

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

Πτυχιακή Εργασία 1581

Θέμα

**«Σχεδίαση αυτόνομου υβριδικού
Φωτοβολταϊκού συστήματος»**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΜΙΜΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΠΑΤΡΑ, 2016

Θέμα: «Σχεδίαση αυτόνομου υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος»

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με τη μελέτη ενός υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος για την αυτόνομη τροφοδότηση κατοικίας 150 τ.μ. Πιο συγκεκριμένα: Αρχικά γίνεται αναφορά των πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δηλαδή οι συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές. Παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των πηγών αυτών.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η θεωρία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, γίνεται λόγος για την ηλιακή ακτινοβολία, τη διακύμανσή της αλλά και για τους ηλιακούς συλλέκτες, τον προσανατολισμό και τη βέλτιστη κλίση των ηλιακών συλλεκτών, τις πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο, δηλαδή τα φωτοβολταϊκά πάνελ, τα οποία θα είναι η κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας της κατοικίας μας.

Στη συνέχεια περιγράφονται τα υλικά και οι τεχνολογίες των φ/β στοιχείων αλλά και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τόσο των στοιχείων όσο και των Φ/Β πλαισίων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας της οικίας μας.

Ποιο αναλυτικά περιγράφεται η δομή, η αρχή λειτουργίας, οι κατηγορίες, οι τύποι και όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός συσσωρευτή.

Ομοίως περιγράφονται τα ηλεκτρονικά των φ/β συστημάτων δηλαδή ο ανιχνευτής μέγιστου σημείου ισχύος, ο μετατροπέας DC-AC και ο ελεγκτής φόρτισης.

Στην συνέχεια γίνεται μια σύντομη αναφορά στη ντιζελογεννήτρια και τη λειτουργία αυτής κατά την ενσωμάτωση της στο φ/β σύστημα που μελετάμε.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η θεωρητική μελέτη του υβριδικού φ/β συστήματος με Η/Ζ δηλαδή με ντιζελογεννήτρια για την τροφοδότηση κατοικίας 150 τ.μ. Η μελέτη χωρίζεται σε τρία κύρια κομμάτια, στον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης της κατοικίας, στον υπολογισμό του συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί και στον τρόπο με τον οποίο θα καταμερισθεί η ισχύς ζήτησης.

Τέλος δίδονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη, και ως παράρτημα παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών της μελέτης που πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα PVGIS.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
<u>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</u>	1-19
1.1 Το Ενεργειακό Πρόβλημα	1
1.2 Πηγές Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας	2
1.2.1 Συμβατικές Πηγές Ενέργειας	2
1.2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	5
1.3 Φωτοβολταϊκά Συστήματα	10
1.3.1 Πλεονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	11
1.3.2 Μειονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	11
1.3.3 Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	12
1.3.4 Εφαρμογές Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	17
1.3.5 Εξέλιξη της Εγκατεστημένης Ισχύος των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων στην Ελλάδα	19
1.3.6 Αναμενόμενη Εξέλιξη τα Επόμενα Χρόνια	19
<u>Κεφάλαιο 2: Ηλιακή Ακτινοβολία</u>	20-40
2.1 Ο Ήλιος	20

2.1.1 Η Ακτινοβολία του Ήλιου	21
2.1.2 Σύσταση Ηλιακού Φάσματος	22
2.1.3 Η Διακύμανση της Ηλιακής Ακτινοβολίας	23
2.2 Ηλιακή Σταθερά G_{sc}	26
2.3 Ηλιακή Γεωμετρία	27
2.3.1 Ορισμοί	27
2.3.2 Σφαιρικές Συντεταγμένες	30
2.4 Ο Ηλιακός Συλλέκτης και ο Προσανατολισμός του	34
2.4.1 Η Βέλτιστη Κλίση του Συλλέκτη	36
<u>Κεφάλαιο 3: Φωτοβολταϊκή Μετατροπή</u>	41-69
3.1 Τι είναι το Φωτοβολταϊκό Στοιχείο	41
3.2 Ημιαγωγοί	42
3.3 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο	43
3.4 Υλικά και Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών Στοιχείων	45
3.4.1 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Πυριτίου	45
3.4.2 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Άλλων Υλικών, Λεπτών Επιστρώσεων	47
3.5 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Στοιχείου	49
3.5.1 Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Κύκλωμα Φωτοβολταϊκού Στοιχείου και Χαρακτηριστική Εξίσωση	49
3.5.2 I-V Χαρακτηριστική Φωτοβολταϊκού Στοιχείου	51
3.5.3 Ο Βαθμός Απόδοσης	57
3.6 Η Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια	60
3.6.1 Το φωτοβολταϊκό Πλαίσιο	61
3.6.2 Η Απόδοση του Φωτοβολταϊκού Πλαισίου	62
3.6.3 Η Επίδραση της Θερμοκρασίας και της Ρύπανσης	63
3.6.4 Η Ισχύς Αιχμής του Φωτοβολταϊκού Πλαισίου	65

3.6.5 Απώλεια Ισχύος-Φαινόμενο HOT-SPOT	66
3.6.6 Μέθοδοι Θεραπείας	69
<u>Κεφάλαιο 4: Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας</u>	70-86
4.1 Η Ανάγκη για Αποθήκευση	70
4.1.1 Ηλιακοί Συσσωρευτές	70
4.2 Δομή Συσσωρευτών	71
4.3 Αρχή Λειτουργίας Συσσωρευτών	73
4.4 Κατηγορίες Στοιχείων και Συσσωρευτών	74
4.4.1 Πρωτεύοντα Στοιχεία ή Συσσωρευτές	74
4.4.2 Δευτερεύοντα Στοιχεία ή Συσσωρευτές	74
4.5 Τύποι Συσσωρευτών	75
4.5.1 Συσσωρευτές Μολύβδου	75
4.5.2 Άλλοι Τύποι Συσσωρευτών	75
4.6 Κύκλος Λειτουργίας (DUTY CYCLE)	78
4.7 Χαρακτηριστικά Μεγέθη ενός Συσσωρευτή	79
4.7.1 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά	79
4.7.2 Χωρητικότητα	80
4.7.3 Εκφόρτιση και Επιτρεπόμενο Βάθος Εκφόρτισης	80
4.7.4 Αυτοεκφόρτιση	81
4.7.5 Φόρτιση	82
4.7.6 Χρόνος Ζωής Συσσωρευτή	82
4.7.7 Συντελεστής Γήρανσης Συσσωρευτή	83
4.7.8 Συντελεστής Φόρτισης και Απόδοση	83
4.8 Οι Συσσωρευτές στα Φωτοβολταϊκά Συστήματα	84
4.8.1 Κύκλος Λειτουργίας σε Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα	85

με Εφεδρική Πηγή	
4.8.2 Ονομαστική Χωρητικότητα και Παρεχόμενη Ισχύς από τους Συσσωρευτές κατά τη Λειτουργίας τους σε Φωτοβολταϊκά Συστήματα	85
<u>Κεφάλαιο 5: Τα Ηλεκτρονικά των Φωτοβολταϊκών</u>	87-99
5.1 Εισαγωγή	87
5.2 Μονάδες Μετατροπής Ισχύος	88
5.3 Μετατροπέας (Inverter) DC-AC	90
5.4 Σχεδίαση ενός DC-AC Μετατροπέα	94
5.4.1 Πλευρά Εισόδου του Μετατροπέα (Input Side)	94
5.4.2 Πλευρά Εξόδου του Μετατροπέα	95
5.5 Ελεγκτής Φόρτισης	97
5.5.1 Παράλληλος Ρυθμιστής Φόρτισης (Shunt Controller)	98
5.5.2 Ρυθμιστής Φόρτισης σε Σειρά (Series Controller)	99
<u>Κεφάλαιο 6: Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος (H/Z)</u>	100-107
6.1 Η Γεννήτρια DIESEL	100
6.1.1 Ιστορική Αναδρομή	100
6.1.2 Υπάρχουσες Τεχνολογίες	102
6.1.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά	103
6.2 Φωτοβολταϊκό Υβριδικό Σύστημα με Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος	105
6.2.1 Εισαγωγή	105
6.2.2 Περιγραφή του υπό Μελέτη Συστήματος	107
<u>Κεφάλαιο 7: Μελέτη Αυτόνομου Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος για την τροφοδότηση οικίας 150 τ.μ.</u>	108-130
7.1 Εισαγωγή	108
7.2 Ηλεκτρική Ενέργεια Κατανάλωση Κατοικίας	109

7.3 Υπολογισμός Αυτόνομου Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος	114
7.4 Καταμερισμός της Ισχύος Ζήτησης	125
<u>Συμπεράσματα</u>	131-132
<u>Παράρτημα</u>	133-146
<u>Βιβλιογραφία</u>	147-148

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Το Ενεργειακό Πρόβλημα

Από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα, όταν άρχισαν οι εφαρμογές του ηλεκτρισμού, μέχρι τις αρχές της 10ετίας του '70, παρατηρείται διεθνώς μία συνεχής συγκέντρωση της παραγωγής σε συνεχώς μεγαλύτερους «Σταθμούς Παραγωγής» και παράλληλα ανάπτυξη των δικτύων Μεταφοράς και Διανομής με συνεχώς μεγαλύτερες τάσεις, λόγω της ραγδαίας αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συνέβη και στην χώρα μας με την ανάπτυξη του Εθνικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), η οποία κατά την περίοδο 1956-63 (περίπου) εξαγόρασε τις 300 περίπου ηλεκτρικές εταιρείες που προμήθευαν τότε την ηλεκτρική ενέργεια με μικρά τοπικά δίκτυα. Όμως, με αφορμή τις «πετρελαϊκές κρίσεις» της 10ετίας του '70, άρχισε να γίνεται διεθνώς συνειδηση η ανάγκη καλύτερης αξιοποίησης της ενέργειας, αφενός μεν για να αξιοποιούνται καλύτερα οι διατιθέμενοι ενεργειακοί πόροι, αφετέρου δε για να περιορίζεται η ρύπανση του περιβάλλοντος. Το θέμα της ενέργειας παραμένει στο επίκεντρο του αιώνα αυτού, θα καθορίσει αναμφίβολα τις εξελίξεις του επόμενου και μπορεί να προσεγγιστεί από τρεις διαφορετικές απόψεις:

- Της εξασφάλισης της αναγκαίας ποσότητας ενέργειας, στην κατάλληλη για την κάθε χρήση μορφή, δηλαδή της ενεργειακής επάρκειας.
- Του κόστους αυτής της ενέργειας.
- Των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση της.

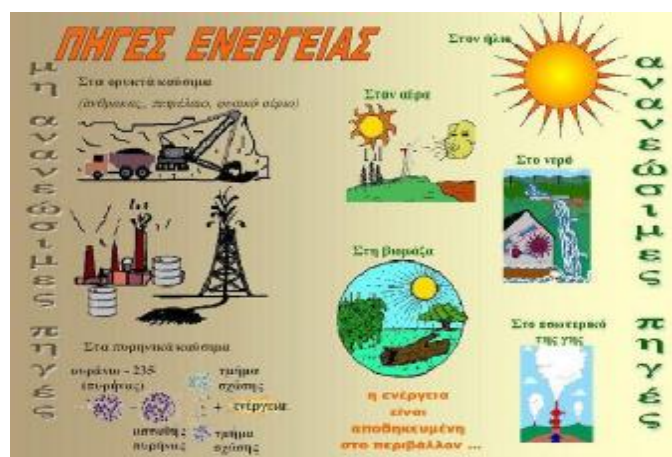
Αυτές οι τρεις απόψεις συνθέτουν ότι έχει γίνει ευρύτερα γνωστό με τον όρο «ενεργειακό πρόβλημα». Εξαιτίας του ενεργειακού προβλήματος άρχισε σε διεθνές επίπεδο η αναζήτηση Εναλλακτικών Πηγών Ενέργειας, σε αντιστάθμισμα των

Συμβατικών Πηγών, όπως είναι το κάρβουνο και το πετρέλαιο, καθώς και της πυρηνικής ενέργειας, η οποία βεβαίως παρουσιάζει τα γνωστά προβλήματα.

Παράλληλα άρχισε μία προσπάθεια για την εξοικονόμηση και γενικότερα την καλύτερη και αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας. Οι παραπάνω παράγοντες συνέβαλαν αποφασιστικά αφενός μεν στην ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), αφετέρου δε στην ανάπτυξη συστημάτων Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ).

1.2 Πηγές Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται παγκοσμίως προέρχεται κυρίως από γαιάνθρακες, φυσικό αέριο, πυρηνική ενέργεια και μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι μόνο 2%. Η τάση πάντως της χρησιμοποίησης των ανανεώσιμων τεχνολογιών δίνει ενθαρρυντικά μηνύματα για το μέλλον.



Σχήμα 1.1. Πηγές Ενέργειας.

1.2.1 Συμβατικές Πηγές Ενέργειας

Ονομάζονται επίσης μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αποκαλούνται έτσι γιατί δεν είναι δυνατό να ανανεώσουν σε εύλογο, για τον άνθρωπο, χρονικό διάστημα την

αποθηκευμένη τους ενέργεια. Η διαδικασία σχηματισμού τους διήρκεσε εκατομμύρια χρόνια. Οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν:

- Ορυκτά καύσιμα

Τα ορυκτά καύσιμα (fossil fuels) είναι ένας γενικός ορισμός που αποδίδεται σε καύσιμα που σχηματίζονται στη γη από υπολείμματα φυτικών ή ζωικών οργανισμών. Τα κυριότερα ορυκτά καύσιμα είναι υδρογονάνθρακες με κυριότερους εκπροσώπους τους γαιάνθρακες, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.



Σχήμα 1.2. Μονάδα διύλισης πετρελαίου.

Όλες οι παγκόσμιες οικονομίες εξαρτώνται άμεσα ή έμμεσα ενεργειακά από τα ορυκτά καύσιμα. Εκτός από το μειονέκτημα της πεπερασμένης πρώτης ύλης τα ορυκτά καύσιμα ευθύνονται κατά πολύ για τη ρύπανση του πλανήτη και για διάφορα περιβαλλοντολογικά προβλήματα.

- Πυρηνική ενέργεια

Άλλη πολύ σημαντική πηγή ενέργειας είναι η πυρηνική. Παρόλα αυτά και η πυρηνική ενέργεια σχετίζεται με ορυκτό καύσιμο μιας και το ουράνιο που χρησιμοποιείται είναι ορυκτό και μάλιστα δυσεύρετο. Η πυρηνική ενέργεια είναι μια ιδιαίτερα αμφιλεγόμενη μορφή ενέργειας γιατί παρά το αρκετά χαμηλό κόστος παραγωγής, σε περίπτωση ατυχήματος τα αποτελέσματα θα είναι δραματικά. Ένα ακόμα πρόβλημα είναι ότι τα απόβλητα μιας τέτοιας παραγωγικής διαδικασίας είναι ιδιαίτερα

ραδιενεργά με αποτέλεσμα να απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις για την επ' αόριστων αποθήκευση των αποβλήτων. Τη μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρισμού από πυρηνική ενέργεια έχει η Γαλλία με 59 αντιδραστήρες και ποσοστό ενεργειακής κάλυψης 78%.



Σχήμα 1.3. Πυρηνικό εργοστάσιο.

- Υδροηλεκτρική ενέργεια

Σε ποσοστό 16% της ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως παράγεται από μεγάλους υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Η εκμετάλλευση υδάτινου δυναμικού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτει μεγάλες ανάγκες ειδικά σε χώρες όπου υπάρχουν μεγάλα ποτάμια. Έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν περισσότερα χρόνια από ότι ένας αντιδραστήρας καυσίμου. Υπάρχουν αρκετές χώρες που έχουν μεγάλη ενεργειακή εξάρτηση από τις υδροηλεκτρικές τους εγκαταστάσεις όπως ο Καναδάς και η Βραζιλία.

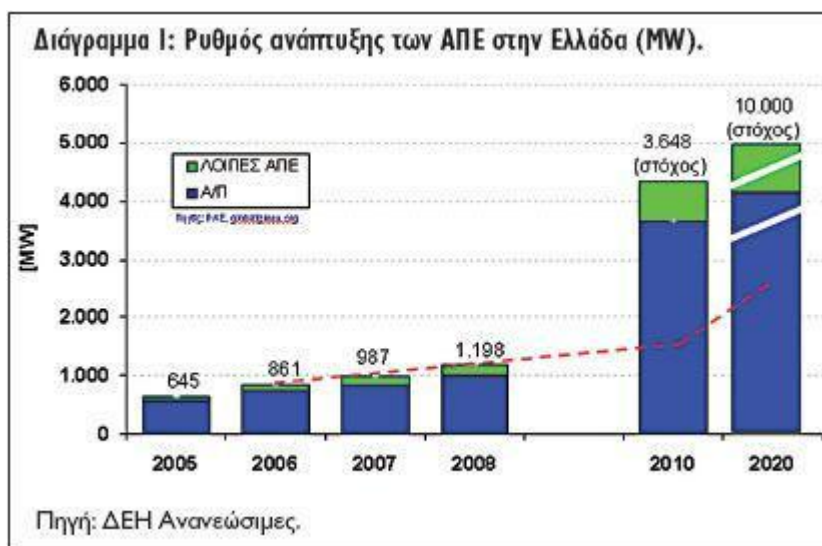


Σχήμα 1.4. Υδροηλεκτρική ενέργεια στο Νιαγάρα.

1.2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ονομάζονται αυτές που από τη φύση τους ανανεώνονται και είναι διαρκώς και ασταμάτητα διαθέσιμες σε άφθονη ποσότητα, δηλαδή είναι ανεξάντλητες. Θα διαρκέσουν όσο θα υπάρχει και ο πλανήτης σε μορφή που να μπορούσε να ζει άνθρωπος. Ο ήλιος για παράδειγμα δεν θα πάψει ποτέ (τουλάχιστον για αρκετά εκατομμύρια χρόνια) να λάμπει στον ουρανό και να μας προσφέρει τη φωτεινή και θερμική του ενέργεια. Ακόμη σε αυτή την κατηγορία συγκαταλέγονται η Αιολική ενέργεια, η Γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια Θαλασσίων Κυμάτων κ.α.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εκπέμπουν περιορισμένα ή καθόλου αέρια που ευθύνονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα που δίνουν οι ανανεώσιμες πηγές για τη δημιουργία καταμεμημένων δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για τις περισσότερες ΑΠΕ δεν υπάρχει κόστος πρώτης ύλης, ενώ και το κόστος συντήρησης είναι περιορισμένο. Στο σύνολο τους οι ΑΠΕ υπόσχονται να δώσουν σπουδαίες εναλλακτικές τεχνικές στο ενεργειακό πρόβλημα αλλά και να δώσουν λύσεις στα τεράστια περιβαλλοντολογικά προβλήματα του πλανήτη.



Σχήμα 1.5. Ρυθμός ανάπτυξης των ΑΠΕ στην Ελλάδα. [28]

Οι περισσότεροι γνωστές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι:

- Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας έτσι τους ανέμους. Είναι μια ήπια μορφή ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον, πρακτικά ανεξάντλητη, γι' αυτό και είναι ανανεώσιμη. Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 5,1 m/sec, σε ύψος 10 m πάνω από το έδαφος. Όταν οι άνεμοι πνέουν με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, τότε το αιολικό δυναμικό του τόπου θεωρείται εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα. Το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών έχει μειωθεί σημαντικά και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την πρώτη περίοδο ωριμότητας, καθώς είναι πλέον ανταγωνιστική των συμβατικών μορφών ενέργειας.

Η χώρα μας διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό και η αιολική ενέργεια μπορεί να γίνει σημαντικός μοχλός ανάπτυξης της. Από το 1982, οπότε εγκαταστάθηκε από τη ΔΕΗ το πρώτο αιολικό πάρκο στην Κύθνο, μέχρι και σήμερα έχουν εγκατασταθεί στην Άνδρο, στην Εύβοια, στη Λήμνο, Λέσβο, Χίο, Σάμο και στην Κρήτη εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο συνολικής ισχύος πάνω από 30 MW.



Σχήμα 1.6. Αιολικό πάρκο στην Κρήτη.

- Γεωθερμική ενέργεια

Γεωθερμική ενέργεια ονομάζεται η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμφανίζεται με τη μορφή θερμού νερού ή ατμού. Η ενέργεια αυτή σχετίζεται με την ηφαιστειότητα και τις ειδικότερες γεωλογικές και γεωτεκτονικές συνθήκες της κάθε περιοχής. Είναι μια ήπια και σχετικά ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή, που με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα μπορεί να καλύψει σημαντικές ενεργειακές ανάγκες.

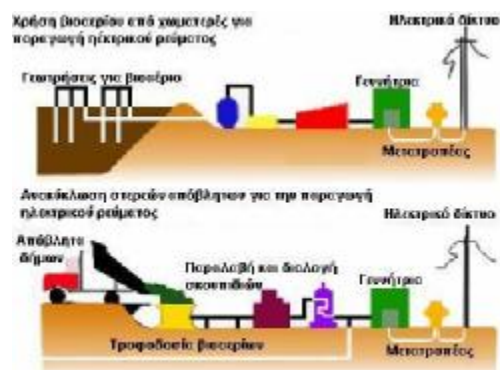


Σχήμα 1.7. Γεωθερμική ενέργεια στην Ισλανδία.

- Βιομάζα

Η ενέργεια της βιομάζας είναι δευτερογενής ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια μετασχηματίζεται από τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης. Οι βασικές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι το νερό και ο άνθρακας, που είναι άφθονα στη φύση. Βασικό πλεονέκτημα της βιομάζας είναι ότι είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και ότι παρέχει ενέργεια αποθηκευμένη με χημική μορφή. Η αξιοποίηση της μπορεί να γίνει με μετατροπή της σε μεγάλη ποικιλία προϊόντων με διάφορες μεθόδους και τη χρήση σχετικά απλής τεχνολογίας. Σαν πλεονέκτημά της καταγράφεται και το ότι κατά την παραγωγή και τη μετατροπή της δεν δημιουργούνται οικολογικά και περιβαλλοντολογικά προβλήματα. Από την άλλη, σαν μορφή ενέργειας η βιομάζα χαρακτηρίζεται από πολυμορφία, χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο, σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, λόγω χαμηλής πυκνότητας και/ή υψηλής περιεκτικότητας σε νερό, εποχικότητα, μεγάλη διασπορά, κλπ. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνεπάγονται πρόσθετες, σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα, δυσκολίες στη συλλογή, μεταφορά και

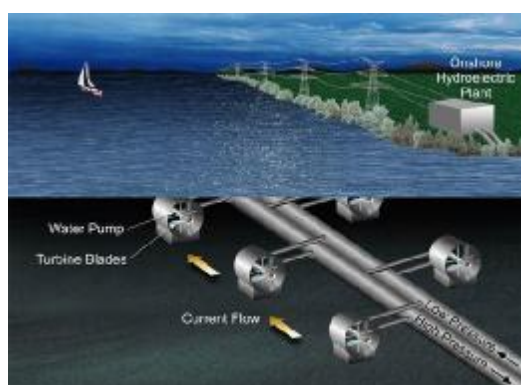
αποθήκευσή της. Σαν συνέπεια το κόστος μετατροπής της σε πιο εύχρηστες μορφές ενέργειας παραμένει υψηλό.



Σχήμα 1.8. Τρόπος παραγωγής βιοαερίου από χυματερές και μονάδες επεξεργασίας αστικών αποβλήτων. [27]

- Υδροδυναμική ενέργεια

Υδροδυναμική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παρέχεται στον άνθρωπο από τη δύναμη του νερού στη φύση. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος χρήσης της είναι μέσω των υδατοπτώσεων αλλά και των φραγμάτων. Μεγάλη προσπάθεια γίνεται τα τελευταία χρόνια για επενδύσεις σε συστήματα που θα εκμεταλλεύονται την ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας αλλά και των παλιρροιών. Η υδροδυναμική ενέργεια είναι μια καθαρή, ανεξάντλητη και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που δεν μολύνει το περιβάλλον και παρέχεται από τη φύση με περίσσεια.



Σχήμα 1.9. Υδροδυναμική ενέργεια.

- Ενέργεια θαλασσίων κυμάτων-παλιρροιών

Οι ωκεανοί, οι οποίοι καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος του πλανήτη, αποτελούν μια τεράστια αποθήκη ενέργειας. Υπάρχουν τρεις τρόποι για να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια των ωκεανών από:

Ενέργεια Κυμάτων

Τα κύματα περικλείουν τεράστια ποσά ενέργειας τα οποία προς το παρόν παραμένουν ανεκμετάλλευτα. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα για την πρακτική αξιοποίηση της ενέργειας αυτής είναι ο ακανόνιστος και τυχαίος χαρακτήρας τους. Στη Χαβάη πάντως (οι ακτές της οποίας χαρακτηρίζονται από ένα σχετικά σταθερό κυματισμό), λειτουργεί ήδη ο πρώτος σταθμός ισχύος 20 MW.

Παλιρροϊκή ενέργεια

Τα εισερχόμενα νερά της παλίρροιας στην ακτή κατά την πλημμυρίδα μπορούν να παγιδευτούν σε φράγματα, οπότε κατά την άμπωτη τα αποθηκευμένα νερά ελευθερώνονται και κινούν έναν υδροστρόβιλο κατά τον ίδιο τρόπο που συμβαίνει και στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Ο πρώτος παλιρροϊκός σταθμός κατασκευάστηκε στην πόλη La Rance της Γαλλίας με μέση ετήσια ισχύ 500 MW.

Θερμική Ενέργεια Ωκεανών

Η θερμοκρασία της θάλασσας μεταβάλλεται σε σχέση με το βάθος. Για παράδειγμα η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και βάθους ως 600 m μπορεί να φτάσει και τους 20 βαθμούς Κελσίου. Η διαφορά αυτή θερμοκρασίας μπορεί να αποτελέσει μια εκμεταλλεύσιμη μορφή ενέργειας.

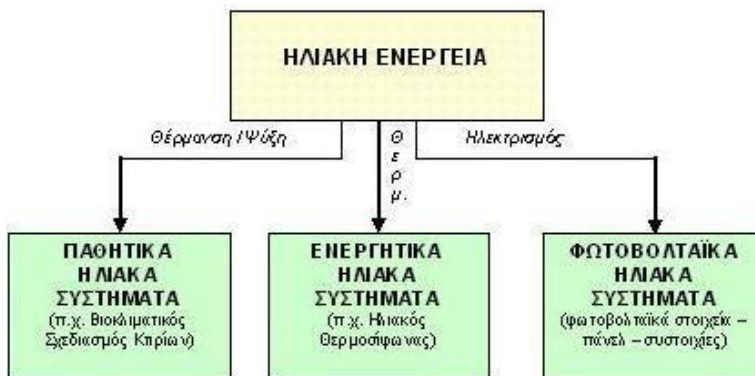


Σχήμα 1.10. Ενέργεια κυμάτων.

- Ηλιακή ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας. Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της.

Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.



Σχήμα 1.11. Κατηγορίες εφαρμογών που προκύπτουν από την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας.

1.3 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν τις ρίζες τους στα διαστημικά προγράμματα των ΗΠΑ και χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά γύρω το 1960 σε δορυφόρους ισχύος. Ακόμα εκπληρώνουν αυτό το ρόλο. Ο άλλος πρώιμος τομέας που οδήγησε στην επέκταση της αγοράς ήταν εφαρμογές για πολύ μικρές ποσότητες ισχύος όπως σε τηλεπικοινωνίες.

1.3.1 Πλεονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

- Λειτουργούν αθόρυβα, καθαρά, χωρίς κατάλοιπα, αποφεύγοντας τη μόλυνση του περιβάλλοντος.
- Λειτουργούν χωρίς κινητά μέρη, με ελάχιστη συντήρηση.
- Λειτουργούν χωρίς καύσιμα.
- Λειτουργούν και με νεφελώδη ουρανό (διάχυτη ακτινοβολία).
- Δεν χρησιμοποιούν υγρά ή αέρια σε αντίθεση με τα θερμικά συστήματα.
- Κατασκευάζονται από πυρίτιο, ένα από τα πλέον εν αφθονία στοιχεία.
- Πλέον αποδοτικά σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Έχουν γρήγορη απόκριση σε ξαφνικές μεταβολές της ηλιοφάνειας.
- Αν ένα κομμάτι πάθει βλάβη το σύστημα συνεχίζει τη λειτουργία του μέχρι την αντικατάστασή του.
- Μεγάλες δυνατότητες σε μια ευρεία περιοχή ισχύων (από mW μέχρι MW).
- Έχουν μεγάλο λόγο ισχύος/βάρους επομένως κατάλληλα για εγκατάσταση σε στέγες.
- Είναι κατάλληλα για επιτόπιες εφαρμογές όπου δεν υπάρχει ή δε συμφέρει η επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου.
- Είναι δυνατόν να συναρμολογηθούν τυποποιημένα στοιχεία μαζικής παραγωγής σε σύστημα οποιουδήποτε μεγέθους (και βαθμό απόδοσης πρακτικά ανεξάρτητο του μεγέθους) για να καλύψουν μικρές, μέσες και μεγάλες ενεργειακές ανάγκες. [11]

1.3.2 Μειονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

- Το σχετικά υψηλό κόστος αγοράς και η έλλειψη επιδοτήσεων ήταν ως πριν λίγο ο κυριότερος λόγος για τη στασιμότητα της ελληνικής αγοράς φ/β, (π.χ. η έλλειψη επιχορήγησης για τον οικιακό καταναλωτή, έλλειψη επιχορήγησης της παραγόμενης φ/β kWh).
- Τα φωτοβολταϊκά, όπως άλλωστε και όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), έχουν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και ασήμαντο λειτουργικό κόστος, αντίθετα με τις συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες που συνήθως έχουν σχετικά μικρότερο αρχικό επενδυτικό κόστος και υψηλά λειτουργικά κόστη. Το κλίμα αυτό όμως τώρα αλλάζει δραματικά. Πολλές χώρες έχουν ξεκινήσει τα τελευταία χρόνια σημαντικά προγράμματα ενίσχυσης των φωτοβολταϊκών, με γενναίες επιδοτήσεις τόσο της

αγοράς και εγκατάστασης φωτοβολταϊκών, όσο και της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας.

