνα χρειαζόμαστε μια χαρακτηριστική ημέρα της οποίας η ηλιακή απόκλιση είναι η πλησιέστερη προς τη μέση του αντίστοιχου μήνα. Η χαρακτηριστική μέρα για κάθε μήνα καθώς και ο αριθμός της στη διάρκεια του έτους δίνονται στον παραπάνω πίνακα.

Ας δούμε, όμως, λίγα γύρω από την ηλιοφάνεια, γιατί πραγματικά δεν έχουμε όλη την ημέρα ηλιοφάνεια λόγω φυσικά των καιρικών φαινομένων. Καταρχάς έχουμε την πραγματική και τη θεωρητική ηλιοφάνεια.

Θεωρητική ηλιοφάνεια είναι οι ώρες του 24ωρου ανάμεσα στην ανατολή και στη δύση του ήλιου.

Πραγματική ηλιοφάνεια είναι οι ώρες εκείνες κατά τις οποίες ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα.

Ηλιοφεγγείς είναι οι ημέρες εκείνες στη διάρκεια των οποίων ο ήλιος δεν καλύπτεται καθόλου από σύννεφα.

Ανήλιες είναι οι ημέρες εκείνες στη διάρκεια των οποίων ο ήλιος καλύπτεται από σύννεφα.

Έχοντας υπόψιν την πραγματική ηλιοφάνεια σε ένα τόπο, το σύνολο των ηλιοφεγγών και ανήλιων ημερών μπορούμε να μελετήσουμε με αρκετή ακρίβεια αν και κατά πόσον ευνοεί μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση κάποιος τόπος ή όχι.

2.4 Ο ηλιακός Συλλέκτης και ο Προσανατολισμός του

Ηλιακός συλλέκτης είναι μια συγκεκριμένη επιφάνεια (με συγκεκριμένες διαστάσεις) που σκοπός της είναι να 'μαζεύει' την ηλιακή ακτινοβολία και ανάλογα με την περίπτωση (τεχνολογία που χρησιμοποιείται) να τη μετατρέψει στην ανάλογη μορφή ενέργειας, ηλεκτρική ενέργεια όταν πρόκειται για φωτοβολταϊκά, θερμική ενέργεια όταν πρόκειται για επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες υγρού μέσου κτλ. Εκείνο που μας ενδιαφέρει είναι με ποιο τρόπο θα τοποθετήσουμε το συλλέκτη μας έτσι ώστε να 'μαζεύει' όσο το δυνατόν καλύτερα την ηλιακή ακτινοβολία.



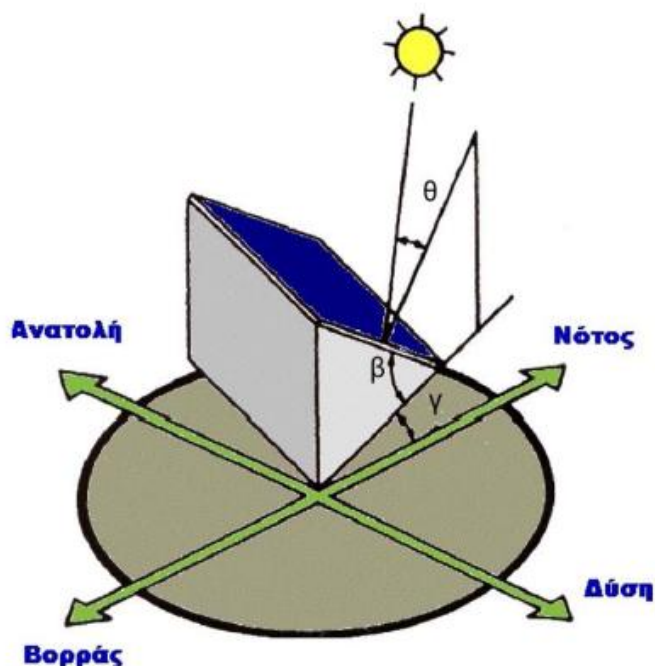
Σχήμα2.11: ηλιακός συλλέκτης

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως η θέση του ήλιου στον ουρανό, έτσι και ο προσανατολισμός ενός επίπεδου στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από 2 γωνίες: την κλίση και την αζιμούθια γωνία.

Η κλίση του συλλέκτη (β): είναι η διεδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα και μπορεί να πάρει τιμές από 0° μέχρι και 180° . Για γωνίες $\beta > 90^\circ$ το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω.

Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη (γ): είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από -180° μέχρι 180° . Η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας, πάνω σε ένα επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνειά του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης (θ) είναι 0° . Η συνθήκη, όμως, αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έχουν κατασκευαστεί μηχανικές διατάξεις που επαναπροσανατολίζουν συνεχώς το συλλέκτη, ώστε η επιφάνεια του να αντικρίζει πάντα κάθετα τον ήλιο. Οι διατάξεις όμως αυτές είναι δαπανηρές και πολύπλοκες. Έτσι η χρήση τους δικαιολογείται μόνο σε περιπτώσεις

εφαρμογών, όπως στα συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας με φακούς ή κάτοπτρα.



Σχήμα 2.12: η κλίση (β) και η αζιμούθια γωνία (γ) που χαρακτηρίζουν τον προσανατολισμό ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη στην επιφάνεια της γης.

2.4.1 Η βέλτιστη Κλίση του Συλλέκτη

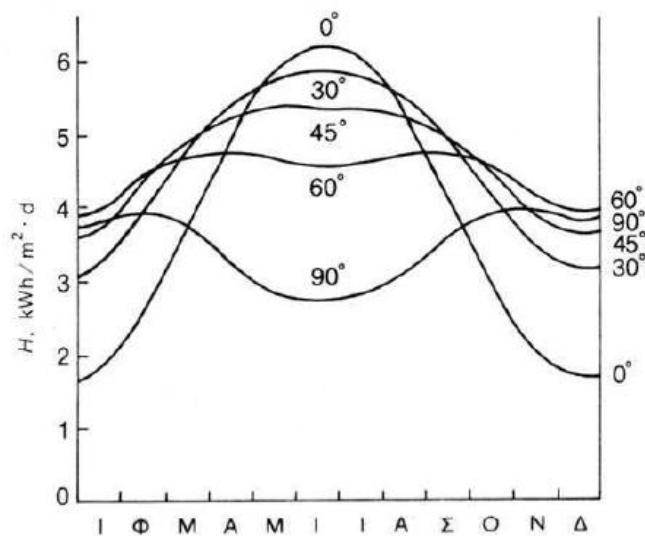
Στις συνηθισμένες περιπτώσεις οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη κατά τη διάρκεια του έτους. Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας συνδέεται με τις άλλες γωνίες της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

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\phi \cdot \cos\beta -$$

$$\sin\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega$$

Οι επίπεδοι συλλέκτες χρησιμοποιούν την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία και συνήθως τοποθετούνται υπό σταθερή κλίση και προσανατολισμό κατά τη διάρκεια του έτους. Η επιλογή του ευνοϊκού προσανατολισμού και της κλίσης του συλλέκτη είναι το σημαντικότερο μέτρο για τη βελτίωση του ηλιακού κέρδους. Η θέση του

συλλέκτη επηρεάζει την απόδοσή του κατά 2 τρόπους. Πρώτα επηρεάζει σημαντικά το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη. Ακόμα η θέση του συλλέκτη επηρεάζει το συντελεστή διάβασης των διαφανών καλυμμάτων και το συντελεστή απορρόφησης του απορροφητήρα, αφού οι 2 συντελεστές είναι συναρτήσεις της γωνίας, που η ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη.



Σχήμα 2.13: παράδειγμα της εξάρτησης της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας H που δέχεται μια επίπεδη επιφάνεια κατά τη διάρκεια των διαφόρων μηνών του έτους, σε συνάρτηση με την κλίση της.

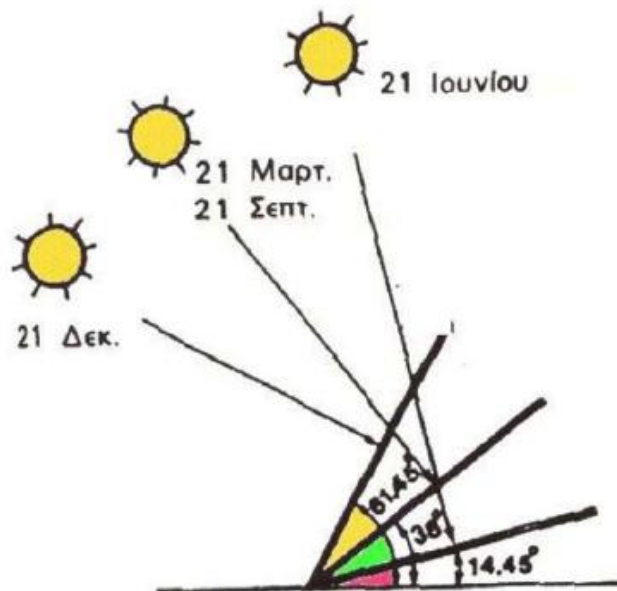
Γενικά η μεγαλύτερη ποσότητα της ηλιακής ενέργειας, λαμβάνεται σε μια νότια προσανατολισμένη κλίση. Εάν η επιφάνεια του συλλέκτη δεν αντικρίζει ακριβώς το νότο, το ποσό της ωφέλιμης ενέργειας, μειώνεται ελαφρά σε μια γωνία 30° ανατολικά, δυτικά ή νότια. Η κλίση για συστήματα που λειτουργούν όλο το χρόνο είναι 45° , ενώ αντίθετα για συστήματα που λειτουργούν καλοκαιρινούς μήνες λαμβάνεται μικρότερη περίπου 25° . Έτσι είναι δυνατόν να αξιολογηθεί ορθά η εγκατάσταση ηλιακών συστημάτων (π.χ ηλιακοί συλλέκτες) ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοσή τους.

Συνοψίζοντας:

- Η βέλτιστη γωνία κλίσης (β) θα πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (ϕ).

- Κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου: η βέλτιστη γωνία κλίσης (β) πρέπει να είναι περίπου $10-15^\circ$ μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου.
- Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου: η βέλτιστη γωνία κλίσης (β) πρέπει να είναι περίπου $10-15^\circ$ μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (ϕ).
- Ο βέλτιστος προσανατολισμός (αζιμούθιο γ) είναι νότιος ($\gamma=0^\circ$), ενώ απόκλιση κατά $20-30^\circ$ από νότο έχει μικρή επίδραση στην ετήσια συλλεγόμενη ενέργεια.

Τα ύψη του ηλίου αφορούν τα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια.



Σχήμα 2.14: η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη στο θερινό(21 Ιουνίου) και το χειμερινό(21 Δεκέμβρη) και στην εαρινή(21 Μαρτίου) και τη φθινοπωρινή(21 Σεπτεμβρίου) ισημερία, σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος 38° , όπως η Αθήνα

Τα παραπάνω ισχύουν για τη συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που έρχεται σε δέσμη από τον ήλιο. Για τις άλλες λιγότερο σημαντικές μορφές της ηλιακής ακτινοβολίας, ο κυριότερος παράγοντας είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης του συλλέκτη, ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου. Έτσι, όσο η κλίση απέχει περισσότερο από το οριζόντιο, τόσο μεγαλύτερο ποσό ανακλώμενης ακτινοβολίας

από το έδαφος δέχεται ο συλλέκτης, αλλά και τόσο μικρότερο ποσό διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό.

Για παράδειγμα, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό, η βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη είναι για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι περίπου 10-15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους. Έτσι, ο συλλέκτης αντικρίζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται αφθονότερα τη διάχυτη ακτινοβολία.

Η ποσότητα της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται περισσότερο σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που καλύπτει την επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία. Η ικανότητα της ανάκλασης εκφράζεται από ένα συντελεστή που κυμαίνεται από 0 για πλήρη απορρόφηση της ακτινοβολίας μέχρι 1 για πλήρη ανάκλαση.

Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης
Επιφάνεια νερού, Θάλασσα	0.05
Ασφαλτόστρωμα	0.07
Αγρός με σκοτεινόχρωμα χώμα	0.08
Πράσινος αγρός	0.15
Βραχώδη επιφάνεια	0.20
Επιφάνεια παλαιού τσιμέντου	0.24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου	0.30
Χιόνι	0.60

Σχήμα 2.15: παραδείγματα τιμών του συντελεστή ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας

Στη συνέχεια ακολουθεί ένας πίνακας με το γεωγραφικό πλάτος (κατά προσέγγιση) διάφορων ελληνικών πόλεων καθώς και οι ζώνες που έχει χωριστεί ο ελλαδικός χώρος ύστερα από μελέτες που έχουν κάνει επιστήμονες με βάση κυρίως τις κλιματολογικές συνθήκες (θερμοκρασία στη διάρκεια της μέρας ή του εικοσιτετραώρου, την υγρασία, την ηλιοφάνεια, τους ανέμους που επικρατούν κτλ.)

Πόλη ή περιοχή	Γεωγραφικό πλάτος
Σιδηρόκαστρο, Διδυμότειχο, Ορεστιάδα, Φλώρινα, Έδεσσα, Γιαννιτσά, Κιλκίς, Σέρρες, Δράμα, Καβάλα	41 30'
Ξάνθη, Κομοτηνή, Αλεξανδρούπολη	41o
Καστοριά, Πτολεμαίδα, Κοζάνη, Νάουσα, Βέροια, Κατερίνη, Θεσσαλονίκη, Πολύγυρος, Σαμοθράκη	40 30'
Κόνιτσα, Γρεβενά, Λιτόχωρο, Κασσάνδρα, Λήμνος	40o
Κέρκυρα, Ηγουμενίτσα, Ιωάννινα, Μέτσοβο, Τρικαλα, Καρδίτσα, Λάρισα, Βόλος	39 30'
Λευκάδα, Πρέβεζα, Αρτα, Καρπενήσι, Λαμία, Σκόρος, Μυτιλήνη	39
Κεφαλληνία, Ιθάκη, Αγρίνιο, Μεσολόγγι, Πάτρα, Αμφίλοχία, Λιβαδειά, Θήβα, Χαλκίδα, Χίος	38 30'
Ζάκυνθος, Αμαλιάδα, Καλάβρυτα, Κόρινθος, Μέγαρα, Ελευσίνα, Αθήνα, Ραφίνα, Κάρυστος, Άνδρος, Ικαρία, Σάμος	38o
Πύργος, Μεγαλόπολη, Τριπολι, Αργος, Ναύπλιο, Πόρος, Εύρος, Πατμός	37 30'
Πύλος, Καλαμάτα, Σπάρτη, Πάρος, Νάξος, Κάλυμνος, Κως	37
Γύθειο, Μήλος, Σαντορίνη, Ρόδος	36 30'
Κύθηρα, Καστελόριζο	36o
Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο, Κάσσο, Κόρφαθος	35 30'
Χώρα Σφακίων, Ιεράπετρα, Αγ.Νικόλαος Κρήτης, Κύπρος	35

Σχήμα2.16: γεωγραφικό πλάτος(προσεγγιστικά) διάφορων ελληνικών πόλεων/περιοχών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της στους μεγάλους θερμοηλεκτρικούς και υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Οι παραπάνω μορφές παραγωγής ενέργειας καταναλώνουν πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο ή ουράνιο και άλλα σχάσιμα υλικά ή χρησιμοποιούν υδατοπτώσεις. Όλες

όμως αυτές οι ενεργειακές πηγές έχουν σχετικά περιορισμένες προοπτικές αφού τα αέρια, υγρά ή στερεά και γενικά συμβατικά καύσιμα, άλλα και τα πυρηνικά καύσιμα, εξαντλούνται βαθμιαία, ενώ και η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι ποσοτικά καθορισμένη και γεωγραφικά περιορισμένη. Επιπλέον, γνωστές είναι και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των παραπάνω μορφών παραγωγής ενέργειας, καθιστώντας απαραίτητη την ανάπτυξη και χρήση τεχνολογιών για την εκμετάλλευση ήπιων μορφών ενέργειας.

Το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια εντάθηκε όταν χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, διαπιστώθηκε η πρακτική δυνατότητα της εύκολης, άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια με την κατασκευή φωτοβολταϊκών γεννητριών. Η φωτοβολταϊκή μέθοδος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια έχει κυρίως πλεονεκτήματα, αν εξαιρεθούν το σχετικά υψηλό κόστος για τις περισσότερες εφαρμογές, η αδυναμία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας να παράγει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια λόγω των διακυμάνσεων της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του 24ώρου και η απαίτηση της χρησιμοποίησης μεγάλων σχετικά επιφανειών λόγω της μικρής ποιότητας της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα πλεονεκτήματα της φωτοβολταϊκής μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι τα ακόλουθα:

1. Ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή.
2. Ικανοποιητική απόδοση μετατροπής.
3. Σχετικά εύκολη μέθοδος κατασκευής των ηλιακών κυττάρων από πρώτες ύλες.
4. Πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων(τουλάχιστον 25 χρόνια).
5. Τα ηλιακά στοιχεία δεν έχουν κινούμενα μέρη και είναι σχεδόν απαλλαγμένα από την ανάγκη επίβλεψης και συντήρησης. Ακόμα και σε περίπτωση βλάβης, η αποκατάσταση της λειτουργίας γίνεται εύκολα λόγω της σπονδυλωτής μορφής της φωτοβολταϊκής διάταξης.
6. Η φωτοβολταϊκή μετατροπή δεν προκαλεί ρύπανση στο περιβάλλον, ούτε θόρυβο ή άλλη ενόχληση και δε δημιουργεί απόβλητα ή άχρηστα παραπροϊόντα.

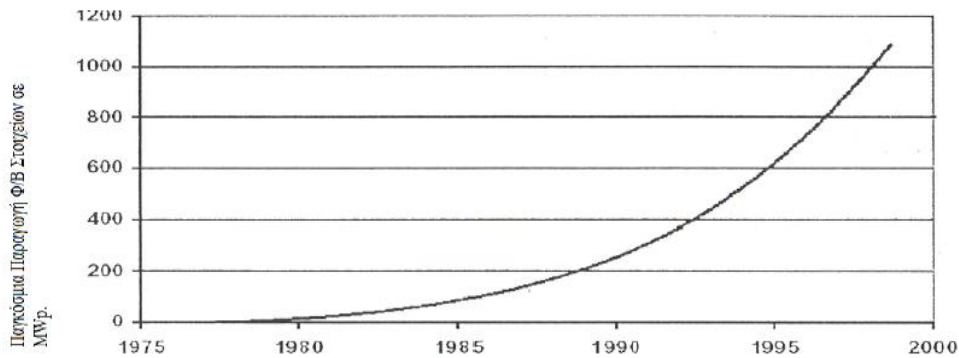
7. Δίνει τη δυνατότητα ανεξαρτησίας από κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής, καθιστώντας τη μια λογικού κόστους παροχή ενέργειας σε εγκαταστάσεις απομακρυσμένες από το κυρίως δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
8. Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν με όσο μικρή ισχύ ζητηθεί.
9. Η αναλογία της παραγόμενης ισχύος προς το βάρος της διάταξης είναι αρκετά μεγάλη, περίπου 100W/kg, που είναι σημαντική ιδιότητα για τις διαστημικές εφαρμογές.
10. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιαγωγικών υλικών και η συνεχής μείωση του κόστους παραγωγής τους, οδηγούν σε σταδιακή μείωση και του κόστους των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

3.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

Τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών και η καρδιά κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες. Αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που καθώς δέχονται στην επιφάνεια τους την ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνει μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την ένταση ακτινοβολίας που δέχονται, ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να δώσει μέχρι 0.5-1.0 Volt και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40mA ανά cm² της επιφάνειάς του. Το είδος του ημιαγωγού που επιλέγεται ως υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθορίζεται με κυριότερο κριτήριο όπως θα δούμε και στη συνέχεια, από την τιμή του ενεργειακού διακένου του η οποία καθορίζει και την απόδοση του στοιχείου. Ως συντελεστής απόδοσης ή απλούστερα ως απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του. Στο σχήμα 3.2 βλέπουμε ότι οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας είναι περίπου 25% και μπορούν να πραγματοποιηθούν με φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό διάκενο περίπου 1.5eV.