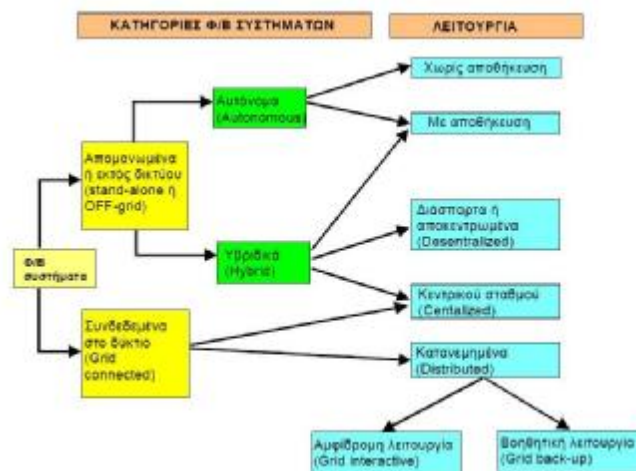
- Ο απαραίτητος περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απορρυπαντικό για να αποφευχθεί η μείωση της απόδοσης από τη ρύπανση (αιθάλη, σκόνη, αλάτι θαλάσσης κτλ).
- Υπάρχει ανάγκη αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών με ανεμογεννήτριες και συμβατικές μηχανές παραγωγής λόγω ετεροχρονισμού φορτίου και παραγωγής.

1.3.3 Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Τα Φ/Β Συστήματα χαρακτηρίζονται από μεγάλο εύρος εφαρμογών με κριτήριο την απαίτηση ισχύος. Το εύρος αυτό αναφέρεται στην κάλυψη ηλεκτρικής ισχύος καταναλωτικών προϊόντων χαμηλής ισχύος, όπως αριθμομηχανές και ωρολόγια, έως συστήματα μεγάλης ισχύος όπως της τροφοδοσίας απομακρυσμένων ή όχι από κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα κτιριακών συγκροτημάτων ή ακόμη και νησιών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω υπάρχει διάκριση των Φ/Β συστημάτων σε δύο βασικές κατηγορίες οι οποίες είναι:

1. Απομονωμένα ή εκτός δικτύου Φ/Β συστήματα (Stand-alone – Off-grid).
2. Συστήματα συνδεδεμένα σε δίκτυο (On-grid).



Σχήμα 1.12. Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων. [8]

Τα απομονωμένα συστήματα δεν είναι συνδεδεμένα σε κάποιο εθνικό ή τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας γι' αυτό ονομάζονται επίσης και Φ/Β συστήματα εκτός δικτύου (off-grid). Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που χρειάζεται ηλεκτρική ισχύς σε κάποιο σημείο όπου είναι αδύνατη η μεταφορά ενέργειας ή αν υπάρχει η επιθυμία πλήρους αυτονομίας ηλεκτρικής ενέργειας από κάποιο δίκτυο και έχουν τυπικές τιμές ισχύος 100 Wp έως 200 kWp.

Διακρίνονται σε δύο επιμέρους κατηγορίες:

1. Αυτόματα Φ/Β συστήματα.
2. Υβριδικά Φ/Β συστήματα.

Αυτόνομα Φ/Β Συστήματα

Στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα η αναγκαία ηλεκτρική ενέργεια παράγεται αποκλειστικά από Φ/Β συστοιχίες. Η παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι άμεση στους καταναλωτές ή μέσω συσσωρευτών. Επίσης, η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι συνεχούς (DC) ή εναλλασσόμενης τάσης (AC). Σύμφωνα με τα παραπάνω υπάρχει διάκριση των αυτόνομων συστημάτων ως εξής:

Άμεσης τροφοδοσίας του φορτίου (Direct- coupled): Στα συγκεκριμένα συστήματα η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αποδίδεται απευθείας στο φορτίο και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές στις οποίες δεν απαιτείται τακτική λειτουργία του συστήματος καθώς και σε φορτία συνεχούς ρεύματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα συστήματα άντλησης νερού.

Με αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας: Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν συσσωρευτές για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Σχεδιάζονται σύμφωνα με τις επιθυμητές μέρες αυτονομίας πράγμα το οποίο καθορίζει το μέγεθος των συσσωρευτών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα Φ/Β συστήματα τροφοδοσίας φωτισμού οδών, διατάξεων πυρανίχνευσης δασικών εκτάσεων, τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού σε δύσβατες περιοχές, τροχόσπιτων και φάρων σε θαλάσσιες περιοχές.

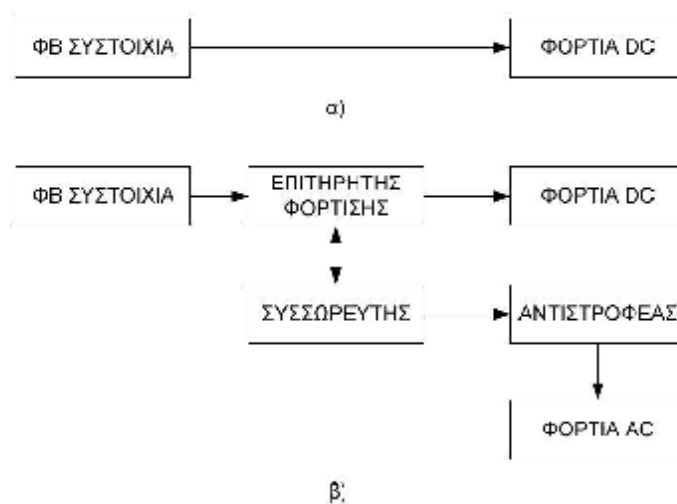
Τα βασικά μέρη ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος είναι:

- Οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες.
- Οι αντιστροφείς.
- Οι μετατροπείς τάσης DC/DC.

- Οι ελεγκτές φόρτισης μπαταριών.
- Οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης (Τράπεζα μπαταριών).



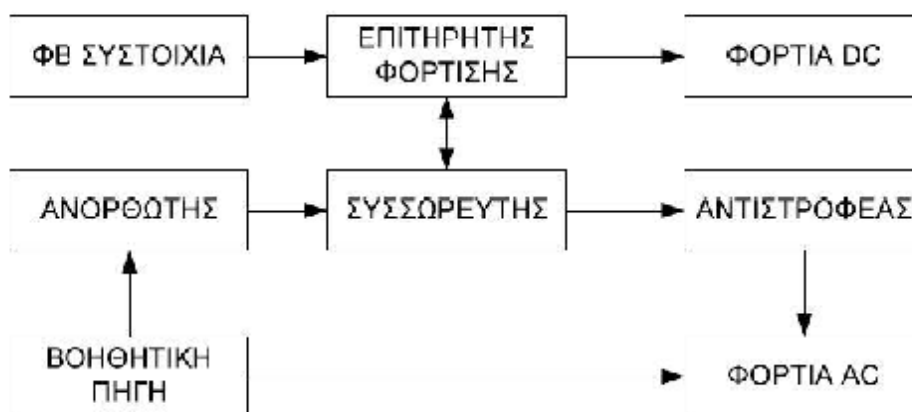
Σχήμα 1.13. Αυτόνομο Φ/Β σύστημα.



Σχήμα 1.14. Αυτόνομο Φ/Β σύστημα α) άμεσης τροφοδοσίας του φορτίου και β) με αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. [8]

Υβριδικά Φ/Β Συστήματα

Όταν η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια δεν καλύπτεται από τη Φ/Β συστοιχία σε αυτόνομα Φ/Β συστήματα τότε χρησιμοποιείται ο συνδυασμός της με κάποια άλλη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι πηγές μπορεί να είναι συμβατικών καυσίμων ή από Α.Π.Ε. Κυρίως χρησιμοποιούνται ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ή ανεμογεννήτριες αντίστοιχα. Συχνά στα συστήματα αυτά προβλέπεται αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν εφαρμογές στις οποίες υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με αυτά που προαναφέρθηκαν παραπάνω όπως Ιερές Μονές και εξοχικές κατοικίες. Χαρακτηριστική εφαρμογή αποτελεί η ενσωμάτωση Φ/Β συστημάτων σε κατοικίες η μελέτη μίας εκ των οποίων αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 1.15. Υβριδικό Φ/Β σύστημα. [8]

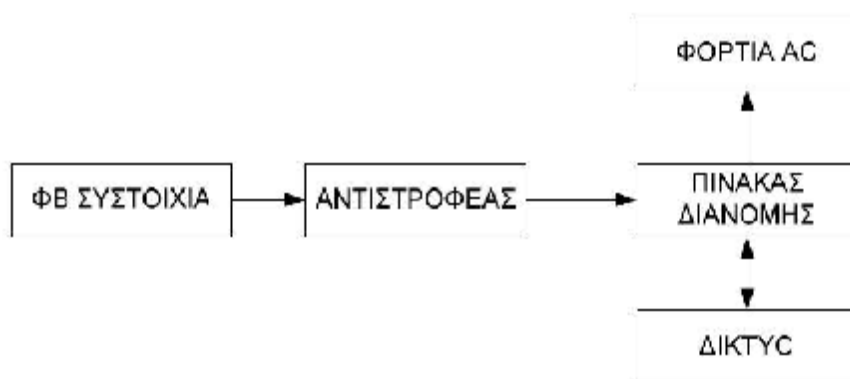
Φ/Β συστήματα Συνδεδεμένα στο Δίκτυο

Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο Φ/Β συστήματα παράγουν το μεγαλύτερο ποσοστό ισχύος των εγκατεστημένων Φ/Β συστημάτων. Τα συγκεκριμένα Φ/Β συστήματα είναι συνδεδεμένα σε κάποιο δίκτυο ηλεκτρικής παροχής αντλώντας από αυτό την ηλεκτρική ισχύ την οποία δε μπορούν να καλύψουν καθιστώντας μη απαραίτητη την αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης μπορεί να συνιστούν μεγάλης ισχύος κεντρικούς Φ/Β σταθμούς με ισχύ μεγαλύτερη των 50 kW_p, η οποία

διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο (Centralized systems), ή να είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο ως καταναμημένα συστήματα (Distributed).



Σχήμα 1.16. Διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα.



Σχήμα 1.17. Φ/Β σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο. [8]

Τα καταναμημένα συστήματα αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των παγκοσμίων συνδεδεμένων στο δίκτυο Φ/Β συστημάτων με τυπικό μέγεθος 1,5 kWp έως 20 kWp. Διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο αλληλεπίδρασης τους με το δίκτυο:

Φ/Β συστήματα που χρησιμοποιούν το δίκτυο ως βοηθητική πηγή ενέργειας:

Το σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε να καλύπτει τις μέσες μηνιαίες ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής. Στις περιπτώσεις έκτακτης ενεργειακής ζήτησης ή αστοχίας του Φ/Β συστήματος το δίκτυο καλύπτει τη ζήτηση ισχύος.

Φ/Β συστήματα τα οποία λειτουργούν με συνεχή αλληλεπίδραση με το δίκτυο:

Το σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε να καλύπτει τις ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής. Σύμφωνα με τα παραπάνω, στην ιδανική περίπτωση, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι ίση ή μεγαλύτερη με την ενέργεια του δικτύου προς την εφαρμογή. Χαρακτηριστική εφαρμογή αποτελεί η ενσωμάτωση συστημάτων σε κατοικίες και κτίρια.

1.3.4 Εφαρμογές Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Τα Φ/Β συστήματα απευθύνονται σε περιοχές εφαρμογών , όπου το σχετικά υψηλό κόστος τους δεν αποτελεί σημαντικό εμπόδιο. Οι εφαρμογές αυτές συνήθως χαρακτηρίζονται από:

- Χαμηλές ενεργειακές ανάγκες.
- Έλλειψη εναλλακτικών τρόπων παροχής ενέργειας ή όπου υπάρχουν, αυτοί είναι πολύ ακριβοί (π.χ. σύνδεση με ένα απομακρυσμένο δίκτυο).
- Απαιτήσεις υψηλής αξιοπιστίας ή και χαμηλές ανάγκες συντήρησης.



Σχήμα 1.18. Εγκατάσταση οικιακού φωτοβολταϊκού συστήματος.

- Σαν κυριότερες κατηγορίες εφαρμογών Φ/Β συστημάτων μπορούν να θεωρηθούν οι εξής:

α) Καταναλωτικά προϊόντα (0,001– 100 W_p)

- Τα συστήματα της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούνται σε περιοχές που δεν είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο ή σε τροχόσπιτα, σκάφη αναψυχής, κλπ, για την εξυπηρέτηση αναγκών φωτισμού και ψύξης και για προϊόντα όπως ηλεκτρονικοί υπολογιστές, φανοί κ.ά.

β) Αυτόνομα ή απομονωμένα συστήματα (100W_p – 200 kW_p)

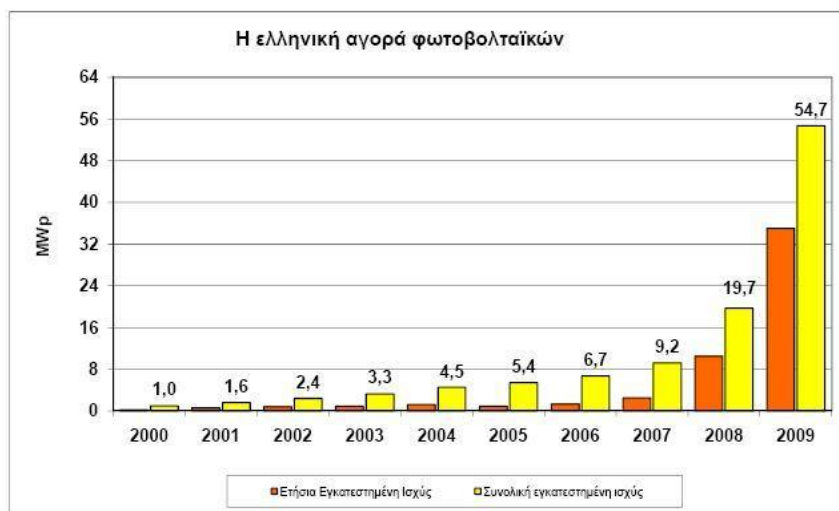
- Στην κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για κατοικίες και μικρούς οικισμούς που δεν είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Ακόμη χρησιμοποιούνται για:
 - Αφαλάτωση / άντληση / καθαρισμό νερού.
 - Φωτισμό (δρόμων , πάρκων , αεροδρομίων).
 - Συστήματα τηλεπικοινωνιών, τηλεμετρήσεων και συναγερμού.
 - Συστήματα σηματοδότησης (οδικής κυκλοφορίας, ναυτιλίας, αεροναυτιλίας).
 - Ψύξη (αγροτικών προϊόντων , φαρμάκων κλπ).

γ) Συστήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο (200 kW_p - αρκετά MW_p)

Στην κατηγορία αυτή, που σύμφωνα με τις συμβατικές θεωρήσεις προς το παρόν δεν αξιολογείται σαν οικονομικά βιώσιμη, διακρίνονται δύο κατηγορίες συστημάτων.

- Φ/Β συστήματα μεγέθους έως μερικών εκατοντάδων kW_p που τροφοδοτούν κατοικίες, συγκροτήματα κατοικιών ή άλλα κτίρια και όπου η τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια τροφοδοτείται (πωλείται) προς το δίκτυο.
- Φ/Β σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο. Για τα Φ/Β συστήματα που αναρτώνται σε κτίρια (σε προσόψεις, οροφές , κλπ), σε σύνδεση με το δίκτυο, τελευταία έχει εκδηλωθεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Τα οφέλη που προκύπτουν είναι:
 - Συγχρονισμός Ψυκτικών φορτίων κτιρίων με μέγιστη παραγόμενη ισχύ από Φ/Β.
 - Αποφυγή χρήσης γης.
 - Αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας.

1.3.5 Εξέλιξη της Εγκατεστημένης Ισχύος των Φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα



Σχήμα 1.19. Εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα. [28]

1.3.6 Αναμενόμενη Εξέλιξη τα Επόμενα Χρόνια



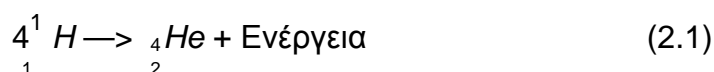
Σχήμα 1.20. Αναμενόμενη εξέλιξη τα επόμενα χρόνια. [28]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

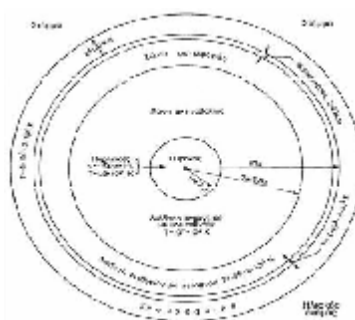
Ηλιακή Ακτινοβολία

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 2 10³⁰ kg, ακτίνα 700.000 km, ηλικία 5 10⁹ χρόνια και υπολογίζεται ότι έχει μπροστά του άλλα 5 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια ζωής. Η επιφανειακή θερμοκρασία του είναι ~5.800 K, ενώ η εσωτερική 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:



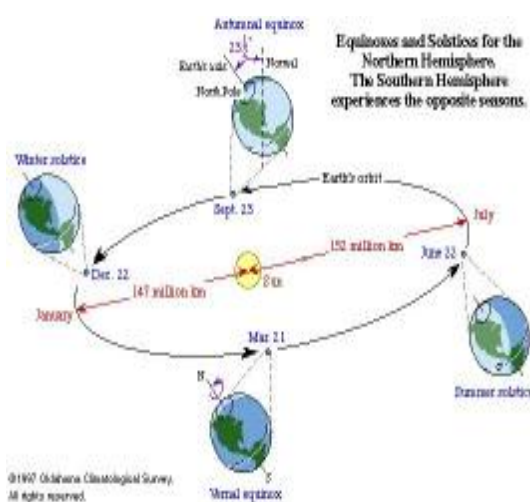
δικαιολογεί, με το έλλειμμα μάζας, την εκλυόμενη ενέργεια με βάση τη γνωστή σχέση E = mc², από την ειδική θεωρία της σχετικότητας του Einstein. Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο υδρογόνου, που μετατρέπεται σε He, εκλύεται ενέργεια ίση με U = 1,67 10⁵ kWh. Η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται στο σύμπαν κυρίως με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλλά και με σωματιδιακή μορφή.



Σχήμα 2.1. Δομή του ήλιου.

2.1.1 Η Ακτινοβολία του Ήλιου

Η τροχιά της γης κατά την κίνηση της γύρω απ' τον ήλιο είναι έλλειψη, με τον ήλιο στη μία των εστιών της, με μήκος μεγάλου ημιάξονα, a $149,6 \cdot 10^6$ km και εκκεντρότητα, e 0,01673. Η απόσταση γης-ήλιου μεταβάλλεται περιοδικά, κατά τη διάρκεια του έτους, μεταξύ της μέγιστης τιμής της (περί την 1η Ιουλίου), που ονομάζεται αφήλιο ($\sim 152,1 \cdot 10^6$ km) και της ελαχίστης (περί την 1η Ιανουαρίου), που ονομάζεται περιήλιο ($147,1 \cdot 10^6$ km).



Σχήμα 2.2. Τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο.

Το μήκος του μεγάλου ημιάξονα, a , προσεγγιστικά $150.000.000$ km, λαμβάνεται ως μονάδα μήκους σε διαστημικές αποστάσεις, ονομάζεται Αστρονομική Μονάδα και συμβολίζεται ως 1 AU (Astronomical Unit). Για να διανύσει την απόσταση αυτή το φως με την ταχύτητα των ~ 300.000 km/s απαιτούνται $\sim 8,5$ min. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία απομακρύνεται ακτινικά από τον αστέρα προς το διάστημα και άρα η ένταση J της ακτινοβολίας του μεταβάλλεται αντιστρόφως αναλόγως με το τετράγωνο της απόστασης:

$$J = \frac{P}{4 a^2} \quad (2.2)$$

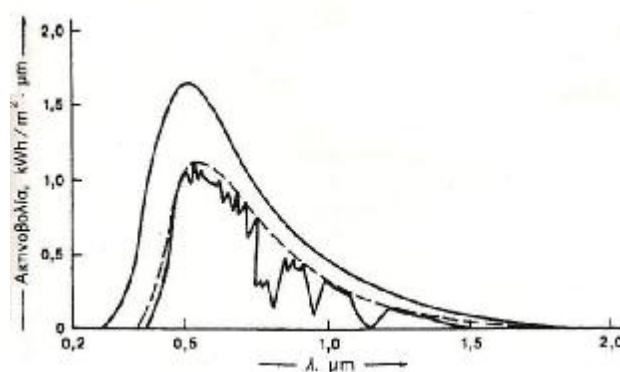
όπου

P η ολική, σ' όλα τα μήκη κύματος, εκπεμπόμενη από απ' όλη την επιφάνειά του, ισχύς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και
 d η απόσταση από τον ήλιο στην οποία μετράται η ένταση.

2.1.2 Σύσταση Ηλιακού Φάσματος

Η διαμόρφωση του φάσματος του φωτός που εκπέμπει ο ήλιος προσομοιάζεται συνήθως με την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος θερμοκρασίας περίπου 5.800 K, όση 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 ενέργειάς 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 5.800 K, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα:



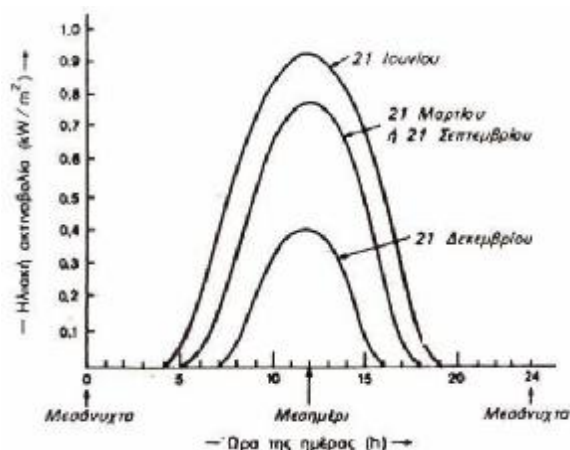
Σχήμα 2.3. Το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην εκπομπή μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5.800 K (εξωτερική συνεχής γραμμή), το φάσμα της ίδιας πηγής ύστερα από απορροφήσεις από το όζον και από σκεδάσεις από τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας (ασυνεχής γραμμή) και το πραγματικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης σε συνθήκες μέτριας υγρασίας (εσωτερική συνεχής γραμμή). [9]

Ενδεικτική άλλωστε της επίδρασης της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία είναι η εξάρτηση της έντασής 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 ηλιακής 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.

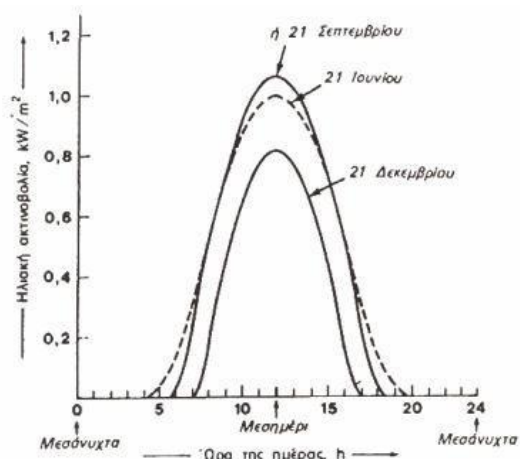
Το όζον, που είναι άφθονο στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, απορροφά έντονα την υπεριώδη ακτινοβολία και ειδικότερα στην περιοχή 0,2-0,35 μm, το μοριακό οξυγόνο απορροφά κυρίως στην περιοχή του ερυθρού (π.χ. 0,63 και 0,69 μm), το διοξείδιο του άνθρακα στο υπέρυθρο (2,7 και 4,3 μm) και οι υδρατμοί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

2.1.3 Η Διακύμανση της Ηλιακής Ακτινοβολίας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Στα Σχήματα 2.4 και 2.5 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 ουρανού. 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. π.χ. στην Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολόι δείχνει 12:25 τον χειμώνα, και 13:25 το καλοκαίρι, όταν ισχύει η θερινή ώρα.



Σχήμα 2.4. Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μία οριζόντια επιφάνεια στη διάρκεια τριών χαρακτηριστικών ημερών του έτους (οι ώρες είναι σε ηλιακές τιμές). [9]

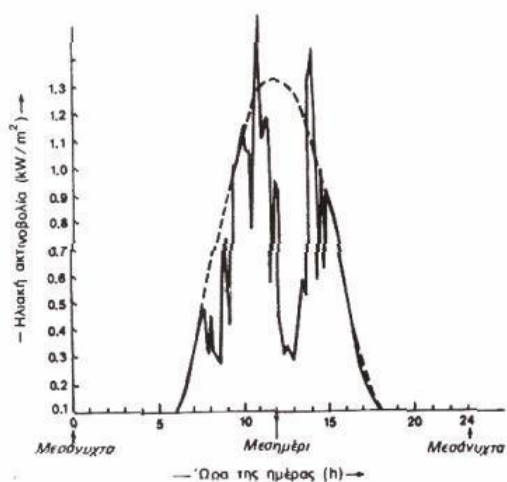


Σχήμα 2.5. Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας με τον ηλιακό συλλέκτη σε κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. [9]

Έχουμε ήδη τονίσει ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια επίπεδη επιφάνεια γίνεται σημαντικά μεγαλύτερη όταν βρίσκεται σε κατάλληλη κλίση, ώστε η πρόσπτωση των ακτίνων να γίνεται κάθετα. Στην περίπτωση αυτή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέγιστη ισχύς της ακτινοβολίας το ηλιακό μεσημέρι στις ευνοϊκότερες ημέρες του έτους δε διαφέρει παρά πολύ από τόπο σε τόπο και η τιμή 1 kW/m² αποτελεί μια πολύ χονδρική, αλλά πάντως γενικά αποδεκτή προσέγγιση.

Στη διάρκεια του έτους, στο βόρειο ημισφαίριο, ο αριθμός των φωτεινών ωρών της ημέρας, η μέγιστη ισχύς καθώς και 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 π.χ. που βρίσκονται σε κλίση ίση με τον 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.



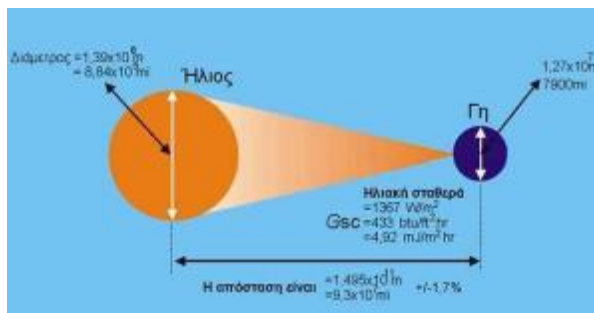
Σχήμα 2.6. Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια των ωρών μιας ημέρας με μερική νέφωση. Η ασυνεχής καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη διακύμανση για καθαρό ουρανό. [9]

Όταν ο ουρανός έχει σύννεφα, η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης γίνεται ανώμαλη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. 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, ακόμη, 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 2.7. Το σχήμα δείχνει σχηματικά τη γεωμετρική σχέση ήλιου-γης, η εκκεντρότητα της τροχιάς της γης είναι τέτοια ώστε η απόσταση μεταξύ τους να μεταβάλλεται κατά 1,7% στη μέση απόσταση $1,495 \cdot 10^{11} \text{ m}$ η γη βλέπει τον ήλιο υπό γωνία 32 μοιρών.