Το πυρίτιο αποτελεί το βασικότερο υλικό για την κατασκευή ηλιακών κυττάρων μια και αποτελεί το κυρίαρχο υλικό στην κατασκευή ημιαγωγών. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία από πυρίτιο κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας είτε μονοκρυσταλλικοί ή πολυκρυσταλλικοί δίσκοι, είτε λεπτά φύλλα πυριτίου (άμορφο). Με τη συνεχή αύξηση στην παραγωγή ημιαγωγικών υλικών και τη βελτίωση της τεχνολογίας πυριτίου, η απόδοση των ηλιακών στοιχείων παρουσιάζει μια συνεχή αύξηση πλησιάζοντας τη μέγιστη θεωρητική τιμή τους και με παράλληλη ραγδαία μείωση στο κόστος τους. Για την εκτίμηση του κόστους των ηλιακών στοιχείων χρησιμοποιείται ο συμβατικός όρος watt αιχμής (W_p , peak watt) που είναι η ελάχιστη απαιτούμενη επιφάνεια του στοιχείου για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 1W όταν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος $1kW/m^2$. Π.χ. κόστος ηλιακού στοιχείου 10€/Wp σημαίνει ότι το κόστος ενός ή περισσοτέρων ηλιακών στοιχείων με τόση συνολική επιφάνεια ώστε να παράγουν ηλεκτρική ισχύ 1W, όταν εκτεθούν σε ακτινοβολία πυκνότητας $1kW/m^2$, είναι 10€. Δηλαδή το W_p εκφράζει συνδυασμένα το κόστος κατασκευής σε σχέση με την απόδοση του ηλιακού στοιχείου. Στο κάτωθι σχήμα (3.1) παρουσιάζεται αυτή η πορεία ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών στοιχείων, τόσο απ' την σκοπιά της αύξησης της παραγωγής όσο και απ' την σκοπιά της μείωσης του κόστους.

Στην Ελλάδα, δυστυχώς δεν έχουν εφαρμοστεί ευρέως προγράμματα εκμετάλλευσης της φωτοβολταϊκής ενέργειας, παρ' ότι πολλοί λόγοι συμβάλουν για το αντίθετο. Η ευνοϊκή γεωγραφική θέση και το κλίμα, ιδίως στις νοτιότερες περιοχές της (δέχεται αρκετά σημαντική ηλιακή ακτινοβολία, περίπου $4600MJ/m^2$ ετησίως, κατά μέσο όρο, σε σύγκριση με $8000 MJ/m^2$ στις τροπικές περιοχές και $2200 MJ/m^2$ κοντά στις αρκτικές περιοχές), καθώς και η ύπαρξη απομονωμένων και αραιοκατοικημένων περιοχών κυρίως στα νησιά, δίνουν μεγάλα περιθώρια στη διάδοση των φωτοβολταϊκών εφαρμογών.



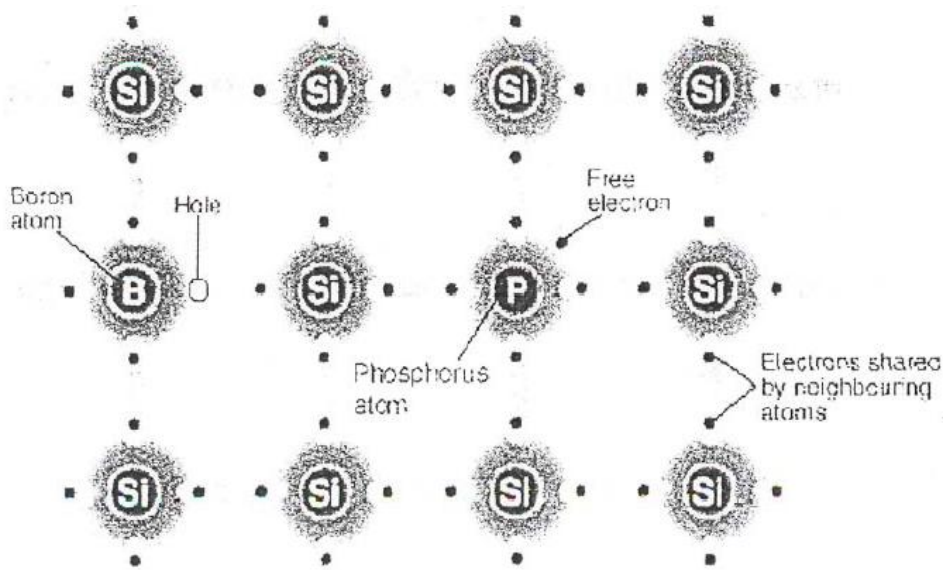
Σχήμα (3.1) :Παγκόσμια συνολική παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων

[1976-1998, NREL '99, Ayres '98]

3.3 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς που είναι στοιχεία τετρασθενή με τετραεδρική κρυσταλλική δομή όπως το πυρίτιο (Si). Στα στοιχεία αυτά δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και δε διαθέτουν ηλεκτρική αγωγιμότητα στην υποθετική περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή είναι εντελώς υποβαθμισμένος ενεργειακά. Όταν όμως απορροφήσουν κάποια αξιόλογη ενέργεια, π.χ. με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας, πραγματοποιείται μια ριζική μεταβολή. Η ενέργεια που παρέχεται στο σώμα και κατανέμεται στα άτομα του, προκαλεί την ελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Τα ηλεκτρόνια αυτά σθένους απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους στο κρυσταλλικό πλέγμα, χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Είναι φανερό ότι το ενεργειακό διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στη ζώνη αγωγιμότητας εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους, ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής.

Αν στα ηλεκτρόνια των δεσμών του κρυστάλλου προσφερθεί μια ποσότητα ενέργειας π.χ. αν δεχθούν μια δέσμη ακτινοβολίας που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια $h\nu$ μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο ($E_g > h\nu$), δε μπορούν να την απορροφήσουν και μένουν στη ζώνη σθένους. Αν όμως τα ενεργειακά κβάντα που προσφέρονται είναι ίσα ή μεγαλύτερα από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού ($E_g \leq h\nu$), τότε κάθε κβάντο μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους και να το διεγείρει προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στη ζώνη σθένους μία οπή. Ο παραπάνω μηχανισμός διέγερσης εξαρτάται και από το αν ο ημιαγωγός είναι άμεσος ή έμμεσος.



Σχήμα(3.2): Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με άτομα νόθευσης

Αν τώρα ο τετρασθενής ημιαγωγός Si, νοθευτεί με κάποιο πεντασθενές στοιχείο (φώσφορος, P) ή με κάποιο τρισθενές στοιχείο (βόριο, B), τότε έχουμε ημιαγωγό προσμίξεως τύπου-n και τύπου-p αντίστοιχα.

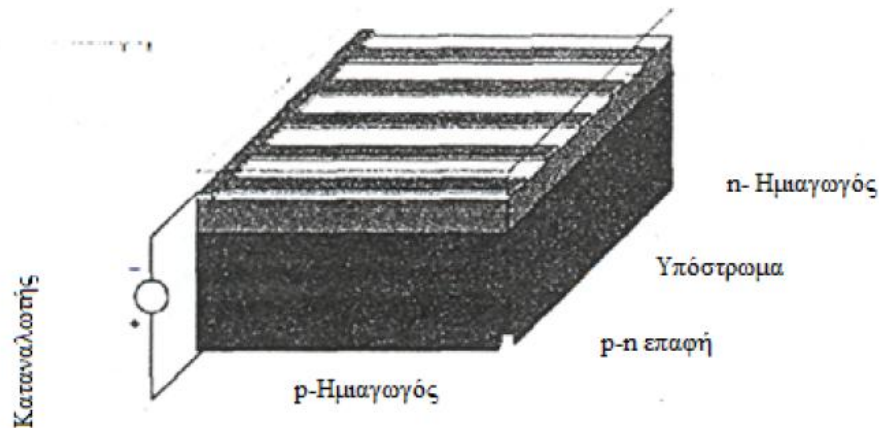
Τέσσερα από τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους κάθε ατόμου P, θα ενωθούν με ηλεκτρόνια σθένους των γειτονικών ατόμων Si και θα σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς (σχήμα 3.5). Το πέμπτο ηλεκτρόνιο (φορέας πλειονότητας) θα συγκρατείται πολύ χαλαρά από το θετικό πυρηνικό φορτίο του P και με λίγη ενέργεια μπορεί να αποσπασθεί και να κινείται σαν ελεύθερο ηλεκτρόνιο, αφήνοντας ένα ανιόν (P+) που μένει ακίνητο στο πλέγμα. Δηλαδή το πεντασθενές άτομο συμπεριφέρεται στο πλέγμα σαν δότης ηλεκτρονίων (τύπος-n ημιαγωγός).

Αντίστοιχα, με την πρόσμιξη τρισθενών ατόμων B σε πλεγματικές θέσεις του Si, δημιουργούνται κενές θέσεις ηλεκτρονίων στους δεσμούς (σχήμα 3.5). Με την απορρόφηση λίγης ενέργειας, ένα ηλεκτρόνιο από ένα γειτονικό πλήρη δεσμό μπορεί να καλύψει την κενή θέση, αφήνοντας παράλληλα στην προηγούμενη θέση του μια οπή και μετατρέποντας το άτομο B σε κατιόν (B⁻). Δηλαδή το τρισθενές άτομο συμπεριφέρεται σαν αποδέκτης ηλεκτρονίων (φορείς μειονότητας) ή δότης οπών (τύπος-p ημιαγωγός).

Όταν σε μια περιοχή του ημιαγωγού υπάρχει δημιουργία ή έκχυση φορέων σε περίσσεια, αυτοί διαχέονται προς τις άλλες περιοχές του ημιαγωγού όπου η συγκέντρωση των αντίστοιχων φορέων είναι μικρότερη. Επίσης όταν έλθουν σε στενή επαφή ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου p με ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου n, δηλαδή σχηματιστεί μια ένωση p-n (διάταξη διόδου ημιαγωγού), τότε ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου τύπου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι πολύ λιγότερα. Η ανάμιξη αυτή των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια (περιοχή αραίωσης) των τεμαχίων τύπου p και n, ανατρέπουν την ισορροπία που υπήρχε πριν. Η αποκατάσταση των συνθηκών ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις των φορέων, μέχρι οι συγκεντρώσεις τους να πάρουν τιμές που να ικανοποιούν τον νόμο δράσης των μαζών. Η συγκέντρωση των κατιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες στο τμήμα τύπου p και n, παραμένουν αμετάβλητες αφού τα ιόντα, όπως συνήθως όλα τα άτομα στα στερεά, μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική ουδετερότητα και οι δύο πλευρές της ένωσης p-n φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Δημιουργείται λοιπόν μια διαφορά δυναμικού, που η τιμή της είναι σχετικά μικρή, αλλά το ενσωματωμένο αυτό ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων πλειονότητας προς το απέναντι τμήμα της ένωσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι η δίοδος που περιέχει την ένωση p-n, παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάλογα με την φορά του.

Στο σχήμα φαίνεται μία υλοποίηση διόδου σε ένα κρυσταλλικό ηλιακό κύτταρο πυριτίου.

Πάχος κελιού:
Περίπου 0,3 mm



(Σχήμα 3.3): Ηλιακό κύτταρο κρυσταλλικού πυριτίου

3.4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός 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, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου, μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p- n, οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ηλεκτροστατικού της πεδίου. Με τον τρόπο αυτό, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n 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 τάσης αυτής ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η διάταξη αποτελεί μια πηγή ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα I_{ϕ} , που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Η πυκνότητα του φωτορευματος δίνεται από τη σχέση 3.1:

$$I_{\phi} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda)[1 - R(\lambda)]\Phi(\lambda)d\lambda \quad (3.1)$$

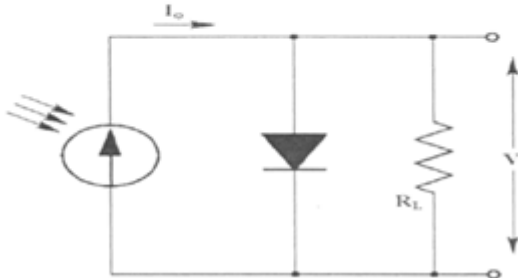
όπου e , είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο και λ_g , το μέγιστο χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος ακτινοβολίας στον ημιαγωγό. $S(\lambda)$ είναι η φασματική απόκριση που ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε σχέση με τη φωτονική ροή $\Phi(\lambda)$, δηλαδή με το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφανείας και χρόνου με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από λ μέχρι $\lambda+d\lambda$. $R(\lambda)$ είναι ο δείκτης ανάκλασης της επιφάνειας του στοιχείου.

3.5 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ

Για να γίνει μια εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο και ότι περιγράφεται από το πολύ απλοποιημένο διάγραμμα του σχήματος 3.7 παρακάτω. Στο ισοδύναμο αυτό δεν συμπεριλαμβάνεται η αντίσταση λόγω της κίνησης των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια, όπως ακόμα και η μη άπειρη αντίσταση διαμέσου της διόδου και τα αναπόφευκτα ρεύματα διαρροής.

Σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί ισορροπία όταν η τάση που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα, για το οποίο και θα ισχύει:

$$I_{\phi} = I_0 \left(e^{\frac{eV}{\gamma k T}} - 1 \right) \quad (3.2)$$



Σχήμα 3.4: Απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

όπου I_0 , είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου, e το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, k η σταθερά Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία και γ ένας συντελεστής που ανάλογα με την κατασκευή και την ποιότητα της διόδου παίρνει συνήθως τιμές μεταξύ 1 και 2. Από την παραπάνω σχέση, η τάση ανοιχτοκυκλώματος θα είναι:

$$V_{oc} = \frac{\gamma k T}{e} \ln \left(\frac{I_{\phi}}{I_0} - 1 \right), \quad I_0 < I_{\phi} \Rightarrow V_{oc} = \frac{\gamma k T}{e} \ln \left(\frac{I_{\phi}}{I_0} \right) \quad (3.3)$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της V_{oc} σε συνάρτηση με το I_{ϕ} , δηλαδή με την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο και την εξάρτηση της από τις διάφορες ιδιότητες του ημιαγωγού. Στην άλλη ακραία περίπτωση, δηλαδή σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα ισούται με το παραγόμενο φωτόρευμα, $I_{sc} = I_{\phi}$.

Όταν το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου κλείσει διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης R_L , το ρεύμα θα πάρει μια μικρότερη τιμή I_L που βρίσκεται με τη λύση της εξίσωσης :

$$I_L = I_\phi - I_0 \cdot (e^{\frac{eI_L R_L}{\gamma \cdot k \cdot T}} - 1)$$

(3.4)

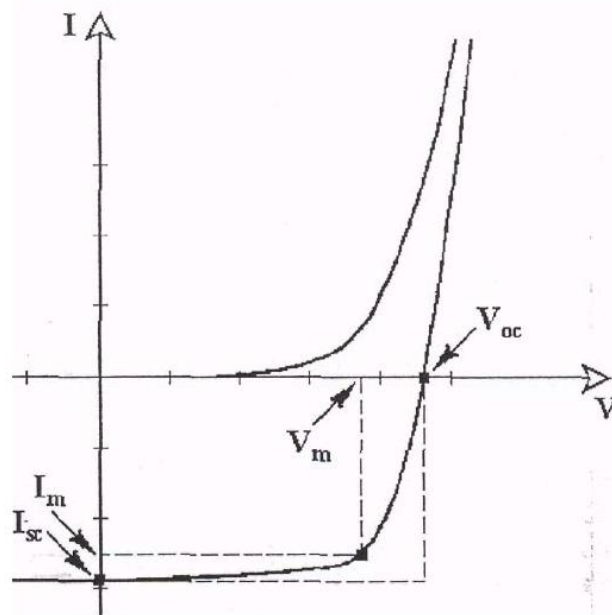
Προφανώς θα υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης, δηλαδή του φορτίου του κυκλώματος, για την οποία η ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο θα γίνεται μέγιστη ($P_m = I_m V_m$). Στις συνθήκες αυτές, θα αντιστοιχεί μια βέλτιστη τάση V_m , που δίνεται από τη λύση της εξίσωσης:

$$\frac{I_\phi}{I_0} + 1 = \left(1 + \frac{e \cdot V_m}{\gamma \cdot k \cdot T}\right) \cdot e^{\frac{e \cdot V_m}{\gamma \cdot k \cdot T}}$$

(3.5)

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.8, φαίνονται τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους.

Στο σκοτάδι



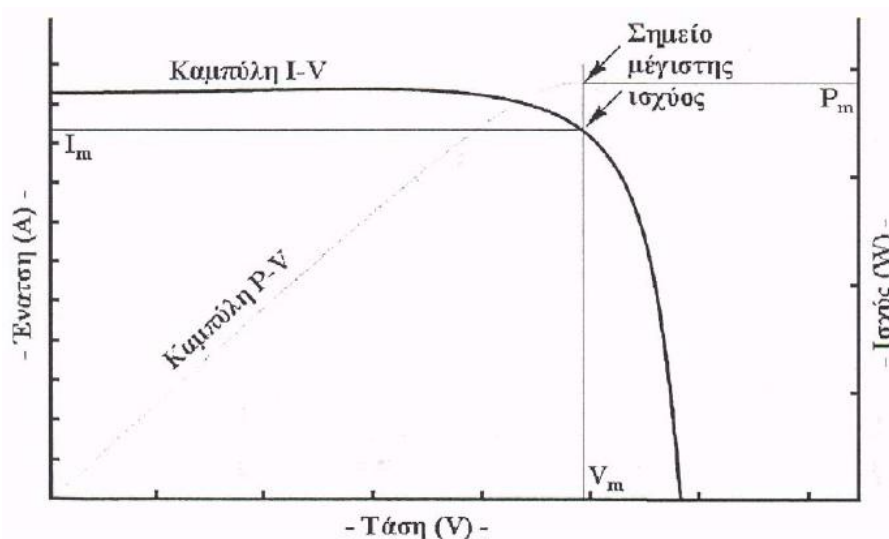
Στο φως

Σχήμα 3.5: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης (I) - τάσης (V) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου στο σκοτάδι και στο φως.

Ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Δηλαδή, σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται

ριζικά και μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή. Επίσης ένας παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι, εκδηλώνεται ισχυρότερο ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της V_{oc} και αντίστοιχη μείωση της απόδοσης του στοιχείου.