Όπως είναι γνωστό η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του 24-ώρου, λόγω περιστροφής της γης περί τον άξονά της και κατά την 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} μέση τιμή της ηλιακής σταθεράς, θα είναι:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot 1,033 \cos \frac{360 n}{365} \quad (2.3)$$

όπου

n οι ημέρες του έτους $n=1,2,3,\dots,365$ με αρχή την 1η Ιανουαρίου.

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

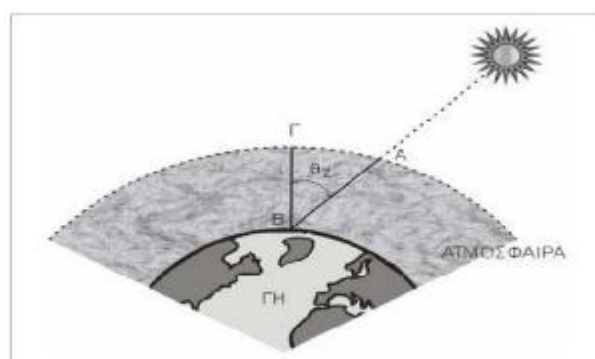
Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή την 1η Ιανουαρίου. Αυτό συμβαίνει διότι τότε η απόσταση ήλιου-γης είναι η μικρότερη από όλη τη διάρκεια του έτους. Όμως, για μία οριζόντια επιφάνεια τοποθετημένη στο βόρειο ημισφαίριο η ακτινοβολία που προσπίπτει είναι μικρότερη το χειμώνα και 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 ηλίου 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, $AM = 1$ όταν είναι ο ήλιος στο ζενίθ και $AM = 2$ για μια γωνία ζενίθ 60° . Για γωνίες ζενίθ από 0° έως 70° στη στάθμη της θάλασσας, κατά προσέγγιση ισχύει:

$$AM \approx \frac{1}{\cos z} \quad (2.4)$$



Σχήμα 2. Μάζα του αέρα.

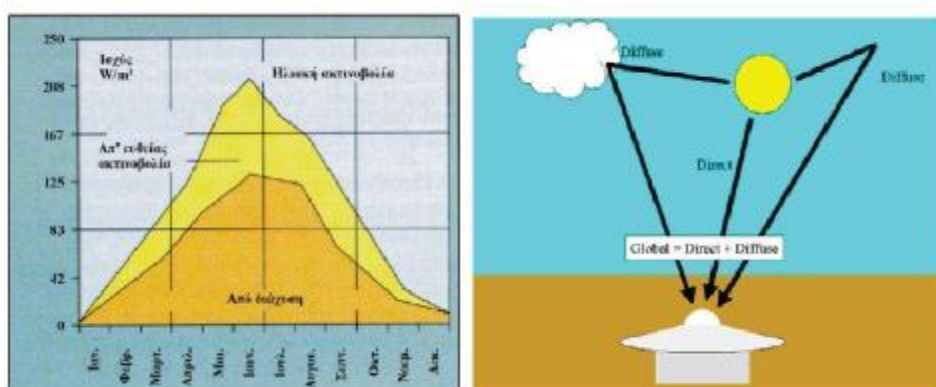
Σχήμα 2.8. Μάζα του αέρα.

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 2.1. 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 διάχυτης ηλιακής ακτινοβολία πάνω σε μια επιφάνεια (συνήθως οι μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας είναι μετρήσεις της συνολικής ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια, συχνά καλούμενη κοσμική ακτινοβολία).



Σχήμα 2.9. 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 ή mW/cm^2 , είναι ο ρυθμός με τον οποίο η ακτινοβολία προσπίπτει σε μία επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας. Το σύμβολο G χρησιμοποιείται για να εκφράσει την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, με τους κατάλληλους δείκτες για την άμεση, τη διάχυτη ή τη συνολική ακτινοβολία.

- **Πυκνότητα ενέργειας ακτινοβολίας:** μονάδα J/m^2 η προσπίπτουσα ενέργεια σε μία επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας. Υπολογίζεται από την ολοκλήρωση της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια ενός καθορισμένου χρόνου, συνήθως μια ώρα ή μια ημέρα. Η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία είναι ένας όρος που ισχύει 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 της γύρω από τον ήλιο.

2.3.2 Σφαιρικές Συντεταγμένες

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

- **Ύψος του ήλιου (h):** είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στον ορίζοντα.

- **Αζιμούθιο (α):** είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στη 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 την διάρκεια της ημέρας, το ύψος του ήλιου και το αζιμούθιο μεταβάλλονται συνεχώς καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό. Το αζιμούθιο είναι:

- Για νότιο προσανατολισμό $=0$.
- Για γωνίες δυτικά από το νότο παίρνει θετικές τιμές.
- Για γωνίες ανατολικά από το νότο παίρνει αρνητικές τιμές.

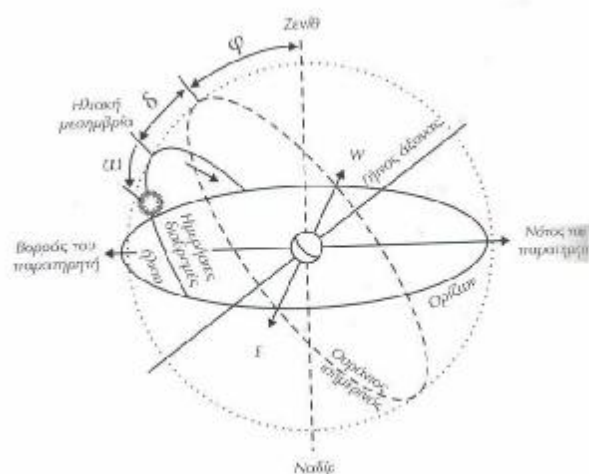
- **Ζενιθιακή γωνία του ήλιου:** Αντί για το ύψος, χρησιμοποιείται επίσης συχνά η συμπληρωματική του γωνία, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, που ονομάζεται ζενιθιακή απόσταση (ή ζενιθιακή γωνία) του ήλιου (z).

Επομένως σύμφωνα με τα παραπάνω:

$$h = 90 - z \quad (2.5)$$

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 άξονά της. Στην ηλιακή μεσημβρία 0 , ενώ κάθε ώρα η μεταβάλλεται κατά 15° . Τις πρωινές ώρες η ω είναι θετική (+) και κατά τις απογευματινές γίνεται αρνητική (-).



Σχήμα 2.10. Το τοπικό σύστημα συντεταγμένων Ζενίθ- Ναδίρ το οποίο δείχνει τη φαινόμενη ημερήσια κίνηση του ήλιου.

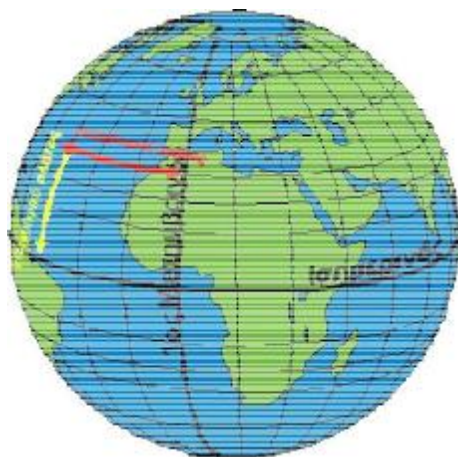
- **Γεωγραφικό πλάτος (ϕ):** του τόπου είναι μια γωνία που ορίζεται από την ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το σημείο τομής του ισημερινού και του μεσημβρινού που μας ενδιαφέρει και η ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το σημείο που μας ενδιαφέρει στο συγκεκριμένο μεσημβρινό που περνά από 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 τον μεσημβρινό γνωρίζουμε και την ακριβή θέση του τόπου πάνω στην επιφάνεια της γης .

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

$$90 - 90 \quad (2.6)$$

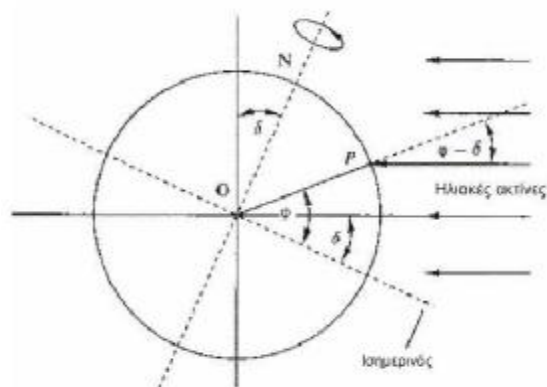
- **Γεωμετρικό μήκος** ενός τόπου είναι μια γωνία όπου σχηματίζεται από τον μηδενικό μεσημβρινό του τόπου που μας ενδιαφέρει . Με το γεωγραφικό μήκος προσδιορίζουμε αν ο τόπος μας είναι ‘ανατολικά’ ή ‘δυτικά’ του μηδενικού μεσημβρινού . Το γεωγραφικό μήκος παίρνει τιμές από 0 μέχρι -180 για τόπους ανατολικά του Greenwich και από 0 μέχρι 180 για τόπους δυτικά του Greenwich.

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



Σχήμα 2.11. 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 σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12. Απόκλιση στο επίπεδο του ισημερινού.

Η τιμή της απόκλισης δεν είναι σταθερή όλη τη διάρκεια του χρόνου αλλά αλλάζει ανάλογα με τη θέση του ήλιου που και αυτή αλλάζει ανάλογα με τις εποχές

του χρόνου , έχει λοιπόν θετικές τιμές για το Βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το Νότιο. Η τιμή λοιπόν που παίρνει κάθε φορά η απόκλιση δείχνει το ύψος του 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, έχουμε μεγάλη ημέρα και ότι βρίσκεται ‘ψηλά’ μακριά από τη γη, αντίθετα το χειμώνα ανατέλλει αργότερα και δύει νωρίτερα, έχουμε μικρότερη ημέρα και ότι βρίσκεται ‘χαμηλότερα’ στη γη. Συνεπώς η απόκλιση παίρνει μεγάλες τιμές το καλοκαίρι και μικρές το χειμώνα, με μέγιστη τιμή στις 21 Ιουνίου, θερινό ηλιοστάσιο ($23,45^{\circ}$) μεγαλύτερη η μέρα και η ελάχιστη τιμή στις 21 Δεκεμβρίου, Χειμερινό ηλιοστάσιο ($23,45^{\circ}$) μεγαλύτερη νύχτα . Η σχέση που μας επιτρέπει τον υπολογισμό για οποιαδήποτε μέρα του έτους είναι:

$$23,45\sin\frac{360}{365} 284 n \quad (2.7)$$

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 2.2. 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 ολόκληρη την ημέρα ηλιοφάνεια λόγω φυσικά των καιρικών φαινομένων.

Κατ' αρχάς έχουμε τη θεωρητική και την πραγματική ηλιοφάνεια.

Θεωρητική ηλιοφάνεια είναι οι ώρες του εικοσιτετράωρου ανάμεσα στην ανατολή και τη 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 χρησιμοποιείτε) να τη μετατρέψει στην ανάλογη μορφή ενέργειας, ηλεκτρική ενέργεια όταν πρόκειται για φωτοβολταϊκά, θερμική ενέργεια όταν πρόκειται για επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες υγρού μέσου κλπ. Εκείνο που μας ενδιαφέρει είναι με ποιο τρόπο θα τοποθετήσουμε το συλλέκτη μας έτσι ώστε να 'μαζεύει' όσο το δυνατό καλύτερα την ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 2.13. Ηλιακός συλλέκτης.

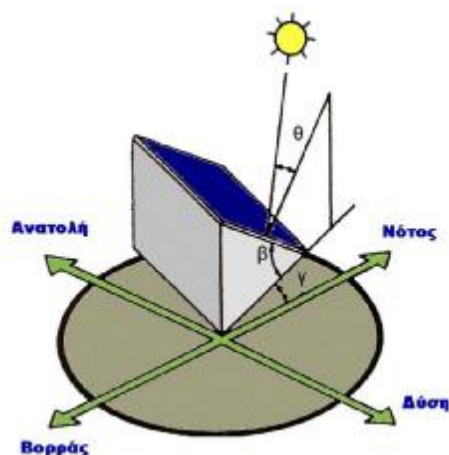
Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως η θέση του ήλιου στον ουρανό, έτσι και ο προσανατολισμός ενός επιπέδου στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από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

- **Η κλίση του συλλέκτη (β):** είναι η διέδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα και μπορεί να πάρει τιμές από 0 μέχρι 180 . Για γωνίες 90 το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω.

- **Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη (α):** 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 γωνία -180 (που συμπίπτει με την +180) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς το βορρά, η γωνία -90 προς την ανατολή, η γωνία 0 προς το νότο και η γωνία +90 προς τη δύση.

Προφανώς, η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας, πάνω σε ένα επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του είναι κάθετη προς τη 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 τον συλλέκτη (π.χ. με τη βοήθεια υπολογιστή ή φωτοκύτταρων), ώστε η επιφάνεια του να αντικρίζει πάντα κάθετα τον ήλιο. Οι διατάξεις όμως αυτές είναι πολύπλοκες και δαπανηρές. Έτσι, η

χρήση τους δικαιολογείται μόνον σε περιπτώσεις εφαρμογών, όπως στα συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας με φακούς ή κάτοπτρα.



Σχήμα 2.14. Η κλίση (β) και η αζιμούθια γωνία (γ) που χαρακτηρίζουν τον προσανατολισμό ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη στην επιφάνεια της γης. [9]

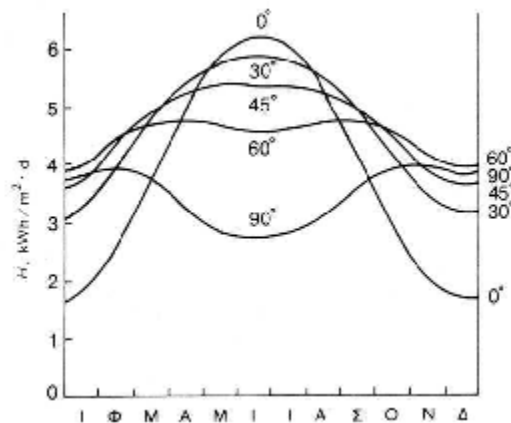
2.4.1 Η βέλτιστη Κλίση του Συλλέκτη

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 δυνατό μικρότερη κατά τη διάρκεια του έτους. Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας συνδέεται με τις άλλες γωνίες της ηλιακής γεωμετρίας, που αναφέρθηκαν παραπάνω, με τη σχέση:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \beta \cos \gamma + \sin \delta \cos \beta \sin \gamma \cos \alpha + \cos \delta \sin \beta \cos \gamma \sin \alpha + \cos \delta \cos \beta \sin \gamma \cos \alpha \quad (2.8)$$

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 (προσανατολισμός και κλίση) επηρεάζει την απόδοσή του κατά δύο

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



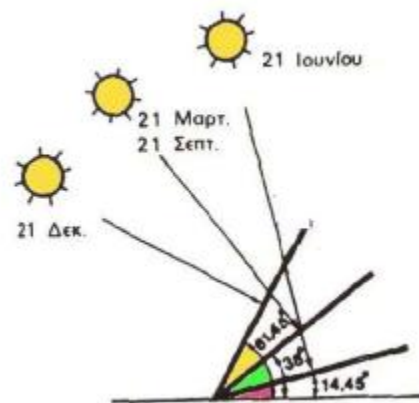
Σχήμα 2.15. Παράδειγμα της εξάρτησης της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας H που δέχεται μια επίπεδη επιφάνεια κατά τη διάρκεια των διαφόρων μηνών του έτους, σε συνάρτηση με την κλίση της. Το παράδειγμα είναι για τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος 45° και αφορά σε κλίσεις του ηλιακού συλλέκτη (β) ίσες με 0° (οριζόντιο επίπεδο), 30° , 45° , 60° και 90° (κατακόρυφο επίπεδο). [9]

Γενικά η μεγαλύτερη ποσότητα της ηλιακής ενέργειας, λαμβάνεται σε μία Νότια προσανατολισμένη κλίση. Εάν η επιφάνεια του συλλέκτη δεν αντικρίζει ακριβώς το νότο, το ποσό της ωφέλιμης ενέργειας, μειώνεται ελαφρά σε μία 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 π.χ. ξενοδοχεία η κλίση 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 την διάρκεια της θερινής περιόδου: Η βέλτιστη γωνία κλίσης () πρέπει να είναι περίπου 10 -15 μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ().
- Κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου: Η βέλτιστη γωνία κλίσης () πρέπει να είναι περίπου 10 -15 μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (). Αν στο έδαφος υπάρχει επιφάνεια με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης (π.χ. χιόνι) απαιτείται μεγαλύτερη κλίση.
- Ο βέλτιστος προσανατολισμός (αζιμούθιο) είναι νότιος (=0), ενώ απόκλιση κατά 20 -30 από νότο έχει μικρή επίδραση στην ετήσια συλλεγόμενη ενέργεια. Τα ύψη του ηλίου αφορούν τα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια.



Σχήμα 2.16. Η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη στο θερινό (21 Ιουνίου) και το χειμερινό (21 Δεκεμβρίου) ηλιοστάσιο και στην εαρινή (21 Μαρτίου) και τη φθινοπωρινή (21 Σεπτεμβρίου) ισημερία, σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος 38°, όπως η Αθήνα.

Τα ύψη του ήλιου που απεικονίζονται αφορούν στα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια. [9]

Τα παραπάνω ισχύουν για τη συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που έρχεται σαν δέσμη από τον ήλιο. Για τις άλλες, από ενεργειακή άποψη 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 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 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

Πίνακας 2.3. 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 κλπ).

Πόλη ή περιοχή	Γεωγραφικό πλάτος
Σιδηρόκαστρο, Διδυμότειχο, Ορμετιάδα, Φλώρινα, Έδεσσα, Γιαννιτσά, Κώκκις, Σέρρες, Δράμα, Καβάλα	41 30'
Ξάνθη, Κομοτηνή, Αλεξανδρούπολη	41o
Καστοριά, Πτολιμαϊίδα, Κοζάνη, Νάουσα, Βέροια, Κατερίνη, Θεσσαλονίκη, Πολύγυρος, Σαμοθράκη	40 30'
Κόνιτσα, Γριβενά, Λιτόχωρο, Κασσάνδρα, Λήμινος	40o
Κέρκυρα, Ηγουμενίτσα, Ιωάννινα, Μέτσοβο, Τρίκαλα, Καρδίτσα, Λαμία, Βόλος	39 30'
Δενκώδα, Πρεβέζα, Άρτα, Κορνηθός, Λαμία, Σκέρφος, Μυτιλήνη	39
Κεφαλληνία, Ιθάκη, Αγρίνιο, Μεσολόγη, Πάτρα, Αμφιλοχία, Λιβαδονά, Θήβα, Χαλκίδα, Χίος	38 30'
Ζάκυνθος, Αμαλιάδα, Καλάβρυτα, Κόρινθος, Μέγαρα, Ελευσίνα, Αθήνα, Ραφήνα, Κέρκερας, Ανδρος, Ικαρία, Σάμος	38o
Πόργος, Μεγολόπολη, Τριπολι, Άργος, Ναύπλιο, Πόρος, Σύρος, Πάτιος	37 30'
Πόρος, Καλομετα, Σπάρτη, Πάρος, Νάξος, Κάλυμνος, Κως	37
Γύθειο, Μήλος, Σαντορίνη, Ρόδος	36 30'
Κύθηρα, Καστελόριζο	36o
Χανιά, Ριθιμνο, Ηράκλειο, Κασσος, Κάρπαθος	35 30'
Χώρα Σφακίων, Ιεράπετρα, Αγ.Νικόλαος Κρήτης, Κύπρος	35

Πίνακας 2.4. Γεωγραφικό πλάτος (προσεγγιστικά) διάφορων ελληνικών πόλεων/περιοχών.



Σχήμα 2.17. Ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας.

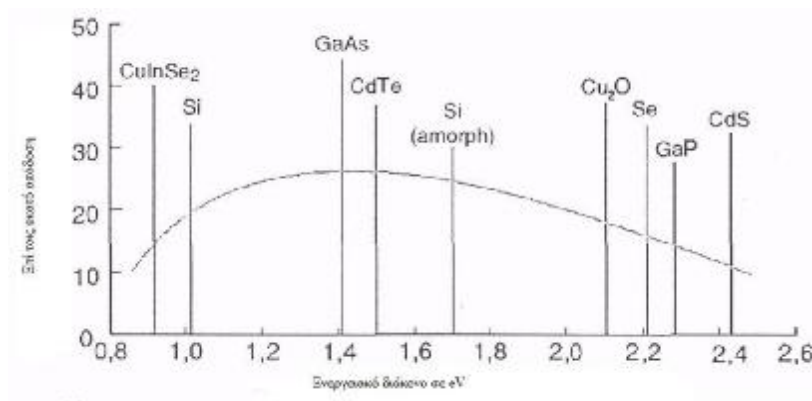
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Φωτοβολταϊκή Μετατροπή

3.1 Τι είναι το Φωτοβολταϊκό Στοιχείο

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 εκδηλώνουν 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 τάση μέχρι 0,5- 1,0 Volt και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40 mA ανά cm^2 της επιφανείας του. Το είδος του ημιαγωγού που επιλέγεται ως υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων καθορίζεται με κυριότερο κριτήριο όπως θα δούμε και στη συνέχεια, την τιμή του ενεργειακού διακένου του η οποία καθορίζει και την απόδοση του στοιχείου.

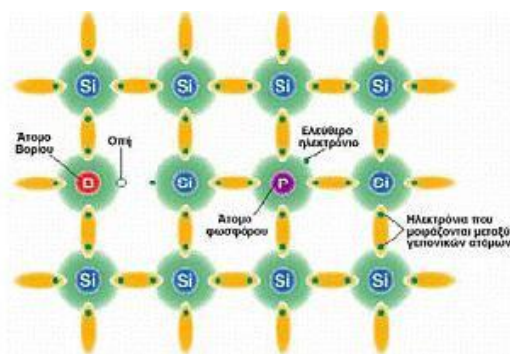
Ως συντελεστής απόδοσης ή απλούστερα ως απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του. Οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας είναι περίπου 25% και μπορούν να πραγματοποιηθούν με φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό διάκενο περίπου 1,5 eV.



Σχήμα 3.1. Θεωρητικά μέγιστα επίπεδα της απόδοσης διαφόρων ηλιακών κυττάρων σε συνάρτηση με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού από τον οποίο είναι κατασκευασμένα σε κανονικές συνθήκες.

3.2 Ημιαγωγοί

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.



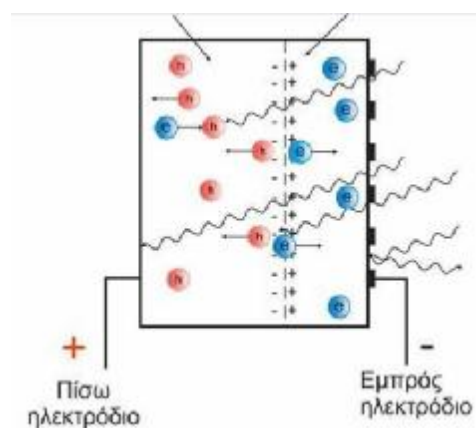
Σχήμα 3.2. Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με άτομα νόθευσης.

Τέσσερα από τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους κάθε ατόμου P, θα ενωθούν με ηλεκτρόνια σθένους των γειτονικών ατόμων Si και θα σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς (Σχήμα 3.2). 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 κινηθεί 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 3.2). Με την απορρόφηση ενός μικρού ποσού 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).

3.3 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Είναι γνωστό ότι τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου, (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας.

Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου.



Σχήμα 3.3. Ο μηχανισμός της εκδήλωσης του Φ/Β φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο.

Τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός όψη του, τύπου n στο παράδειγμα του σχήματος, παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές). Ένα μέρος από τους φορείς αυτούς διαχωρίζεται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα εμπρός (τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, e^-) ή προς τα πίσω (οι οπές, h^+), δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου. Οι υπόλοιποι φορείς επανασυνδέονται και εξαφανίζονται. Επίσης ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου χωρίς να απορροφηθεί, μέχρι να συναντήσει το πίσω ηλεκτρόδιο.

Έτσι, 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. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων p και n μιας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικά ημιαγωγό, το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ενός ηλιακού

στοιχείου, αλλά και κάθε φωτοβολταϊκής διάταξης, μπορεί να προέρχεται επίσης και από διόδους άλλων π.χ. από διόδους Σότκνι που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο.

Συμπερασματικά, η συνεργασία των δύο προαναφερθέντων παραγόντων, του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου των δύο σε επαφή φωτοαγωγίμων υλικών και του φωτός, παράγει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο:

$$\text{Επαφή υλικών} + \text{φως} = \text{Φωτοβολταϊκό φαινόμενο} \quad (3.1)$$

3.4 Υλικά και Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φ/β στοιχείων είναι:

- Τεχνολογία παραγωγής ημιαγωγίμων υλικών με κρυσταλλική δομή, την πλειοψηφία των οποίων αποτελεί το πυρίτιο.
- Τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film), η οποία ονομάζεται έτσι επειδή το πάχος των στοιχείων είναι πολύ μικρό (μερικά μόνο μm).
- Άλλες τεχνολογίες που σκοπό έχουν να γίνει λιγότερο ενεργοβόρα η παραγωγή του καθαρού πυριτίου, περιορίζοντας τις απώλειες σε ακριβό καθαρό πυρίτιο (π.χ. μέθοδος EFG, edge defined film fed growth και μέθοδος String Process).

Οι κρύσταλλοι και η μορφή λεπτού φιλμ διαφέρουν μεταξύ τους όσον αφορά την απόδοση απορρόφησης του φωτός, την απόδοση μετατροπής της μια μορφής ενέργειας στην άλλη, την τεχνολογία κατασκευής και το κόστος κατασκευής.

3.4.1 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Πυριτίου

Το υλικό, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία των Φ/Β κυψελίδων, είναι το πυρίτιο (Si). Στην άμμο, το πυρίτιο περιέχεται με τη μορφή του οξειδίου του πυριτίου (SiO₂). Το τελικό προϊόν χαρακτηρίζεται από υψηλή καθαρότητα (99,99999%). Τα Φ/Β στοιχεία Πυριτίου διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη δομή του βασικού υλικού ή τον ιδιαίτερο τρόπο παρασκευής. Οι διαφορετικοί τύποι είναι οι εξής:

Φ/Β στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου (Single-crystal Silicon)

Το βασικό υλικό είναι μονο-κρυσταλλικό. Το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (Wafer ~ 300μm). Η απόδοσή τους, με τη μορφή κυψελίδας, κυμαίνεται από ~ 21% έως ~24%, ενώ με τη μορφή των Φ/Β πλαισίων μεταξύ 13 έως 16%. Χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής. Χρώμα: Σκούρο μπλε.



Σχήμα 3.4. Σχηματική απεικόνιση Φ/Β στοιχείου κρυσταλλικού πυριτίου. [8]

Φ/Β στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Multicrystalline Silicon mc-Si)

Δυνατότητα κατασκευής μεγάλων επιφανειών. Συνήθως κόβονται σε τετραγωνικής μορφής στοιχεία. Αποτελούνται από λεπτά επιστρώματα πάχους 10 έως 50 μm. Στην επιφάνεια της κυψελίδας διακρίνονται σε διαφορετικές μονοκρυσταλλικές περιοχές. Τα όριά τους αποτελούν θέσεις παγίδευσης των φορέων. Άρα, όσο μικρότερο το συνολικό μήκος των οριακών περιοχών μέσα στο δεδομένης διάστασης Φ/Β στοιχείο, τόσο καλύτερη η ηλεκτρική αγωγιμότητά τους. Γενικά, όσο μεγαλύτερες οι διαστάσεις των μονοκρυσταλλικών περιοχών του πολυκρυσταλλικού Φ/Β στοιχείου, τόσο υψηλότερη η απόδοση του, η οποία κυμαίνεται από 17% έως ~20%, σε εργαστηριακή μορφή κυψελίδας και από 10% έως και 14% σε βιομηχανική μορφή Φ/Β πλαισίου. Χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλή χρονική σταθερότητα.. Το κόστος παρασκευής τους είναι χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το χρώμα τους είναι γαλάζιο.



Σχήμα 3.5. Σχηματική απεικόνιση Φ/Β στοιχείου πολυκρυσταλλικού πυριτίου. [8]

Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon)

Τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων ή υμενίων (films), θεωρητικά πολύ χαμηλού κόστους παραγωγής εξαιτίας της μικρής χρησιμοποιούμενης μάζας υλικού. Το λεπτό επίστρωμα σχηματίζεται πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης χαμηλού κόστους. Η απόδοση των Φ/Β στοιχείων αυτών μειώνεται έντονα, στα αρχικά στάδια φωτισμού τους, στα επίπεδα του 6% έως 8%. Σήμερα, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παρασκευή σύνθετων Φ/Β στοιχείων, με διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα, με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος.