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για μεταβαλλόμενες τιμές στην αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτεί το ηλιακό κύτταρο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του κυττάρου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (βραχυκυκλωμένη κατάσταση με μέγιστη τιμή ρεύματος, I_{sc} και μηδενική τάση) και άπειρη αντίσταση (ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση με μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης V_{oc}), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Καμπύλες I-V και P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου Si για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Παράλληλα μεταβάλλεται ομαλά και η ισχύς που παράγει το στοιχείο, με μέγιστη τιμή P_m σε ένα ορισμένο ζεύγος τιμών τάσης V_m και έντασης I_m για το οποίο η

καμπύλη της ισχύος ως προς την τάση (P-V) παρουσιάζει μέγιστο. Διαφορετικά μπορεί να ειπωθεί, ότι για τις τιμές αυτές των I_m και V_m , το εμβαδόν του ορθογωνίου που σχηματίζεται από την I-V καμπύλη και τους άξονες τάσης και έντασης ρεύματος, γίνεται μέγιστο. Η μαθηματική συνθήκη για το σημείο μέγιστης ισχύος είναι:

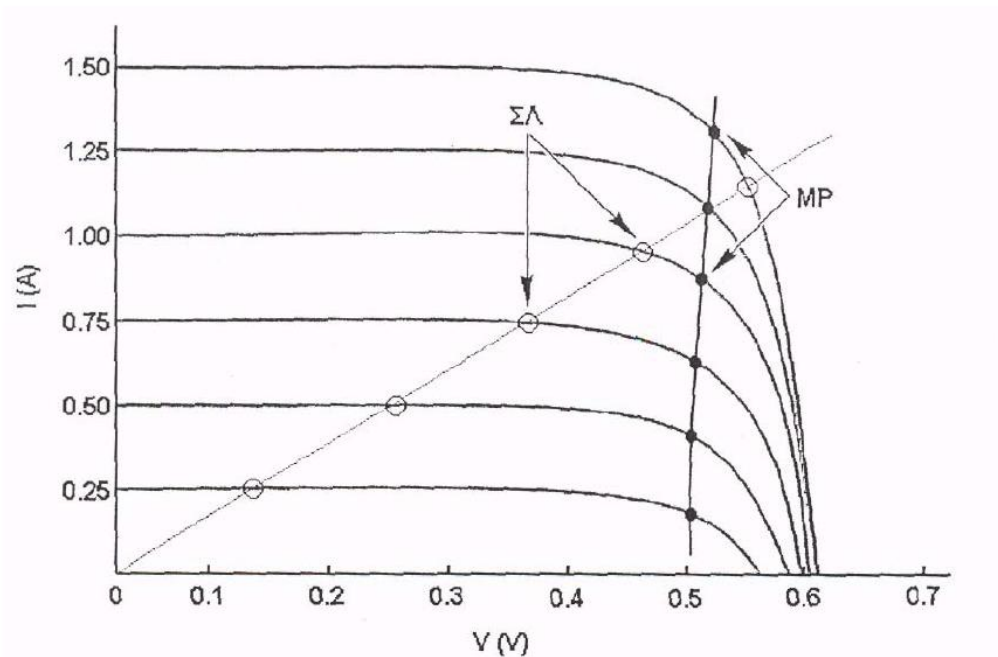
$$dP = \frac{\partial P}{\partial I} \cdot dI + \frac{\partial P}{\partial V} \cdot dV = 0 \Rightarrow$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial I} = V, \frac{\partial P}{\partial V} = I \right) \quad \frac{dV}{dI} = -\frac{V_m}{I_m} = R_m$$

(3.6-3.7)

όπου R_m είναι η δυναμική αντίσταση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Αυτή η δυναμική αντίσταση είναι μια συνάρτηση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας των στοιχείων. Επομένως για τη μεταφορά μέγιστης ισχύος από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια στο φορτίο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, πρέπει να γίνεται ταίριασμα του φορτίου στη μονίμως μεταβαλλόμενη δυναμική αντίσταση της γεννήτριας. Υπάρχει κατάλληλη συσκευή ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών που παρακολουθεί αυτό το σημείο μέγιστης ισχύος, επιτρέποντας μια όσο το δυνατό μεγαλύτερη παροχή ηλεκτρικής ισχύος από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια προς το φορτίο και τη μπαταρία του φωτοβολταϊκού συστήματος για διάφορα επίπεδα εντάσεως της ηλιακής ακτινοβολίας και διαφορετικές θερμοκρασίες των ηλιακών κυττάρων. Η μεταβολή της πυκνότητας της ισχύος της ακτινοβολίας συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή της V_{oc} και της I_{sc} από το μηδέν για το σκοτάδι, μέχρι τις μέγιστες τιμές τους για τη μέγιστη ένταση της ακτινοβολίας. Επίσης, με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται αισθητή μείωση της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης, V_{oc} των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Παρατηρώντας το σχήμα 3.10 που ακολουθεί, για την ακτινοβολία που δίνει $I_{sc}=1.25A$ έχουμε περίπου $I_m=1.1A$ και $V_m=0.5V$. Επομένως η κατάλληλη αντίσταση του κυκλώματος για να παράγεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς από το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι $R_L=V_m/I_m=0.5/1.1=0.455\Omega$. Η αντίσταση αυτή όπως φαίνεται και στο σχήμα, είναι εντελώς ακατάλληλη για όλες τις άλλες συνθήκες ακτινοβολίας, αφού η ευθεία με κλίση $1/0.455$ τέμνει τις

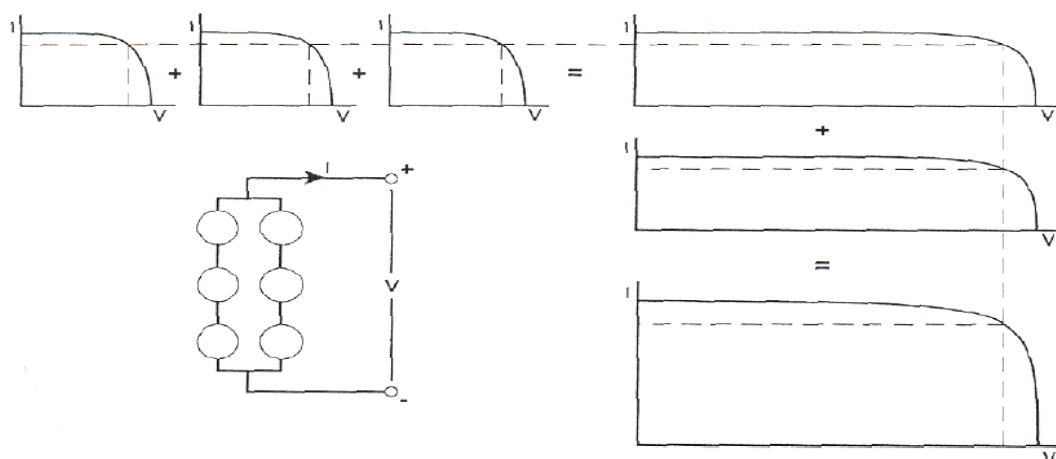
αντίστοιχες καμπύλες I-V σε σημείο διαφορετικό από το σημείο μέγιστης ισχύος. Η τιμή της εσωτερικής αντίστασης του συσσωρευτή (και σε σχέση με το φορτίο κατανάλωσης) στο φωτοβολταϊκό σύστημα καθορίζει κατά πόσο κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος θα λειτουργεί η φωτοβολταϊκή γεννήτρια στα μεταβαλλόμενα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στα ηλιακά στοιχεία.



Σχήμα 3.7: Η μετατόπιση των σημείων λειτουργίας ($\Sigma\Lambda$) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου και η απομάκρυνση του από τα αντίστοιχα σημεία της μέγιστης ισχύος (MP) της I-V καμπύλης, για διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά για σταθερή τιμή της αντίστασης του κυκλώματος που τροφοδοτεί το στοιχείο.

3.6 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ

Η τάση και η ισχύς των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων ή για τη φόρτιση των συσσωρευτών. Ειδικότερα, η τάση που εκδηλώνει ένα συνηθισμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου του εμπορίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι μόλις 0.5V περίπου και η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μέχρι μόλις 0.4W περίπου. Επίσης, είναι γνωστό ότι υπό ιδανικές συνθήκες δύο ή περισσότερες ίδιες πηγές τάσης σε σειρά προστίθενται όπως προστίθενται και δύο ή περισσότερες πηγές ρεύματος που συνδέονται παράλληλα. Για τον λόγο αυτό τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση φωτοβολταϊκών γεννητριών συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα και τοποθετούνται σε ενιαίο πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο ώστε να τροφοδοτούν στην έξοδο τους με την επιθυμητή από τον κατασκευαστή τάση και ισχύ.



Σχήμα 3.8: I-V χαρακτηριστική φωτοβολταϊκού πλαισίου με στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα.

Όταν τα ηλιακά κύτταρα έχουν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά, η μέγιστη ισχύς που παίρνουμε από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ισούται με το γινόμενο της μέγιστης ισχύος που μπορεί να τροφοδοτήσει κάθε στοιχείο ξεχωριστά, επί τον αριθμό των στοιχείων. Η μέγιστη τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου προσδιορίζεται από τον αριθμό συγκεκριμένων ηλιακών στοιχείων που συνδέονται

σε σειρά και το μέγιστο ρεύμα στην έξοδο (για κανονικά επίπεδα ηλιοφάνειας) προσδιορίζεται από τον αριθμό των στοιχείων (ή ομάδα εν σειρά στοιχείων) που συνδέονται παράλληλα. Η χαρακτηριστική IV καμπύλη ενός συνόλου ίδιων ηλιακών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά ή/και παράλληλα, προκύπτει με αντίστοιχο συνδυασμό των χαρακτηριστικών των επιμέρους στοιχείων. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που κυκλοφορούν στο εμπόριο, αποτελούνται από τα στοιχεία τα οποία προστατεύονται από πάνω με φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού και από κάτω με φύλλο ανθεκτικού υλικού, συνήθως μετάλλου ή ενισχυμένου πλαστικού. Το πάνω και κάτω προστατευτικό φύλλο συγκρατούνται μεταξύ τους στεγανά και μόνιμα. Διαμορφώνεται έτσι η βιομηχανική μονάδα η οποία χρησιμοποιείται ως συλλέκτης στη συγκρότηση των φωτοβολταϊκών γεννητριών. Στο εμπόριο συνήθως τα πλαίσια παρουσιάζουν τάσεις από 4V ως 22V, ρεύμα 0.5 A ως 2.5 A, ισχύς αιχμής (παραγόμενη μέγιστη ισχύς όταν το πλαίσιο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1kW/m²) 2WP ως 60WP και συντελεστή απόδοσης 6% ως 12%. Επίσης, συχνά χρησιμοποιούνται στα πλαίσια δίοδοι για την προστασία (δίοδοι απομόνωσης, blocking diodes) και την βελτίωση της απόδοσης τους (δίοδοι παράκαμψης, bypass diodes).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η στατιστική κατανομή της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας ενός τόπου και η δυνατότητα μετατροπής μέρους αυτής σε καθαρή για το περιβάλλον ηλεκτρική ενέργεια, δεδομένου του τρέχοντος επιπέδου της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, καθιστά όλο και πιο συχνά επιτακτική τη χρήση των ηλιακών κυττάρων ως γεννήτρια ηλεκτρικής ενέργειας. Τα στατιστικά δεδομένα της ηλιοφάνειας ενός τόπου αντιπαρατιθέμενα στην ίδια τη φύση του φαινομένου, που χαρακτηρίζεται από τις έντονες και συχνά γρήγορες μεταβολές, τόσο κατά τη διάρκεια του έτους

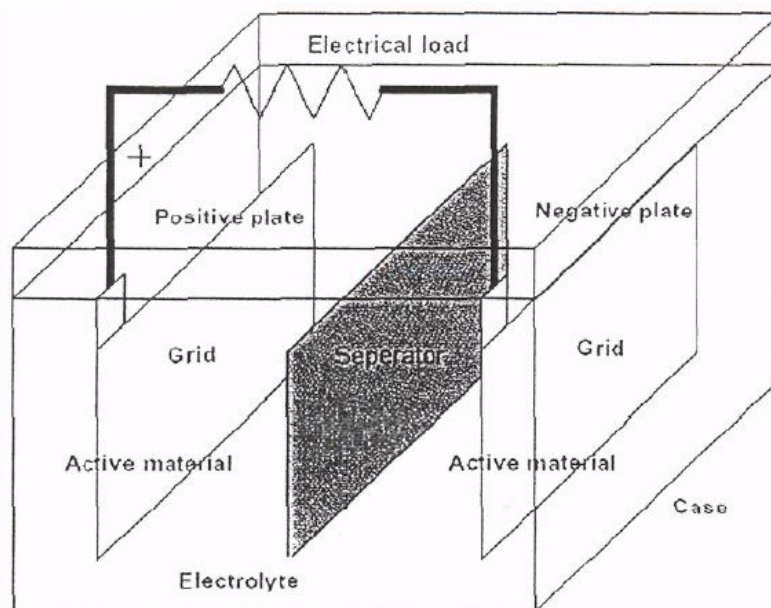
όσο και κατά τη διάρκεια της μέρας, θα περιόριζαν τρομερά το εύρος των δυνατών εφαρμογών χωρίς τη δυνατότητα της αποταμίευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Τη λύση του προβλήματος της συχνής ασυμφωνίας ζήτησης και παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της δυνατότητας της αποταμίευσης της, την παρέχουν οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες). Μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια, ο συσσωρευτής, την αποθηκεύει σε χημική μορφή, για να την αποδώσει στην αρχική της μορφή όταν υπάρξει ζήτηση. Στο κεφάλαιο αυτό, εκτός από τα βασικά στοιχεία της τεχνολογίας των συσσωρευτών θα εξεταστούν και τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας τους, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα.

4.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές είναι ουσιαστικά μετατροπείς χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική και, συνήθως, έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν αυτή τη μετατροπή και προς την αντίθετη κατεύθυνση παρέχοντας με άμεσο τρόπο τη δυνατότητα συσσώρευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα να αποταμιεύουν ενέργεια ανά πάσα στιγμή ή όχι είναι αυτή που χωρίζει τους συσσωρευτές στις δύο κυριότερες κατηγορίες. Στην κατηγορία των πρωτευόντων (primary) συσσωρευτών ανήκουν αυτοί που έχουν αποθηκευμένη χημική ενέργεια την οποία και μπορούν να την αποδώσουν ως ηλεκτρική, δεν μπορούν όμως να επαναφορτιστούν. Οι τυπικές μπαταρίες λιθίου που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές συσκευές ευρείας κατανάλωσης ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία και επειδή δεν μπορούν να επαναφορτιστούν δεν είναι λειτουργικές στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Αυτές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοια συστήματα ανήκουν στην κατηγορία των δευτερευόντων (secondary) συσσωρευτών. Η δυνατότητα τους να επαναφορτίζονται είναι αυτή που τους κάνει κατάλληλους για φωτοβολταϊκά συστήματα και ο πιο συνηθισμένος τύπος τους είναι οι μπαταρίες μολύβδου-οξειδίου.

4.2.1. Σχεδιαστική δομή και αρχή λειτουργίας συσσωρευτών.

Η κατασκευή των δευτερευόντων συσσωρευτών είναι μία βαριά βιομηχανική διαδικασία που περιλαμβάνει τη χρήση επικίνδυνων και τοξικών ουσιών. Η διαδικασία αυτή είναι συνήθως μαζική και συνδυάζει πλήθος σειριακών και παραλλήλων επεξεργασιών. Αν και η διαδικασία κατασκευής ποικίλει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή, ωστόσο ορισμένα χαρακτηριστικά είναι κοινά σε όλες σχεδόν τις μπαταρίες.



(Σχήμα 4.1) : Κυψελίδα συσσωρευτή

Δομική μονάδα του συσσωρευτή είναι η κυψελίδα (cell), και μία εποπτική παρουσίαση της μονάδας αυτής δίνεται στο σχήμα 4.1.

Η κυψελίδα είναι η βασική ηλεκτροχημική μονάδα της μπαταρίας, συνίσταται από μία θετική και μία αρνητική πλάκα που είναι βυθισμένες σε ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη και περικλείονται σε ένα δοχείο. Με τη βοήθεια του παραπάνω σχήματος θα γίνει μία περιγραφή των συστατικών μερών της κυψελίδας ώστε να γίνεται στη συνέχεια, πιο εύκολα και κατανοητά η αναφορά σε σχετικά θέματα.

Ενεργό Υλικό (Active Material): Το ενεργό υλικό είναι ένας συνδυασμός υλικών τα οποία από τη θετική και την αρνητική πλάκα, είναι οι βασικοί

συντελεστές της ηλεκτροχημικής αντίδρασης μέσα στην κυψελίδα. Η ποσότητα του ενεργού υλικού σε μία μπαταρία είναι ανάλογη της χωρητικότητας της. Σε μία τυπική μπαταρία μολύβδου, όπως είναι και η περίπτωση της μπαταρίας που χρησιμοποιούμε, το ενεργό υλικό είναι συνδυασμός διοξειδίου του μολύβδου (PbO_2) στη θετική πλάκα με μεταλλικό πορώδη μόλυβδο (Pb) στην αρνητική, που αντιδρούν σε διάλυμα θεικού οξέος (H_2SO_4) κατά τη λειτουργία της μπαταρίας.

Ηλεκτρολύτης: Ο ηλεκτρολύτης είναι το αγώγιμο μέσο που επιτρέπει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της ιοντικής ανταλλαγής ή της ανταλλαγής ηλεκτρονίων, επάνω στις πλάκες της κυψελίδας. Στις μπαταρίες μολύβδου είναι διάλυμα θεικού οξέος (H_2SO_4) σε υγρή μορφή ή σε μορφή gel, ενώ στις μπαταρίες νικελίου (Ni) είναι διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH). Σε περιπτώσεις σαν τη δική μας, που ο ηλεκτρολύτης είναι υγρό διάλυμα, συχνά, απαιτείται η αναπλήρωση νερού λόγω του φαινομένου της εξαέρωσης.

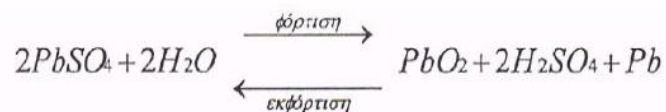
Πλέγμα (Grid): Σε μία μπαταρία μολύβδου, το πλέγμα συνήθως είναι ένα πλαίσιο από κράμα μολύβδου το οποίο υποστηρίζει το ενεργό υλικό επάνω στις πλάκες και είναι αγωγός ηλεκτρικού ρεύματος. Υλικά κράματος όπως το αντιμόνιο (Sb) ή το ασβέστιο (Ca) συχνά χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τη μηχανική αντοχή των πλακών και έχουν χαρακτηριστική επίδραση στις επιδόσεις της μπαταρίας. Οι συσσωρευτές του συστήματος έχουν μικρή πρόσμιξη αντιμονίου ($Sb < 3\%$) στα θετικά ηλεκτρόδια, με αποτέλεσμα να μπορούν να λειτουργούν διατηρούμενοι σε άριστη κατάσταση συνεχώς για 3 χρόνια σε παράλληλη, λειτουργία αναμονής όταν τις διαπερνάει ρεύμα 2,23 V/cell και βρίσκονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C.

Πλάκες (Plates): Οι πλάκες, που συνίστανται από το πλέγμα και από το ενεργό υλικό, είναι το βασικό στοιχείο της μπαταρίας και συνήθως αναφέρονται ως ηλεκτρόδια. Γενικά, υπάρχει ένα πλήθος αρνητικών και θετικών πλακών, συνδεδεμένων παράλληλα, μέσα σε μία κυψελίδα. Το πάχος τους και οι σχέσεις των επιφανειών μεταξύ των αρνητικών και των θετικών πλακών, έχουν καθοριστική επίδραση στα χαρακτηριστικά της μπαταρίας.

Διαχωριστής (Separator): Ο διαχωριστής είναι ένα πορώδες απομονωτικό μέσο μεταξύ των πλακών της μπαταρίας που εμποδίζει την αγωγή επαφή μεταξύ θετικού και αρνητικού ηλεκτροδίου. Σε πολλές περιπτώσεις ο διαχωριστής εφαρμόζεται σαν φάκελος και περικλείει ολόκληρο το ηλεκτρόδιο, εμποδίζοντας τη δημιουργία βραχυκυκλώματος, λόγω των διαχεόμενων υλικών στο κάτω μέρος των πλακών.

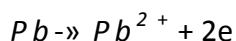
Πόλοι ή Τερματικοί Πόλοι (Terminal Poles): Οι πόλοι είναι οι εξωτερικές θετικές ή αρνητικές, ηλεκτρικές συνδέσεις της μπαταρίας. Ένα φορτίο ή ένα φωτοβολταϊκό σύστημα συνδέεται με τη μπαταρία μέσω των πόλων.

Ο τύπος των δευτερευόντων συσσωρευτών μπορεί να αναφέρεται ως Μολύβδου-Οξειδίου (lead-acid ή απλά Pb), Νικελίου-Καδμίου (Ni-Cd), Αργύρου-Ψευδαργύρου κτλ, ανάλογα με το υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων τους. Ειδικότερα, όσο αφορά τους συσσωρευτές μολύβδου, το κράμα του πλέγματος των ηλεκτροδίων τους, τους κατατάσσει σε υποκατηγορίες (Μολύβδου-Ασβεστίου Pb-Ca, Μολύβδου-Αντιμονίου Pb- Sb) και το κράμα αυτό μαζί με τον τρόπο κατασκευής του συσσωρευτή, καθορίζει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του και τις χρήσεις για τις οποίες αυτός προορίζεται. Σε όποιον τύπο και αν ανήκουν οι συσσωρευτές, ο μηχανισμός της λειτουργίας τους στηρίζεται σε μία αντιστρεπτή ηλεκτροχημική διαδικασία η οποία, για τους συσσωρευτές μολύβδου περιγράφεται από την αντίδραση (4.1):

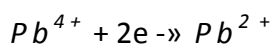


Οι κυψελίδες των συσσωρευτών Pb αποτελούνται από ζεύγη μονωμένων πλακών βυθισμένων στο ίδιο διάλυμα θειικού οξέος (H₂SO₄). Οι πλάκες του αφόρτιστου συσσωρευτή καλύπτονται από θειικό μόλυβδο PbSO₄ (ή ακριβέστερα Pb²⁺SO₄²⁻). Κατά το στάδιο της φόρτισης, διασπάται ο θειικός μόλυβδος και σχηματίζεται οξείδιο του μολύβδου PbO₂ (ή ακριβέστερα Pb⁴⁺O₂²⁻) στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων και μεταλλικός Pb στις πλάκες των αρνητικών. Αντίστροφα, κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή και κατά την τροφοδότηση των ηλεκτρικών

καταναλώσεων, ο Pb οξειδώνεται στις πλάκες των αρνητικών ηλεκτροδίων προς ιόντα Pb^{2+} και δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα



ενώ στις θετικές πλάκες ο Pb^{4+} ανάγεται προς Pb^{2+} , παίρνοντας ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα :



Τα προϊόντα των δύο αντιδράσεων, δηλαδή τα ιόντα Pb^{2+} ενώνονται με θειικά ιόντα (SO_4^{2-}) από το διάλυμα και επανασχηματίζουν θειικό μόλυβδο πάνω στις πλάκες. Έτσι, καταναλώνεται θειικό οξύ και αραιώνεται το διάλυμα στις κυψελίδες. Με τη διαδικασία της φόρτισης, τα θειικά ιόντα επιστρέφουν στο διάλυμα και η περιεκτικότητά του αποκαθίσταται στην κανονική τιμή.