Σχήμα 3.6. Σχηματική απεικόνιση Φ/Β στοιχείου άμορφου πυριτίου. [8]

3.4.2 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Άλλων Υλικών, Λεπτών Επιστρώσεων

Στην κατηγορία αυτή, εκτός από τα Φ/Β στοιχεία πυριτίου, λεπτής επίστρωσης (a-Si:H), τα οποία σήμερα αποτελούν τα περισσότερο διαδεδομένα στον κόσμο, εξαιτίας των πράγματι αξιόλογων χαρακτηριστικών τους, κατασκευάζονται Φ/Β στοιχεία από

άλλα υλικά. Γενικά, τα Φ/Β στοιχεία αυτά παρά τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματά τους σε σχέση με το πυρίτιο, παρουσιάζουν ακόμη μειονεκτήματα, τα οποία στην καλύτερη περίπτωση περιορίζουν τη χρήση τους σε ειδικές εφαρμογές. Ο επόμενος πίνακας παρουσιάζει τα πιο σημαντικά απ' αυτά τα Φ/Β στοιχεία, το καθένα με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του.

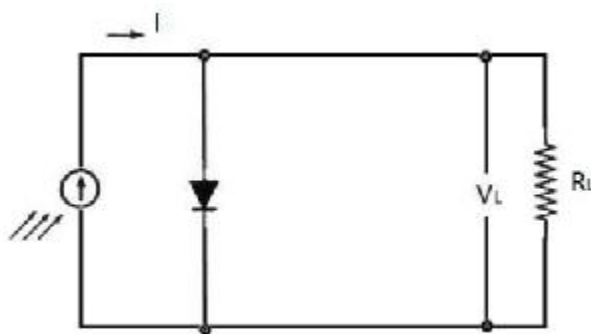
α/α	Βασικά υλικά Φ/Β στοιχείου	Χαρακτηριστικά	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1	Ετεροένωση Cu ₂ S/CdS	Πολυκρυσταλλικό. E _g =1,2 eV/2,3 eV. Απόδοση ~ 10%	Μικρό κόστος κατασκευής.	Μη σταθερής απόδοσης Φ/Β στοιχείο.
2	Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός (CuInSe ₂ ή CIS)	Άμεσο ενεργειακό διάκενο, υψηλή απορρόφηση σε λεπτό στρώμα. Εργαστηριακή απόδοση 12-13%. Με προσθήκη Ga, βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά του. (Εργαστηριακή απόδοση: 17%). Απόδοση βιομηχανικού προϊόντος (πλαισίου): 8-11 %.	Χαμηλό κόστος κατασκευής, σταθερότητα ισοδύναμη του c-Si.	Χαμηλή απόδοση βιομηχανικού προϊόντος.
3	Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)	Ιδανικό ενεργειακό διάκενο.	Εξαιρετική εκμετάλλευση ηλιακού φάσματος.	Μη επαναλήψιμες ιδιότητες. Δυσκολία δημιουργίας μεταλλικών επαφών.
4	Αρσενιούχο Γάλλιο (GaAs)	Παρουσιάζει την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση ~ 25,5%. Χρήση σε διαστημικές εφαρμογές.	Υψηλή ενεργειακή απόδοση βιομηχανικού Φ/Β πλαισίου: 22%.	Υψηλό κόστος κατασκευής.

Πίνακας 3.1. Φ/Β στοιχεία λεπτών επιστρωμάτων. [8]

3.5 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

3.5.1 Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Κύκλωμα Φωτοβολταϊκού Στοιχείου και Χαρακτηριστική Εξίσωση

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 δε 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.



Σχήμα 3.7. Ιδανικό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου. [9]

Η βασική εξίσωση του ιδανικού ηλιακού κυττάρου είναι η εξής:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_L \quad (3.2)$$

όπου

I = το ρεύμα του κυττάρου.

V = η τάση του κυττάρου.

I_L = το φωτόρευμα.

I_0 = το ρεύμα κόρου της διόδου που δίνεται από τη σχέση

$$I_0 = A \frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} \quad (3.3)$$

όπου

A = διατομή του κυττάρου.

n_i n_p = ενδογενής συγκέντρωση ηλεκτρονίων (οπών) σε καθαρό κρύσταλλο πυριτίου.

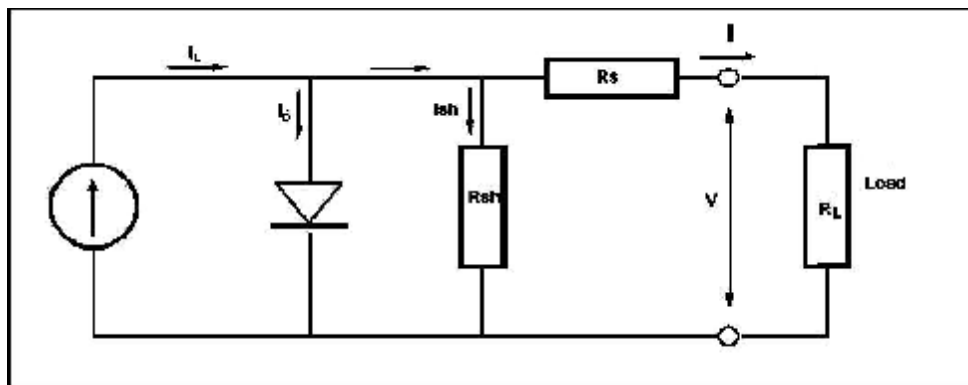
L_e = μήκος διάχυσης ηλεκτρονίων = $\sqrt{D_e \tau_e}$.

τ_e = διάρκεια ζωής ηλεκτρονίων σαν φορέων μειονότητας = ο χρόνος μεταξύ της δημιουργίας ενός φορέα σε υλικό που αποτελεί φορέα μειονότητας και της επανασύνδεσης του με φορέα πλειονότητας.

L_h = μήκος διάχυσης οπών = $\sqrt{D_h \tau_h}$.

τ_h = διάρκεια ζωής οπών σαν φορέων μειονότητας.

Ωστόσο στην πράξη κανένα ηλιακό κύτταρο δεν είναι ιδανικό γι' αυτό τοποθετείται το μη ιδανικό τμήμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει, αφενός την αντίσταση απωλειών διαρροής του ρεύματος μεταξύ των άκρων του φωτοβολταϊκού στοιχείου, που είναι παράλληλα συνδεδεμένη στα άκρα της διόδου, αφετέρου την αντίσταση απωλειών στο δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου, που αντιπροσωπεύεται από αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με τη δίοδο.



Σχήμα 3.8. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου που περιλαμβάνει τις αντιστάσεις σε σειράς R_S , καθώς και τις παράλληλες αντιστάσεις R_{Sh} . [9]

Η χαρακτηριστική εξίσωση για το παραπάνω ηλιακό κύτταρο είναι η εξής:

$$I = I_L - I_0 \exp\left(\frac{q V I R_s}{AKT}\right) - \frac{V}{R_{sh}} \quad (3.4)$$

όπου

I = το ρεύμα στην έξοδο του κυττάρου.

I_L = φωτόρευμα.

I_0 = ρεύμα κόρου διόδου.

q = φορτίο ηλεκτρονίου.

V = τάση στην έξοδο του κυττάρου.

R_s = σε σειρά αντίσταση του κυττάρου. Παριστάνει σε συγκεντρωμένη μορφή όλα τα κατανεμημένα στοιχεία αντίστασης κατά τη ροή των φορέων στον κυρίως ημιαγωγό, την επιφανειακή ροή στον ημιαγωγό (συνήθως τύπου-n) που βρίσκεται στην πλευρά που προσπίπτει το φως και αποτελείται από πολύ λεπτό στρώμα, την ενδοεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού-ωμικής επαφής και την ωμική επαφή. Τυπικές τιμές της R_s , για καλής ποιότητας Φ/Β στοιχεία: 0,1 Ω έως 0,3 Ω.

$V I R_s$ V_D = τάση της διόδου επαφής μέσα στο κύτταρο.

A = σταθερά με τιμές 1 και 2. Οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής.

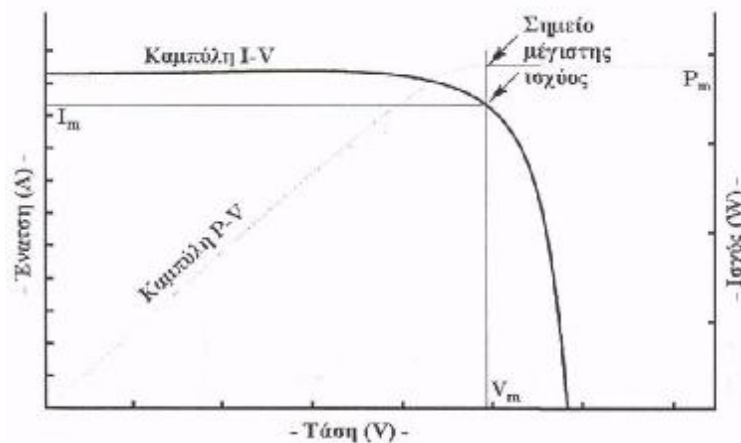
K = Σταθερά Boltzmann.

T = απόλυτη θερμοκρασία.

R_{sh} = παράλληλη αντίσταση του κυττάρου. Σχετίζεται με τη διαρροή του ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n. Αφορά διαδρομές ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n, μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της διόδου. Η τιμή της R_{sh} σε πολύ καλής απόδοσης Φ/Β στοιχεία είναι μεγαλύτερη των 10^3 Ω.

3.5.2 I-V Χαρακτηριστική Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το Φ/Β στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Δηλαδή σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή κανονικής λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά και μη γραμμικά συναρτήσει της έντασης του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή. Η γραφική παράσταση μεταξύ ρεύματος στην έξοδο (I) και τάσεως στην έξοδο (V) ενός ηλιακού κυττάρου καλείται $I-V$ χαρακτηριστική και έχει επικρατήσει να παριστάνεται στο πρώτο τεταρτημόριο.



Σχήμα 3.9. Καμπύλες $I-V$ και $P-V$ φωτοβολταϊκού στοιχείου Si για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. [9]

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}). Συνεπώς οι βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν την καμπύλη είναι:

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc}

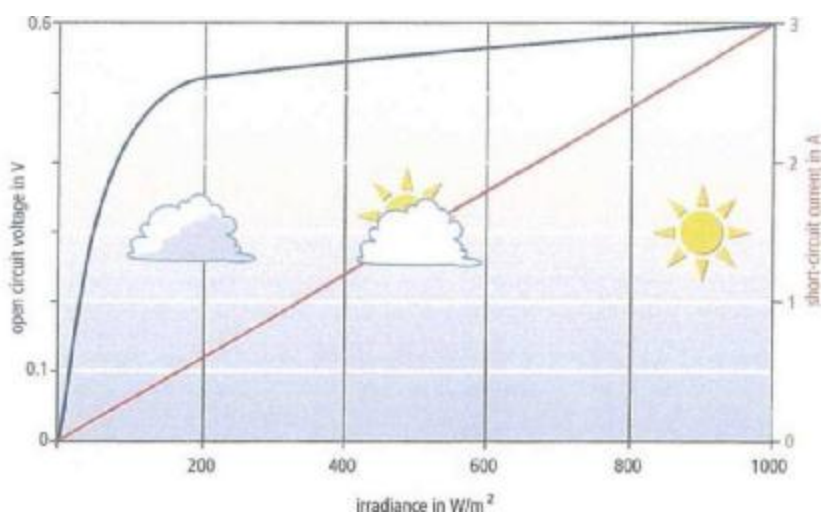
Είναι το ρεύμα για $V = 0$ και αν θεωρήσουμε την R_s πολύ μικρή είναι ίσο με το φωτόρευμα I_L .

Η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc}

Είναι η τάση για $I = 0$ και αν θεωρήσουμε τη R_{sh} πολύ μεγάλη τότε από την εξίσωση (3.4) προκύπτει:

$$V_{oc} = \frac{AKT}{q} \ln \frac{I_L}{I_0} + 1 \quad (3.5)$$

Η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} καθορίζεται, αφενός από τα χαρακτηριστικά της επαφής p-n, όπως το βασικό υλικό, τη συγκέντρωση των προσμείξεων και τη θερμοκρασία και αφετέρου από την ένταση της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.



Σχήμα 3.10. Η μεταβολή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης V_{oc} (μπλε καμπύλη) και της βραχυκυκλωμένης έντασης I_{sc} του ρεύματος (κόκκινη καμπύλη) ενός Φ/Β στοιχείου πυριτίου σε συνάρτηση με την ισχύ της ακτινοβολίας H , που δέχεται ανά μονάδα επιφάνειάς του.

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι:

- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{sc} , του Φ/Β στοιχείου είναι ανάλογο της πυκνότητας ισχύος, H , της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην κυψελίδα.
- Η τάση ανοικτού κυκλώματος αρχικά αυξάνει, σχετικά απότομα, ως συνάρτηση της πυκνότητας ισχύος, H , της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην κυψελίδα

παραμένοντας στη συνέχεια, σχεδόν ανεξάρτητη της H . Δηλαδή, με το πρώτο φως της ημέρας, η τάση ανοικτού κυκλώματος παίρνει τιμή που μεταβάλλεται αργά (ποσοστιαία μεταβολή), μέσα στο υπόλοιπο χρονικό διάστημα μιας αίθριας ημέρας, σχεδόν μέχρι τη δύση.

Σημείο μέγιστης ισχύος P_m

Στο σημείο αυτό αντιστοιχεί ρεύμα I_m και τάση V_m και βρίσκεται στο σημείο από το οποίο μπορούμε να κατασκευάσουμε το ορθογώνιο με την μεγαλύτερη επιφάνεια μέσα στη $I-V$ καμπύλη. Μια ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και το

σημείο P_m παριστάνει τη βέλτιστη αντίσταση φορτίου R_{Lopt} , που έχει κλίση

$1/R_{Lopt} = I_m / V_m$. Επίσης, η $I-V$ χαρακτηριστική είναι εφαπτόμενη σε κάποια καμπύλη σταθερής ισχύος στο σημείο μέγιστης ισχύος, όπου $dP/dV = 0$ και επειδή το σημείο επαφής δε μπορεί να καθορισθεί επακριβώς για καμπύλες που κατασκευάζονται με βάση πειραματικά δεδομένα είναι δυνατόν να κατασκευαστεί μια $P-V$ καμπύλη και να εντοπιστεί το μέγιστο αυτής.

Ο συντελεστής πλήρωσης ff (Fill Factor)

Ο συντελεστής ποιότητας (παράγοντας πληρότητας ή πλήρωσης) ff (fill factor) είναι ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος $P_m = V_m I_m$ ενός Φ/Β στοιχείου ή Φ/Β πλαισίου γενικότερα, προς το γινόμενο της τάσεως ανοικτού κυκλώματος V_{oc} επί το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , αντίστοιχα, για τη δεδομένη πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (τύπος 3.6) και είναι ένα μέτρο του πόσο “τετράγωνη” είναι η $I-V$ καμπύλη.

$$ff = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (3.6)$$

Είναι ουσιαστικά συνάρτηση μόνο της τάσεως ανοικτού κυκλώματος V_{oc} επειδή εξαρτάται κυρίως απ' αυτήν. Αν ορίσουμε μια κανονικοποιημένη τάση ($U_{oc} = V_{oc} / (AKT/q)$), η ιδανική (μέγιστη) τιμή του δίνεται από τον εμπειρικό τύπο:

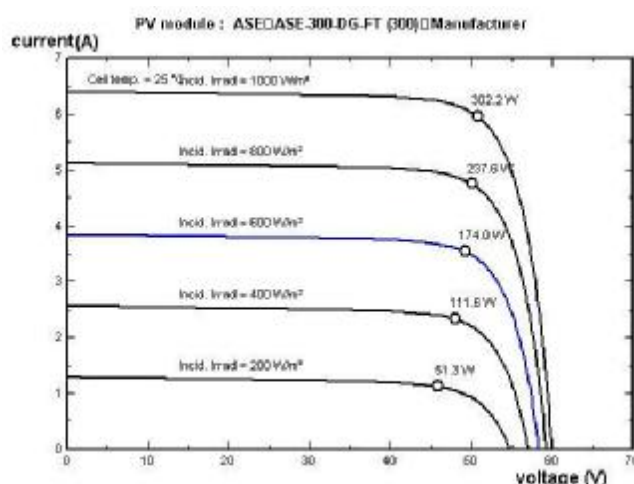
$$ff_o = \frac{U_{oc} \ln(U_{oc} + 0,72)}{U_{oc} + 1} \quad \text{για } U_{oc} > 10 \quad (3.7)$$

Οι τιμές του, που καθορίζονται από το υλικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου και τις συνθήκες, είναι μεταξύ 0 και 1 και πιο συγκεκριμένα τυπικές τιμές του είναι μεταξύ 0,7 και 0,85. Η τιμή αναφοράς του δίδεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές του ff , τόσο περισσότερο η λειτουργία του Φ/Β στοιχείου πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος στην περιοχή τάσεων $0-V_{oc}$. Σ' αυτές τις περιπτώσεις η διάταξη χαρακτηρίζεται αφενός από μικρή ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά, αφετέρου από μεγάλη τιμή παράλληλης αντίστασης. Τυπικές τιμές 0,7 με 0,9 χαρακτηρίζουν Φ/Β στοιχεία με αποδεκτή έως πολύ καλή ενεργειακή απόδοση αντίστοιχα.

Έχοντας δει τη μεταβολή της τάσης ανοικτού κυκλώματος V_{oc} και του ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{sc} συναρτήσει της ακτινοβολίας, μπορούμε να δούμε πως μεταβάλλεται και η $I-V$ χαρακτηριστική του κυττάρου όταν μεταβάλλεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία του καθώς και ποιες μεταβολές στις παραμέτρους της $I-V$ χαρακτηριστικής θα προκληθούν με μεταβολή της θερμοκρασίας.

Μεταβολή της έντασης της ακτινοβολίας

Όταν μεταβάλλεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία του κυττάρου και τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας), μεταβάλλεται και η $I-V$ χαρακτηριστική του κυττάρου και μάλιστα η απόκριση είναι πολύ γρήγορη (σταθερά χρόνου της τάξεως των μsec). Για τους περισσότερους τύπους ηλιακών κυττάρων που έχουν σχεδιασθεί για λειτουργία σε ένταση ακτινοβολίας μιας περίπου ηλιακής σταθεράς, η μορφή της $I-V$ καμπύλης δε μεταβάλλεται ουσιαστικά με την ένταση στην περιοχή 0,5-2 ηλιακές σταθερές, το ρεύμα I_{sc} πρακτικά μεταβάλλεται αναλογικά με την ένταση, η τάση V_{oc} μεταβάλλεται λιγότερο (λογαριθμική εξάρτηση).



Σχήμα 3.11. Χαρακτηριστικές $I - V$ για διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία λειτουργίας πλαισίου παραμένει σταθερή στους 25°C . Με τη μείωση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας παρατηρείται σημαντική μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της παραγόμενης ισχύος στο MPP. Αντίθετα η τάση ανοιχτού κύκλου μετατοπίζεται ελαφρά.

Μεταβολή της θερμοκρασίας

Όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του κυττάρου προκαλούνται οι παρακάτω μεταβολές στις παραμέτρους της $I - V$ χαρακτηριστικής. Με αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του κυττάρου:

- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} αυξάνεται ελαφρά (εξαρτάται βέβαια και από την ένταση της ακτινοβολίας και οφείλεται σε μεταβολή της δυνατότητας συλλογής των φορέων, αφού και το ενεργειακό χάσμα μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας). Τυπικές τιμές:

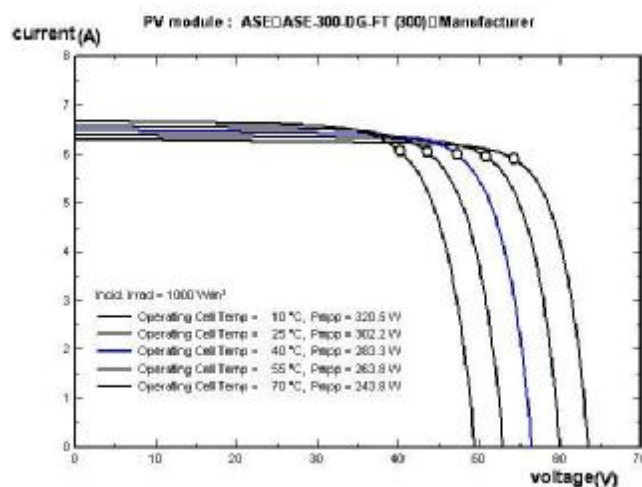
$$\frac{dI_{sc}}{dT} = 0,01 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2} / \text{C} \text{ ή } 0,1\% / \text{C} \quad (3.8)$$

- Η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} μειώνεται (οφείλεται σε μεταβολή των χαρακτηριστικών αγωγής της διόδου). Τυπικές τιμές:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = -2,2 \text{ mV} / \text{C} \text{ ή } -0,4\% / \text{C} \quad (3.9)$$

- Η ισχύς P_m (P_{mpp} ή P_{max}) μειώνεται, ενώ μεταβάλλεται και η μορφή της καμπύλης (το σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης γίνεται πιο στρογγυλεμένο με αύξηση της θερμοκρασίας). Τυπικές τιμές:

$$\frac{dP_m}{dT} = -0,4 \text{ έως } -0,5\% / C \quad (3.10)$$



Σχήμα 3.12. Χαρακτηριστικές $I - V$ για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας των κυττάρων του πλαισίου. Η τιμή της προσπίπτουσας ολικής ακτινοβολίας παραμένει σταθερή στα 1000 W/m^2 . Με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των κυττάρων του πλαισίου παρατηρείται μετατόπιση του MPP που αντιστοιχεί σε μείωση της παραγόμενης ισχύος. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται ελαφρά. Η τάση V_{oc} μειώνεται περισσότερο αισθητά κάτι που οφείλεται στην μεταβολή των χαρακτηριστικών αγωγής της διόδου.

3.5.3 Ο βαθμός απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού κυττάρου δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc}}{P_{in}} \cdot \frac{V_m I_m}{P_{in}} \quad (3.11)$$

Όπου

P_{in} είναι η ολική ισχύς της προσπίπτουσας στο κύτταρο ακτινοβολίας.

Ο βαθμός απόδοσης των ηλιακών κυττάρων του εμπορίου βρίσκεται στην περιοχή 12 μέχρι 14%, ενώ σε πειραματικά μοντέλα έχουν επιτευχθεί μεγαλύτερες τιμές. Ο θεωρητικά μέγιστος δυνατός βαθμός απόδοσης, με βάση τη σχέση, εξαρτάται από τις μέγιστες τιμές των I_{sc} , V_{oc} και ff , κυρίως όμως από τα δύο πρώτα, διότι όπως έχει αναφερθεί η μέγιστη τιμή του ff είναι συνάρτηση του V_{oc} . Έτσι προκύπτει για το πυρίτιο η μέγιστη τιμή της V_{oc} περίπου 100 mV. Η αντίστοιχη μέγιστη τιμή του ff είναι 0,84 οπότε μπορεί να υπολογιστεί η μέγιστη τιμή του βαθμού απόδοσης. Μια λογική εκτίμηση της ελάχιστης τιμής του I_0 που προκύπτει συναρτήσει του ενεργειακού χάσματος είναι:

$$I_0 \approx 1,5 \cdot 10^{-5} \exp \frac{E_g}{KT} \quad (3.12)$$

Αυτή η σχέση δείχνει ότι η μέγιστη τιμή του V_{oc} ελαττώνεται, όταν ελαττώνεται το ενεργειακό χάσμα, τάση που είναι αντίθετα από εκείνη που ισχύει για το I_{sc} . Κατά συνέπεια θα υπάρχει μια βέλτιστη τιμή του ενεργειακού χάσματος που θα δίνει το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης όπως φαίνεται στο σχήμα όπου η μέγιστη απόδοση συμβαίνει για ενεργειακό χάσμα στην περιοχή (1,4-1,6 eV). Το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου (1,1 eV) είναι μικρότερο από το βέλτιστο αλλά η θεωρητικά μέγιστη απόδοση είναι ακόμα πολύ υψηλή, ενώ το GaAs έχει ένα σχεδόν βέλτιστο ενεργειακό χάσμα (1,4 eV).

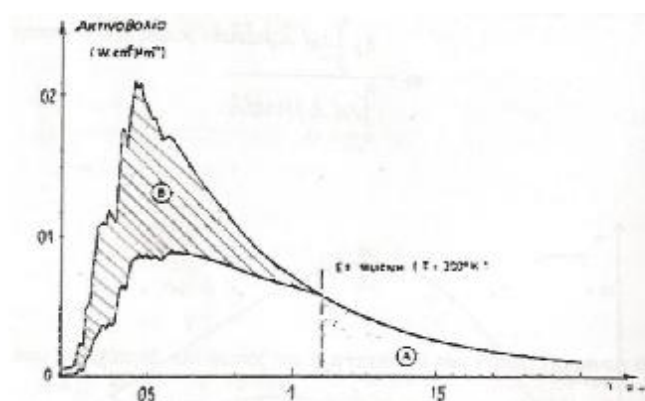
Παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά το βαθμό απόδοσης

Οι παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για τη σχετικά χαμηλή τιμή, τόσο θεωρητική όσο και πρακτική, του βαθμού απόδοσης είναι:

- **Ανάκλαση:** Μη επεξεργασμένη επιφάνεια πυριτίου ανακλά ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας της τάξεως του 30%. Επεξεργασία της επιφάνειας με χημικά μέσα και/ή επίστρωση με αντανάκλαστικά υλικά περιορίζει δραστικά τις ανακλάσεις μέχρι την τάξη του 3%.
- **Σκίαση από τις επαφές:** Η ανάγκη της κατασκευής ηλεκτροδίων τόσο στην επιφάνεια του υλικού τύπου-p όσο και του υλικού τύπου-n συνεπάγεται τη

δημιουργία ενός μεταλλικού πλέγματος επαφών στην επιφάνεια του κυττάρου που εκτίθεται στο ηλιακό φως. Αυτό συμβαίνει επειδή η αντίσταση στην επιφανειακή κίνηση των φορέων στο πάνω επιφανειακό στρώμα του κυττάρου είναι μεγάλη και πρέπει να υπάρχουν πολλά σημεία απαγωγής των φορέων (ηλεκτρικές επαφές) με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν τα ωμικά φαινόμενα. Το αποτέλεσμα για τα ηλεκτρόδια είναι μια γεωμετρία μεταλλικού πλέγματος στην πάνω επιφάνεια του κυττάρου, που έχει σαν συνέπεια ένα ποσοστό 5-15% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας να εκτρέπεται.

- Ατελής εκμετάλλευση της ενέργειας των φωτονίων: Όπως είναι γνωστό η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος έχει διαφορετικές εντάσεις σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος. Δηλαδή στον κρύσταλλο, προσπίπτουν φωτόνια που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τιμών ενέργειας τα οποία είναι δυνατόν ή να διαπεράσουν το κύτταρο, ή να απορροφηθούν παράγοντας μόνο θερμότητα υπό μορφή ταλαντώσεων των ατόμων, ή να δημιουργήσουν ζεύγος ηλεκτρονίων- οπών, ή να δημιουργήσουν ζεύγος ηλεκτρονίων- οπών και η επιπλέον ενέργεια τους να μετατραπεί σε θερμότητα. Αυτός ο παράγοντας με τους τέσσερις μηχανισμούς του και μόνο περιορίζει τη μέγιστη δυνατή απόδοση στο 44%.

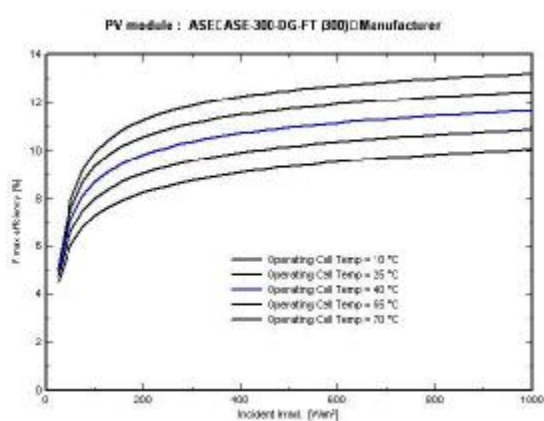


Σχήμα 3.13. Χάραξη του ηλιακού φάσματος AM0 για ένα ηλιακό κύτταρο Si. Η ζώνη A αντιστοιχεί στη χαμένη ενέργεια από τα φωτόνια τα μη απορροφώμενα. Η ζώνη B αντιστοιχεί στην περίσσεια ενέργειας, μη χρησιμοποιούμενη, των φωτονίων

ενέργειας ανώτερης από E_g . [12]

- Επανασύνδεση: Αυτή μπορεί να συμβεί με διάφορους μηχανισμούς στον κυρίως όγκο του ημιαγωγού στις επιφάνειες και στις ατέλειες του υλικού.