Ένας συσσωρευτής αποτελείται από μία συνάθροιση κυψελίδων και η ονομαστική του τάση είναι το άθροισμα των ονομαστικών τάσεων των κυψελίδων του. Έτσι, ο συσσωρευτής που χρησιμοποιούμε, με ονομαστική τιμή 60Volt αποτελείται από 30 κυψελίδες ονομαστικής τιμής 2Volt η καθεμία.

4.2.2. Τύποι συσσωρευτών.

Έχει ήδη αναφερθεί ότι τα υλικά του κράματος στο πλέγμα των πλακών κατηγοριοποιούν τους συσσωρευτές μολύβδου και νικελίου σε υποκατηγορίες. Αυτοί οι συνδυασμοί, μαζί με άλλα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών, καθορίζουν τις ιδιαιτερότητες των επιδόσεων τους και τις εφαρμογές για τις οποίες είναι περισσότερο κατάλληλοι. Γνωστοί και ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι συσσωρευτών μολύβδου είναι:

Οι συσσωρευτές μολύβδου-αντιμονίου (Pb-Sb), οι συσσωρευτές μολύβδου-ασβεστίου (Pb-Ca) οι οποίοι χωρίζονται σε υγρού καταλύτη με ανοικτή ή με σφραγισμένη βαλβίδα εξαέρωσης, οι υβριδικοί συσσωρευτές μολύβδου-αντιμονίου / μολύβδου-ασβεστίου, οι μολύβδου με δεσμευμένο καταλύτη που μπορεί να είναι gelled ή Absorbed Glass Material (AGM).

Για εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων, όπου οι ανάγκες κατανάλωσης πολύ σπάνια συμβαδίζουν με τις ώρες παραγωγής και την παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, περισσότερο κατάλληλοι είναι οι συσσωρευτές που έχουν τη δυνατότητα να υποστούν βαθιά εκφόρτιση χωρίς να αλλοιώνεται η χωρητικότητα τους και να μειώνεται η διάρκεια ζωής. Αναλόγως του φορτίου, άλλοτε είναι απαραίτητη η δυνατότητα παροχής εντόνου ρεύματος για μικρά χρονικά διαστήματα και άλλοτε η παροχή μίας κανονικής τιμής ρεύματος για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Συχνά οι απαιτήσεις του φορτίου σε κατανάλωση δεν είναι τόσο μεγάλες όσο η ανάγκη η κατανάλωση να παρέχεται με αξιοπιστία και για μεγάλες χρονικές περιόδους και άλλες φορές ο τόπος της εγκατάστασης είναι τόσο δυσπρόσιτος που προτιμώνται συσσωρευτές με μικρές ανάγκες συντήρησης και επίβλεψης.

Ιδιαίτερα για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπου δεν υπάρχει εναλλακτική λύση παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και όπου οι μεταβολές της ηλιοφάνειας μπορούν να είναι έντονες και μακρόχρονες, απαραίτητοι είναι οι συσσωρευτές που έχουν μεγάλη χωρητικότητα, μπορούν να υποστούν βαθιά εκφόρτιση και συχνά απαιτείται μία καλή σχέση κόστους και διάρκειας ζωής. Για ένα τέτοιο σύστημα, καλή επιλογή θα αποτελούσε ένας συσσωρευτής μολύβδου-αντιμονίου (Pb-Sd). Αυτοί είναι συσσωρευτές με εξαιρετικά χαρακτηριστικά, όσο αφορά τις δυνατότητες βαθιάς εκφόρτισης και υψηλού ρυθμού εκφόρτισης. Έχουν, επίσης, μεγάλη διάρκεια ζωής και υφίστανται μικρή διάχυση των ενεργών υλικών τους. Μειονέκτημα τους είναι ο μεγάλος βαθμός αυτοεκφόρτισης που υφίστανται και που οδηγεί στην ανάγκη να υπερφορτίζονται με αποτέλεσμα τη μεγάλη απώλεια υγρών που εξαρτάται και από τις θερμοκρασίες λειτουργίας. Είναι συνήθως συσσωρευτές υγρού ηλεκτρολύτη, με ανοικτή βαλβίδα εξαερισμού και για τον λόγο αυτό απαιτείται συχνή αναπλήρωση των υγρών. Η κατάσταση τους μπορεί εύκολα να ελεγχθεί μετρώντας την ειδική πυκνότητα του ηλεκτρολύτη.

Πολύ δημοφιλής επιλογή για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι οι συσσωρευτές μολύβδου δεσμευμένου ηλεκτρολύτη (Captive Electrolyte Lead-Acid Batteries), λόγω της στεγανότητας τους και της ευκολίας μετακίνησης που παρουσιάζουν. Έχουν βαλβίδα εξαέρωσης, που ανοίγει σε ορισμένη πίεση όταν

υπερφορτιστούν, για να απελευθερωθούν τα αέρια που δημιουργήθηκαν όμως, δεν υπάρχει δυνατότητα αναπλήρωσης του ηλεκτρολύτη. Το γεγονός ότι δεν έχουν απαιτήσεις συντήρησης (ούτε και δυνατότητα), σε συνδυασμό με την ευκολία στη μετακίνηση, τις καθιστά ιδανικές για συστήματα σε απομακρυσμένα ή δυσπρόσιτα μέρη. Εκτός από το πρόβλημα της υπερφόρτισης, η απώλεια ηλεκτρολύτη μπορεί να επιταχυνθεί λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα της αναπλήρωσης του, ειδικά μέτρα πρέπει να ληφθούν. Είναι δυνατόν να γίνει θερμοκρασιακή αντιστάθμιση και ρύθμιση ακριβείας ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτιση και η υπερβολική εκφόρτιση και μέσω του περιορισμού του φορτίου να αποφευχθεί ο μεγάλος ρυθμός εκφόρτισης. Έτσι μειώνεται σημαντικά η απώλεια ηλεκτρολύτη και αυξάνεται αντιστοίχως η διάρκεια ζωής. Μέσω του αλγορίθμου φόρτισης αντιμετωπίζεται η ευαισθησία που παρουσιάζουν οι συσσωρευτές αυτοί στη διαδικασία φόρτισης. Οι συσσωρευτές μολύβδου δεσμευμένου ηλεκτρολύτη δεν αντιμετωπίζουν τόσο μεγάλο πρόβλημα μείωσης χωρητικότητας σε ψυχρότερο περιβάλλον όσο αυτοί του υγρού ηλεκτρολύτη, παρέχονται σε δύο τύπους (gelled electrolyte, AGM) και πάνω από τα μισά απομακρυσμένα μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα τους χρησιμοποιούν.

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι εκτός από τα υλικά του κράματος στο πλέγμα των ηλεκτροδίων, άλλα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών, όπως ο τρόπος κατασκευής τους ή οι σχετικές διαστάσεις, ο αριθμός και η γεωμετρία των πλακών τους, μπορούν να τους κατατάξουν σε ειδικότερες κατηγορίες. Για παράδειγμα, συσσωρευτές μολύβδου με θετικές πλάκες μεγαλύτερης επιφάνειας από αυτή των αρνητικών, αναφέρονται με το συνοδευτικό σύμβολο GroEH, ενώ για οπλισμένα θετικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιείται το συνοδευτικό OrzS, το οποίο είναι και η περίπτωση του φωτοβολταϊκού που χρησιμοποιούμε. Έτσι, το συνοδευτικό 5OrzS, υποδεικνύει κυψελίδα με 5 θετικές πλάκες, τύπου OrzS.

4.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ, ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

Η δυνατότητα αποταμίευσης ενέργειας, οι περιορισμοί στο ρεύμα που μπορεί να παρασχεθεί προς κατανάλωση από έναν συσσωρευτή, η συμπεριφορά του σε

σχέση με τη θερμοκρασία και τα όρια γενικότερα της λειτουργίας του, θα είναι το θέμα των επόμενων παραγράφων.

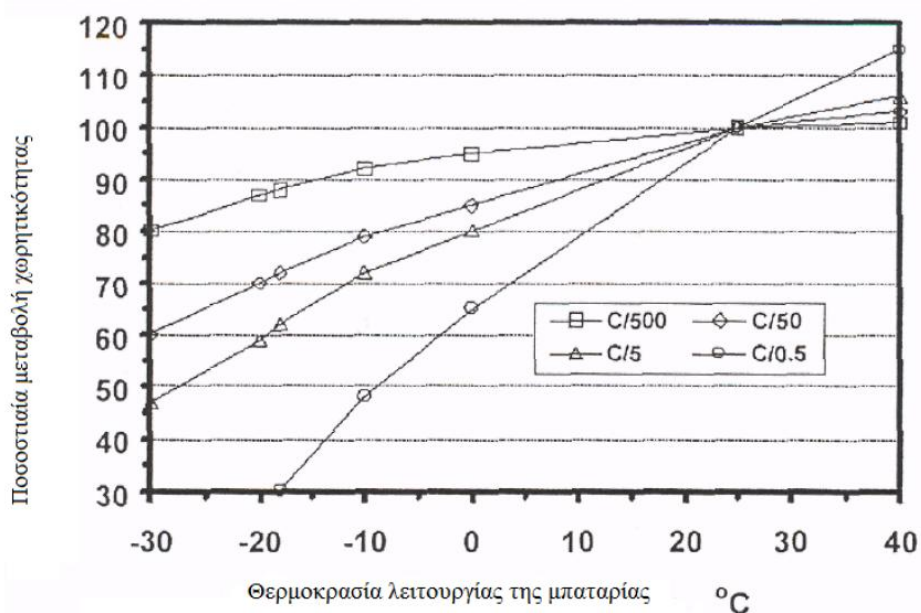
4.3.1. Χωρητικότητα

Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα συσσωρευτή ή που μπορεί να αποδοθεί από αυτόν, είναι η χωρητικότητα C του συσσωρευτή. Η χωρητικότητα συνήθως καθορίζεται για ένα συγκεκριμένο ρυθμό εκφόρτισης ή περίοδο εκφόρτισης. Εξαρτάται από αρκετούς σχεδιαστικούς παράγοντες, στους οποίους συμπεριλαμβάνονται η ειδική πυκνότητα του ηλεκτρολύτη, η ποσότητα του ενεργού υλικού, ο αριθμός, ο σχεδιασμός και οι φυσικές διαστάσεις των πλακών (ηλεκτροδίων). Λειτουργικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη χωρητικότητα είναι ο ρυθμός εκφόρτισης, το βάθος της εκφόρτισης (ποσοστό της συνολικής χωρητικότητας που αποδόθηκε από τη μπαταρία), η τάση της μπαταρίας στο τέλος της εκφόρτισης (τάση αποκοπής), η θερμοκρασία, η ηλικία της μπαταρίας και το ιστορικό της χρήσης της (κακή χρήση κτλ). Η συνήθης μονάδα έκφρασης της χωρητικότητας του συσσωρευτή είναι το Amber-hour (Ah) και ο ρυθμός εκφόρτισης εκφράζεται ως το κλάσμα της χωρητικότητας C προς τη διάρκεια της περιόδου εκφόρτισης σε ώρες (π.χ. εκφόρτιση σε 120 ώρες ισοδυναμεί με ρυθμό εκφόρτισης C/120). Φυσικά, η μονάδα του ρυθμού εκφόρτισης είναι το Amber. Έτσι, μία μπαταρία με χωρητικότητα C—375 Ah ορισμένη σε ρυθμό εκφόρτισης C/120, δηλαδή 375A, μπορεί να αποδίδει 375A για χρονικό διάστημα 120 ωρών (η χωρητικότητα ορισμένη για ρεύμα εκφόρτισης 375A μπορεί να αναφέρεται και ως K375). Μερικές φορές η χωρητικότητα σε αποθηκευμένη ενέργεια του συσσωρευτή, εκφράζεται σε Kilowatt-hour (KWh) και υπολογίζεται προσεγγιστικά πολλαπλασιάζοντας τη χωρητικότητα σε Ah με την ονομαστική τάση του συσσωρευτή και διαιρώντας με 1000. Για παράδειγμα, συσσωρευτής 12 V, 100Ah, έχει χωρητικότητα σε αποθηκευμένη ενέργεια $12 \cdot 100 / 1000 = 1.2 \text{KWh}$. Ο υπολογισμός της απαιτούμενης χωρητικότητας, είναι ένας καθοριστικός παράγοντας στην επιλογή του αριθμού των κυψελίδων και του τύπου του συσσωρευτή. Δεδομένου του μέγιστου ρεύματος που μπορεί ένα φορτίο να καταναλώσει και του χρονικού διαστήματος που το φορτίο μπορεί να εξαρτάται αποκλειστικά από τον συσσωρευτή (δηλαδή την αυτονομία του), η χωρητικότητα

που απαιτείται πρέπει να είναι ορισμένη για ρυθμό εκφόρτισης τουλάχιστον ίσο με το μέγιστο ρεύμα κατανάλωσης ή για χρόνο εκφόρτισης τουλάχιστον ίσο με τον χρόνο που το φορτίο θα καταναλώνει αποκλειστικά από τον συσσωρευτή. Σημαντικός παράγοντας επιλογής της χωρητικότητας είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του συσσωρευτή καθώς οι επιδράσεις της μπορεί να είναι σημαντικές. Ειδικότερα για συσσωρευτές μολύβδου, η θερμοκρασία λειτουργίας μεταβάλλει έντονα τη χωρητικότητα τους. Η αύξηση της θερμοκρασίας, έχει αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας, ενώ για λειτουργία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες μειώνεται. Όταν η θερμοκρασία λειτουργίας πέσει σημαντικά, η ιδέα της προσέγγισης της αρχικής χωρητικότητας μέσω εσκεμμένης υπερφόρτισης πρέπει να εγκαταλειφθεί, αφού υπάρχει κίνδυνος εξαέρωσης. Η ποσοστιαία μεταβολή της χωρητικότητας ορισμένης για χρόνους εκφόρτισης 500, 50, 5 και 0.5 ώρες σε σχέση με την θερμοκρασία λειτουργίας για συσσωρευτές μολύβδου φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα (σχήμα 4.2).

Σε χαμηλές θερμοκρασίες, μέτρα πρέπει να λαμβάνονται για τη φόρτιση ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα εξαέρωσης του ηλεκτρολύτη και για την εκφόρτιση που πρέπει να είναι περιορισμένη.

Άλλο μέτρο της χωρητικότητας του συσσωρευτή είναι η κατάσταση φόρτισης (state of charge ή SOC), που ορίζεται σαν το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας και εκφράζεται ως το ποσοστό της ενέργειας ενός πλήρως φορτισμένου συσσωρευτή. Έτσι, ένας συσσωρευτής του οποίου τα % της ενέργειας του έχουν αφαιρεθεί, δηλαδή έχει εκφορτιστεί κατά 75%, λέγεται ότι βρίσκεται στο 25% SOC. Μία μέθοδος μέσω της οποίας μπορεί να εκτιμηθεί το SOC του συσσωρευτή είναι η μέτρηση του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη. Αυτή ορίζεται ως το κλάσμα της πυκνότητας του διαλύματος του ηλεκτρολύτη προς την πυκνότητα του καθαρού νερού. Σε έναν πλήρως φορτισμένο συσσωρευτή μολύβδου, η περιεκτικότητα σε θειικό οξύ (H_2SO_4) είναι 36% κατά βάρος ή 25% κατ' όγκο και το ειδικό βάρος του διαλύματος είναι περίπου 1.25 στους 27°C. Καθώς ο συσσωρευτής εκφορτίζεται το ειδικό βάρος του διαλύματος του μειώνεται και επανέρχεται όταν επαναφορτίζεται.



(Σχήμα 4.2): Επί τις εκατό ποσοστιαία μεταβολή της χωρητικότητας για συσσωρευτές μολύβδου, συναρτήσεως της θερμοκρασίας λειτουργίας.

4.3.2. Εκφόρτιση και επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης.

Το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης (depth of discharge ή DOD) είναι το μέγιστο ποσοστό της χωρητικότητας το οποίο μπορεί να αποδοθεί από τη μπαταρία. Συνήθως καταδεικνύεται από την τάση αποκοπής ή τάση βάθους εκφόρτισης και από τον ρυθμό εκφόρτισης. Στα τυπικά φωτοβολταϊκά συστήματα, προβλέπεται μία τάση αποκοπής του φορτίου από τη συσκευή του ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών και έτσι καθορίζεται το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης για δεδομένο ρυθμό εκφόρτισης. Οι τιμές του επιτρεπόμενου DOD μπορούν να είναι από 80% έως και 15% της χωρητικότητας ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας μειώνεται η πυκνότητα του διαλύματος του ηλεκτρολύτη, δηλαδή μειώνεται το ειδικό του βάρος. Το φαινόμενο της μείωσης του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη για λειτουργία του συσσωρευτή σε θερμοκρασίες που πλησιάζουν τη θερμοκρασία στερεοποίησης του νερού (0°C). Σε έναν πλήρως φορτισμένο συσσωρευτή μολύβδου, η συγκέντρωση

ηλεκτρολύτη στο διάλυμα είναι περίπου 35% κατά βάρος και το σημείο στερεοποίησης του διαλύματος είναι πολύ χαμηλό (περίπου -60°C). Καθώς ο συσσωρευτής εκφορτίζεται, το διάλυμα του ηλεκτρολύτη αραιώνεται και το σημείο στερεοποίησης του διαλύματος πλησιάζει το σημείο στερεοποίησης του νερού (0°C). Υπάρχει λοιπόν το ενδεχόμενο της στερεοποίησης του με αποτέλεσμα τη διαστολή και την πιθανή διάρρηξη των τοιχωμάτων του δοχείου της κυψελίδας. Για να αποφευχθεί αυτή η εξέλιξη, το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης πρέπει να μειώνεται θέτοντας την τάση αποκοπής του φορτίου στην συσκευή ρυθμιστή φόρτισης σε κατάλληλο σημείο. Το αποτέλεσμα θα είναι ο συσσωρευτής να μην εκφορτίζεται πλήρως και η θερμοκρασία στερεοποίησης να διατηρείται χαμηλά. Το κόστος θα είναι η μείωση της αυτονομίας του συστήματος μπαταρίας-συσσωρευτή.

Για να διατηρείται η αυτονομία, η χωρητικότητα του συσσωρευτή πρέπει να επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη, τόσο τη μείωση της σε χαμηλές θερμοκρασίες όσο και το DOD στις θερμοκρασίες αυτές. Η τάση του βάθους εκφόρτισης σχετίζεται με τον ρυθμό εκφόρτισης για τον οποίο είναι καθορισμένη η χωρητικότητα.

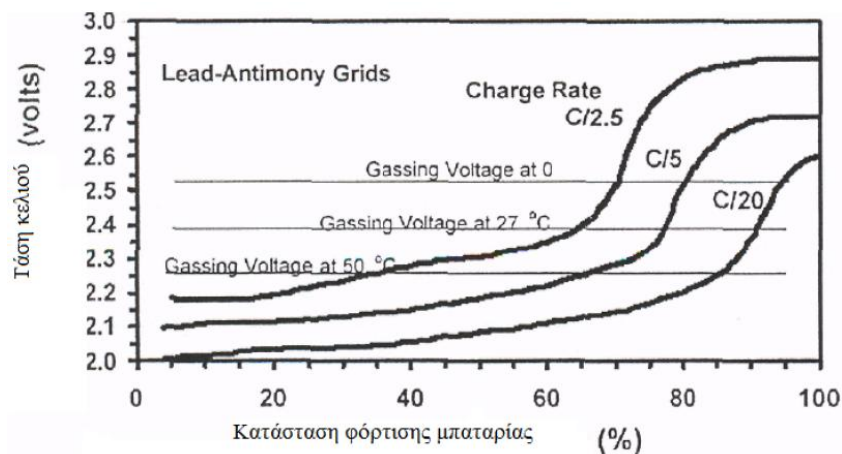
4.3.3 Αυτοεκφόρτιση

Η αυτοεκφόρτιση είναι η διαδικασία κατά την οποία ο συσσωρευτής υφίσταται μείωση του SOC (state of charge), χωρίς να είναι συνδεδεμένος με κάποια κατανάλωση. Τα αιτία είναι οι εσωτερικοί χημικοί μηχανισμοί ή άλλες απώλειες της μπαταρίας και σημαντικοί παράγοντες στη διαδικασία της αυτοεκφόρτισης είναι τα ενεργά υλικά και τα στοιχεία του κράματος του πλέγματος που επιλέχθηκαν κατά τον σχεδιασμό του συσσωρευτή. Τυπικό μέγεθος αυτοεκφόρτισης είναι η απώλεια του 0.7% του SOC ανά ημέρα και για τον λόγο αυτό, οι συσσωρευτές πρέπει να βρίσκονται σε συνθήκες συντηρητικής φόρτισης ακόμα και αν δεν υπάρχει κατανάλωση.

4.3.4 Φόρτιση

Η φόρτιση του συσσωρευτή είναι η διαδικασία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος προς τον συσσωρευτή. Οι μέθοδοι φόρτισης που εφαρμόζονται από τους ρυθμιστές φόρτισης στα φωτοβολταϊκά συστήματα, διαφέρουν γενικά από αυτές που εφαρμόζουν οι κατασκευαστές για να καθορίσουν τις επιδόσεις της μπαταρίας.

Οι προδιαγραφές δεν περιορίζουν κατά κανόνα το ρεύμα φόρτισης του συσσωρευτή εφόσον δεν γίνει υπέρβαση της τάσης εκλύσεως αερίων. Ωστόσο, η τάση εκλύσεως αερίων γίνεται μικρότερη καθώς το ρεύμα φόρτισης γίνεται μεγαλύτερο. Γενικά η έκλυση αερίων είναι αναπόφευκτη αφού συμβαίνει τόσο κατά τη διάρκεια της φόρτισης όσο και μετά την υπέρβαση της τάσης εκλύσεως αερίων. Για σωστή φόρτιση του συσσωρευτή ένα σωστό σημείο ισορροπίας πρέπει να αναζητείται μεταξύ της μέγιστης δυνατής φόρτισης και της τάσης εκλύσεως αερίων, αφού και οι δύο είναι παράγοντες που σχετίζονται με τη διάρκεια ζωής του συσσωρευτή. Άλλος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για το επιδιωκόμενο SOC είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του συσσωρευτή. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται η χωρητικότητα του συσσωρευτή, μειώνεται όμως η τάση εκλύσεως αερίων. Έτσι, το μέγιστο SOC που μπορεί να επιτευχθεί σε δεδομένη θερμοκρασία, κατά κάποιο τρόπο φράσσεται από την τάση εκλύσεως αερίων. Στο διάγραμμα του σχήματος 4.3 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η σχέση της τάσης ανά κυψελίδα και του SOC που μπορεί να επιτευχθεί με τρεις διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης (C/2.5, C/5, C/20) καθώς και οι τάσεις εκλύσεως αερίων σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας για συσσωρευτή μολύβδου-αντιμονίου (Pb-Sb).



(Σχήμα 4.3): Διάγραμμα τάσης κελιού - SOC και επίπεδα τάσης εκλύσεως αερίων για συσσωρευτή Pb-Sb.

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται προφανής η ανάγκη αντιστάθμισης ως προς τη θερμοκρασία λειτουργίας του συσσωρευτή και της κατάστασης πλήρους φόρτισης. Η μείωση της εκλύσεως αερίων για συσσωρευτές δεσμευμένου ηλεκτρολύτη είναι σημαντική και είναι αυτή που καθορίζει τη διάρκεια ζωής τους.

4.3.5. Συντελεστής φόρτισης και απόδοση ισχύος.

Τα αμπερώρια (Ah) που είναι απαραίτητα για τη φόρτιση ενός συσσωρευτή και την αύξηση του SOC κατά ένα συγκεκριμένο ποσοστό είναι, κατά κανόνα, περισσότερα από τα Ah που αποδίδει όταν εκφορτιστεί κατά το ίδιο ποσοστό του SOC. Έτσι, ορίζεται ο συντελεστής φόρτισης ως το κλάσμα της εισερχόμενης ποσότητας Ah προς την εξερχόμενη ποσότητα Ah, δηλαδή ισχύει:

$$\text{Συντελεστής φόρτισης} = \frac{\text{εισερχόμενη ποσότητα Ah}}{\text{εξερχόμενη ποσότητα Ah}}$$

Αντίστοιχα, ο λόγος της ισχύος που δίνει ένας πλήρως φορτισμένος συντελεστής προς την ενέργεια που απαιτείται για να φορτιστεί πλήρως ονομάζεται απόδοση ισχύος.

$$\text{Απόδοση} = \text{Εξερχόμενη ενέργεια(KW)}/\text{Εισερχόμενη ενέργεια(KW)}$$

4.3.6. Έκλυση ατμών, δημιουργία κρυστάλλων και διάβρωση στους συσσωρευτές μολύβδου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η υπερβολική φόρτιση και το αυξημένο ρεύμα φόρτισης των συσσωρευτών οδηγεί σε έκλυση αερίων. Το φαινόμενο αφορά στον σχηματισμό αερίου οξυγόνου (O₂) στις θετικές πλάκες και αερίου υδρογόνου (H₂) στις αρνητικές. Γενικά, αυτό το εκρηκτικό αέριο μίγμα ελευθερώνεται μέσω των βαλβίδων εξαερισμού και οδηγεί στην απώλεια νερού. Σε συσσωρευτές δεσμευμένου ηλεκτρολύτη, ένας εσωτερικός μηχανισμός επιτρέπει τον επανασχηματισμό νερού από το αέριο μίγμα για την αποκατάσταση του διαλύματος του ηλεκτρολύτη. Ωστόσο, αν η πίεση των ατμών αυξηθεί ιδιαίτερα, αυτοί απελευθερώνονται στον αέρα μέσω των βαλβίδων ασφαλείας, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα αναπλήρωσης του χαμένου νερού. Για φωτοβολταϊκά συστήματα που χρησιμοποιούν τέτοιους συσσωρευτές, είναι ανάγκη να γίνεται προσεκτική ρύθμιση στην επιλογή της τάσης πλήρους φόρτισης και στον ρυθμό φόρτισης των συσσωρευτών για να διατηρηθεί η διάρκεια ζωής τους.

Σε κάποιους συσσωρευτές συχνά επιδιώκεται η έκλυση ατμών. Πρόκειται για τους συσσωρευτές υγρού καταλύτη με ανοικτή βαλβίδα εξαερισμού και η αιτία έχει σχέση με τη δημιουργία βαρέως θεικού οξέως, το οποίο σχηματίζεται στις πλάκες και επικάθεται στο πάτο του δοχείου. Με την πάροδο του χρόνου ο ηλεκτρολύτης επικάθεται και δημιουργείται μεγαλύτερη συγκέντρωση στο κάτω μέρος των κυψελίδων, με αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη λειτουργία και τη σταδιακή διάβρωση του πλέγματος που οδηγεί στη συντόμευση της ζωής του συσσωρευτή. Η δημιουργία ατμών, σε τέτοιους συσσωρευτές, έχει αποτέλεσμα την ανάδευση του διαλύματος και αποτελεί μία μέθοδο συντήρησης. Κατά κανόνα, η έκλυση ατμών πρέπει να περιορίζεται ιδιαίτερα αν οι συσσωρευτές βρίσκονται κοντά σε χώρους εργασίας.

Αν ο συσσωρευτής βρεθεί για παρατεταμένο χρονικό διάστημα σε κατάσταση μερικής φόρτισης, κρύσταλλοι θεικού μολύβδου αναπτύσσονται επάνω στην επιφάνεια των θετικών πλακών. Οι κρύσταλλοι με την πάροδο του χρόνου

αυξάνονται, μειώνοντας την ποσότητα του ενεργού υλικού που συμμετέχει στην αντίδραση και την ενεργή επιφάνεια των πλακών με αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας του συσσωρευτή. Αν οι κρύσταλλοι γίνουν πολύ μεγάλοι μπορούν να προκαλέσουν μη αναστρέψιμες μηχανικές βλάβες στο πλέγμα των πλακών. Αυτό είναι ένα συνηθισμένο πρόβλημα στα φωτοβολταϊκά συστήματα όπου οι συσσωρευτές, λόγω καιρικών συγκυριών, μπορούν να βρεθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα σε κατάσταση μερικής φόρτισης και για τον λόγο αυτό απαιτείται εφαρμογή ρεύματος εξισορρόπησης για συντήρηση. Γενικότερα, το πλέγμα μπορεί να υποστεί διάβρωση για πολλούς λόγους όπως η οξείδωση και συχνά η αντοχή του είναι αυτή που υποδεικνύει την διάρκεια ζωής του συσσωρευτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

5.1 ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η κατάλληλη λύση για κάποιον ο οποίος είτε για προσωπικούς λόγους θέλει να επωφεληθεί από την άπλετη και δωρεάν ενέργεια του ήλιου ως επιλογή, είτε βρίσκεται πολύ μακριά από το δίκτυο της ΔΕΗ ως ανάγκη. Έτσι δεν συνδέονται στο δίκτυο της ΔΕΗ και δεν επιβαρύνουν τον ιδιοκτήτη με πάγια κόστη ή πτώσεις τάσεων του παροχέα. Κατά αυτήν την έννοια δεν επιδοτούνται και δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως επαγγελματικά ή επενδυτικά συστήματα.

Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται ένα αυτόνομο φ/β σύστημα είναι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, η μπαταρία, ο ρυθμιστής τάσης, ο μετατροπέας (inverter) και ο καταναλωτής. Στην εικόνα που ακολουθεί περιγράφονται τα βασικά μέρη ενός

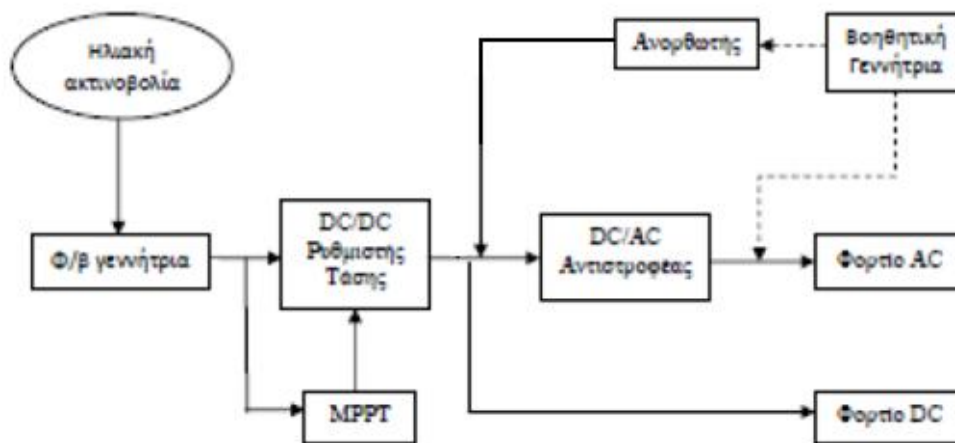
τέτοιου συστήματος. Αναλυτική περιγραφή του συστήματος θα γίνει στο 6^ο κεφάλαιο.



Σχήμα5.1: αυτόνομο φ/β σύστημα

5.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ (DC/DC CONVERTER)

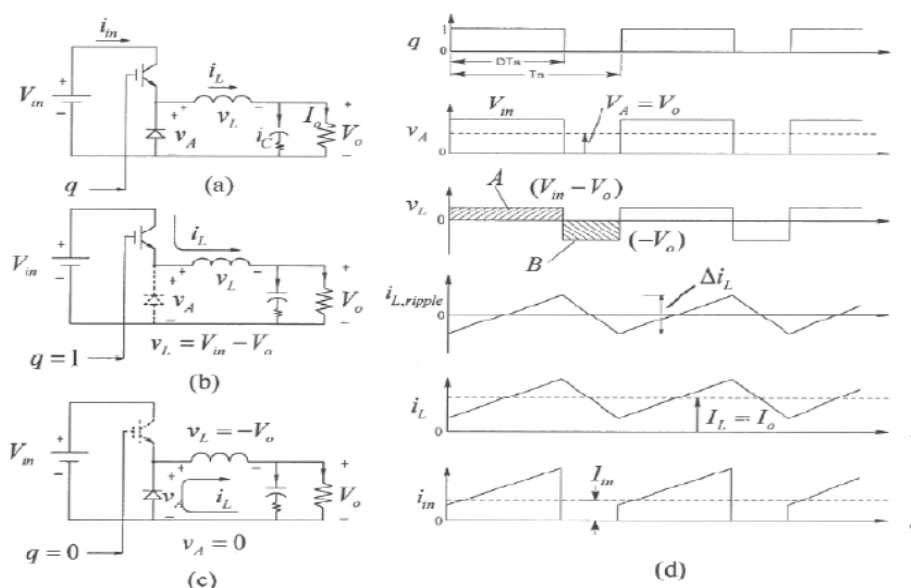
Σε ένα φ/β σύστημα η παραγόμενη τάση από τα φ/β στοιχεία δεν έχει σταθερή τιμή, αλλά μεταβάλλεται γύρω από μια μέση τιμή. Για να σταθεροποιηθεί η τάση εξόδου της φ/β γεννήτριας και να καταστεί κατάλληλη για την είσοδό της στον αντιστροφέα χρησιμοποιούνται μετατροπείς συνεχούς ρεύματος. Οι μετατροπείς μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με το αν η τάση εξόδου που βγάζουν είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση εισόδου και ακόμα ανάλογα με την περιοχή.



Σχήμα (5.2): Απλοποιημένο διάγραμμα φ/β συστήματος . Εάν χρησιμοποιηθεί μια βοηθητική πηγή ενέργειας, όπως φαίνεται στο σχήμα με την διακεκομμένη γραμμή, τότε το σύστημα καλείται υβριδικό φ/β σύστημα.

Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά τη μόνιμη κατάσταση των μετατροπών και τα στοιχεία θεωρούνται ιδανικά.

Μετατροπέας Υποβιβασμού (Step-Down Converter ή Buck Converter)



(Σχήμα 5.3):(α) Κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού, (β) Διακόπτης κλειστός, (γ) Διακόπτης ανοιχτός, (δ) Κυματομορφές για συνεχόμενο ρεύμα εξόδου

Το κύκλωμα ενός μετατροπέα υποβιβασμού φαίνεται στο σχήμα 5.3(a). Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η διόδος πολώνεται ανάστροφα και η είσοδος παρέχει ενέργεια τόσο στο φορτίο όσο και στο πηνίο (Σχήμα 5.3(b)). Όταν ο διακόπτης ανοίξει, το ρεύμα του πηνίου ρέει μέσω της διόδου προς το φορτίο, μεταφέροντας έτσι μέρος της αποθηκευμένης του ενέργειας προς αυτό (Σχήμα 5.3(c)).

Ο μετατροπέας αυτός δέχεται στην είσοδό του μια συνεχή τάση V_{in} και δίνει στην έξοδό του συνεχή τάση μικρότερης τιμής V_o . Η μέση τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_o = V_a = D V_{in} \quad (5.1)$$

όπου το D δείχνει τη σχετική διάρκεια αγωγής του διακόπτη και δίνεται από τη σχέση:

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (5.2)$$

όπου t_{on} η διάρκεια κατά την οποία άγει ο διακόπτης για μια περίοδο, t_{off} η διάρκεια κατά την οποία δεν άγει και T_s η περίοδος. Η μέση τιμή της τάσης εξόδου V_o προκύπτει ίση με την τάση στα άκρα της διόδου V_a , καθώς η μέση τιμή της τάσης του πηνίου για χρόνο μιας περιόδου είναι μηδέν. Το ρεύμα εξόδου μπορεί να είναι είτε συνεχές είτε διακοπτόμενο, γεγονός που εξαρτάται από το φορτίο και τη χρονική διάρκεια t_{on} . Οι κυματομορφές για την κατάσταση συνεχούς ρεύματος εξόδου (Continuous Conduction Mode -CCM) φαίνονται στο σχήμα 5.3(d), ενώ η κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος εξόδου φαίνεται στο σχήμα 5.4 (Discontinuous Conduction Mode - DCM). Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τη γραφική παράσταση του σχήματος 5.4(b), υπάρχει μια κρίσιμη μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου, κάτω από την οποία το ρεύμα γίνεται ασυνεχές. Η μέση τιμή αυτή δίνεται από τη σχέση (5.3):

$$I_{L,crit,Buck} = \frac{V_{in}}{2Lf_s} D(1-D)$$

Τέλος επειδή τόσο η τάση όσο και το ρεύμα είναι θετικά κατά τη λειτουργία του μετατροπέα, για αυτό και ονομάζεται μετατροπέας πρώτου τεταρτημορίου.

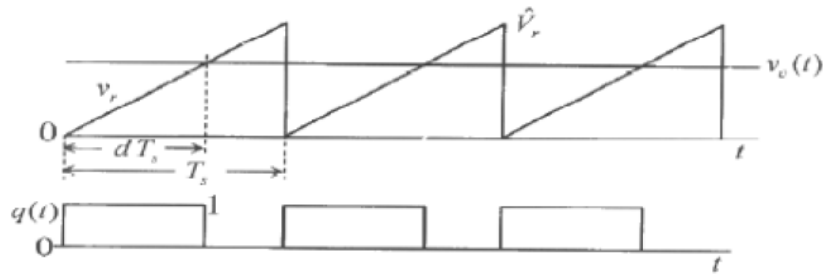
5.2.1 Έλεγχος με την τεχνική PWM

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου μπορεί να ρυθμιστεί με τη μέθοδο της διαμόρφωσης πλάτους (PWM). Όπως φαίνεται και από τη σχέση 5.1, η τάση αυτή εξαρτάται από το χρόνο τον οποίο άγει ο διακόπτης σε χρόνο μιας περιόδου. Σύμφωνα με την τεχνική της PWM, η μέση τιμή της τάσης εξόδου ελέγχεται ρυθμίζοντας τη σχετική διάρκεια αγωγής του διακοπτικού στοιχείου. Η περίοδος καθώς και η συχνότητα μετάβασης του διακόπτη είναι σταθερά, ενώ αυτό που μεταβάλλεται είναι η σχετική διάρκεια αγωγής αυτού, δηλαδή ο λόγος D.

Η τάση εξόδου του μετατροπέα μετράται και συγκρίνεται με την επιθυμητή τάση και έπειτα το σήμα λάθους ενισχύεται από έναν ενισχυτή, του οποίου η έξοδος είναι το σήμα ελέγχου $v_c(t)$. Έπειτα το σήμα ελέγχου $v_c(t)$ συγκρίνεται με μια πριονωτή τάση $v_r(t)$ η οποία έχει πλάτος V_r και σταθερή συχνότητα f_s . Παράγεται έτσι το διακοπτικό σήμα το οποίο έχει τιμή 1 όταν $v_c(t) > v_r(t)$, και 0 όταν $v_c(t) < v_r(t)$ (Σχήμα 5.4). Έτσι η σχετική διάρκεια αγωγής μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των δύο αυτών τάσεων ως εξής:

$$D = V_c / V_r$$

Με αυτόν τον τρόπο το σήμα ελέγχου που μπορεί να κυμαίνεται από 0 μέχρι V_r , και να ελέγχει γραμμικά και δυναμικά τον λόγο D.



(Σχήμα 5.4): Μέθοδος PWM

5.3 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ-MAXIMUM POWER POINT TRACKERS

MPPT

Η τεχνολογία της ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος, άρχισε να χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα στις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών και αποτελεί πλέον χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο ή φορτιστή συσσωρευτών. Σήμερα χρησιμοποιούνται πολυάριθμες τεχνικές και αλγόριθμοι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος. Όλες αυτές οι τεχνικές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες.