- Αντίσταση: Μη ικανοποιητικές τιμές τόσο της εν σειρά αντίστασης R_s όσο και της παράλληλης R_{sh} τείνουν να ελαττώσουν το συντελεστή ff , ενώ σε ακραίες περιπτώσεις ακόμη και τα I_{sc} , V_{oc} με τελική συνέπεια τη μείωση της απόδοσης.
- Θερμοκρασία: Οι φυσικοί μηχανισμοί που καθορίζουν τη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και βαθμού απόδοσης είναι αρκετά πολύπλοκοι. Πάντως τόσο οι αρκετά υψηλές και οι αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες τείνουν να μειώσουν σημαντικά το βαθμό απόδοσης (σχήμα 3.14).



Σχήμα 3.14. Όπως αναμενόταν η μέγιστη απόδοση του πλαισίου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας για τις ίδιες συνθήκες ακτινοβολίας.

- Γήρανση: Προσδιορίζει την ελάττωση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, άρα και της ισχύος αιχμής του, λόγω γενικότερης αλλοίωσης του φωτοβολταϊκού κυττάρου ως ενσωματωμένου τμήματος του Φ/Β πλαισίου. Οι αιτίες της γήρανσης είναι πολλές όπως αποχρωματισμός των κυττάρων, ράγισμα του γυαλιού κάλυψης, διαχωρισμός του ειδικού πλαστικού μόνωσης από την υγρασία της πίσω πλευράς, και κακή λειτουργία των καλωδιώσεων και του κιβωτίου συνδέσεων. Μετρήσεις μακράς διάρκειας σε πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου δίδουν μείωση της αποδοτικότητας του κάτω από πρότυπες συνθήκες ~ 1% κατ' έτος χρήσης (ρυθμός γήρανσης).

3.6 Η Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια

3.6.1 Το Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο

Το βασικό χαρακτηριστικό κάθε φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι η Φ/Β γεννήτρια, που αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες με τα Φ/Β ηλιακά στοιχεία. Και εδώ, όπως είδαμε ότι συμβαίνει γενικότερα στη Φ/Β ορολογία, χρησιμοποιούνται και άλλες ονομασίες, όπως, ηλιακή μπαταρία, ηλιακή ηλεκτρογεννήτρια κλπ.

Η τάση και η ισχύς των Φ/Β 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 Φ/Β στοιχείο πυριτίου του εμπορίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι μόλις μέχρι 0,5 V περίπου και η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μόλις 0,4 W περίπου. Γι' αυτό, τα Φ/Β στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση Φ/Β γεννητριών τοποθετούνται ανά 10 ως 50 περίπου σε ένα πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Στο πλαίσιο, τα στοιχεία συνδέονται στη σειρά σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση μιας επιθυμητής τάσης π.χ. η σύνδεση 35 στοιχείων στη σειρά δίνει περίπου 15-20 V, που είναι κατάλληλη, αν αφαιρέσουμε τις διάφορες απώλειες για τη φόρτιση των συνηθισμένων συσσωρευτών μόλυβδου. Τα πλαίσια είναι κατασκευασμένα με μορφή σάντουιτς. Δηλαδή, τα ηλιακά στοιχεία στερεώνονται με κολλητική ουσία σε ένα ανθεκτικό φύλλο από μέταλλο (συνήθως αλουμίνιο) ή από ενισχυμένο πλαστικό, που αποτελεί την πλάτη του πλαισίου, ενώ η εμπρός όψη τους καλύπτεται από ένα προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού. Το εμπρός και πίσω φύλλο συγκρατούνται μεταξύ τους, στεγανά και μόνιμα, με την βοήθεια μιας ταινίας από φυσικό ή συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται με ένα περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα. Διαμορφώνεται έτσι το Φ/Β πλαίσιο, που είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση των Φ/Β γεννητριών.

-Φωτοβολταϊκό πάνελ (PV panel): Ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή, έτοιμη για να εγκατασταθεί σε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.

-Φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array): Μια ομάδα από φωτοβολταϊκά πλαίσια ή πανέλα με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση, τοποθετημένα συνήθως σε κοινή κατασκευή στήριξης.

3.6.2 Η Απόδοση του Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

Το κάθε Φ/Β πλαίσιο παρουσιάζει τα δικά του ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (απόδοση, τάση, ισχύ κλπ), που προφανώς διαμορφώνονται από τα αντίστοιχα μεγέθη των χωριστών ηλιακών στοιχείων που περιέχει. Επομένως, όμοια με την σχέση που ορίζει το συντελεστή πλήρωσης, ο συντελεστής απόδοσης του Φ/Β πλαισίου (n) εκφράζει το λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το Φ/Β πλαίσιο (P) προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του S . Προφανώς, την ίδια τιμή θα έχει και ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ενέργειας E που παράγει το Φ/Β πλαίσιο επί ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, προς την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται επί το ίδιο χρονικό διάστημα. Δηλαδή:

$$n = \frac{P}{HS} = \frac{W}{W/m^2 \cdot m^2} \quad (3.13)$$

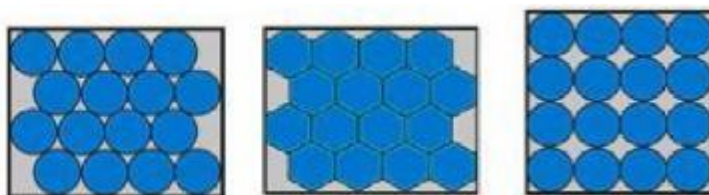
$$n = \frac{E}{S} = \frac{kWh}{kWh/m^2 \cdot m^2} \quad (3.14)$$

όπου

είναι η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που πέφτει στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου.

Η τιμή του n είναι φανερό ότι εξαρτάται όχι μόνο από τη μέση απόδοση των ηλιακών στοιχείων (n), αλλά και από τον συντελεστή κάλυψης του πλαισίου (γ), που ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας του ημιαγωγού όπου γίνεται η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας προς την συνολική επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου. Βρίσκουμε εύκολα ότι θα ισχύει η σχέση:

$$n = \gamma n \quad (3.15)$$



Σχήμα 3.15. Τρεις συνηθισμένοι τρόποι παράθεσης των ηλιακών στοιχείων στα Φ/Β πλαίσια. Οι αντίστοιχοι συντελεστές κάλυψης είναι περίπου 0,78 για την περίπτωση (α), 0,88 για την περίπτωση (β) και 0,98 για τα εξαγωνικά στοιχεία της περίπτωσης (γ). [9]

Η τιμή του εξαρτάται κυρίως από το σχήμα και την πυκνότητα της τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων πάνω στο Φ/Β πλαίσιο. Συνήθως κυμαίνεται από περίπου 0,78 για κυκλικά στοιχεία σε παράλληλες στοιχισμένες σειρές και φτάνει σχεδόν 1,00 (πρακτικά μέχρι 0,98) για τα μεγαλύτερου κόστους τετραγωνικά ή εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία.

3.6.3 Η Επίδραση της Θερμοκρασίας και της Ρύπανσης

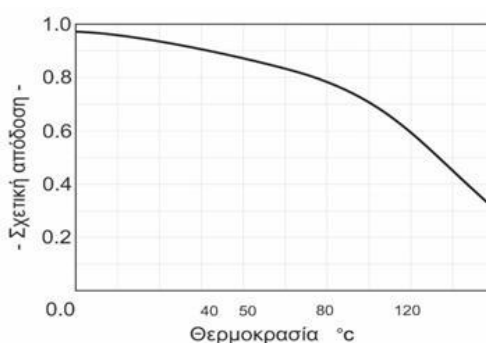
Όπως είδαμε η απόδοση των Φ/Β στοιχείων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Όμως, ο συντελεστής απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία ή για τα Φ/Β πλαίσια αντιστοιχεί σε μία συμβατική θερμοκρασία 20 C, που συχνά, ιδίως στους θερινούς μήνες, διαφέρει αξιόλογα από την πραγματική θερμοκρασία του στοιχείου. Έχει μετρηθεί ότι αφενός και κυρίως λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται, αλλά και λόγω των ηλεκτρικών απωλειών που πραγματοποιούνται πάνω τους, στις αντιστάσεις σειράς, τα ηλιακά στοιχεία αποκτούν κατά την λειτουργία τους θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος κατά 25 ως 30 C, ανάλογα και με την ταχύτητα του ανέμου. Ως μέσο όρο στους υπολογισμούς μας παίρνουμε συνήθως αύξηση της θερμοκρασίας κατά 30 C. Για τη διόρθωση του παραπάνω σφάλματος χρησιμοποιείται ένας αδιάστατος συντελεστής

με τον οποίο πολλαπλασιάζουμε τον συντελεστή απόδοσης των ηλιακών στοιχείων. Το ίδιο εφαρμόζουμε και για τα Φ/Β πλαίσια. Δηλαδή, για θερμοκρασίες διαφορετικές από τη συμβατική, ως συντελεστή απόδοσης των Φ/Β πλαισίων παίρνουμε το γινόμενο:

n

(3.16)

Σε συμβατική θερμοκρασία ο είναι ίσος με την μονάδα και για τα συνηθισμένα ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από αυτή.



Σχήμα 3.16. Τυπική καμπύλη της μεταβολής της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους. Η κλίμακα του άξονα των τεταγμένων δίνει το ποσοστό της απόδοσης του στοιχείου σε σχέση με την απόδοσή του στη συμβατική θερμοκρασία 20° C. Η κλίμακα της θερμοκρασίας στον άξονα των τεταγμένων είναι λογαριθμική. [9]

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή των Φ/Β πλαισίων, ιδίως όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειας του από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των Φ/Β πλαισίων χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνει περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας των Φ/Β πλαισίων με απορρυπαντικό. Πάντως, σε περιοχές σε συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90° για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού ή τουλάχιστον 45° για να μην συγκρατείται η σκόνη.

Όταν η Φ/Β γεννήτρια βρίσκεται σε μια περιοχή όπου εκτιμάμε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς μας η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα Φ/Β πλαίσια, με τη

χρησιμοποίηση ενός αδιάστατου συντελεστή καθαρότητας (), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο Φ/Β πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ όταν η επιφάνεια του είναι τελείως καθαρή. Η τιμή του είναι τόσο μικρότερη από τη μονάδα, όσο εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του Φ/Β πλαισίου, όσο σπανιότερες είναι οι βροχές στην περιοχή κτλ. Έτσι, όποτε είναι απαραίτητο, ως συντελεστή απόδοσης των Φ/Β πλαισίων για τους υπολογισμούς μας, παίρνουμε το γινόμενο του ενδεικτικού συντελεστή απόδοσης n , που δίνεται για συμβατική θερμοκρασία και καθαρή επιφάνεια, επί τους συντελεστές διόρθωσης για τη θερμοκρασία και για τη ρύπανση. Δηλαδή, η προηγούμενη σχέση παίρνει τη γενικότερη μορφή:

$$E = S n \quad (3.17)$$

3.6.4 Η Ισχύς Αιχμής του Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

Συχνά, δεν είναι διαθέσιμα όλα τα λεπτομερειακά κατασκευαστικά δεδομένα και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων (διαστάσεις, συντελεστής κάλυψης, συντελεστής απόδοσης των ηλιακών στοιχείων κλπ), αλλά δίνεται μόνο μια ενδεικτική ισχύς αιχμής (P_a), που αντιστοιχεί στην παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν το Φ/Β πλαίσιο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1 ήλιου, δηλαδή 1 kW/m².

Οι μονάδες ισχύος που εκφράζουν την ισχύ αιχμής ενός Φ/Β πλαισίου μιας ολόκληρης Φ/Β εγκατάστασης ή ενός ηλιακού στοιχείου ονομάζονται συχνά βατ αιχμής (W_p , Watt peak) και κιλοβάτ αιχμής (kW_p). Δηλαδή χρησιμοποιείται ο ίδιος όρος και συμβολισμός (άλλωστε ουσιαστικά είναι και το ίδιο πράγμα) όπως για το μέτρο της επιφάνειας των Φ/Β στοιχείων που γνωρίσαμε προηγουμένως.

Από την σχέση που δίνει την απόδοση n είναι φανερό ότι:

$$P (kW) = \frac{1 (kW / m^2) S (m^2) n}{p} \quad (3.18)$$

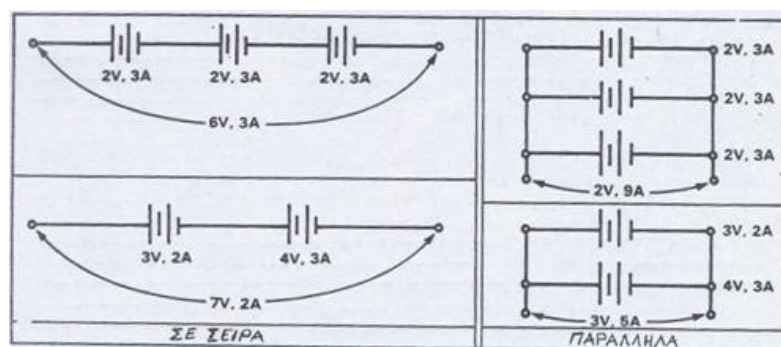
Στην περίπτωση λοιπόν, που γνωρίζουμε μόνο την ισχύ αιχμής P_a για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Φ/Β πλαισίου αντί για την παραπάνω σχέση χρησιμοποιούμε την ισοδύναμη σχέση:

$$E (kWh / d) (kWh / m^2 d) \frac{P (kW)}{1 (kW / m^2)} \quad (3.19)$$

3.6.5 Απώλεια ισχύος – Φαινόμενο HOT SPOT

Οι αιτίες της μη προσαρμογής των χαρακτηριστικών των κυττάρων μιας συστοιχίας είτε ενυπάρχουν και οφείλονται σε κατασκευαστικούς λόγους κατά τη μαζική παραγωγή τους, είτε προκύπτουν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Από τις τελευταίες, πρωτεύουσα θέση κατέχει η μερική ή ολική σκίαση ενός ή περισσοτέρων κυττάρων και μπορεί να οφείλεται σε σύννεφα, παρακείμενα δένδρα, κτίρια, πουλιά κλπ. Άλλη αιτία είναι η θραύση ενός ή περισσοτέρων κυττάρων και μπορεί να οφείλεται σε διαφορετική διαστολή μεταξύ του κυττάρου και του υλικού πάνω στο οποίο στηρίζεται, σε χαλάζι, σε ελαττωμένη αντοχή που προέκυψε κατά τη διάρκεια της κατασκευής του ή της ενσωμάτωσής του στο πλαίσιο. Ας σημειωθεί ότι η ολική θραύση ενός κυττάρου σημαίνει από ηλεκτρική άποψη, ανοιχτό κύκλωμα. Τέλος, μια άλλη αιτία μπορεί να είναι ανοιχτοκυκλωμένες ηλεκτρικές συνδέσεις και να οφείλεται σε διαφορετική θερμική διαστολή κλπ.

Επίσης, είναι γνωστό ότι οι τάσεις σε σειρά προστίθενται, ενώ παράλληλα είναι ισοδύναμες με την τιμή της μικρότερης τάσης. Επιπλέον, ρεύματα παράλληλα προστίθενται, ενώ σε σειρά είναι ισοδύναμα με την τιμή του μικρότερου σχήματος (σχήμα 3.17). Έτσι, αν δύο κύτταρα με ανάμοια χαρακτηριστικά συνδεθούν σε σειρά η συμπεριφορά τους (που απαιτεί να διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα), περιγράφεται αν αθροίσουμε τις τάσεις των δύο κυττάρων για τις διάφορες τιμές του ρεύματος.



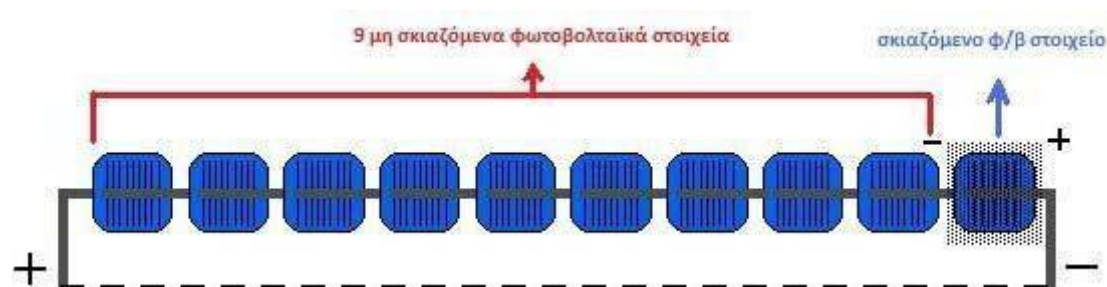
Σχήμα 3.17. Βασικός συνδυασμός, σε σειρά και παράλληλα, πηγών τάσεως και ρεύματος με διαφορετικά χαρακτηριστικά. [11]

Ισχυρές αποκλίσεις από την προσαρμογή των χαρακτηριστικών των κυττάρων μιας συστοιχίας είναι δυνατόν να προκαλέσουν απώλεια της ικανότητας παραγωγής ισχύος από τα «καλύτερα», από άποψη χαρακτηριστικών κύτταρα. Με άλλα λόγια, η μη προσαρμογή των χαρακτηριστικών των κυττάρων μιας συστοιχίας συνεπάγεται ότι η συνολική ισχύς εξόδου θα είναι μικρότερη από το άθροισμα των ισχύων των επί μέρους κυττάρων. Η απώλεια αυτή ισχύος καλείται απώλεια προσαρμογής (mismatch loss) και αποτελεί ένα φαινόμενο με μεγάλο ενδιαφέρον, ιδιαίτερα για κύτταρα συνδεδεμένα σε σειρά.

Η μη προσαρμογή των χαρακτηριστικών των κυττάρων μιας συστοιχίας, εκτός από μείωση της ισχύος εξόδου, είναι δυνατόν να προκαλέσει κι ένα άλλο φαινόμενο, ιδιαίτερα σημαντικό, που καλείται φαινόμενο hot-spot. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε ανάστροφη πόλωση ενός ή περισσότερων κυττάρων και συνεπάγεται υπερθέρμανσή τους, που πολλές φορές μπορεί να είναι καταστροφική.

Πιο συγκεκριμένα, το φαινόμενο hot-spot συμβαίνει όταν υπάρχει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, συνδεδεμένο σε σειρά με κάποια άλλα, που δίνει χαμηλό ρεύμα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Δηλαδή, αν μια αλυσίδα από κύτταρα βραχυκυκλωθεί (σχήμα 3.18) τότε η ισχύς που παράγουν τα μη σκιαζόμενα στοιχεία καταναλώνεται δια μέσω του σκιαζόμενου φωτοβολταϊκού στοιχείου. Το σκιαζόμενο στοιχείο μειώνει το ρεύμα δια μέσω των μη σκιαζόμενων στοιχείων, προκαλώντας τα «καλά» στοιχεία να παράγουν υψηλότερη τάση η οποία μπορεί να προκαλέσει ανάστροφη πόλωση του σκιαζόμενου φωτοβολταϊκού στοιχείου. Έτσι, η ενέργεια που χάνεται στο σκιαζόμενο στοιχείο μετατρέπεται σε θερμότητα (υπερβολική τοπική

αύξηση της θερμοκρασίας) με πιθανό αποτέλεσμα την θραύση ή ακόμη και την πλήρη καταστροφή του πλαισίου.



Σχήμα 3.18. Διάταξη φ/β στοιχείων σε σειρά με ένα σκιαζόμενο.

3.6.6 Μέθοδοι θεραπείας

Επειδή τα κύτταρα μιας συστοιχίας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της είναι δυνατόν να μην έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά είναι πιθανό να προκύψουν τα δύο φαινόμενα που μελετήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο (μείωση ισχύος εξόδου και φαινόμενο hot-spot) και να δημιουργηθούν προβλήματα. Με σκοπό να μειώσουμε την επίδραση των προβλημάτων αυτών στην λειτουργία της συστοιχίας και να απομακρύνουμε τον κίνδυνο δυσάρεστων καταστάσεων, ακολουθούμε συνήθως δύο στρατηγικές: είτε χρησιμοποιούμε πλεονάζουσες συνδέσεις είτε συνδέουμε παράλληλα διόδους παράκαμψης.

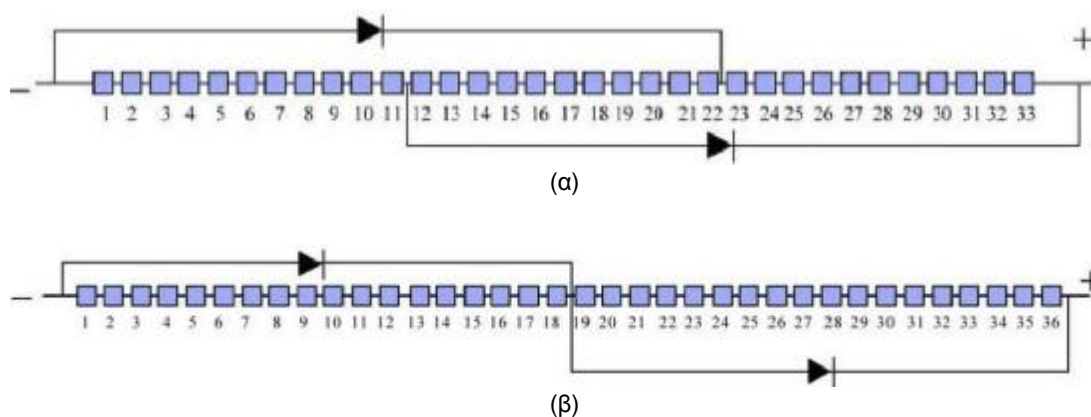
Στρατηγική παράλληλης/σε σειρά σύνδεσης κυττάρων

Ένας τρόπος για να αυξήσουμε την αξιοπιστία του συστήματος είναι να χρησιμοποιήσουμε πλεονάζουσες σε σειρά και παράλληλες συνδέσεις. Είναι σκόπιμο να χωρίσουμε τη συστοιχία σε μεγάλο αριθμό παράλληλων κλάδων. Αυτό μειώνει την πιθανότητα να συμβούν πολλά βραχυκυκλώματα σε ένα κλάδο, έτσι ώστε δύο ή περισσότερα βραχυκυκλωμένα κύτταρα να μην προκαλούν αθροιστική πτώση τάσης. Αυτό έχει το επιπλέον πλεονέκτημα ότι είναι δυνατός ο τμηματικός έλεγχος της συστοιχίας σε διάφορα ενδιάμεσα σημεία καθώς επίσης υπάρχει δυνατότητα απομόνωσης μικρών (επί μέρους) τμημάτων της όλης συστοιχίας για συντήρηση κι επισκευή.

Δίοδοι παράκαμψης

Το καταστροφικό φαινόμενο hot-spot είναι δυνατόν να αποφευχθεί με τη χρήση μιας παρακαμπτήριας διόδου (δίοδος παράκαμψης). Μια δίοδος συνδέεται παράλληλα με μια σειρά φωτοβολταϊκών στοιχείων, την οποία θέλουμε να προστατέψουμε, αλλά με αντίθετη πόλωση. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, κάθε στοιχείο είναι ορθά πολωμένο και η δίοδος που είναι ανάστροφα πολωμένη, απλά αποτελεί ένα κομμάτι ανοιχτού ουσιαστικά κυκλώματος με αποτέλεσμα το ρεύμα να μην επιλέγει τον δρόμο αυτό. Όμως, όταν ένα στοιχείο πολωθεί ανάστροφα και εμφανιστεί μια διαφορά του ρεύματος βραχυκυκλώσεως μεταξύ των φωτοβολταϊκών στοιχείων της σειράς, τότε η δίοδος άγει και προστατεύει το «προβληματικό» στοιχείο.

Πρακτικά, θα έπρεπε να είχαμε μια δίοδο για κάθε στοιχείο. Αυτό όμως είναι ανέφικτο λόγω του υψηλού κόστους κι έτσι χρησιμοποιείται μια δίοδος κατά μήκος μιας ομάδας στοιχείων. Ο μέγιστος αριθμός φωτοβολταϊκών στοιχείων που μπορεί να καλύπτει μια δίοδος είναι περίπου 15 (στοιχεία/δίοδο). Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν δύο τρόπους τοποθέτησης διόδων κατά τους οποίους είτε παρουσιάζεται αλληλοεπικάλυψη στοιχείων, είτε και όχι (σχήμα 3.19).



Σχήμα 3.19. (α) στοιχεία που επικαλύπτονται και (β) στοιχεία που δεν επικαλύπτονται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας

4.1 Η Ανάγκη για Αποθήκευση

Ένα μέρος της ενέργειας που παράγεται από μια Φ/Β συστοιχία είναι ανάγκη να αποθηκευτεί, ώστε να χρησιμοποιηθεί μετά τη δύση του ήλιου, τη νύχτα, πριν την ανατολή του ήλιου, όταν δεν επαρκεί η ηλιακή ακτινοβολία ή κατά τη διάρκεια συνεχών ημερών με νεφελώδη ουρανό. 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 ηλεκτρικού ρεύματος. 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. Τα περισσότερα από τα συστήματα αποθήκευσης που υπάρχουν δεν προσφέρονται για το σκοπό αυτό είτε λόγω μεγάλου αρχικού κόστους, είτε λόγω μη προσαρμογής των δυνατοτήτων αποθήκευσης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η άντληση και η αποθήκευση νερού, ο συμπιεσμένος αέρας, η θερμική αποθήκευση, η παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου, η αποθήκευση σε σφονδύλους κτλ.

4.1.1 Ηλιακοί Συσσωρευτές

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. Η χημική αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με τη βοήθεια συσσωρευτών φαίνεται ότι αποτελεί την πλέον κατάλληλη μέθοδο αποθήκευσης για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

Τα πλεονεκτήματα ενός Φ/Β συστήματος με συσσωρευτές είναι η δυνατότητα να παρέχουν ενέργεια σε περιόδους που δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, η δυνατότητα να καλύπτουν στιγμιαίες αιχμές ζήτησης φορτίου, η ύπαρξη σταθερής τάσης στο σύστημα, η ικανότητα αποθήκευσης της επί πλέον της ενεργειακής ζήτησης ενέργειας ώστε να μειώνονται οι απώλειες κτλ. Από την άλλη μεριά, η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος, το αυξημένο κόστος, ο αυξημένος χρόνος και το κόστος συντήρησης και πολλές φορές η μειωμένη αξιοπιστία μπορούν να καταγραφούν στα μειονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος.



Σχήμα 4.1.Συσσωρευτές ROLLS.

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 Δομή Συσσωρευτών

Ένας συσσωρευτής αποτελείται από ένα ή περισσότερα στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ή/και παράλληλα και ο τρόπος σύνδεσής τους εξαρτάται από την επιθυμητή τάση εξόδου και τη χωρητικότητα της συστοιχίας. Το στοιχείο αποτελείται από τρία βασικά συστατικά:

- Την άνοδο, η οποία δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.
 - Την κάθοδο, η οποία δέχεται τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και ανάγεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.
 - Τον ηλεκτρολύτη (ιονικός αγωγός) ο οποίος αποτελεί το μέσο για τη μεταφορά των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του στοιχείου μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.
- Ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως κάποιο διάλυμα που συμβάλλει στην ιονική αγωγιμότητα της διάταξης.

Σε ένα πρακτικό σύστημα, η άνοδος επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω: καλή αγωγιμότητα, σταθερότητα, ευκολία κατασκευής και μικρό κόστος. Συνήθως τα υλικά που επιλέγονται για την κατασκευή ανόδων είναι τα μέταλλα. Η κάθοδος πρέπει να είναι ένας καλός οξειδωτικός παράγοντας και να μην αλληλεπιδρά χημικά με τον ηλεκτρολύτη. Συνήθως τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή καθόδων είναι τα οξείδια μετάλλων. Ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει καλή ιονική αγωγιμότητα. Η άνοδος και η κάθοδος είναι ηλεκτρικά απομονωμένες μέσα στο στοιχείο για την αποφυγή εσωτερικού βραχυκυκλώματος, αλλά περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη.

Στις κατασκευές των στοιχείων χρησιμοποιείται ένα υλικό διαχωρισμού για να διαχωρίσει τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου. Το υλικό διαχωρισμού είναι διαπερατό από τον ηλεκτρολύτη, έτσι ώστε να διατηρηθεί η ιονική αγωγιμότητα του στοιχείου. Κατάλληλα υλικά μπορούν να προστεθούν στα ηλεκτρόδια για τη μείωση της εσωτερικής τους αντίστασης.

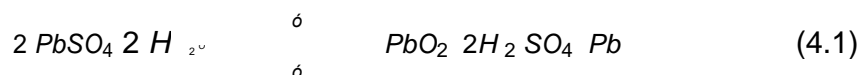
Το στοιχείο μπορεί να κατασκευαστεί σε πολλά σχήματα: κυλινδρικό, επίπεδο ή πρισματικό. Τα στοιχεία σφραγίζονται με διάφορους τρόπους για να αποφευχθεί η διαρροή του ηλεκτρολύτη. Μερικά στοιχεία διαθέτουν βαλβίδες για να επιτρέπουν τη διαφυγή των αερίων που παράγονται κατά τη λειτουργία τους. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται η δομή ενός συσσωρευτή όπου διακρίνονται τα δομικά χαρακτηριστικά που έχουν περιγραφεί παραπάνω.