5.3.1 Έμμεσοι ανιχνευτές MPP

Αυτοί οι ανιχνευτές προσεγγίζουν το σημείο μέγιστης λειτουργίας με βάση απλές υποθέσεις και έμμεσες μετρήσεις. Σύμφωνα με μία μέθοδο η τάση λειτουργίας ρυθμίζεται ανάλογα με την εποχή του χρόνου. Μεγαλύτερες τιμές τάσης στο σημείο μέγιστης λειτουργίας αναμένονται τον χειμώνα, όπου οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές, ενώ το καλοκαίρι οι τιμές της τάσης είναι σαφώς μικρότερες. Μια άλλη μέθοδος ρυθμίζει την τάση ανάλογα με την θερμοκρασία που αναπτύσσει το πλαίσιο. Τέλος μια τρίτη κάνει χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία ο λόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς την τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός, δηλαδή:

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο τοποθετείται δίπλα από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες για να μετράται συνεχώς η τάση

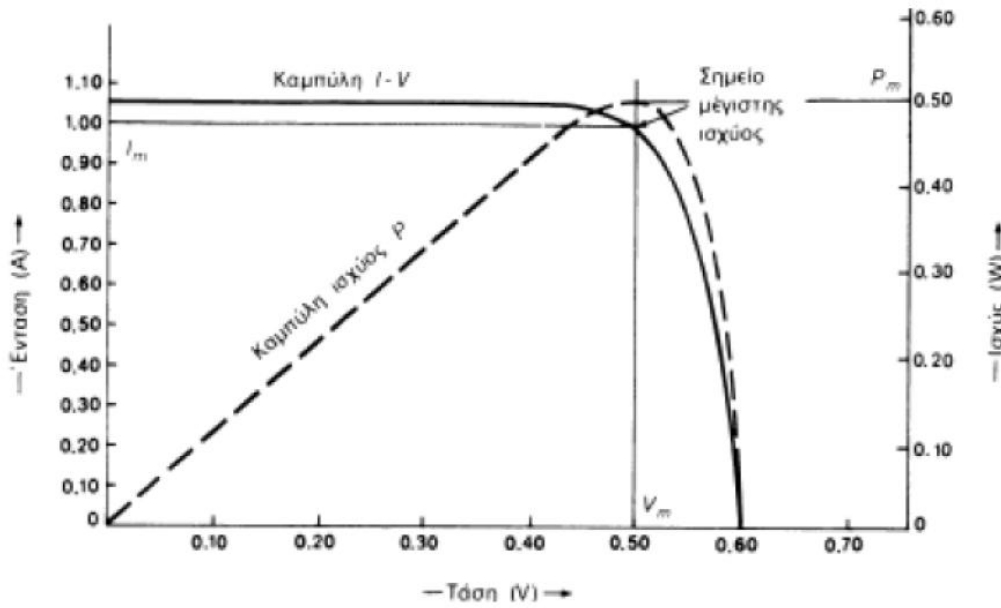
ανοιχτοκύκλωσης αυτού. Η τάση τότε των παραγωγικών φ/β στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή στο σημείο $K \cdot V$ ος, που εξασφαλίζει τη μέγιστη ισχύ.

5.3.2 Άμεσοι ανιχνευτές MPP

Η λειτουργία τους βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση των τιμών της τάσης και έντασης εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, προκαλώντας ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης, αυξάνεται η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό είναι και το σημείο μέγιστης λειτουργίας.

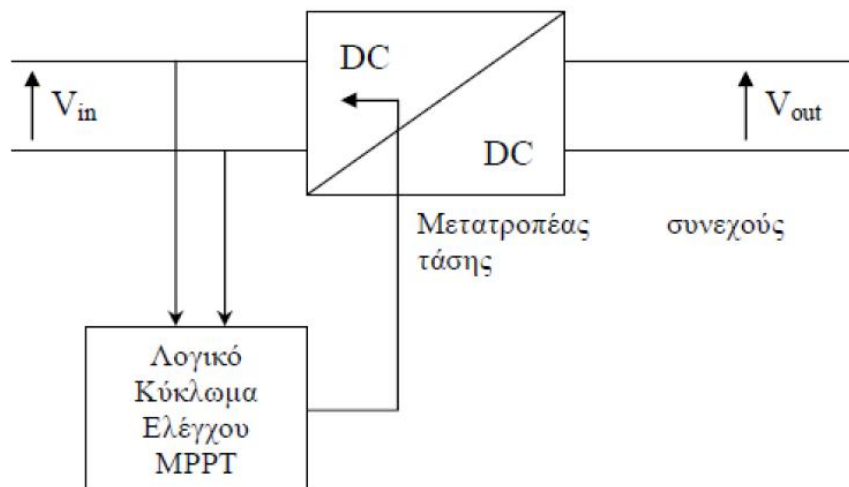
Όπως προαναφέρθηκε στην εξέταση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η ένταση που παράγεται από ένα φ/β στοιχείο, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα απ' ότι μεταβάλλεται η τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης - έντασης, το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Ωστόσο επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο δεν είναι σταθερή, ομοίως σταθερή δεν είναι και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό για κάθε στιγμή το φωτοβολταϊκό στοιχείο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης - έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του. Στο σχήμα 5.5 φαίνονται οι χαρακτηριστικές τάσης- έντασης και ισχύος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Η συνεχής καμπύλη δείχνει την μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος ενός φ/β στοιχείου πυριτίου, σε συνθήκες σταθερής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η διακεκομμένη καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται.



(Σχήμα 5.5): Χαρακτηριστικές τάσης- έντασης και ισχύος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Για να επιτευχθεί η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα DC/DC μετατροπέα, ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης, στα άκρα της ηλεκτρονικής συσκευής στην οποία εισέρχεται η ισχύς του φωτοβολταϊκού. Ένα απλοϊκό σχεδιάγραμμα DC/DC μετατροπέα που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της μέγιστης ισχύς εξόδου της φ/β γεννήτριας φαίνεται παρακάτω.



(Σχήμα 5.6): Απλοποιημένη διάταξη MPPT

Ανά πάσα στιγμή η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι: $P = V \cdot I$ (5.6). Εάν λόγω μεταβολής στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ή μεταβολή του φορτίου, αλλάξει η παραγόμενη ισχύς, μετατοπιστεί δηλαδή σε διαφορετικό σημείο λειτουργίας πάνω στη καμπύλη V-I, τότε θα υπάρξει μεταβολή της τάσης και μεταβολή της έντασης κατά dV και dI αντίστοιχα. Η ισχύς στο καινούργιο σημείο λειτουργίας θα είναι

$$P' = (V + dV) \cdot (I + dI) = V \cdot I + V \cdot dI + IdV$$

όπου αγνοήθηκαν οι όροι δεύτερης τάξης. Συνεπώς η μεταβολή στην ισχύ προκύπτει:

$$dP = P' - P = V \cdot dI + IdV$$

Στο σημείο της μέγιστης ισχύος η κλίση της καμπύλης ισχύος του φ/β στοιχείου μηδενίζεται, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.5. Δηλαδή ισχύει:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow V \frac{dI}{dV} + I = 0 \Rightarrow \frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I}$$

όπου ο πρώτος όρος εκφράζει την δυναμική αντίσταση της πηγής (Z_d) ενώ ο δεύτερος την στατική αντίσταση (Z_s).

Με βάση αυτή την εξίσωση υπάρχουν δυο διαφορετικοί τρόποι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος:

- Μία διαταραχή ρεύματος εισάγεται περιοδικά στην φωτοβολταϊκή πηγή ενώ μετρούνται η δυναμική αντίσταση αυτής Z_d και η στατική αντίσταση Z_s . Η τάση λειτουργίας αυξάνεται ή μειώνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η εξίσωση του σημείου μέγιστης ισχύος, δηλαδή:

$$Z_d = -Z_s \quad (5.10)$$

Σύμφωνα με μια δεύτερη μέθοδο ελέγχου, η τάση αυξάνεται όσο ισχύει η συνθήκη:

$$\frac{dP}{dV} > 0$$

που συνεπάγεται και ταυτόχρονη αύξηση της ισχύος. Σε αντίθετη περίπτωση η τάση μειώνεται, ενώ όταν ο ρυθμός μεταβολής είναι πολύ κοντά στο μηδέν η τάση σταθεροποιείται. Το λογικό κύκλωμα ελέγχου μετρά την τάση και την ένταση εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, η οποία βέβαια εξαρτάται κάθε στιγμή από την ακτινοβολία που προσπίπτει, τη θερμοκρασία της γεννήτριας και φυσικά από την αντίσταση που συναντά η γεννήτρια στα άκρα της. Εφαρμόζοντας μία από τις παραπάνω μεθόδους, στέλνει σήμα στον DC/DC μετατροπέα να ανυψώσει ή να μειώσει την τάση μέχρι να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος. Ανάλογα με την περίπτωση λοιπόν το συγκεκριμένο κύκλωμα λειτουργεί είτε ως μετατροπέας ανύψωσης είτε ως μετατροπέας υποβιβασμού τάσης.

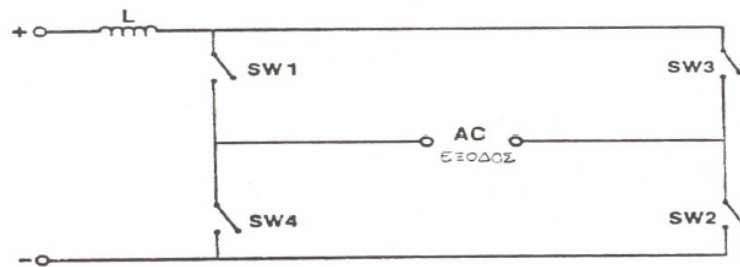
Εναλλακτικές μορφές ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος χρησιμοποιούν κυκλώματα με μνήμη ώστε να συγκρίνουν τις τρέχουσες μετρούμενες τιμές ισχύος, τάσης, έντασης με προηγούμενες οπότε προσαρμόζουν ανάλογα τη στάθμη της τάσης που θα απορροφήσει ο αντιστροφέας.

5.4 ANTIΣΤΡΟΦΕΑΣ DC/AC

5.4.1 Γενικά

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα διασυνδεδεμένο με το δίκτυο για να μπορεί να διοχετεύει την ισχύ του σε αυτό, είναι απαραίτητο να μπορεί να μετατρέψει την συνεχή τάση εξόδου του σε εναλλασσόμενη με χαρακτηριστικά ίδια με αυτά του δικτύου, ώστε να μη δημιουργεί πρόβλημα στη λειτουργία του δικτύου και στη ποιότητα ισχύος που αυτό παρέχει. Την μετατροπή αυτή επιτυγχάνουμε μέσω του αντιστροφέα (Inverter) ή DC to AC Converter, η θέση του οποίου σε ένα σύστημα φαίνεται στο σχήμα

Τα χαρακτηριστικά που θέλουμε να επιτύχουμε στην έξοδο του αντιστροφέα είναι ημιτονοειδής ισχύς εξόδου σταθερού πλάτους, σταθερής συχνότητας και χωρίς απώλειες. Συνήθως για τη μετατροπή αυτή χρησιμοποιούμε ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος σαν διακόπτες όπως τρανζίστορ ή θυρίστορ και η γενική τοπολογία του κυκλώματος του αντιστροφέα φαίνεται στο σχήμα :



(Σχήμα 5.7):Τοπολογία κυκλώματος αντιστροφέα

Τα ημιαγωγικά στοιχεία που χρησιμοποιούμε έχουν την ιδιότητα να άγουν ή όχι ανάλογα με το αν τους δίνεται παλμός έναυσης από κάποιο ανεξάρτητο λογικό κύκλωμα ενώ η σβέση τους μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με παλμούς (τρανζίστορ) είτε κάτω από ειδικές συνθήκες όπου το ρεύμα που διαρρέει το διακόπτη μηδενίζεται για κάποιο χρονικό διάστημα (θυρίστορ). Τα στοιχεία αυτά ανοιγοκλείνουν ανά ομάδες (1,2) και (3,4) για χρόνο μισημιπεριόδου, με μια συχνότητα ίση με την διπλάσια της συχνότητας του δικτύου ($f=50\text{Hz}$) ή περίοδο $T=2/f=0.01\text{ sec}$.

Το πηνίο στην είσοδο του αντιστροφέα χρειάζεται για να εξομαλύνει τις μεταβολές της τάσης που δημιουργούν οι διακόπτες, ενώ στην έξοδο υπάρχει συνήθως ένας μετασχηματιστής.

5.4.2 Τύποι αντιστροφέων.

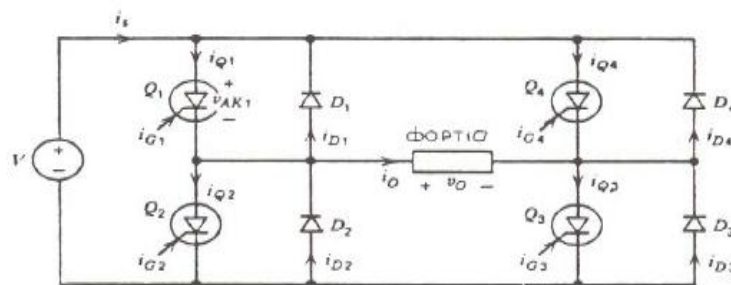
Υπάρχουν διάφορες τοπολογίες που μπορεί να υλοποιηθεί ένας αντιστροφέας. Η απλή τοπολογία παρουσιάζει υψηλό βαθμό απόδοσης αλλά η κυματομορφή και η σταθεροποίηση της τάσης εξόδου δεν είναι αποδεκτή για τις περισσότερες εφαρμογές. Τα μειονεκτήματα αυτά μπορούν να εξαλειφθούν εν μέρει με τη βοήθεια φίλτρων τα οποία όμως έχουν μεγάλο όγκο και κόστος. Άλλες πιο προχωρημένες τεχνικές μειώνουν τις απαιτήσεις σε φίλτρα αλλά παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες. Συνεπώς η επιλογή της τοπολογίας βασίζεται στην εύρεση της χρυσής τομής ανάμεσα σε αντικρουόμενες απαιτήσεις όσον αφορά το κόστος,

την ποιότητα της τάσης εξόδου, το περιεχόμενο σε αρμονικές, τον όγκο κ.λ.π. Αν και η τεχνολογία των αντιστροφέων είναι αρκετά ανεπτυγμένη, εν τούτοις δεν είναι αρκετά ξεκάθαρο ποια από τις πολλές τοπολογίες που υπάρχουν είναι η καταλληλότερη για κάθε φωτοβολταϊκή εφαρμογή. Ένας αντιστροφέας πρέπει να εκτελεί τρεις λειτουργίες που είναι α) αντιστροφή, β) ρύθμιση της τάσης και γ) διαμόρφωση της κυματομορφής.

Οι αντιστροφείς που υπάρχουν μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το σβήσιμο των διακοπτικών τους στοιχείων όταν αυτά είναι θυρίστορ. Όταν η ενέργεια για το σβήσιμο των θυρίστορ παρέχεται από μια εξωτερική πηγή (δίκτυο) τότε ανήκουν στην κατηγορία των αντιστροφέων οδηγούμενων από το δίκτυο ή με φυσική μετάβαση. Όταν η ενέργεια αυτή προέρχεται από εσωτερικά κυκλώματα που περιέχουν στοιχεία όπως πυκνωτές τότε ανήκουν στην κατηγορία των αντιστροφέων με εξαναγκασμένη μετάβαση ή αυτοοδηγούμενοι αντιστροφείς. Οι αντιστροφείς που περιέχουν τρανζίστορς ανήκουν πάντα στην κατηγορία των φυσικά αυτοοδηγούμενων αντιστροφέων.

5.4.3 Αντιστροφέας γέφυρας.

Ένας από τους πιο καθιερωμένους αντιστροφείς είναι ο αντιστροφέας γέφυρας που φαίνεται στο σχήμα 5.8 (μονοφασικός).



(Σχήμα 5.8): Αντιστροφέας γέφυρας

Όταν το φορτίο δεν είναι απλά ωμικό αλλά περιέχει πυκνωτές ή και επαγωγούς, δηλαδή στοιχεία που αποθηκεύουν ενέργεια, τότε κρίνεται απαραίτητη η τοποθέτηση των διόδων παράλληλα σε κάθε διακοπτικό στοιχείο. Αυτό γίνεται διότι σε αυτές τις περιπτώσεις το ρεύμα φορτίου δεν έχει πάντα το ίδιο πρόσημο

με την τάση στο φορτίο και έτσι όταν τα θυρίστορ σβήνουν, το ρεύμα συνεχίζει να περνά μέσα από τις διόδους.

Στο σχήμα 5.8 βλέπουμε την διαδοχή των παλμών έναυσης στα διακοπτικά στοιχεία, την εναλλασσόμενη τάση εξόδου που προκύπτει καθώς και το ρεύμα στο φορτίο.

5.4.4 Ρύθμιση τάσης σε ένα αντιστροφέα.

Σε πολλές εφαρμογές χρειάζεται ο βαθμιαίος έλεγχος του λόγου της DC τάσης εισόδου που μπορεί να μεταβάλλεται προς την AC τάση εξόδου που τροφοδοτεί το φορτίο. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με έναν AC ρυθμιστή τάσης μεταξύ της εξόδου του αντιστροφέα και του φορτίου που όμως δημιουργεί πολλές ανώτερες αρμονικές στην τάση εξόδου και αποφεύγεται, είτε με έναν DC/ DC μετατροπέα μεταξύ πηγής και ακροδεκτών εισόδου (αυξάνονται έτσι οι απώλειες του συστήματος λόγω του επιπρόσθετου μετατροπέα και απαιτείται ένα επιπλέον φίλτρο στην είσοδο).

ΜΕΘΟΔΟΣ PWM

Ένας άλλος τρόπος να μεταβάλλουμε τον λόγο μεταξύ της DC τάσης εισόδου προς την AC τάση εξόδου είναι με την βοήθεια του κυκλώματος ελέγχου του αντιστροφέα. Οι τεχνικές που υπάρχουν διαφέρουν ως προς το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης εξόδου πράγμα που καθορίζει την κατάλληλη κάθε φορά επιλογή. Οι τρεις πιο γνωστές τεχνικές χρησιμοποιούν διαμόρφωση εύρους παλμού (Pulse Width Modulation ή PWM) η οποία απαιτεί εξαναγκασμένη μεταγωγή και είναι: 1) διαμόρφωση με έναν παλμό, 2) διαμόρφωση με πολλούς παλμούς και 3) διαμόρφωση με ημιτονοειδή παλμό.

Το κύκλωμα έλεγχου ελέγχει την έναυση και σβέση των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα που συνήθως είναι MOSFET ή IGBT για τέτοιες εφαρμογές. Στην εργασία αυτή θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο PWM με διαμόρφωση με ημιτονοειδή παλμό γιατί θέλουμε να πάρουμε μια τάση στην έξοδο που να

πλησιάζει όσο το δυνατό περισσότερο το ημίτονο. Οι συναρτήσεις ελέγχου αποτελούνται από ένα ημίτονο μεταβλητού πλάτους και μια τριγωνική κυματομορφή σταθερού πλάτους με μια συνεχή συνιστώσα, η οποία αναστρέφεται σε πολικότητα στο τέλος κάθε ημικύκλιου της τάσης εξόδου. Οι γωνίες έναυσης και σβέσης των διακοπτικών στοιχείων καθορίζονται από την τομή αυτών των δυο κυματομορφών ελέγχου. Η τάση εξόδου ελέγχεται με μεταβολή του πλάτους του ημίτονου. Αν αυτό γίνει πολύ μεγάλο τότε η χρονική μεταβολή της τάσης εξόδου πλησιάζει την τετραγωνική κυματομορφή.

Το ημίτονο (λέγεται σήμα αναφοράς) έχει μεταβλητό πλάτος A και συχνότητα f , ενώ η τριγωνική κυματομορφή (λέγεται και φορέας) έχει σταθερό πλάτος A_p , δηλαδή μια συνεχή συνιστώσα με μέτρο A_p και συχνότητα f_p . Το πλάτος του ημιτόνου A γενικά μπορεί να πάρει τιμή μεγαλύτερη από το πλάτος του τριγώνου A_p . Ο αριθμός των παλμών ανά ημίκυκλο δίνεται από την σχέση $2N = f_p/f$ και είναι πάντα ακέραιος.

Ορίζονται δυο συντελεστές διαμόρφωσης: ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους $MA = \lambda \delta i \pi / A_p$ και ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας

$MF = F_p / F \sin$. Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα οι δυο κυματομορφές συγκρίνονται μεταξύ τους. Όταν το τρίγωνο είναι μεγαλύτερο του ημίτονου έχουμε έξοδο με λογική στάθμη μηδέν ενώ όταν το ημίτονο είναι μεγαλύτερο του τριγώνου έχουμε λογική στάθμη μονάδα. Ουσιαστικά ο συγκριτής τροφοδοτεί την μονάδα παλμοδότησης των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης εξαρτάται από τα σημεία τομής των 2 κυματομορφών. Αυξομειώνοντας το συντελεστή MA (από 0 έως 1) μεταβάλλεται το εύρος των παλμών της κυματομορφή που προκύπτει από τη σύγκριση.

Όσο αφορά τον συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας MF πρέπει να επισημανθεί ότι για χαμηλές τιμές του πρέπει να χρησιμοποιηθεί συγχρονισμένη διαμόρφωση (συγχρονισμός σήματος φορέα με σήμα αναφοράς), να είναι περιττός ακέραιος και πολλαπλάσιος του 3 για την απαλοιφή των κυριότερων αρμονικών από την πολική τάση.