Σχήμα 4.2. Η δομή ενός συσσωρευτή.

4.3 Αρχή Λειτουργίας Συσσωρευτών

Ο μηχανισμός της λειτουργίας των συσσωρευτών στηρίζεται σε μία αντιστρεπτή ηλεκτροχημική διαδικασία, η οποία για τους συσσωρευτές μολύβδου περιγράφεται από την αντίδραση:



Η κατεύθυνση προς τα δεξιά αντιστοιχεί στη διαδικασία της εκφόρτισης, ενώ η αντίθετη στη φόρτιση του συσσωρευτή. Πιο συγκεκριμένα, κατά την αρχική επαφή των μολύβδινων πλακών με το ηλεκτρολυτικό διάλυμα H_2SO_4 , λεπτό επιφανειακό στρώμα των ηλεκτροδίων μετατρέπεται από Pb σε PbSO_4 . Κατά τη φόρτιση υπό τάση λίγο μεγαλύτερη της ονομαστικής τάσης της διάταξης, το ηλεκτρόδιο που είναι συνδεδεμένο στον αρνητικό πόλο της πηγής φόρτισης, ανάγεται σε μεταλλικό μολύβδο (Pb), με σπογγώδη μορφή και το άλλο που είναι συνδεδεμένο με το θετικό πόλο της πηγής, οξειδώνεται προς PbO_2 , φαιού χρώματος.

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.

4.4 Κατηγορίες Στοιχείων και Συσσωρευτών

4.4.1 Πρωτεύοντα Στοιχεία ή Συσσωρευτές

Τα πρωτεύοντα στοιχεία (ή συσσωρευτές) δε γίνεται να επαναφορτιστούν, γι' αυτό εκφορτίζονται μία φορά και στη συνέχεια αποσύρονται. Ο πρωτεύων συσσωρευτής είναι μία ικανοποιητική και συνήθως φθηνή πηγή ενέργειας. Τα γενικά πλεονεκτήματά τους είναι η γενικά μεγάλη ζωή τους όταν βρίσκονται αποθηκευμένοι, η μεγάλη πυκνότητα ενέργειας για μικρούς ή μεσαίους ρυθμούς εκφόρτισης, η μικρή ή έως καθόλου ανάγκη για συντήρηση, η ευκολία χρήσης και το μικρό αρχικό κόστος. Διάφορες εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται πρωτεύοντες συσσωρευτές είναι φορητές ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές, φωτισμός, φωτογραφικός εξοπλισμός, παιχνίδια κ.α. Οι πιο συνηθισμένοι πρωτεύοντες συσσωρευτές είναι κυλινδρικοί ή επίπεδοι.

4.4.2 Δευτερεύοντα Στοιχεία ή Συσσωρευτές

Τα δευτερεύοντα στοιχεία (ή συσσωρευτές) μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά μετά την εκφόρτιση, μέχρι να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση πριν τη εκφόρτιση. Αυτό γίνεται με την εφαρμογή ρεύματος με την αντίθετη φορά από αυτή του ρεύματος εκφόρτισης. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούνται μεγάλες ισχύεις. Πιο συγκεκριμένα, οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

1. Τις εφαρμογές στις οποίες ο συσσωρευτής εκφορτίζεται μόνο όταν είναι απαραίτητο και φορτίζεται από μία πηγή τάσης ή ρεύματος. Τέτοιες εφαρμογές είναι τα συστήματα αεροπλάνων, συστήματα έκτακτης ανάγκης και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.
2. Τις εφαρμογές στις οποίες ο συσσωρευτής χρησιμοποιείται ως κύρια πηγή ενέργειας και επαναφορτίζεται μετά τη χρήση αντί να αποσύρεται. Τέτοιες εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν τις φορητές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, ηλεκτρικά οχήματα και γενικά εφαρμογές τις οποίες δε μπορούν να καλύψουν οι πρωτεύοντες συσσωρευτές.

Οι δευτερεύοντες συσσωρευτές χαρακτηρίζονται από υψηλή ενεργειακά πυκνότητα, υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης και καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Μερικοί συσσωρευτές, οι οποίοι είναι γνωστοί και ως μηχανικά επαναφορτιζόμενοι, φορτίζονται με την αντικατάσταση ενός από τα ηλεκτρόδια, συνήθως της μεταλλικής διόδου. Τους βασικότερους εκπροσώπους αυτής της κατηγορίας, που είναι και πλέον κατάλληλοι για φωτοβολταϊκά συστήματα, αποτελούν οι συσσωρευτές μολύβδου (LEAD-ACID) και οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου (NICKEL-CADMIUM).

4.5 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.

4.5.1 Συσσωρευτές Μολύβδου

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).

Συσσωρευτές Μολύβδου-Αντιμονίου (Pb-Sd)

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.

Συσσωρευτές μολύβδου δεσμευμένου ηλεκτρολύτη (Captive Electrolyte Lead-Acid Batteries)

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. Το γεγονός ότι δεν έχουν απαιτήσεις συντήρησης (ούτε και δυνατότητα), σε συνδυασμό με την ευκολία στη μετακίνηση τους καθιστά ιδανικούς για συστήματα σε απομακρυσμένα ή δυσπρόσιτα μέρη. Πάνω από τα μισά απομακρυσμένα μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα τους χρησιμοποιούν.

4.5.2 Άλλοι Τύποι Συσσωρευτών

Εκτός από τους συσσωρευτές μολύβδου έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς και έχουν κυκλοφορήσει στο εμπόριο ή βρίσκονται ακόμα υπό μελέτη διάφοροι άλλοι τύποι συσσωρευτών όπως οι συσσωρευτές νικελίου. Γνωστοί και ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι συσσωρευτών νικελίου είναι:

- Οι συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου.
- Οι συσσωρευτές Νικελίου- Σιδήρου.
- Οι συσσωρευτές Νικελίου- Ψευδαργύρου.
- Οι συσσωρευτές REDOX.

Συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου

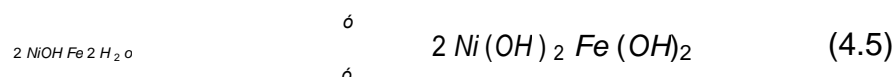
Η χημική αντίδραση που περιγράφει τη φόρτιση-εκφόρτιση είναι:



Ο ηλεκτρολύτης είναι διάλυμα υδροξειδίου του καλίου σε νερό. Στα πλεονεκτήματα των συσσωρευτών αυτών περιλαμβάνονται η δυνατότητα μεγάλων ρυθμών, μεγάλη διάρκεια ζωής, δυνατότητα υπερφόρτισης, σχετικά σταθερή τάση λειτουργίας συναρτήσει της στάθμης φόρτισης, ικανότητα παραμονής σε μέτρια στάθμη φόρτισης χωρίς πολλές φθορές. Χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές συσκευές, φορητά εργαλεία, σαν εφεδρικές πηγές και σε διαστημικές εφαρμογές. Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγονται το υψηλό κόστος και η μικρή χωρητικότητα.

Συσσωρευτές Νικελίου- Σιδήρου

Η χημική αντίδραση που περιγράφει τη φόρτιση-εκφόρτιση είναι:



Ο ηλεκτρολύτης είναι διάλυμα υδροξειδίου του καλίου σε νερό. Στα πλεονεκτήματα των συσσωρευτών αυτών περιλαμβάνονται η μεγάλη διάρκεια ζωής και η δυνατότητα να υπερφορτίζονται και να υπερεκφορτίζονται με ελάχιστη μόνιμη βλάβη, ενώ στα μειονεκτήματα το σχετικά υψηλό κόστος και ο μικρός βαθμός απόδοσης.

Συσσωρευτές Νικελίου- Ψευδαργύρου

Η χημική αντίδραση είναι όμοια με τους προηγούμενους με τη διαφορά ότι χρησιμοποιούν ηλεκτρόδιο ψευδαργύρου στη θέση του σιδήρου. Τα πλεονεκτήματά τους είναι η μεγάλη πυκνότητα ισχύος και ενέργειας που τους κάνει κατάλληλους για συσσωρευτές έλξης, ενώ σαν μειονεκτήματα έχουν τη μικρή διάρκεια ζωής, σχετικά χαμηλό βαθμό απόδοσης και το υψηλό κόστος.

Συσσωρευτές REDOX

Τα ενεργά υλικά είναι διάλυμα $CrCl_2$ σε νερό για το θετικό ηλεκτρόδιο και διάλυμα $FeCl_3$ σε νερό για το αρνητικό ηλεκτρόδιο και αποθηκεύονται σε χωριστά δοχεία εκτός του στοιχείου, όπου βρίσκονται τα δυο ηλεκτρόδια και κυκλοφορούν με τη βοήθεια αντλιών. Στα πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνονται η μεγάλη διάρκεια ζωής, η δυνατότητα υπερφόρτωσης ή υπερεκφόρτισης χωρίς μόνιμη βλάβη, η δυνατότητα ρύθμισης της τάσης με την πρόθεση επί πλέον στοιχείων κατά τη διάρκεια της

λειτουργίας, ενώ στα μειονεκτήματα οι ενεργειακές (παρασιτικές) απαιτήσεις για τη λειτουργία των βοηθητικών συσκευών κ.α.

Τέλος, πρέπει να τονισθεί ότι βρίσκονται υπό μελέτη και άλλοι τύποι συσσωρευτών που καθένας παρουσιάζει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

4.6 Κύκλος Λειτουργίας (DUTY CYCLE)

Μια πλήρης φόρτιση μαζί με την επόμενη επαναφόρτιση αναφέρεται σαν ένας κύκλος (CYCLE). Οι συσσωρευτές ανάλογα με τον τρόπο χρησιμοποίησης χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες, που καθεμιά παρουσιάζει ιδιαίτερα κρίσιμα χαρακτηριστικά.

Συσσωρευτές Εκκίνησης (SLI και DIESEL)

Χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση (STARTING), φωτισμό (LIGHTING) και ανάφλεξη (IGNITION) αυτοκινήτων και ντιζελομηχανών. Έχουν μεγάλους ρυθμούς εκφόρτισης και αποδίδουν μεγάλα ποσά ενέργειας σε μικρές χρονικές περιόδους με μικρό βάθος εκφόρτισης, σχετικά χαμηλό κόστος, μεγάλη ταχύτητα αυτοεκφόρτισης, διάρκεια ζωής 2-5 χρόνια για αυτοκίνητα και μέχρι 8 χρόνια για ντιζελομηχανές και μικρή διάρκεια ζωής σε κύκλους (200 κύκλους για 50% DOD και 3-5 κύκλους για 80-100% DOD).

Συσσωρευτές Έλξης (MOTIVE POWER, TRACTION)

Χρησιμοποιούνται σε ανυψωτικά μηχανήματα, ηλεκτρικούς συρμούς ορυχείων, υποβρύχια και εν γένει ηλεκτροκίνητα οχήματα. Έχουν μεγάλη ταχύτητα αυτοεκφόρτισης και όταν δεν εκφορτίζονται σε βάθος μπορεί να διαρκέσουν 5-15 χρόνια.

Στάσιμοι Συσσωρευτές (STATIONARY FLOAT)

Χρησιμοποιούνται σε τηλεφωνικά συστήματα, συστήματα αδιάλειπτου παροχής και εν γένει εφεδρικά συστήματα. Αρχίζουν να παρέχουν ενέργεια μόνο όταν η κύρια τροφοδοσία πάθει κάποια βλάβη με ρυθμούς εκφόρτισης $C/8$ μέχρι $2C$ ανάλογα με την εφαρμογή. Έχουν διάρκεια ζωής 15-30 χρόνια

Συσσωρευτές Κλειστού Τύπου (SEALED)

Δε χρειάζονται συνήθως συντήρηση (πρόσθεση νερού) διότι χρησιμοποιούν πλάκες ενισχυμένες με ασβέστιο που ελαχιστοποιούν την έκλυση αερίων, καταλύτη για επανασύνδεση των αερίων και βαλβίδες ασφαλείας.

Φωτοβολταϊκοί Συσσωρευτές Μικρού Ρυθμού Εκφόρτισης

Χρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα που σχεδιάζονται για ελάχιστη συντήρηση με μικρούς ρυθμούς εκφόρτισης (C /500), να αντέχουν στις χαμηλές θερμοκρασίες, με μεγάλη διάρκεια ζωής (5-15 χρόνια) και μικρή ταχύτητα αυτοεκφόρτισης.

Φωτοβολταϊκοί Συσσωρευτές Μέσου Ρυθμού Εκφόρτισης

Χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο ή με εφεδρική πηγή ενέργειας. Είναι συνήθως τροποποιημένοι συσσωρευτές έλξης (π.χ. περιέχουν περισσότερο ηλεκτρολύτη, ώστε να μειώσουν τις απαιτήσεις σε συντήρηση, λιγότερο ανθεκτικές από μηχανική άποψη κτλ). Έχουν μέσους ρυθμούς και μεγάλο ημερήσιο βάθος εκφόρτισης.

4.7 Χαρακτηριστικά Μεγέθη ενός Συσσωρευτή

4.7.1 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

Τα στοιχεία που προσδιορίζουν τις δυνατότητες ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή είναι η ονομαστική τάση στους πόλους του, που εκφράζεται με την έννοια της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) και η ονομαστική χωρητικότητά του. Η ΗΕΔ μετρείται σε Volt και ισούται με την πολική τάση του συσσωρευτή όταν δεν είναι συνδεδεμένος σε καταναλωτή.

Οι τιμές των ΗΕΔ των διαφόρων τύπων συσσωρευτών (Pb- H₂SO₄, NiCd, Ni-Fe, Ni-Zn, Sodium- Sulphur, Zinc- Bromide, Zinc- Chloride, Lithium- Metal Sulphide, Nickel- Hydrogen) κυμαίνονται μεταξύ 1V και ~4V ανά στοιχείο. Για να προκύψει μια διάταξη συσσώρευσης σε υψηλότερη ΗΕΔ, όμοια ηλεκτρικά στοιχεία συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους. Η ονομαστική τάση ενός στοιχείου συσσωρευτή μολύβδου είναι 2,25 V. Έτσι, οι τυπικές ονομαστικές τάσεις με τις οποίες κυκλοφορούν, με την

τυπική εμπορική τους μορφή οι συσσωρευτές μολύβδου είναι 6V, 12V 24V και 48 V.

4.7.2 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 Amper-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 Amper. 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.

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 3/4 της ενέργειας του έχουν αφαιρεθεί, δηλαδή έχει εκφορτιστεί κατά 75%, λέγεται ότι βρίσκεται στο 25% SOC .

4.7.3 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 το 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. 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 το ρυθμό εκφόρτισης για τον οποίο είναι καθορισμένη η χωρητικότητα.

4.7.4 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 αίτια 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 το λόγο αυτό, οι συσσωρευτές πρέπει να βρίσκονται σε συνθήκες συντηρητικής φόρτισης ακόμα και αν δεν υπάρχει κατανάλωση. Τυπικοί ρυθμοί αυτοεκφόρτισης ενός συσσωρευτή είναι:

- Σε θερμοκρασία 5 C, η χωρητικότητα ελαττώνεται κατά 2% ανά μήνα.
- Σε θερμοκρασία 15 C, η χωρητικότητα ελαττώνεται κατά 4% ανά μήνα.
- Σε θερμοκρασία 25 C, η χωρητικότητα ελαττώνεται κατά 10% ανά μήνα.

4.7.5 Φόρτιση

Η φόρτιση του συσσωρευτή είναι η διαδικασία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος προς το 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.

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.

4.7.6 Χρόνος Ζωής Συσσωρευτή

Οι συσσωρευτές δεν πρέπει να υφίστανται παρατεταμένη φόρτιση σε πολύ υψηλή τάση γι' αυτούς (Overcharging), ούτε να εκφορτίζονται κάτω από ένα όριο (Overdischarging). Ο κανόνας αυτός είναι πολύ σημαντικός και καθορίζει το χρόνο ζωής τους. Η υπερφόρτιση έχει ως αποτέλεσμα την ηλεκτρόλυση και συνακόλουθα, την παραγωγή υδρογόνου με ταυτόχρονη έντονη ελάττωση της στάθμης του ηλεκτρολυτικού διαλύματος (απώλεια νερού). Ο χρόνος ζωής των συσσωρευτών εκφράζεται σε κύκλους λειτουργίας, καθέννας από τους οποίους περιλαμβάνει τις διαδικασίες εκφόρτισης και φόρτισής του.

Η χωρητικότητα, C του συσσωρευτή δεν παραμένει σταθερή. Μειώνεται όσο αυξάνουν οι κύκλοι λειτουργίας. Ένας πρακτικός κανόνας που προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά των συσσωρευτών και ουσιαστικά περιγράφει το χρόνο ζωής τους, είναι ο ακόλουθος: Το γινόμενο βάθους εκφόρτισης επί τους κύκλους λειτουργίας είναι με καλή προσέγγιση σταθερό:

$$N_k \quad \acute{o} \quad (4.6)$$

όπου

N_k το πλήθος των κύκλων λειτουργίας του συσσωρευτή.

4.7.7 Συντελεστής Γήρανσης Συσσωρευτή

Η χωρητικότητα του συσσωρευτή ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή, με την αύξηση του αριθμού των κύκλων λειτουργίας του. Η μείωση αυτή (γήρανση) πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον υπολογισμό της αρχικής χωρητικότητας του συσσωρευτή, ώστε μέσα στο χρόνο ζωής του να διατηρεί τη δυνατότητα να καλύπτει ημερησίως την ενέργεια που απαιτούν οι καταναλώσεις της εφαρμογής, με το αυτό βάθος εκφόρτισης, . Η εμπειρία έχει δείξει ότι, η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή μειώνεται σταδιακά και περί το πέρας της ζωής του έχει πέσει στο 80% της αρχικής ονομαστικής χωρητικότητάς του. Συνεπώς, ως τυπική τιμή του συντελεστή γήρανσης του συσσωρευτή λαμβάνεται η τιμή $n = 0,8$.

4.7.8 Συντελεστής Φόρτισης και Απόδοση

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:

$$\acute{\eta} \acute{o} \quad \frac{\acute{o} \acute{o} Ah}{\acute{o} \acute{o} Ah} \quad (4.7)$$

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

$$\eta_{\text{ύ}} = \frac{\dot{W}_{\text{έ}} \text{ (kW)}}{\dot{W}_{\text{έ}} \text{ (kW)}} \quad (4.8)$$

Όταν φορτίζεται ένας συσσωρευτής, ένα ποσοστό της τάξεως του 10-20% της προσφερόμενης σ' αυτόν ενέργειας χάνεται, θερμαίνοντας τον ηλεκτρολύτη ή προκαλώντας ηλεκτρόλυση. Έτσι ένας συσσωρευτής χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο βαθμό απόδοσης ενέργειας, η_E . Ορίζεται ως ο λόγος του ηλεκτρικού έργου που αποδίδει ο συσσωρευτής κατά την εκφόρτιση (W $V I t$), δια του έργου που του προσφέρθηκε κατά την προηγούμενη φόρτισή του. Τυπική τιμή 80-85%.

$$\eta_E = \frac{W}{W_{\text{έ}}} \quad (4.9)$$

Εκτός από το βαθμό ενεργειακής απόδοσης, χρησιμοποιείται επίσης ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης φορτίου, η_q , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του φορτίου κατά την εκφόρτιση, προς το φορτίο κατά τη φόρτιση. Τυπική τιμή η_q 90%.

$$\eta_q = \frac{Q}{Q_{\text{έ}}} \quad (4.10)$$

4.8 Οι Συσσωρευτές στα Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Για τη σωστή εκλογή, σχεδίαση και λειτουργία των συσσωρευτών στα φωτοβολταϊκά συστήματα πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλές παράμετροι όπως:

- Τα χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.
- Οι συσκευές προσαρμογής και ελέγχου της ισχύος.
- Το φορτίο.
- Οι μετεωρολογικές συνθήκες.
- Ο συγκεκριμένος τύπος του συσσωρευτή.

4.8.1 Κύκλος Λειτουργίας σε Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα με Εφεδρική Πηγή

Ο τρόπος με τον οποίο θα λειτουργήσει ένας συσσωρευτής επηρεάζει τόσο τον τύπο όσο και την ιδιαίτερη κατασκευή των στοιχείων του. Σ' ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ο κύκλος λειτουργίας των συσσωρευτών καθορίζεται κυρίως από:

- Το προφίλ του φορτίου.
- Την προσπίπτουσα ακτινοβολία και τη χρονική σχέση της με το φορτίο.
- Την ύπαρξη ή μη εφεδρικής πηγής ενέργειας.

Αυτόνομα συστήματα με εφεδρική πηγή ενέργειας

Στα συστήματα αυτά υπάρχει μια εφεδρική πηγή (ντιζελογεννήτρια), ενώ για περιόδους χαμηλής ακτινοβολίας ή μεγάλης ζήτησης υπάρχουν και συσσωρευτές με χωρητικότητα που κυμαίνεται από μερικές ώρες μέχρι μερικές μέρες, ανάλογα με το ποσοστό του φορτίου που πρέπει να καλύψει το ηλιακό σύστημα και τις κλιματολογικές συνθήκες. Γενικά ο κύκλος λειτουργίας είναι παρόμοιος με των συσσωρευτών των διασυνδεδεμένων στο δίκτυο. Ωστόσο αν υπάρχει διαθέσιμη αρκετή χωρητικότητα (μερικές μέρες) προκύπτουν κάπως χαμηλότεροι ρυθμοί φόρτισης/εκφόρτισης και λιγότεροι πλήρεις κύκλοι στη μονάδα του χρόνου.

4.8.2 Ονομαστική Χωρητικότητα και Παρεχόμενη Ισχύς από τους Συσσωρευτές κατά τη Λειτουργία τους σε Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω καταλήγουμε σε ένα συσσωρευτή ονομαστικής χωρητικότητας C_N . Η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα C δίνεται από:

$$C < C_N \quad (4.11)$$

όπου

είναι το βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή.

Η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να αποταμιευθεί και να ανακτηθεί σε ιδανικές συνθήκες, σε κάθε κύκλο φόρτισης- εκφόρτισης είναι:

$$E C C_N V \quad (4.12)$$

Ο συντελεστής απόδοσης των συσσωρευτών μολύβδου , δηλαδή ο λόγος της μέγιστης ποσότητας της ενέργειας που ανακτάται προς την ενέργεια που είχε απορροφηθεί από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια σε κάθε κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης είναι περίπου 85%. Επομένως, αν η ηλεκτρική ενέργεια που ζητάμε να δίνει ο συσσωρευτής είναι E η ενεργός χωρητικότητα του C θα πρέπει να αντιστοιχεί σε ενέργεια φόρτισης E , ίση με:

$$E = \underline{E} \quad (4.13)$$

Και τότε η ονομαστική χωρητικότητά του είναι:

$$C_N \frac{E}{V} = \frac{E}{V} \quad (4.14)$$

Ως προς την παρεχόμενη ισχύ, βρίσκουμε εύκολα ότι αν ένας συσσωρευτής απαιτείται να τροφοδοτεί την κατανάλωση με μέση ισχύ P επί συνεχείς μέρες, τότε η ενεργός χωρητικότητα θα πρέπει να είναι:

$$C = \frac{24 P}{V} \quad (4.15)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Τα Ηλεκτρονικά των Φωτοβολταϊκών

5.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ένα Φ/Β πλαίσιο είναι υπό μορφή συνεχούς ρεύματος (DC). Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (AC) είναι απαραίτητη για τη χρήση πολλών κοινών συσκευών όπως και για τη σύνδεση στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο και επιτυγχάνεται με ένα μετατροπέα τάσης συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα ή αλλιώς μετατροπέας DC-AC.

Η αποδοτικότητα των μετατροπέων είναι γενικά μεγαλύτερη από 90%, όταν λειτουργούν πάνω από το 10% της μέγιστης παραγωγής τους και μπορεί να φτάσει έως και 96%. Οι μετατροπείς που συνδέονται άμεσα με τα φωτοβολταϊκά ενσωματώνουν μια ηλεκτρονική διάταξη ανίχνευσης του μέγιστου σημείου ισχύος (Maximum Power Point Tracker - MPPT), ρυθμίζοντας συνεχώς τη σύνθετη αντίσταση φορτίων έτσι ώστε ο μετατροπέας να εξάγει πάντα τη μέγιστη ενέργεια από το σύστημα.

Οι μετατροπείς υπάγονται σε δύο-κύριες κατηγορίες: αυτο-συγχρονιζόμενος και συγχρονισμένος βάση μίας σύνδεσης. Ο πρώτος μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα, ενεργοποιούμενος από την πηγή ενέργειας, δηλαδή μόλις υπάρχει ρεύμα από τα Φ/Β τότε ενεργοποιείται για να μην σπαταλάει ρεύμα από τους συσσωρευτές. Αυτοί που υπάγονται στη δεύτερη κατηγορία ενεργοποιούνται και ελέγχονται από το δίκτυο. Αυτό είναι απαραίτητο για να διατηρήσει το δίκτυο σταθερή ποιότητα ρεύματος και να αποφευχθούν τυχόν ατυχήματα. Αυτής της κατηγορίας οι μετατροπείς σταματάνε όταν υπάρχει βλάβη στο δίκτυο για πρόληψη ηλεκτροπληξίας στα συνεργεία της ΔΕΗ.

Παραδοσιακά, ένας μετατροπέας χρησιμοποιείται για ολόκληρη τη συστοιχία. Ξεχωριστοί μετατροπείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικές συστοιχίες

Φ/Β σε περίπτωση που η εγκατεστημένη ισχύς είναι μεγάλη. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοπιστία, καθώς εάν προκύψει κάποιο πρόβλημα σε μια μονάδα, απομονώνεται χωρίς να σταματήσει την παραγωγή το υπόλοιπο σύστημα.

5.2 Μονάδες Μετατροπής Ισχύος

Μονάδες μετατροπής ισχύος είναι οι μονάδες εκείνες που αναλαμβάνουν την προσαρμογή μεταξύ συστοιχίας, συσσωρευτή, φορτίων και εφεδρικής πηγής ενέργειας (αν υπάρχει) μετατρέποντας την «ακατέργαστη» DC ισχύ εξόδου από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία σε ισχύ «κατάλληλης ποιότητας» και σύμφωνης με τις απαιτήσεις του φορτίου.

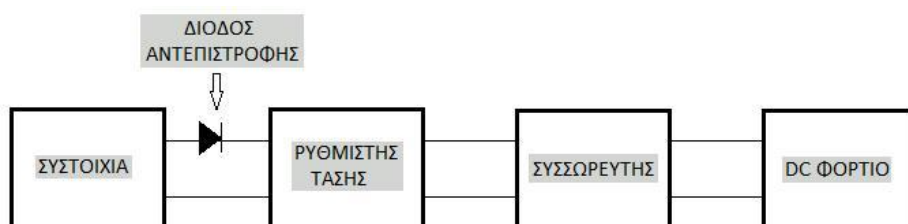
Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία παράγει DC ισχύ με μεταβολές της τάσης της τάξης του 30%. Αν οι ανάγκες του φορτίου περιορίζονται σε DC ισχύ (π.χ. φωτισμός, DC κινητήρας, άλλα ωμικά φορτία) τότε ο πιο απλός συνδυασμός είναι η απ' ευθείας σύνδεση της συστοιχίας με ένα συσσωρευτή, μέσω διόδου αντεπιστροφής και στη συνέχεια με το φορτίο (σχήμα 5.1). Η δίοδος αντεπιστροφής τοποθετείται για αποφυγή της εκφόρτισης των συσσωρευτών διαμέσου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, αν μειωθεί σημαντικά η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο συνδυασμός αυτός συνίσταται μόνο όταν το μέγιστο ρεύμα της συστοιχίας είναι μικρότερο από το 5% της χωρητικότητας των συσσωρευτών.