5.5 ΑΝΩΤΕΡΕΣ ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ

Η συχνότητα στην έξοδο του αντιστροφέα καθορίζεται από το ρυθμό έναυσης και σβέσης των διακοπτικών στοιχείων και επομένως δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης αυτής μέσω του κυκλώματος παλμοδότησης του αντιστροφέα. Ωστόσο η διακοπτική λειτουργία του αντιστροφέα έχει συνήθως ως αποτέλεσμα μη ημιτονοειδείς κυματομορφές ρεύματος και τάσης στην έξοδο του, που σημαίνει ύπαρξη ανώτερων αρμονικών. Το φιλτράρισμα των αρμονικών δεν είναι εύκολο, ειδικά στην περίπτωση όπου η συχνότητα των ανώτερων αρμονικών μεταβάλλεται και βρίσκεται κοντά στην συχνότητα της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του βάρους, όγκου και κόστους του αντιστροφέα. Συνεπώς η δημιουργία κυματομορφών με το μικρότερο δυνατό αρμονικό περιεχόμενο και αρμονικές που να εντοπίζονται σε όσο δυνατό υψηλότερες συχνότητες (για ευκολότερο και οικονομικότερο φιλτράρισμα) αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους στόχους των κατασκευαστών αντιστροφέων. Ταυτόχρονα θα μπορούσαμε να πούμε ότι για τον παραπάνω λόγο θα μπορούσαμε να έχουμε αντιστροφείς με πολύ μεγάλο συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας. Όμως κάτι τέτοιο δεν γίνεται στην πράξη διότι όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα λειτουργίας του αντιστροφέα τόσο μεγαλύτερες είναι οι διακοπτικές του απώλειες. Συνεπώς πρέπει να βρεθεί ένας συμβιβασμός μεταξύ των διακοπτικών απωλειών στα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα και του όγκου- κόστους των φίλτρων που θα τοποθετήσουμε στην έξοδο του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΚΑΤΟΙΚΙΑ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

6.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΠΙΤΙΟΥ

Θα προσπαθήσουμε να εφαρμόσουμε το υβριδικό μας σύστημα σε μια μεγάλη κατοικία στην περιοχή της Θέρμης,στη Θεσσαλονίκη.Οι καταναλώσεις υπολογίστηκαν βάση μιας μέσης τετραμελούς οικογένειας.

6.1.1 Τοποθεσία φωτοβολταϊκών

Η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών μπορεί να γίνει με 2 τρόπους:είτε στη στέγη,είτε σε μια έκταση στην αυλή με trackers.Τα πλεονεκτήματα της εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών στη στέγη είναι τα εξής:

- Μικρότερο κόστος εγκατάστασης
- Εξοικονόμηση χώρου,καθώς η στέγη είναι αχρησιμοποίητη έκταση

Τα πλεονεκτήματα της εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών με trackers είναι τα εξής:

- Δεν υπάρχουν περιορισμοί στην αρχιτεκτονική του σπιτιού,σε αντίθεση με την εγκατάσταση στη στέγη,όπου πρέπει μια μεγάλη έκταση της σκεπής να προσανατολίζεται στο νότο
- Μεγαλύτερη απόδοση έως και 40% με αποτέλεσμα τη χρήση λιγότερων πάνελ για την ίδια παραγόμενη ενέργεια
- Είναι πιο εύκολη η επέκταση των φωτοβολταϊκών,σε περίπτωση ανάγκης περισσότερης ενέργειας

Στο συγκεκριμένο μοντέλο θα τοποθετήσουμε τα φωτοβολταϊκά μας στη στέγη.Θα φροντίσουμε μια μεγάλη έκταση της στέγης να είναι στραμμένη προς το νότο,για να εκμεταλλευτούμε την ηλιακή ενέργεια κατά το μέγιστο δυνατό.Πιο συγκεκριμένα:

Η Θεσσαλονίκη έχει συντεταγμένες **ανατολικά 22° 56' 40''** και **βόρεια 40°38'21''**. Η βέλτιστη κλίση για τη μεγιστοποίηση της ετήσιας απόδοσης σε σύστημα σταθερής στήριξης για το συγκεκριμένο πλάτος είναι $\phi=31^\circ$.

6.1.2 Αρχιτεκτονική σπιτιού



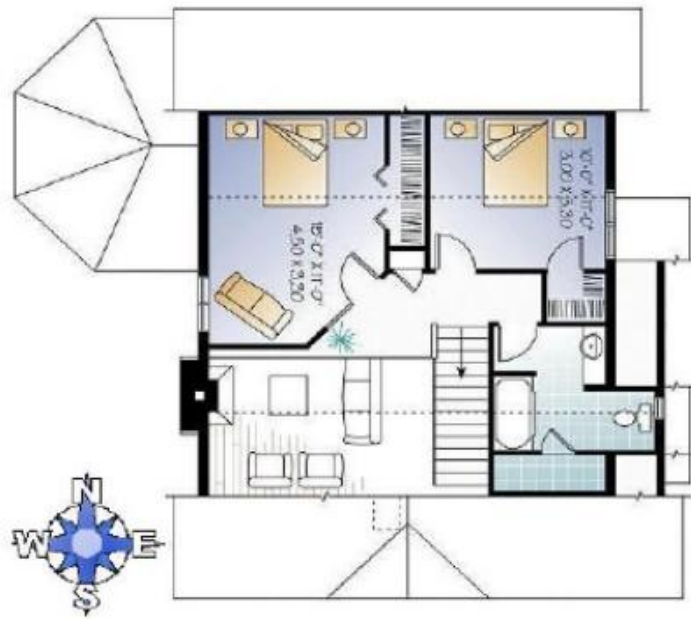
Σχήμα 6.1:εξωτερική εμφάνιση κατοικίας

Η κατοικία στην προκειμένη περίπτωση είναι μια διώροφη μονοκατοικία 112 τ.μ. Διαθέτει τρία υπνοδωμάτια, δύο μπάνια, σαλόνι και τραπεζοκουζίνα. Στον 1^ο όροφο βρίσκεται μια κρεβατοκάμαρα, ένα μπάνιο, η τραπεζοκουζίνα και το σαλόνι (Σχήμα 6.2)



Σχήμα 6.2:κάτοψη πρώτου ορόφου

Ο δεύτερος όροφος (Σχήμα 6.3) είναι σοφίτα και περιέχει δύο υπνοδωμάτια και ένα μπάνιο. Η μεγάλη σκεπή, στην οποία πάνω θα γίνει η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών, είναι προσανατολισμένη στο νότο για να εκμεταλλευτούμε τη μέγιστη δυνατή ηλιακή ενέργεια.



Σχήμα 6.3:κάτοψη δεύτερου ορόφου

6.2 ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τις ανάγκες της κατοικίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Πρώτα θα πάρουμε μια γενική εικόνα με μέσες τιμές κατανάλωσης και αργότερα θα αναλύσουμε λεπτομερώς τις τιμές των φορτίων ανά μήνα, αλλά και ανά ώρα του εικοσιτετράωρου.

Η τάση του υποσυστήματος των συσσωρευτών που θα χρησιμοποιήσουμε θα είναι 48V, καθώς έχουμε τάση αιχμής 14.465,5W σύμφωνα με τον πίνακα.

6.2.1 Μέση κατανάλωση

Έχοντας ως δεδομένο ότι το σπίτι κατοικείται από μια τετραμελή οικογένεια όλο το χρόνο, υπολογίσαμε τις καταναλώσεις που έχει κάθε ηλεκτρική συσκευή (μέσο όρο) συνολικά μέσα στην ημέρα, αλλά και μέσα στην εβδομάδα. (Πίνακας 6.1)

Φορτίο		Συνολική Ισχύς [W]	Ημερησία Λειτουργία (ώρες/ημέρα)	Εβδομαδιαία λειτουργία (ημέρες/εβδομάδα)
19	Λάμπες των 11W	209	3,3	7
2	Λάμπες των 7W	14	4	7
1	Ψυγείο 900Wh σε 24 ώρες	112,5	8	7
1	Φούρνος μικροκυμάτων 800W	800	0,05	7
1	Βραστήρας νερού 2400W	2400	0,13	7
1	Μίξερ 800W	800	0,25	3
1	Γκριλ 1800W	1800	0,17	5
1	Αποροφητήρας 250W	250	1	6
1	Ηλεκτρική σκούπα 1500W	1500	0,25	7
1	TV 100W	100	7	7
1	TV 85W	85	5	7
1	Σεσουάρ 1650W	1650	0,16	5
1	Σίδερο σιδερώματος 2250W	2250	0,34	5
1	Laptop 300W	300	5	7
1	DVD 50W	50	3	7
1	H/Y 715W	715	3	7
1	Ραδιόφωνο 70	70	0,25	6
1	Πλυντήριο ρούχων A+ 1360W	1360	1	7

Πίνακας 6.1: οι ηλεκτρικές συσκευές της κατοικίας και ο χρόνος που αυτές λειτουργούν

Σύμφωνα λοιπόν με τον παραπάνω πίνακα και με τη βοήθεια του excel υπολογίζουμε τις μέσες τιμές φορτίων της κατοικίας(Πίνακας 6.2):

Μέση ετήσια κατανάλωση	3,572 MWh
Μέση μηνιαία κατανάλωση	297,64 KWh
Μέση εβδομαδιαία κατανάλωση	69,45 KWh
Μέση ημερήσια κατανάλωση	9,92 KWh

Πίνακας 6.2: εκτιμώμενες μέσες καταναλώσεις κατοικίας

Στον παρακάτω πίνακα γίνεται μια πιο αναλυτική προσέγγιση ανά συσκευή.Υπολογίζουμε λοιπόν τις καταναλώσεις,αλλά και τους χρόνους λειτουργίας κάθε συσκευής.Διαιρώντας με την τάση που λειτουργεί το σύστημα μας και πολλαπλασιάζοντας με την απόδοση του inverter(91%) δίνονται τα αμπερώρια(AH) που καταναλώνει η κατοικία.

	ΦΟΡΤΙΟ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ N	I [A]	V [V]	P [W] DC φορτ.	P [W] AC φορτ.	ημερησία λειτουργία [ώρες/ημέρα]	εβδομαδιαία λειτουργία [ημέρες/εβδομάδα]	απόδοση αντιστρ. ή μετατροπ.	ονομαστική τάση συστ. [V]	[ΑΗ/ημέρα]		
DC		x	x	x	=	=	x	x	+	+	=		
		x	x	x	=	=	x	x	+	+	=		
		x	x	x	=	=	x	x	+	+	=		
		x	x	x	=	=	x	x	+	+	=		
		x	x	x	=	=	x	x	+	+	=		
AC	λαμπτήρες	x	19 x	x	=	=	209 x	3,3 x 7	+7	0,91 ±	48 =	15,79	
	λαμπτήρες	x	2 x	x	=	=	14 x	4 x 7	+7	0,91 ±	48 =	1,28	
	ψυγείο	x	1 x	x	=	=	112,5 x	8 x 7	+7	0,91 ±	48 =	20,6	
	φούρνος μικροκυμάτων	x	1 x	x	=	=	800 x	0,05 x 7	+7	0,91 ±	48 =	0,92	
	βραστήρας νερού	x	1 x	x	=	=	2400 x	0,13 x 7	+7	0,91 ±	48 =	7,14	
	μίξερ	x	1 x	x	=	=	800 x	0,25 x 3	+7	0,91 ±	48 =	1,96	
	γκριλ	x	1 x	x	=	=	1800 x	0,17 x 5	+7	0,91 ±	48 =	5	
	απορροφητήρας	x	1 x	x	=	=	250 x	1 x 6	+7	0,91 ±	48 =	4,91	
	ηλεκτρική σκούπα	x	1 x	x	=	=	1500 x	0,25 x 7	+7	0,91 ±	48 =	8,59	
	TV	x	1 x	x	=	=	100 x	7 x 7	+7	0,91 ±	48 =	16,03	
	TV	x	1 x	x	=	=	85 x	5 x 7	+7	0,91 ±	48 =	9,73	
	σασουάρ	x	1 x	x	=	=	1650 x	0,16 x 5	+7	0,91 ±	48 =	4,82	
	σίδηρο σιδερώματος	x	1 x	x	=	=	2250 x	0,34 x 5	+7	0,91 ±	48 =	12,51	
	hairtop	x	1 x	1,3 x	230	=	=	300 x	5 x 7	+7	0,91 ±	48 =	34,34
	DVD	x	1 x	x	=	=	50 x	3 x 7	+7	0,91 ±	48 =	3,43	
	H/Y	x	1 x	x	=	=	715 x	3 x 7	+7	0,91 ±	48 =	49,11	
	ραδιόφωνο	x	1 x	x	=	=	70 x	0,25 x 6	+7	0,91 ±	48 =	0,34	
πλυντήριο ρούχων A+	x	1 x	x	=	=	1360 x	1 x 7	+7	0,91 ±	48 =	31,14		
					D C	A C	10425,2 Wh/ημέρα					227,14	
												Σύνολο [ΑΗ/ημέρα]	

Πίνακας 6.3: υπολογισμός αμπερωτών/ημέρα που καταναλώνει η κατοικία

6.3 ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται κάποια στοιχεία σχετικά με τη θερμοκρασία,την ηλιοφάνεια,την πίεση και την υγρασία που επικρατεί στη Θεσσαλονίκη ανά μήνα.

Μήνας	Θερμοκρασία αέρα (C°)	Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία οριζόντια (kWh/m ² /ημ)	Ατμοσφαιρική πίεση kPa	Θερμοκρασία εδάφους
Ιαν	5,5	1,70	96,6	1,5
Φεβ	6,3	2,75	96,4	3,3
Μαρ	9,2	3,79	96,3	8,0
Απρ	13,5	5,00	96,0	14,1
Μάι	18,7	7,21	69,1	20,6
Ιουν	23,5	7,22	69,1	26,1
Ιουλ	25,8	6,93	96,1	28,9
Αυγ	25,5	6,27	96,1	28,3
Σεπ	21,4	4,85	96,3	23,2
Οκτ	16,3	3,00	96,6	15,9
Νοε	10,7	1,88	96,5	8,2
Δεκ	6,6	1,41	96,6	2,5
Ετήσιο	15,3	4,26	96,3	15,1
Πηγή	Έδαφος	Έδαφος	NASA	NASA

Πίνακας 6.4:κλιματολογικά στοιχεία Θεσσαλονίκης

Στη δεύτερη στήλη είναι οι μέσες θερμοκρασίες του αέρα λίγα μέτρα πάνω από το έδαφος, σύμφωνα με μετρήσεις της από το έδαφος. Στην Τρίτη στήλη καταγράφεται η μέση ηλιακή ακτινοβολία ανά μέρα, σε ένα οριζόντιο τετραγωνικό μέτρο. Η τέταρτη στήλη αναφέρει τη μέση ατμοσφαιρική πίεση ανά μήνα σύμφωνα με μετρήσεις της NASA και η Πέμπτη στήλη δείχνει τη μέση θερμοκρασία του εδάφους. Η πιο σημαντική στήλη για την επιλογή της ισχύος των φωτοβολταϊκών είναι η Τρίτη, η ισχύς θα επιλεγεί σύμφωνα με το μήνα με τη μικρότερη ηλιοφάνεια που είναι ο Δεκέμβρης (θεωρούμε δεδομένο ότι οι καταναλώσεις είναι ίδιες κάθε μήνα).

6.4 ΕΠΙΛΟΓΗ INVERTER

-Ονομαστική τάση: η ονομαστική τάση του inverter πρέπει να είναι ίση με την ονομαστική τάση του υποσυστήματος, δηλαδή 48V.

-Ισχύς εξόδου: η ισχύς εξόδου θα πρέπει να είναι ίση με την ισχύ των φορτίων κατανάλωσης που λειτουργούν ταυτόχρονα. Θεωρώντας ότι ο συντελεστής ταυτοχρονισμού των φορτίων της οικίας είναι 0,47, η ισχύς εξόδου του Inverter είναι $14465,5W * 0,47 = 6798,79W$.

-Ισχύς αιχμής: η ισχύς αιχμής καλό είναι να ανταποκρίνεται στο φαινόμενο λειτουργίας όλων των εγκατεστημένων συσκευών, ταυτόχρονα, έστω και για λίγα δευτερόλεπτα. Δηλαδή η ισχύς αιχμής να είναι 14465,5W.

-Τάση εξόδου: πρέπει να είναι ίση με την τάση των φορτίων κατανάλωσης, δηλαδή 230V.

Το inverter που επιλέγουμε είναι το Sunny Island 5048 και θα χρησιμοποιήσουμε 2 από αυτά παράλληλα. Σε παράλληλη λειτουργία οι inverter συγχρονίζονται και λειτουργούν σε μία μόνο φάση, ώστε να αυξάνεται η διαθέσιμη ονομαστική ισχύς σε 10KW.



AC output (loads)	
Nominal AC voltage / adjustable	230 V / 202 V – 253 V
Nominal AC frequency / adjustable	50 Hz, 60 Hz / 45 Hz ... 65 Hz
Continuous AC power (at 25 °C / at 45 °C)	5000 W / 4000 W
Battery DC input	
Battery voltage / range	48 V / 41 V – 63 V
Max. battery charging current / continuous charging current at 25 °C	120 A / 100 A
Battery type / battery capacity	Lead, NiCd / 100 Ah ... 10000 Ah
Charge control	IUoU process
Efficiency / self-consumption	
Max. efficiency	95 %
Self-consumption with no load / standby	25 W / 4 W
Protection	
DC reverse polarity protection / DC fuse	yes / yes
AC short circuit / AC overload	yes / yes
Over-temperature / battery deep discharge	yes / yes

Πίνακας 6.5: χαρακτηριστικά inverter

6.5 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΗΛΙΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που θα χρησιμοποιηθούν είναι μονοκρυσταλλικά της εταιρίας Coenergy τύπου SC 170MA ισχύος 170 W με ονομαστική τάση 24 V. Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου έγινε με κριτήριο την απόδοση τους και το κόστος τους. Ορισμένες λεπτομέρειες σχετικά με τα φ/β πάνελ βρίσκονται στην παρακάτω εικόνα.

SC 179MA	
Max. output (P_{max}) as per STC ²	170 W \pm 3 %
Module efficiency (%)	13.1 %
MPP voltage (V_{MPP})	35.5 V
MPP current (I_{MPP})	4.79 A
Open-circuit voltage (V_{OC})	44.4 V
Short-circuit current (I_{SC})	5.27 A
Temperature coefficient (P_{MPP})	-0.485 %/°C
Temperature coefficient (V_{OC})	-0.155 V/°C
Temperature coefficient (I_{SC})	2.79 mA/°C
Maximum system voltage	1,000 V
Cells	72 monocrystallines
Cell dimensions	125 x 125 mm
Module dimensions (L x W x H)	1,575 x 826 x 46 mm
Weight	16.3 kg

Wide Range of Applications

- Grid-connected photovoltaic systems between 1 and 100 kWp
- Large PV systems and special projects

Extended Module Service Life

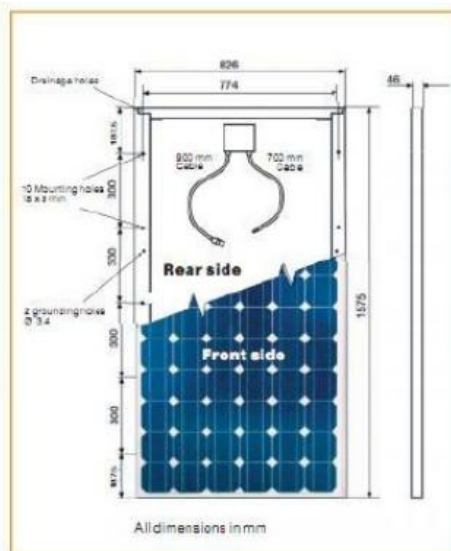
- Cells embedded in EVA (ethylene vinyl acetate)
- Solar glass on the front side
- Weather and waterproof foil back

Sturdy Frame

- Fully closed aluminium frame
- Frame screwed at end faces

Warranties and Certificates

- 25 year warranty on 80% of the minimum output¹
- 5 year product warranty¹
- IEC 61215, Protection Class II



High Quality Finish

- Optical, mechanical and electrical module testing during and post-production
- Automated production line ensures consistently high level of product quality

Simple Installation

- Multi-contact (MCII) plug supplied as standard

Σχήμα 6.6: χαρακτηριστικά φ/β πλαισίου

Στη συγκεκριμένη ενότητα υπολογίζουμε τη συνολική ισχύ των φ/β συστοιχιών για να διαστασιολογήσουμε την εγκατάσταση μας. Για να γίνει αυτό εκτιμούμε τις καταναλώσεις για κάθε μήνα και την παραγόμενη ενέργεια και υπολογίζουμε την ισχύ σύμφωνα με το μήνα με τη μικρότερη διαφορά παραγόμενης ενέργειας κατανάλωσης.