Σχήμα 5.1. Αυτορυθμιζόμενο φωτοβολταϊκό σύστημα. [24]

Σε πολλά DC συστήματα, οι μεταβολές της τάσης που οφείλονται σε μεταβολή των καιρικών συνθηκών και χειροτέρευση των χαρακτηριστικών τους κυττάρων λόγω

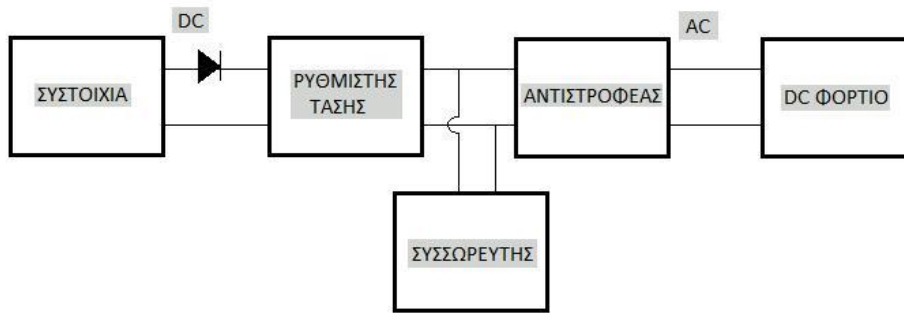
γήρανσης, αντισταθμίζονται με έλεγχο της τάσης της συστοιχίας με τη βοήθεια ρυθμιστών τάσης (σχήμα 5.2). Έτσι, παρέχεται ισχύς σε σταθερή τάση με σκοπό να προστατεύσουμε το συσσωρευτή και το φορτίο από ακραίες τιμές της τάσης με όλες τις γνωστές συνέπειες.



Σχήμα 5.2. Φωτοβολταϊκό σύστημα με ρυθμιστή τάσης. [24]

Σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα θέλουμε να εξάγουμε από τη συστοιχία το μέγιστο δυνατό ποσό ενέργειας, δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή το σημείο λειτουργίας να αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος. Αν το σύστημα είναι αυτόνομο και περιλαμβάνει συσσωρευτές ο αριθμός των σε σειρά συνδεδεμένων στοιχείων των συσσωρευτών πρέπει να είναι κατάλληλος, ώστε η τάση του συσσωρευτή να βρίσκεται στη γειτονιά της τάσης που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος της συστοιχίας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Σε κάθε περίπτωση, δεν υπάρχει αυτή η προσαρμογή λόγω μεταβολής της ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας, της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών (SOC), του ρυθμού φόρτισης/εκφόρτισης των συσσωρευτών, με συνέπεια τη μείωση του συνολικού βαθμού απόδοσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια μονάδα που ονομάζεται ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracker), που ακολουθώντας κατάλληλη στρατηγική ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος επιτυγχάνει την απαιτούμενη προσαρμογή.

Αν οι ανάγκες του φορτίου απαιτούν AC ισχύ (που είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση) χρησιμοποιείται κι ένας αντιστροφέας, inverter, ώστε να μετατρέπει την DC σε AC ισχύ (σχήμα 5.3).

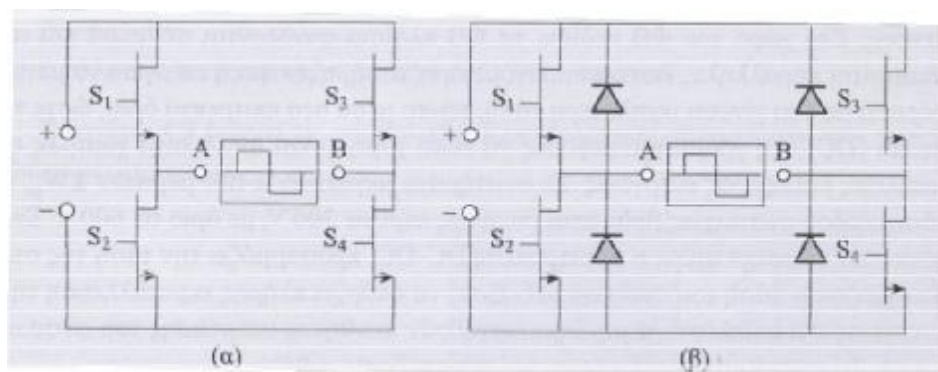


Σχήμα 5.3. Φωτοβολταϊκό σύστημα με αντιστροφή. [24]

Επίσης, στις παραπάνω μονάδες μετατροπής της ισχύος μπορούμε να κατατάξουμε και τις μονάδες ελέγχου του συστήματος που μπορεί να περιλαμβάνουν: αυτόματη εκκίνηση και θέση εκτός λειτουργίας, εκτίμηση του SOC των συσσωρευτών, θέση σε λειτουργία της εφεδρικής πηγής ενέργειας, κατανομή φορτίου, εντοπισμό σφαλμάτων/αυτόματη διόρθωση, διακόπτες, γείωση, άλλα συστήματα προστασίας, συστήματα παρακολούθησης και καταγραφής δεδομένων κλπ.

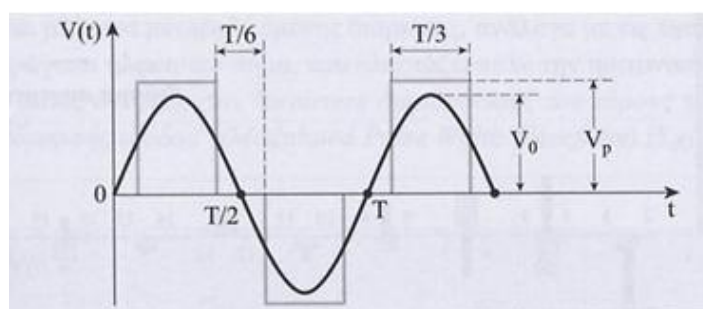
5.3 Μετατροπέας (inverter) DC-AC

Ο Inverter είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος που μετατρέπει συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη (μονοφασική ή τριφασική). Η βασική αρχή λειτουργίας του περιγράφεται στο σχήμα 5.4. Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε περιπτώσεις που διαθέτουμε πηγή συνεχούς ηλεκτρικής τάσεως και καταναλωτές εναλλασσόμενης, όπως συμβαίνει στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές οικιακής χρήσεως. Αποτελείται από ηλεκτρονικούς διακόπτες (bipolar transistors ισχύος, MOSFETs, thyristors κλπ), η συνδυασμένη λειτουργία των οποίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σειράς τετραγωνικών παλμών διαδοχικά ορθών και ανεστραμμένων (Inversion).



Σχήμα 5.4. (α) Βασική αρχή λειτουργίας του inverter. Τα S1, S2, S3, S4 είναι διακοπτικά στοιχεία. Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (DC-AC conversion) επιτυγχάνεται με κλείσιμο- άνοιγμα των διακοπτικών στοιχείων ανά δύο, χιαστί (1,4 και 2,3). Όσο τα S1, S4 είναι αγωγή και τα S2, S3 σε αποκοπή, τα σημεία A και B έχουν πρόσημα + και – αντίστοιχα. Όταν συμβαίνει το αντίστροφο, τα A και B έχουν πρόσημα – και + αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η εναλλασσόμενη τετραγωνική τάση (κέντρο του διαγράμματος). (β) Στο προηγούμενο κύκλωμα προστίθεται σε κάθε διακοπτικό στοιχείο από μία δίοδος, έτσι ώστε να αποκόπτεται η επιστρεφόμενη ισχύς από μη ωμικά φορτία κατανάλωσης. [8]

Μία βελτιωμένη έκδοση inverter αποτελεί εκείνος του οποίου η τάση εξόδου παρουσιάζεται με τη μορφή του διαμορφωμένου ημιτόνου (modified sine inverter), όπως εμφανίζεται στο σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5. Η μορφή του τροποποιημένου ημιτόνου σε σύγκριση με το καθαρό ημίτονο. V_p = πλάτος τετραγωνικού παλμού, V_0 = πλάτος αντίστοιχου θεμελιώδους ημιτονικής κυματομορφής. [8]

Με κατάλληλη ρύθμιση των χρόνων κλεισίματος – ανοίγματος των διακοπών, επιτυγχάνουμε μικρή τροποποίηση της κυματομορφής εξόδου του, η οποία

χαρακτηρίζεται από το ότι ο αρνητικός τετραγωνικός παλμός είναι μετατοπισμένος χρονικά, σε σχέση με το θετικό, κατά $T/6$ της περιόδου της συνολικής κυματομορφής. Το χρονικό εύρος των τετραγωνικών τμημάτων είναι $T/3$.

Το πλεονέκτημα αυτής της διαμορφωμένης τετραγωνικής κυματομορφής είναι ότι περιορίζεται το μέγεθος των ανωτέρων αρμονικών και άρα περιορίζεται δραστικά η παραμόρφωση σήματος. Πράγματι, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6, υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των πλατών των ανωτέρων αρμονικών του διαμορφωμένου σήματος, σε σχέση με τον απλό τετραγωνικό παλμό.



Σχήμα 5.6. Φάσμα συχνοτήτων δύο περιοδικών σημάτων, του εναλλασσόμενου τετραγωνικού παλμού (μαύρα παραλληλόγραμμα) και του εναλλασσόμενου διαμορφωμένου τετραγωνικού παλμού. Το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής (τάξη $n=1$) είναι $\sim 1,15$ του πλάτους του τετραγωνικού παλμού

$$(V_0 = 1,15 V_p). [8]$$

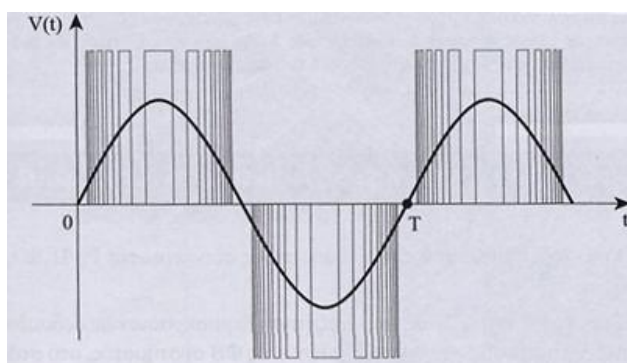
Η περίπτωση με μετατόπιση $=T/6$ μεταξύ των αντεστραμμένων παλμών χαρακτηρίζεται από μικρότερη παραμόρφωση, που επιβάλλουν οι ανώτερες αρμονικές στο σήμα της θεμελιώδους. Οι inverters αυτού του είδους χρησιμοποιούνται, ευρέως, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα στις συσκευές που τροφοδοτούν και παρουσιάζουν αρκετά καλή απόδοση (μέχρι και 96%, σε πλήρες φορτίο). Γενικά, η απόδοση των inverters είναι αρκετά υψηλή (93-96%, σχήμα 5.7), εξαρτώμενη από το ποσοστό του πλήρους φορτίου που τροφοδοτεί. Απαιτείται υψηλή

απόδοση, όχι μόνο όταν τροφοδοτείται το πλήρες φορτίο (100%), αλλά και όταν αυτό είναι μειωμένο. Συγκεκριμένα, βασικό απαιτούμενο χαρακτηριστικό ενός inverter είναι η υψηλή απόδοση (>90%) ακόμα και όταν το φορτίο είναι μόνο 10% του πλήρους. Σημειώνεται, επίσης, ότι η λειτουργία τους συνοδεύεται, κατά περίπτωση από παραγωγή μεγάλου πλήθους αρμονικών υψηλών συχνοτήτων (κυρίως με τον απλό τετραγωνικό παλμό), που περιορίζονται με ειδικά ηλεκτρονικά φίλτρα.



Σχήμα 5.7. Μεταβολή της απόδοσης του inverter σε συνάρτηση με το ποσοστό του πλήρους φορτίου που τροφοδοτεί. [8]

Επιβάλλοντας περισσότερα κλεισίματα των διακοπών 1,4 και 2,3 και μάλιστα μεταβαλλόμενης διάρκειας, ανάλογα με τις τιμές ενός ημιτόνου, παράγεται ηλεκτρικό σήμα που πλησιάζει πολύ την ημιτονική μορφή. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται "inverters διαμόρφωσης του εύρους των παλμών της κυματομορφής εξόδου" (Σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.8. Η κυματομορφή εξόδου ενός inverter διαμόρφωσης εύρους παλμών. [8]

5.4 Σχεδίαση ενός DC-AC Μετατροπέα

5.4.1 Πλευρά Εισόδου του Μετατροπέα (Input side)

Επί της ουσίας πρόκειται για την πλευρά του μετατροπέα που συνδέεται με την έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, η οποία παρέχει ισχύ υπό συνεχή dc τάση και ρεύμα. Τα μεγέθη που παραθέτουμε σε αυτήν την παράγραφο αναφέρονται στην dc πλευρά της συσκευής, δηλαδή σε συνεχές ρεύμα και τάση.

Κατάσταση λειτουργίας

Ο μετατροπέας έχει ενσωματωμένες στην είσοδο του ηλεκτρονικές διατάξεις που επεξεργάζονται κατάλληλα το ρεύμα και την τάση εξόδου της φ/β συστοιχίας, ώστε για κάθε χρονική στιγμή να απορροφάμε τη μέγιστη ισχύ από τη συστοιχία. Η παραγωγή και άρα απορρόφηση μέγιστης ισχύος όπως είδαμε αντιστοιχεί στο MPP σημείο λειτουργίας. Με τη χρήση τέτοιων διατάξεων το σημείο λειτουργίας διατηρείται σταθερά στο MPP, προφανώς για τις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η κατάσταση λοιπόν λειτουργίας του μετατροπέα λαμβάνεται να αντιστοιχεί πάντα στο MPP.

Ελάχιστη και μέγιστη MPP τάση

Οι δύο αυτές χαρακτηριστικές τιμές της τάσης ορίζουν ένα «παράθυρο τάσης», άνω και κάτω όριο τάσης, μέσα στο οποίο ο inverter δύναται να αναζητήσει το MPP. Όταν καθορίζουμε την τάση MPP εξόδου της συστοιχίας αυτή θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στο «παράθυρο τάσης» του μετατροπέα.

Το MPP όπως είδαμε καθορίζεται από το ρεύμα IMPP και την τάση VMPP. Τα μεγέθη αυτά παρέχονται από τους κατασκευαστές των πλαισίων αλλά αναφέρονται στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC), όπου η θερμοκρασία λειτουργίας των κυττάρων λαμβάνεται 25 C.

Στις πραγματικές συνθήκες, η θερμοκρασία λειτουργίας είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερη και το MPP μετατοπίζεται. Έτσι μια καλή προσέγγιση για τον υπολογισμό του MPP της γεννήτριας, ώστε να εξεταστεί αν αυτό βρίσκεται μέσα στο παράθυρο τάσης είναι η θερμοκρασία να λαμβάνεται η θερμοκρασία λειτουργίας για 50 C με 60 C.

Μέγιστη τάση

Είναι η απόλυτη μέγιστη dc τάση κάτω από οποιασδήποτε συνθήκες που μπορεί να δεχθεί στην είσοδό του ο μετατροπέας. Η μέγιστη τάση εξόδου της συστοιχίας δεν πρέπει να υπερβαίνει αυτή την τιμή. Πρέπει λοιπόν να εξετάζουμε αν η V_{oc} της συστοιχίας είναι μικρότερη από το συγκεκριμένο όριο τάσης. Για να είμαστε στην ασφαλή πλευρά, ή ακτινοβολία λαμβάνεται στους 1000, ενώ για τη θερμοκρασία μια καλή προσέγγιση είναι -10 C για την Ευρώπη. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η V_{oc} ελαττώνεται.

Κατώφλι ισχύος (Power threshold)

Είναι η ελάχιστη ισχύς εισόδου που χρειάζεται ο inverter για να λειτουργήσει. Μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ισχύς που καταναλώνει ο ίδιος ο inverter για τη λειτουργία του.

Μέγιστο φωτοβολταϊκό ρεύμα (I_{pvmax})

Είναι το απόλυτο μέγιστο αποδεκτό ρεύμα στην είσοδο του inverter. Για τη διαστασιολόγηση του συστήματος συνήθως εξετάζεται η απαίτηση το I_{mpp} της συστοιχίας να είναι μικρότερο από την παραπάνω τιμή.

Λοιπά στοιχεία

Άλλα στοιχεία τα οποία μπορεί κανείς να βρει στους καταλόγους με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κατασκευαστών, αλλά δε χρησιμοποιούνται από το συγκεκριμένο πρόγραμμα για το σχεδιασμό και την εξομοίωση είναι τα εξής:

Η **Ονομαστική Φωτοβολταϊκή Ισχύς** που είναι μια συνήθης καθοριζόμενη παράμετρος για τους inverter. Εννοείται ως η συνιστώμενη ονομαστική ισχύς της φ/β συστοιχίας σε STC συνθήκες.

Η **Μέγιστη Φωτοβολταϊκή Ισχύς** η τιμή της οποίας μπορεί να δίνεται μερικές φορές. Η σημασία της δεν είναι σαφώς ορισμένη. Μπορεί να γίνει αντιληπτή, ως η απόλυτη μέγιστη ισχύς της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε STC συνθήκες αν και ο ακριβής της ορισμός διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή.

5.4.2 Πλευρά Εξόδου του Μετατροπέα

Εννοείται η πλευρά του μετατροπέα που συνδέεται στο δίκτυο ή εν γένει στο φορτίο που τροφοδοτεί. Προφανώς στην πλευρά εξόδου έχουμε εναλλασσόμενη (AC) τάση και ρεύμα. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που εξετάζονται στις επόμενες υποπαραγράφους αναφέρονται στην ac πλευρά του μετατροπέα.

Ονομαστική ισχύς

Η ονομαστική ισχύς είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά μεγέθη για τους μετατροπείς. Εννοείται ως η ισχύς που μπορεί να παρέχει διαρκώς στο δίκτυο. Όταν έχουμε υπέρβαση των ορίων, δηλαδή σε ακραίες περιπτώσεις υπερπαραγωγής ισχύος στο MPP, εφαρμόζεται κάποια μέθοδος περιορισμού, π.χ. μετατόπιση του σημείου λειτουργίας της $I-V$ χαρακτηριστικής. Η ονομαστική ισχύς είναι το μόνο από τα μεγέθη που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για τη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης.

Μέγιστη AC ισχύς

Η σημασία της δεν είναι σαφώς ορισμένη αν και μερικές φορές παρέχεται από τους κατασκευαστές. Μπορεί να εννοηθεί ως η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει ο μετατροπέας στην έξοδο του για ένα χρονικό διάστημα, μετά την υπέρβαση του οποίου επέρχεται η υπερθέρμανση της συσκευής οπότε και πρέπει να σταματήσει η λειτουργία της στο σημείο αυτό. Δεν χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα.

Ονομαστική AC τάση

Είναι η τάση υπό την οποία παρέχει την ονομαστική ισχύ του ο μετατροπέας στην έξοδό του. Εξαρτάται από την τάση του δικτύου για την οποία είναι σχεδιασμένος να συνδέεται ο μετατροπέας. Για μετατροπείς που συνδέονται κατευθείαν στο δίκτυο ΧΤ η ονομαστική πολική τάση εξόδου της συσκευής είναι στα 0.4 kV. Υπάρχουν και μετατροπείς με τάση εξόδου στα 20 kV.

Ονομαστικό AC ρεύμα

Είναι το ρεύμα που δίνει στην έξοδο του ο μετατροπέας για ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή ονομαστική τάση και ονομαστική ισχύ.

Μονοφασική ή τριφασική σύνδεση

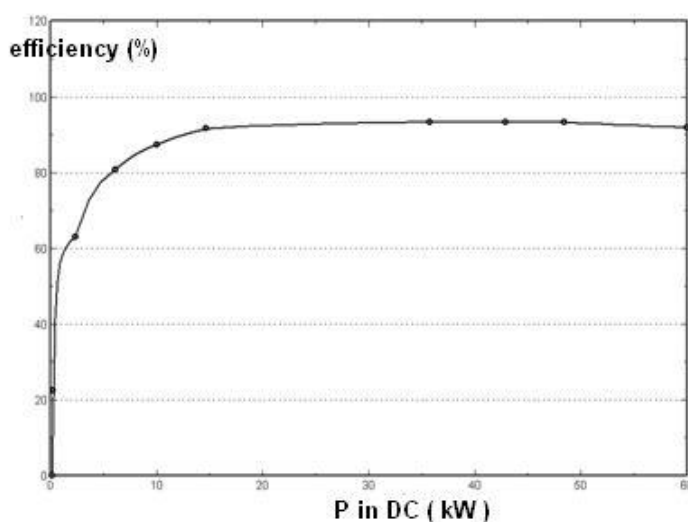
Προφανώς αναφέρεται στον τρόπο σύνδεσης του μετατροπέα στην έξοδο του. Συνήθως έχουμε μονοφασική σύνδεση για μετατροπείς μικρότερους των 3 kW, ενώ τριφασική σύνδεση για μεγαλύτερους μετατροπείς.

Συχνότητα δικτύου

Οι περισσότεροι μετατροπείς μπορούν να συνδεθούν σε δίκτυο με συχνότητα 50 Hz και 60 Hz. Για την Ελλάδα λαμβάνουμε 50 Hz.

Απόδοση

Γενικά οι μετατροπείς χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση (93%-97%), η οποία όμως εξαρτάται από τη στιγμιαία ισχύ. Υπάρχει η απαίτηση ο μετατροπέας να έχει μεγάλη απόδοση και για μικρή ισχύ, συγκεκριμένα 90% για 10% της ονομαστικής ισχύος.



Σχήμα 5.9. Απόδοση μετατροπέα συναρτήσει της ισχύος εισόδου της συσκευής.

Να σημειώσουμε ακόμα ότι οι κατασκευαστές δίνουν την «ευρωπαϊκή απόδοση», που επιχειρεί να περιγράψει την απόδοση της συσκευής για τη μέση παραγωγή ισχύος στις συνθήκες λειτουργίας ενός έτους. [24]

5.5 Ελεγκτής φόρτισης

Η φόρτιση των συσσωρευτών μέσω της φωτοβολταϊκής συστοιχίας απαιτεί συνεχή έλεγχο της κατάστασης φόρτισης τους, ώστε όταν αυτοί φτάσουν στην κατάσταση μέγιστης φόρτισης να διακόπτεται η διαδικασία. Έτσι αποφεύγεται η υπέρταση του

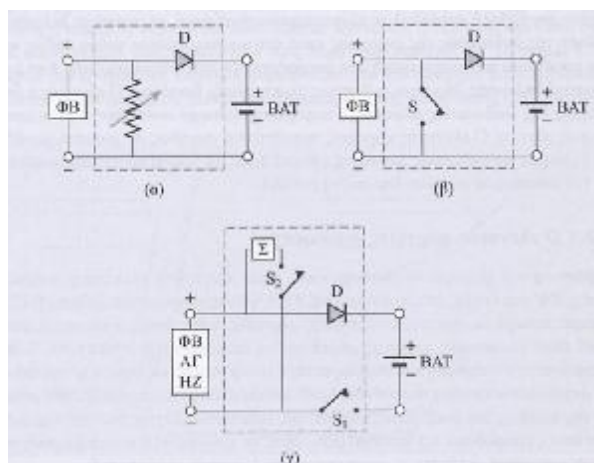
συσσωρευτή, η οποία θα είχε ως συνέπεια την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου λόγω ηλεκτρόλυσης και συνακόλουθα μείωση της στάθμης του διαλύματος. Αντίστοιχα, απαιτείται έλεγχος του συσσωρευτή όσο αυτός τροφοδοτεί την κατανάλωση, ώστε να προληφθεί η καταστροφική κατάσταση υπερεκφόρτισης.

Γενικά ο ελεγκτής φόρτισης-εκφόρτισης, στην πιο περιορισμένη του μορφή, εποπτεύει τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης ώστε να απομονώνει το σύστημα αποθήκευσης, αφενός από το σύστημα παραγωγής της ενέργειας, στην περίπτωση της υπερφόρτισης, και αφετέρου από το σύστημα κατανάλωσης, στην περίπτωση της υπερεκφόρτισης. Και στις δύο περιπτώσεις, η διακοπή αυτή προκαλείται όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή ξεπεράσει, προς τα άνω και αντίστοιχα προς τα κάτω ορισμένα όρια τάσης, όπου ενεργοποιούνται οι ηλεκτρικοί διακόπτες.

Μια μονάδα ελέγχου φόρτισης- εκφόρτισης, περιλαμβάνει σύνολο ολοκληρωμένων συστημάτων είτε μικροελεγκτές, που ελέγχουν ηλεκτρικούς διακόπτες, είτε ηλεκτρομηχανικούς (ρελέ), είτε ηλεκτρονικούς ισχύος. Σε κάθε περίπτωση, στο κύκλωμα παρεμβάλλεται μια δίοδος, για την προστασία του συστήματος αποθήκευσης από εκφόρτιση, μέσω της διάταξης ή του υπόλοιπου συστήματος.

5.5.1 Παράλληλος Ρυθμιστής Φόρτισης (Shunt controller)

Χαρακτηριστικό αυτού του ρυθμιστή είναι το ότι το ελεγχόμενο στοιχείο είναι συνδεδεμένο παράλληλα με το φωτοβολταϊκό σύστημα (shunt controller), με δυνατότητα να λειτουργεί, είτε μεταβαλλόμενο γραμμικά, ανάλογα με τη μέγιστη φόρτιση (Σχήμα 5.10(α)), είτε ως διακόπτης ON/OFF (Σχήμα 5.10(β)). Στην περίπτωση του παράλληλου ρυθμιστή, όταν επιτευχθεί η μέγιστη φόρτιση (όριο τάσης) το ελεγχόμενο σημείο βραχυκυκλώνει το φωτοβολταϊκό σύστημα, χωρίς να προκαλείται καμία βλάβη σε αυτό. Έτσι, απομονώνεται το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα αποθήκευσής της.



Σχήμα 5.10. Τυπικά διαγράμματα παράλληλου ρυθμιστή φόρτισης (α) με γραμμικό και (β) με διακοπτικό στοιχείο. Το διάγραμμα (γ) αφορά ρυθμιστή φόρτισης σε σειρά με στοιχείο απόρριψης ή απόδοσης της περίσσειας ενέργειας. [8]

5.5.2 Ρυθμιστής φόρτισης σε σειρά (Series controller)

Η βασική αρχή λειτουργίας της δεύτερης διάταξης ελέγχου φόρτισης βασίζεται στη χρήση δύο διακοπών S1, S2. Ο πρώτος διακόπτει το ρεύμα από το σύστημα ενέργειας στο σύστημα αποθήκευσης, όταν η τάση φόρτισης φτάσει στο όριό της. Την ίδια στιγμή ενεργοποιείται ο διακόπτης S2, ο οποίος εισάγει στην έξοδο του συστήματος ενέργειας, ένα στοιχείο απόδοσης (Σ) της επί πλέον ενέργειας, την οποία δεν έχει την δυνατότητα να απορροφήσει το σύστημα αποθήκευσης. Το στοιχείο απόδοσης, πρέπει να μπορεί να αποβάλλει εύκολα την αποδιδόμενη σε αυτό ενέργεια, προς το περιβάλλον. Ο ρυθμιστής αυτός ονομάζεται ρυθμιστής με το ελεγχόμενο στοιχείο (S1) σε σειρά (Series controller) και μπορεί να ελέγξει τη φόρτιση συσσωρευτών από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Υπάρχουν διάφορες εκδόσεις του ρυθμιστή, με διαφορές που εντοπίζονται στον τρόπο που προσεγγίζεται η τελική κατάσταση φόρτισης, από καθεμιά από αυτές.

Η διάταξη φόρτισης συμπληρώνεται από παρόμοια διάταξη ελέγχου εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, με σκοπό την προστασία του συσσωρευτή από υπερεκφόρτιση (overdischarging) και η οποία συνήθως ενσωματώνεται στην πρώτη. Διακόπτει το κύκλωμα παροχής ενέργειας από το συσσωρευτή στην κατανάλωση, όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή μειούμενη φτάσει ορισμένη τιμή (disconnect setpoint).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος (H/Z)

6.1 Η γεννήτρια DIESEL

6.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Πρόδρομος του βενζινοκινητήρα θεωρείται η ατμομηχανή, που πρωτοεμφανίστηκε τον 18ο αιώνα. Η μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), που ακολούθησε τον 19ο αιώνα ως βελτίωση για πολλές εφαρμογές δεν μπορεί να αποδοθεί μόνο σε έναν εφευρέτη διότι γίνονταν πολλές παράλληλες προσπάθειες κατασκευής μιας ΜΕΚ. Η κεντρική ιδέα του κινητήρα εσωτερικής καύσης ήταν να πυροδοτηθεί ένα μίγμα εύφλεκτων αερίων ή υγρών, το οποίο θα εκρήγνυται μέσα σε ένα κύλινδρο και θα κινούσε ένα έμβολο. Το 1820 στην Αγγλία ένας κινητήρας λειτουργούσε με βάση την έκρηξη μίγματος αέρα-υδρογόνου.

Έτσι το 1816 παρουσιάστηκε ως ευρεσιτεχνία ο παλαιότερος κινητήρας εσωτερικής καύσης, γνωστός ως κινητήρας Stirling που λειτουργεί με υπέρθερμο αέρα και μπορεί να αξιοποιήσει οποιοδήποτε καύσιμο μέχρι και την ηλιακή ενέργεια. Υστερεί βέβαια έναντι των άλλων για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους. Το 1824, ο Γάλλος φυσικός Santi Carnot δημοσίευσε το κλασικό πλέον σύγγραμμα "Σκέψεις πάνω στην Ωστική δύναμη της θερμότητας" στο οποίο περιέγραψε τις βασικές αρχές της θεωρίας εσωτερικής καύσης.