6.5.1 Μηνιαίες ανάγκες ρεύματος

Αναφέραμε ότι οι μέσες ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας της οικίας είναι 297,6 kWh το μήνα. Αυτή η τιμή αποτελεί το μέσο όρο όλων των μηνών. Υπάρχει διαφοροποίηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια του έτους, καθώς αφενός μεν έχουμε διαφορετικές δραστηριότητες και αφετέρου το χειμώνα νυχτώνει νωρίτερα και τα φώτα λειτουργούν περισσότερες ώρες. Στον παρακάτω πίνακα έχουμε μια εκτίμηση των καταναλώσεων ανά μήνα.

Μήνας	kWh	Μήνας	kWh
Ιανουάριος	320	Ιούλιος	275
Φεβρουάριος	314	Άυγουστος	270
Μάρτιος	309	Σεπτέμβριος	287
Απρίλιος	298	Οκτώβριος	297
Μάϊος	290	Νοέμβριος	307
Ιούνιος	280	Δεκέμβριος	322

Πίνακας 6.7:εκτιμώμενη μηνιαία κατανάλωση κατοικίας

6.5.2 Μηνιαία παραγωγή

Χρησιμοποιούμε έναν εξομοιωτή φ/β και βάλαμε τα κάτωθι δεδομένα(Πίνακας 6.8):

Ανοχή Ισχύος φωτοβολταϊκής γεννήτριας	0%
Απώλειες μετασχηματισμού (χαμηλή -> μέση)	0%
Απώλειες λόγω σκόνης & κάλυψης επιφάνειας συλλεκτών	0,5%
Απώλειες λόγω διαθεσιμότητας	1/έτος
Τοποθεσία	Θεσσαλονίκη
Στήριξη	Κεραμοσκεπή
Προσανατολισμός	Νότιος
Κλίση	31°
Ονομαστική ισχύς	8,5 kW

Πίνακας 6.8:εισερχόμενα δεδομένα στον εξομοιωτή

-Η <<Ανοχή ισχύος φ/β γεννήτριας>> είναι το ποσοστό της της ανοχής ανάμεσα στην ονομαστική ισχύ της γεννήτριας και της πραγματικής της τιμής.

-Οι <<Απώλειες λόγω σκόνης & κάλυψης επιφάνειας συλλεκτών>> είναι οι απώλειες που προκύπτουν από το μετασχηματισμό του ρεύματος από τη Χαμηλή στη Μέση Τάση και έχει εφαρμογή μόνο σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις μεγαλύτερες των 100KWp.

-Οι <<Απώλειες Διαθεσιμότητας>> είναι απώλειες οι οποίες οφείλονται σε βλάβη του συστήματος.

-Την <<Ονομαστική ισχύ>> την ορίσαμε στα 8,5 KW και το λόγο θα τον αναλύσουμε παρακάτω.

Τα αποτελέσματα σχετικά με την ενέργεια που αποδίδουν οι συλλέκτες ανά μήνα καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Μήνας	Παραγωγή (kWh)
Ιανουάριος	644
Φεβρουάριος	684
Μάρτιος	945
Απρίλιος	1.009
Μάιος	1.120
Ιούνιος	1.215
Ιούλιος	1.279
Αυγούστος	1.247
Σεπτέμβριος	1.167
Οκτώβριος	898
Νοέμβριος	572
Δεκέμβριος	556
Σύνολο 1^{ου} έτους	11.337 kWh

Πίνακας 6.9: kWh ανά μήνα

Οι παραπάνω υπολογισμοί έγιναν για τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του συστήματος μας. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών όμως μειώνεται περίπου κατά 1% κάθε χρόνο. Οι υπολογισμοί που θα κάνουμε είναι για 25 χρόνια λειτουργίας. Άρα η παραγόμενη ενέργεια σε kWh το χρόνο φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Έτος	kWh	Έτος	kWh	Έτος	kWh	Έτος	kWh	Έτος	kWh
1	11.109	6	10.565	11	10.047	16	9.555	21	9.086
2	10.998	7	10.459	12	10.047	17	9.459	22	8.996
3	10.888	8	10.355	13	9.847	18	9.365	23	8.906
4	10.779	9	10.251	14	9.749	19	9.271	24	8.817
5	10.672	10	10.149	15	9.651	20	9.178	25	8.728

Πίνακας 6.10: οι παραγόμενες kWh κάθε έτους

Για να υπολογίσουμε αν η ισχύς που επιλέξαμε (8,5 KW) είναι η κατάλληλη, θα πρέπει να ελέγξουμε τη χειρότερη περίπτωση παραγωγής-κατανάλωσης. Ο μήνας λοιπόν που θα κρίνει την τιμή αυτή είναι ο Δεκέμβρης του 25^{ου} έτους, καθώς το

μήνα αυτό έχουμε τη μεγαλύτερη κατανάλωση και τη μικρότερη παραγωγή ενέργειας. Οι αντίστοιχες kWh ανά μήνα του 25^{ου} έτους καταγράφονται στον Πίνακα 6.11:

Μήνας	kWh	Μήνας	kWh
Ιανουάριος	505	Ιούλιος	1.004
Φεβρουάριος	537	Αυγустος	979
Μάρτιος	742	Σεπτέμβριος	916
Απρίλιος	792	Οκτώβριος	705
Μάϊος	880	Νοέμβριος	449
Ιούνιος	954	Δεκέμβριος	437

Πίνακας 6.11: kWh ανά μήνα 25^{ου} έτους

Παρατηρούμε ότι η χειρότερη μηνιαία εισροή ενέργειας είναι 427 kWh. Όμως στην πραγματικότητα αυτή η ενέργεια δε θα πάει ολόκληρη προς κατανάλωση, αλλά θα υπάρξουν και κάποιες απώλειες. Στον Πίνακα 6.12 φαίνονται οι απώλειες αυτές και υπολογίζεται ο συνολικός συντελεστής απωλειών από τα φ/β στην κατανάλωση.

Απώλειες καλωδιώσεων	0,98
Απώλειες Inverter	0,91
Απώλειες συσσωρευτών	0,85
Συνολικός Συντελεστής Απωλειών	0,76

Πίνακας 6.12: συντελεστές απωλειών ενέργειας από τα φ/β στην κατανάλωση

Έτσι λοιπόν η πραγματική παραγόμενη ενέργεια που πηγαίνει στην κατανάλωση για το 25^ο έτος είναι:

Μήνας	kWh	Μήνας	kWh
Ιανουάριος	384	Ιούλιος	763
Φεβρουάριος	408	Αυγούστος	744
Μάρτιος	564	Σεπτέμβριος	696
Απρίλιος	602	Οκτώβριος	536
Μαΐος	668	Νοέμβριος	342
Ιούνιος	725	Δεκέμβριος	342

Πίνακας 6.13:kWh που καταλήγουν στην κατανάλωση το 25^ο έτος

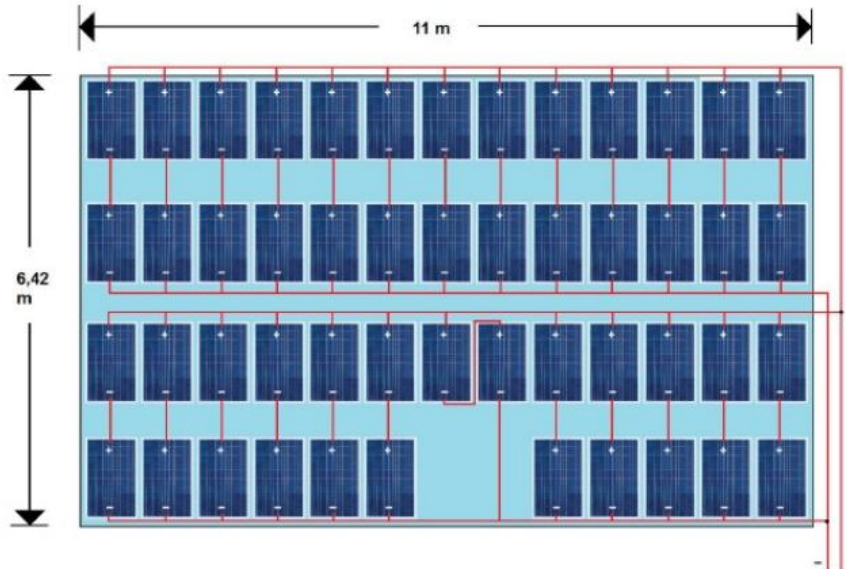
6.5.3 Διαστασιολόγηση και διάταξη φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Υπολογίσαμε λοιπόν ότι η φ/β συστοιχία μας,θα πρέπει να έχει ισχύ της τάξης των 8,5KW.Οι διαστάσεις από κάθε πάνελ είναι 1,515 Χ0,826m το οποίο είναι 1.,30095 τ.μ.Συνολικά η συστοιχία μας καλύπτει έκταση των 65,05 τ.μ και η έκταση της νότιας σκεπής είναι 70,4 τ.μ.Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συνοπτικά τα στοιχεία της διαστασιολόγησης.

Συνολική ισχύς	8,5 KW
Ισχύ ανά πάνελ	170 W
Συνολικός αριθμός πάνελ	50
Διαστάσεις – επιφάνεια πάνελ	1,575 x 0,826 m 1,30095 τ.μ.
Συνολική έκταση συστοιχίας	65,05 τ.μ.
Έκταση νότιας σκεπής	70,4 τ.μ.
Βάρος ανά πάνελ	16,3 kg
Συνολικό βάρος συστοιχίας	815 kg

Πίνακας 6.14:στοιχεία διαστασιολόγησης πάνελ

Για να έχουμε τάση εξόδου 48 V θα πρέπει να συνδέσουμε ανά 2 τα πλαίσια σε σειρά και όλες τις δυάδες μεταξύ τους παράλληλα.



Σχήμα 6.15: αναπαράσταση διάταξης φ/β συστοιχίας

Ρεύμα πλαισίου: **4,79 A**

Ρεύμα συστοιχίας: $25 \times 4,79 = \mathbf{119,75 A}$

Ρεύμα βραχ. Πλαισίου: **5,27 A**

Ρεύμα βραχ. Συστοιχίας: $25 \times 5,27 = \mathbf{131,75 A}$

Το επόμενο βήμα της τεχνικής μελέτης είναι ο υπολογισμός της ελάχιστης τάσης της ηλιογεννήτριας, ώστε να επιτυγχάνεται η φόρτιση των συσσωρευτών.

Η μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας των φ/β πλαισίων μπορεί να φθάσει μέχρι και τους 70°C , σε κατασκευές που επιτρέπουν την ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα στην πίσω πλευρά των πλαισίων. Σε αυτές τις περιπτώσεις από το datasheet του πλαισίου, υπολογίζεται ότι η τάση του πλαισίου είναι περίπου 28,53 V. Τα πλαίσια που είναι σε σειρά είναι 2, άρα η **τάση της συστοιχίας** είναι:

Τάση συστοιχίας στους 70°C : $2 \times 28,53 = \mathbf{57,06 V}$

Η **τάση φόρτισης των συσσωρευτών** επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας την ονομαστική τάση του υποσυστήματος των συσσωρευτών με το συντελεστή 1,2. Έτσι έχουμε:

Τάση φόρτισης των συσσωρευτών: $2 \times 24 \times 1,2 = \mathbf{57,6 V}$

Τέλος υπολογίζουμε την τάση της συστοιχίας σε συνθήκες STC(Standard Test Condition),πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των πλαισίων σε σειρά, με την αντίστοιχη τάση του πλαισίου σε συνθήκες STC:

Τάση συστοιχίας: $2 \times 35,5=71 \text{ V}$

Τάση ανοιχτού κυκλώματος πλαισίου: $2 \times 44,4 \text{ V}=88,8\text{V}$

6.6 Επιλογή-Διαστασιολόγηση συσσωρευτών

Ο συσσωρευτής που θα επιλέξουμε είναι ο << **2V 16 OPzS 2000**>> της εταιρίας ΕΡΓΟΝ με ονομαστική τάση 2V και χωρητικότητα 2520 AH σε εκφόρτιση 24 ωρών.Ανήκουν στη σειρά OPzS-Solar,είναι σωληνωτού τύπου χαμηλής συντήρησης,ειδικά σχεδιασμένοι για για κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης υψηλής αυτονομίας και ασφάλειας.Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του όπως τα δίνει ο κατασκευαστής.

Τύπος	Χωρητ. C24 (Ah)	Αριθμός πόλων	Τάση (V)	Ρεύμα βρ/σης (A)	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Ύψος (mm)	Βάρος με ηλ/τη (kg) $\pm 5\%$
2V 16 OPzS 2000 Solar LA-b	2.520	6	2	12.300	220	399	815	155,8

Σχήμα 6.16:στοιχεία επιλεγμένων συσσωρευτών



Σχήμα 6.17: συσσωρευτής τύπου OPzS-Solar

Στον πίνακα υπολογίζουμε τα Ah που θέλουμε να έχει ο συσσωρευτής μας.

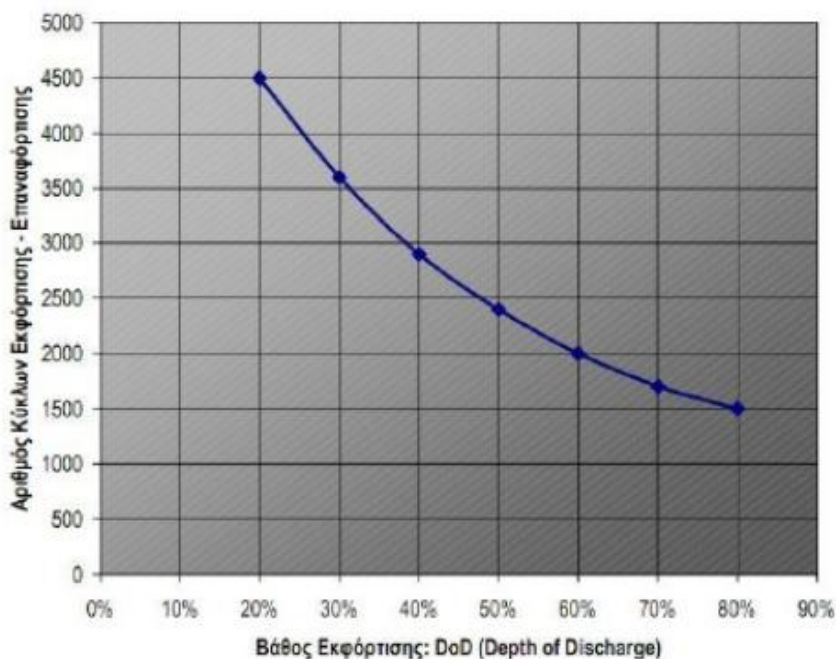
Συνήθως το βάθος εκφόρτισης είναι 60% σε αυτόνομες κατοικίες. Όμως εμείς χρησιμοποιούμε μικρό βάθος εκφόρτισης 30% για να αυξήσουμε το χρόνο ζωής των συσσωρευτών. Επιλέγουμε 2 μέρες αυτονομίας. Το παρακάτω σχήμα μας δείχνει τη σχέση του βάθους εκφόρτισης και των κύκλων ζωής. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής είναι 0,9, καθώς οι συσσωρευτές θα βρίσκονται σε υπόγειο με σχεδόν σταθερή θερμοκρασία κοντά στους 15°C.

Άρα αφού τα απαιτούμενα Ah σχεδόν συμπίπτουν με τη χωρητικότητα του επιλεγμένου συσσωρευτή, δε θα έχουμε παράλληλη σύνδεση και όλοι οι συσσωρευτές θα συνδεθούν σε σειρά.

Απαιτ. Ah	Ημέρες αυτονομίας	Μεγ. βάθος εκφόρτισης	Θερμοκ. συντελεστής	Απαιτούμενη χωρητικότητα συσσωρευτών (Ah)	Χωρητ. επιλεγμ. συσσωρ. C24 (Ah)
266,3	x 2	÷ 0,3	÷ 0,9	= 1.972	2.520

Σχήμα 6.18: υπολογισμός απαιτούμενων Ah

Ο αριθμός των συσσωρευτών υπολογίζεται από την απαιτούμενη τάση που είναι 48V. Άρα ο αριθμός των συσσωρευτών που απαιτείται είναι 24 συνδεδεμένοι σε σειρά. Με βάθος εκφόρτισης 30% τα οφέλιμα Ah είναι $0,3 \times 2520 = 756 \text{ Ah}$.



Σχήμα 6.19: αναλογία βάθους εκφόρτισης με αριθμό κύκλων ζωής σε θερμοκρασία 20°C

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι για βάθος εκφόρτισης 30%, έχουμε 3600 κύκλους ζωής, το οποίο σημαίνει 8,5 περίπου χρόνια ζωής.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ολοκληρώνοντας την μελέτη αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος για την τροφοδότηση μιας κατοικίας στη Θεσσαλονίκη συμπεραίνουμε ότι τέτοιου είδους μελέτες δεν είναι ιδιαίτερα απλές. Ο μηχανικός πρέπει να λάβει υπόψη του ένα πλήθος παραγόντων πριν προχωρήσει στην επιλογή των μονάδων και το μέγεθος της εγκατάστασης. Βασικό κριτήριο στις επιλογές του αποτελεί η επιθυμητή

αξιοπιστία του μελετώμενου συστήματος που όμως αντικρούεται με το αυξημένο κόστος των απαραίτητων μονάδων για την συγκρότηση του.

Οι ενδιαφερόμενοι πρέπει να κατανοήσουν ότι, εφόσον η ηλεκτρική τροφοδότησή τους βασίζεται αποκλειστικά σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, πρέπει να περιορίσουν τις ανάγκες τους σε ηλεκτρική ενέργεια στον μέγιστο δυνατό βαθμό. Ο μηχανικός οφείλει να τους προτείνει εναλλακτικές λύσεις σε ότι αφορά την χρήση συσκευών που μπορούν να αντικατασταθούν από άλλες που δεν απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια, όπου αυτό είναι δυνατόν, προκειμένου να παρθεί μια τελική και συγχρόνως ικανοποιητική απόφαση ως προς το μέγεθος της εγκατάστασης.

Σήμερα, τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα βρίσκουν εφαρμογή σε ελάχιστες περιπτώσεις εξαιτίας της μικρής αξιοπιστίας τους και του υπέρογκου ποσού χρημάτων που πρέπει να δαπανηθεί για την μελέτη και εγκατάστασή τους. Συνήθως, τα συναντάμε σε κατοικίες απομακρυσμένες από το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο ή εξοχικά σπίτια που κατοικούνται κυρίως κατά τους θερινούς μήνες και οι απαιτήσεις σε ενέργεια και αποθήκευσή αυτής είναι πολύ περιορισμένες.

Δεδομένου ότι τα συμβατικά καύσιμα έχουν κάποια όρια ύπαρξης και κάποτε θα εξαντληθούν, η τεχνολογία έχει ήδη στραφεί στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δίνοντας έμφαση στην ηλιακή. Αυτό είναι πολύ ενθαρρυντικό διότι η φωτοβολταϊκή τεχνολογία θα εξελιχθεί και στο μέλλον θα μπορούσε να αποτελέσει την κύρια πηγή ηλεκτρικής τροφοδότησης του ανθρώπου.

BIBLIOΓΡΑΦΙΑ

1. «Planning and Installing Photovoltaic Systems- A guide for installers, architects and engineers», second edition, Earthscan
2. www.rae.gr
3. www.ypeka.gr

4. «Renewable and Efficient Electric Power Systems», Gilbert M. Masters
5. “Φωτοβολταϊκά Συστήματα”, Ι. Φραγκιαδάκης, εκδόσεις Ζήτη, 2007
6. <http://solar.com.gr>
7. Λογισμικό “RETScreen” (<http://www.etscreen.net/>)
8. Διπλωματική εργασία Βεζυράκης Γιώργος, Κωνσταντίνου Κ/νος, “ Μοντελοποίηση και βέλτιστος σχεδιασμός αυτόνομου συστήματος”
9. www.wikipedia.org
10. «Ηπιες Μορφές Ενέργειας II», Ζαχαρίας Θωμάς, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2007
11. Ι.Ε.Φραγκιαδάκης, “Φωτοβολταϊκά Συστήματα 3^η Έκδοση”, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2009
12. Κάπος Μιλτιάδης, “Φωτοβολταϊκά, Υδροηλεκτρικά, αιολικά, Ηπιες και ανανεώσιμες πηγές ηλεκτρισμού”, 2009
13. Κ.Καγκαράκης, “Φωτοβολταϊκή τεχνολογία, ημιαγωγοί 2”, εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1987
14. Κ.Θ.Δέρβος, “Εισαγωγή στα ημιαγωγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις”, Ε.Μ.Π 2010
15. «Stand - Alone Photovoltaic Systems handbook of recommended design practices», Sandia National Laboratories, 1995
16. «Batteries and charge control in stand - alone photovoltaic systems», James P. Dunlop, Florida energy center, 1997