Το έτος 1860 ο Γάλλος εφευρέτης Jean-Joseph-Etienne-Lenoir (1822-1900) κατασκεύασε τον πρώτο πρακτικά χρησιμοποιούμενο κινητήρα από τον οποίο προέρχονται όλοι οι άλλοι κινητήρες εσωτερικής καύσης. Τη χρονιά εκείνη παρουσιάστηκε ένα μικρό όχημα το οποίο εκκινείτο με τη μηχανή του. Το καύσιμο που χρησιμοποιούσε ήταν το φωταέριο το οποίο εισάγεται στον κύλινδρο αναμειγμένο με αέρα στο πρώτο στάδιο λειτουργίας, κατά το πρώτο μισό της

διαδρομής του εμβόλου. Το μίγμα αυτό πυροδοτείται με ηλεκτρικό σπινθήρα και ωθεί το έμβολο στο υπόλοιπο κομμάτι της διαδρομής του. Κατά την επιστροφή του εμβόλου, στη μία πλευρά του απωθούνται τα καυσαέρια, ενώ στην άλλη επαναλαμβάνεται η διαδικασία εισαγωγής του μίγματος φωταερίου-αέρα. Όμως ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα του Lenoir ήταν πολύ χαμηλός, αφού το προς καύση μείγμα συμπιεζόταν ελάχιστα πριν την ανάφλεξη πράγμα που δυσκόλεψε την οικονομική του αξιοποίηση.

Μια σημαντική εξέλιξη πραγματοποιήθηκε στο Παρίσι το 1862, όταν δημοσιεύτηκε η περιγραφή του ιδανικού κύκλου λειτουργίας μιας μηχανής εσωτερικής καύσης από τον Alphonse Eugene Beau de Rochas(1815-1893), ο οποίος ήταν και ο πρώτος που διατύπωσε τις συνθήκες για την άριστη απόδοση. Ο κινητήρας προέβλεπε τετράχρονο κύκλο, σε αντίθεση με το δίχρονο κύκλο (είσοδος- ανάφλεξη και ισχύς- έξοδος) του Lenoir. Όμως στα επόμενα 14 χρόνια ο τετράχρονος κινητήρας έμεινε στα χαρτιά.

Το 1876 από τη μηχανή του ξεκίνησε ο Γερμανός Nikolaus August Otto (1832-1891) και κατασκεύασε ένα τετράχρονο βενζινοκινητήρα, αφού προηγουμένως είχε κατασκευάσει έναν ατμοσφαιρικό δίχρονο κινητήρα με ελεύθερο έμβολο. Το 1867 ο δίχρονος αυτός κινητήρας παρουσιάστηκε στην έκθεση του Παρισιού και πήρε το χρυσό βραβείο γιατί είχε κατά 60% μειωμένη κατανάλωση καυσίμου. Το 1892 από τον Γερμανό μηχανικό Rudolf Christian Karl Diesel (1858-1913) ανακοινώθηκε ως ευρεσιτεχνία ο ομώνυμος κινητήρας και μελετήθηκε από το 1893 μέχρι το 1897.

Στον κινητήρα ντίζελ διαχέεται το καύσιμο με ισχυρό περίσσειμα αέρα, το οποίο συμπυκνώνεται σε μία σχέση 25:1 και αυτοαναφλέγεται σε θερμοκρασία 700 - 900 C.

Από περιβαντολογικής άποψης τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν υψηλές εκπομπές ρύπων, ιδιαίτερα σε οξειδία του αζώτου. Οι εκπομπές αυτές μπορούν να περιοριστούν με την εφαρμογή καταλυτικών μετατροπών ή με την τροποποίηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της ΜΕΚ. Και οι δύο όμως αυτές τεχνικές έχουν σαν αποτέλεσμα την ελάττωση του συντελεστή απόδοσης. Η χρήση παγίδων αιθάλης είναι επίσης υποχρεωτική σε κινητήρες ντίζελ ή άλλων βαρέων κλασμάτων πετρελαίου. Στα μειονεκτήματα των συστημάτων αυτών πρέπει να συμπεριληφθεί

επίσης το υψηλό κόστος συντήρησης και τα υψηλά επίπεδα θορύβου, ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες.

Μια παγκόσμια έρευνα της IEA για παραγγελίες σε συστήματα ηλεκτροπαραγωγής στο διάστημα από 6/2000 μέχρι 5/2001 έδειξε ότι έγιναν παραγγελίες συστημάτων ΜΕΚ 1 MW-30 MW για συνολική ισχύ 16,2 MW. Το 80% των παραγγελιών αυτών προέρχεται από χώρες του ΟΟΣΑ, ενώ πάνω από τα μισά συστήματα προορίζονται για εφαρμογές εφεδρικής ισχύος.

6.1.2 Υπάρχουσες Τεχνολογίες

Οι συμβατικοί θερμικοί σταθμοί χρησιμοποιούν καύσιμα όπως οι λιθάνθρακες, ο λιγνίτης, η τύρφη, το πετρέλαιο (ντίζελ και μαζούτ) και το φυσικό αέριο. Οι θερμικοί σταθμοί κατατάσσονται ανάλογα με το μέσο και τις μηχανές που χρησιμοποιούν για το θερμοδυναμικό τους κύκλο. Στην προκειμένη περίπτωση οι ντιζελοηλεκτρικοί κάνουν χρήση εμβολοφόρων μηχανών. Οι εμβολοφόρες ΜΕΚ, γνωστές και σαν ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, αποτελούν την πιο διαδεδομένη τεχνολογία διανεμημένης παραγωγής. Πρόκειται για μια παραδοσιακή και δοκιμασμένη τεχνολογία που συνδυάζει χαμηλό κόστος προμήθειας ανά εγκατεστημένο kW, μεγάλη διαθεσιμότητα σε μεγέθη, δυνατότητα γρήγορης εκκίνησης, υψηλούς συντελεστές απόδοσης και υψηλή λειτουργική αξιοπιστία. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με την ικανότητα των συστημάτων αυτών να εκκινούν χωρίς ηλεκτρική τροφοδότηση από το δίκτυο, το καθιστούν πρωταρχική επιλογή σε εφαρμογές εφεδρικής ισχύος (emergency stand-by-power). Επιπλέον αποτελούν σήμερα την πιο διαδεδομένη μορφή συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής για ισχείς μικρότερες από 1 MW. Οι κινητήριες μηχανές λειτουργούν με αέρια ή υγρά καύσιμα. Οι μηχανές υγρών καυσίμων χρησιμοποιούν συνήθως πετρέλαιο αν και υπάρχουν συστήματα βενζίνης ή βαρέων κλασμάτων πετρελαίου (τα βαρύτερα χρησιμοποιούνται για τους μεγαλύτερους κινητήρες) και βιοκαυσίμων.

Η ταξινόμηση των μηχανών ντίζελ μπορεί να γίνει ανάλογα με το μέγιστο αριθμό στροφών που αναπτύσσονται ανά λεπτό, διακρίνονται σε αργόστροφες, μέχρι 350 σ.α.λ, σε μεσαίων στροφών, μέχρι 1200 σ.α.λ και σε πολύστροφες που φτάνουν τις 5000 σ.α.λ. Ανάλογα με την ισχύ που αποδίδουν στις κανονικές στροφές λειτουργίας

τους τις διακρίνουμε σε μηχανές μικρής ισχύος (μέχρι 25 ίππους ανά κύλινδρο), σε μηχανές μέσης ισχύος (από 25-200 ίππους ανά κύλινδρο) και σε μηχανές υψηλής ισχύος 9 πάνω από 200 ίππους ανά κύλινδρο. Επιπλέον ανάλογα με τον αριθμό των κυλίνδρων διακρίνονται σε μηχανές μονοκύλινδρες μέχρι και 24κύλινδρες. Ακόμη ανάλογα με τον αριθμό των χρόνων του κύκλου λειτουργίας τους χωρίζονται σε τετράχρονες και δίχρονες.

6.1.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Στις μηχανές ντίζελ η σχέση συμπίεσης είναι συνήθως 17:1 μέχρι 24:1. Λόγω της υψηλής συμπίεσης η πίεση στο χώρο καύσης των κυλίνδρων της μηχανής ντίζελ φτάνει τις 30-50 ατμόσφαιρες, ενώ η θερμοκρασία στους 700-900 C. Από την υψηλή πίεση του αέρα στους κυλίνδρους αυξάνεται η ισχύς του κινητήρα ντίζελ, ενώ από την υψηλή θερμοκρασία αναφλέγεται το μίγμα αέρα-καυσίμου. Επιπρόσθετα σε μία ντιζελομηχανή η αναλογία βάρους ανά ίππο είναι περίπου 2,8-3 κιλά/ίππο, η οποία είναι αρκετά υψηλή, συγκρινόμενη με μία βενζινομηχανή η οποία έχει αναλογία περίπου 1,3 κιλά/ίππο και οφείλεται στην αναγκαία αύξηση του κυβισμού της μηχανής ντίζελ και στη μεγαλύτερη αντοχή των μερών της στις υψηλές πιέσεις των κυλίνδρων της. Η μηχανή ντίζελ επιπλέον έχει αριθμό στροφών περίπου ίσο με τα 5/8 μιας βενζινομηχανής πράγμα που οφείλεται στη μικρή μέση ταχύτητα των εμβόλων της. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στη μηχανή ντίζελ το καύσιμο αυτοαναφλέγεται κατά το ψεκασμό του στους κυλίνδρους από την υψηλή θερμοκρασία του πεπιεσμένου αέρα χωρίς τη βοήθεια του σπινθήρα.

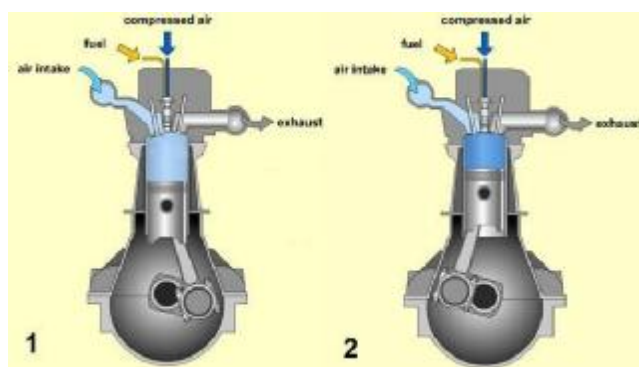
Η μηχανή ντίζελ ακολουθεί κατά τη λειτουργία της το θερμικό κύκλο του ντίζελ ο οποίος χρειάζεται τέσσερις ή δύο χρόνους για την ολοκλήρωση του και την επιτυχία μιας εκτόνωσης. Έχουμε λοιπόν τις φάσεις της: Εισαγωγής- Συμπίεσης- Εκτόνωσης- Εξαγωγής. Παρακάτω αναλύεται ο κύκλος λειτουργίας του τετράχρονου κινητήρα ντίζελ:

1η φάση-εισαγωγής

Το έμβολο ακολουθεί καθοδική πορεία δημιουργώντας υποπίεση. Όση ώρα η βαλβίδα εισαγωγής παραμένει ανοικτή ο θάλαμος καύσης γεμίζει με ατμοσφαιρικό αέρα που μπορεί να περιέχει και καυσαέρια αν υπάρχει σύστημα επανακυκλοφορίας.

2η φάση-συμπίεσης

Τη στιγμή που όλες οι βαλβίδες κλείνουν, το πιστόνι κινείται προς τα πάνω μέχρι να φτάσει στο άνω νεκρό σημείο. Η αυξημένη συμπίεση (25-55bar) προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα (600-900 C) η οποία είναι σχεδόν η διπλάσια από τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου.



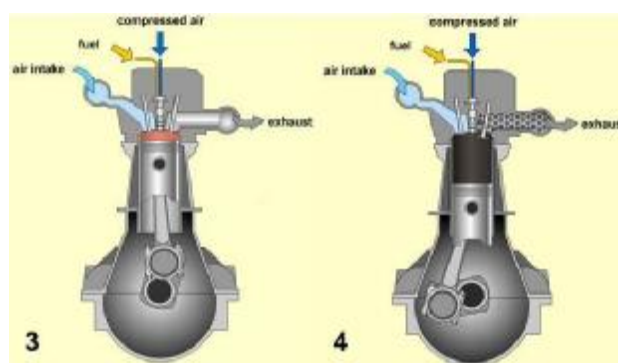
Σχήμα 6.1. Φάσεις εισαγωγής και συμπίεσης. [29]

3η φάση-ανάφλεξη & εκτόνωση

Προς το τέλος του χρόνου συμπίεσης πραγματοποιούνται οι ψεκασμοί του καυσίμου στη μορφή ατμών οι οποίοι αναμειγνύονται με το θερμό αέρα. Τότε αυτοαναφλέγονται σε πύρινο περιβάλλον που φτάνει τους 2.500 C και σε πίεση μπορεί να αγγίξει και τα 100 bar. Από τη στιγμή που θα ψεκαστεί το καύσιμο, μέχρι την ανάφλεξη του, υπάρχει καθυστέρηση της αυτανάφλεξης που διαρκεί 0,5-2 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Για αυτό στα πρόσφατα συστήματα πραγματοποιείται από πριν ένας μικροψεκασμός που μειώνει και το χαρακτηριστικό κροτάλισμα των κινητήρων diesel.

4η φάση-εξαγωγή

Όταν η φάση εκτόνωσης πλησιάζει στην ολοκλήρωση της και αφού το πιστόνι έχει αρχίσει να ξανανεβαίνει ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής ώστε να βγουν τα καυσαέρια. Η πίεση μειώνεται απότομα στα 3-4 bar και προοδευτικά αγγίζει την ατμοσφαιρική και η βαλβίδα εξαγωγής κλείνει με ένα μικρό βαθμό επικάλυψης με τις εισαγωγής (συνήθως 20 μοίρες).



Σχήμα 6.2. Φάσεις ανάφλεξης- εκτόνωσης και εξαγωγής. [29]

6.2 Φωτοβολταϊκό Υβριδικό Σύστημα με Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος

6.2.1 Εισαγωγή

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στο κόστος μιας αυτόνομης ντιζελογεννήτριας είναι το γεγονός ότι η τιμή του αργού πετρελαίου αυξάνεται και σαν συνέπεια αυτού και η τιμή σε εθνικό επίπεδο του πετρελαίου έχει αυξηθεί κατά 400% τα τελευταία 10 έτη.

Επιπλέον η χρήση μιας ντιζελογεννήτριας για την παραγωγή ενέργειας όλο το 24ωρο σημαίνει ότι αυτή θα πρέπει να αντικαθίσταται κάθε έτος ή να απαιτεί γενική επισκευή. Επιπλέον τα τρέχοντα έξοδα της επένδυσης αυτής αυξάνουν το συνολικό κόστος λειτουργίας της. Ακόμη σημαντική οικονομική επιβάρυνση αποτελούν και τα λειτουργικά έξοδα της ντιζελογεννήτριας τα οποία και είναι η μηνιαία συντήρηση, τα ανταλλακτικά, το κόστος καυσίμων αλλά και η μεταφορά τους και τέλος ο καθαρισμός και το λάδι της μηχανής.

Μια γεννήτρια ντίζελ, αν και έχει μικρό κόστος αγοράς, έχει γενικά υψηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης, ενώ είναι επιβαρυντική για το περιβάλλον λόγω των αερίων που παράγονται από την καύση του πετρελαίου. Χαρακτηριστικό είναι ότι σε χαμηλό, σχεδόν μηδενικό φορτίο, η ντιζελογεννήτρια χρησιμοποιεί το 30% του καυσίμου που θα χρησιμοποιούσε σε πλήρες φορτίο. Αυτά τα προβλήματα εξαλείφονται με τη συνεργασία φωτοβολταϊκών στοιχείων με ντιζελογεννήτρια και

μπαταρίες έτσι ώστε να ομαλοποιείται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και να μειώνεται το κόστος της.

Η βέλτιστη επιλογή της ισχύος των φωτοβολταϊκών λαμβάνει πρωτίστως υπόψη την αξιολόγηση του ποσού της προσπίπτουσας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, με μονάδα μέτρησης τα W/m^2 . Συνήθως ενδιαφέρει η ολική ηλιακή ακτινοβολία στη διάρκεια μιας ώρας, η οποία οδηγεί στην εκτίμηση της ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ επίσης σημαντικές πληροφορίες είναι η ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία και η μηναία ολική ακτινοβολία.

Στη συνέχεια πρέπει να επιλεχτεί ο τύπος και η ισχύς της ντιζελογεννήτριας που θα ενσωματωθεί στον υβριδικό σταθμό. Μια γεννήτρια βενζίνης είναι πιο οικονομική από μία ντιζελογεννήτρια, αλλά έχει μικρότερη διάρκεια ζωής και μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας. Συνήθως γεννήτριες βενζίνης χρησιμοποιούνται όταν το σύστημα έχει διαστασιολογηθεί έτσι ώστε οι ΑΠΕ να καλύπτουν εξολοκλήρου το φορτίο και το χρόνο που δε μπορούν να ανταποκριθούν. Οι γεννήτριες βενζίνης τροφοδοτούν με ισχύ και αποθηκεύουν ενέργεια στα μέσα αποθήκευσης, τα οποία είναι κατά κύριο λόγο μπαταρίες. Αν υπάρχουν όμως μεγάλες διακυμάνσεις στην καμπύλη του φορτίου τότε καταλληλότερη είναι η ντιζελογεννήτρια, έτσι ώστε να καλύπτει με μικρό κόστος τις αιχμές του ημερήσιου φορτίου ή γενικά όταν η διαστασιολόγηση είναι τέτοια ώστε οι ΑΠΕ να καλύπτουν μερικώς το φορτίο.

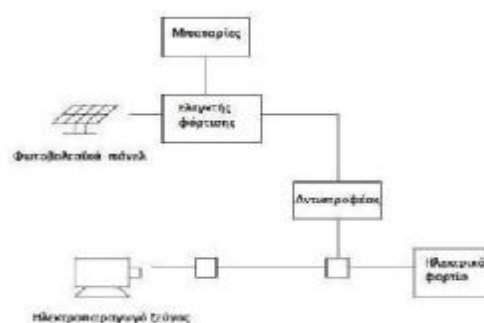
Εφόσον επιλεγεί το είδος της γεννήτριας που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να γίνει η διαστασιολόγησή του, η οποία εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Ο κυριότερος από αυτούς είναι η αιχμή του φορτίου. Δηλαδή θα πρέπει η γεννήτρια να έχει την ικανότητα να καλύπτει την αιχμή του φορτίου. Επομένως παράγοντας είναι το είδος του φορτίου που πρέπει να καλυφθεί. Έτσι, αν το φορτίο είναι για παράδειγμα ωμικό τότε δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις από τη γεννήτρια για σταθερή συχνότητα του δικτύου, του οποίου αποτελεί πηγή.

Στην περίπτωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική σχεδιασμού του υβριδικού συστήματος όπου ο αντιστροφέας συνήθως δε λειτουργεί ταυτόχρονα με τη ντιζελογεννήτρια και η διαστασιολόγηση του ανορθωτή συνήθως καθορίζεται από τη χωρητικότητα των μπαταριών. Μια άλλη λύση είναι οι δύο μετατροπείς ισχύος να αποτελούν ένα μετατροπέα διπλής κατεύθυνσης που χρησιμοποιούνται ευρέως σε ένα

τέτοιο σύστημα. Για λόγους οικονομίας και εάν η χωρητικότητα των μπαταριών είναι τέτοια που είναι αδύνατο να καλυφθεί το φορτίο αιχμής μέσω του αντιστροφέα, τότε ο αντιστροφέας μπορεί να είναι χαμηλότερης ισχύος και το φορτίο αιχμής να καλύπτεται απευθείας από τη ντιζελογεννήτρια. Στην περίπτωση που οι απαιτήσεις του φορτίου είναι τέτοιες που να απαιτείται όσο το δυνατόν σταθερή συχνότητα, τότε θα πρέπει η συχνότητα του φορτίου να καθορίζεται από την έξοδο του αντιστροφέα. Η τελευταία περίπτωση είναι και η πιο δαπανηρή.

6.2.2 Περιγραφή του Υπό Μελέτη Συστήματος

Η λειτουργία του υβριδικού συστήματος στην κανονική του λειτουργία είναι η εξής: Τα φωτοβολταϊκά παρέχουν την απαιτούμενη ισχύ στο φορτίο μέσω του μετατροπέα ισχύος. Η πρόσθετη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά φορτίζει τις μπαταρίες μέσω του ρυθμιστή φόρτισης μέχρι οι μπαταρίες φτάσουν στο μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο φόρτισης τους. Ο κύριος σκοπός της χρήσης μπαταριών σαν αποθηκευτικό μέσο ενέργειας είναι να παρέχει ή να αποθηκεύει ενέργεια ανάλογα με τη ζήτηση. Η ντιζελογεννήτρια μπαίνει σε λειτουργία εάν τη ζήτηση του φορτίου δε μπορούν να την καλύψουν τα φωτοβολταϊκά, αλλά ούτε και οι μπαταρίες.



Σχήμα 6.3. Τοπολογία υβριδικού συστήματος Φωτοβολταϊκών- Ντιζελογεννήτριας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Μελέτη Αυτόνομου Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος για την Τροφοδότηση Οικίας 150 τ.μ.

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί μελετάται το πρόβλημα ηλεκτρικής τροφοδότησης μιας οικίας, η οποία είναι απομακρυσμένη από το δίκτυο της ΔΕΗ. Η συγκεκριμένη κατοικία έχει εμβαδόν 150 τ.μ., στεγάζει μια μέση ελληνική οικογένεια και βρίσκεται στο νομό Αχαΐας και συγκεκριμένα στην πόλη της Πάτρας.

Η οικογένεια αποφάσισε να εγκαταστήσει φωτοβολταϊκά για την τροφοδότηση της κατοικίας με ηλεκτρικό ρεύμα. Δεδομένης της κατάστασης, όλα τα μέλη της οικογένειας συμφώνησαν να περιορίσουν στο μέγιστο δυνατό βαθμό τις ανάγκες τους σε ηλεκτρικό ρεύμα, τουλάχιστον κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών όπου η ηλιοφάνεια στην περιοχή είναι περιορισμένη έως και ανύπαρκτη.

Μαζί με τα φωτοβολταϊκά και τους συσσωρευτές που θα τροφοδοτήσουν την οικία θα χρησιμοποιηθεί και ως εφεδρική πηγή ενέργειας μία ντιζελογεννήτρια. Η ντιζελογεννήτρια θα χρησιμοποιείται προκειμένου να καλυφθούν φορτία αιχμής όταν τα φωτοβολταϊκά και οι συσσωρευτές δεν επαρκούν και σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Η ντιζελογεννήτρια θα αναλάβει επίσης τη φόρτιση των συσσωρευτών όταν αυτό δε θα γίνεται από τα φωτοβολταϊκά.

Το πρόβλημα λοιπόν που πρόκειται να μελετήσουμε είναι η τροφοδότηση οικίας 150 τ.μ. με υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα και ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, Η/Ζ (ντιζελογεννήτρια).

7.2 Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας Κατοικίας

Ο υπολογισμός της ηλεκτρικής ενέργειας κατανάλωσης κατοικίας γίνεται με τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1: Καταγραφή όλων των ηλεκτρικών συσκευών, της ισχύς τους και του πιθανού χρόνου λειτουργίας τους σε ένα εικοσιτετράωρο.

Βήμα 2: Υπολογισμός ημερήσιας ενέργειας κατανάλωσης. Πολλαπλασιάζοντας την ηλεκτρική ισχύ επί το χρόνο λειτουργίας κάθε συσκευής, έχουμε την ηλεκτρική της κατανάλωση ($E P T$). Από το

άθροισμα των καταναλώσεων προκύπτει η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης της εγκατάστασης E .

Βήμα 3: Εκτίμηση της μέγιστης ισχύς στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή καταγράφεται η πιθανότητα της ταυτόχρονης λειτουργίας περισσότερων συσκευών και υπολογίζεται η μέγιστη απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς.

Το αυτόνομο υβριδικό σύστημα που θα χρησιμοποιήσουμε όπως είδαμε έχει σαν στόχο την κάλυψη των αναγκών μίας κατοικίας 150 τ.μ. Επειδή είναι λογικό οι απαιτήσεις να είναι πολύ υψηλές σε ένα τόσο μεγάλο οίκημα, θα ακολουθήσουμε κάποιους βασικούς κανόνες, ώστε να είναι το σύστημα οικονομικότερο:

1. Είναι αντιοικονομικό να επιδιώκεται η χρήση υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος για τροφοδότηση ηλεκτρικών συσκευών με μεγάλη θερμική κατανάλωση (ηλεκτρικές κουζίνες, ηλεκτρικά καλοριφέρ, ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες). Οι ανάγκες αυτές πρέπει να καλύπτονται από εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως υγραέριο, πετρέλαιο, ήλιος κλπ. Στο συγκεκριμένο οίκημα χρησιμοποιήσαμε καυστήρα πετρελαίου για θέρμανση, ηλιακό θερμοσίφωνα και boiler για τη θέρμανση νερού το χειμώνα και φούρνο υγραερίου.
2. Χρησιμοποιήσαμε ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/Z) για την αντιμετώπιση αιχμών ζήτησης από το να επιδιώκεται η πλήρης ικανοποίηση των καταναλώσεων με αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές, οι

οποίοι χαρακτηρίζονται από μεγάλο βάρος και κόστος. Με το H/Z χρησιμοποιούμε συσσωρευτές μικρότερης χωρητικότητας και φωτοβολταϊκή συστοιχία με μικρότερη ισχύ.

3. Χρησιμοποιούμε συσκευές υψηλής ενεργειακής απόδοσης, δηλαδή χαμηλότερης ενεργειακής κατανάλωσης (για παράδειγμα χρησιμοποιήσαμε ανεμιστήρες οροφής αντί για κλιματιστικά (A/C).

Για να επιλέξουμε τους χαρακτηριστικούς μήνες του χρόνου που μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε ώστε το σύστημά μας να είναι επαρκές, χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα PV GIS [re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/]. Μετά από διαδοχικές δοκιμές στο πρόγραμμα (βλέπε παράρτημα), καταλήξαμε στην επιλογή της κλίσης των 50 για τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, διότι τους χειμερινούς μήνες (κατά τους οποίους έχουμε την ελάχιστη παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια), η κλίση αυτή δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Επιλέξαμε Νότιο προσανατολισμό (αζιμούθια γωνία 0), επειδή η Ελλάδα βρίσκεται στο βόρειο ημισφαίριο.

Στον Πίνακα 7.1 φαίνεται η ηλιακή ακτινοβολία σε αυτές τις συνθήκες ($\text{Wh}/\text{m}^2/\text{day}$) και η μέση θερμοκρασία της περιοχής καθ' όλο το εικοσιτετράωρο (C).

ΜΗΝΑΣ	ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (Wh /m²/day)	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	2410	8.8
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	2900	9.4
ΜΑΡΤΙΟΣ	3890	11.2
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	4820	14.3
ΜΑΙΟΣ	5150	19.3
ΙΟΥΝΙΟΣ	5450	23.4
ΙΟΥΛΙΟΣ	5480	25.3
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	5520	25.5
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	5080	22.1
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	3910	18.2
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	2630	13.8
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	2020	10.3
ΣΥΝΟΛΟ	4110	16.8

Πίνακας 7.1. Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για κλίση 50° (Wh /m²/day) ανά μήνα και μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα (°C) για την περιοχή της Πάτρας, όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα PVGIS. [52]

Από τον Πίνακα 7.1 βλέπουμε ότι ο μήνας με τη χαμηλότερη ηλιακή ακτινοβολία (σε πλαίσια κλίσης 50) είναι ο Δεκέμβριος, ενώ αυτός με την υψηλότερη είναι ο Αύγουστος. Άρα, αρκεί να μελετήσουμε αυτούς τους δύο μήνες για την εγκατάσταση και ειδικά το Δεκέμβριο (για να είναι το σύστημά μας ασφαλές).

Στους παρακάτω Πίνακες γίνεται μια καταγραφή των ηλεκτρικών συσκευών, της ισχύς τους και του πιθανού χρόνου λειτουργίας τους κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου, για τους μήνες Δεκέμβριο και Αύγουστο. Τέλος υπολογίζεται η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των συσκευών που λειτουργούν, η εκτιμώμενη ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση κάθε συσκευής καθώς και της όλης οικίας.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ	ΙΣΧΥΣ (kW)	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (kWh)
Καυστήρας Πετρελαίου	0,3	9	2,7
Κυκλοφορητής Καυστήρα	0,4	8,5	3,4
Πλυντήριο Πιάτων	1,3	1	1,3
Πλυντήριο Ρούχων	1,5	1	1,5
Απορροφητήρας Κουζίνας	0,25	0,5	0,125
6 χ Ανεμιστήρας Οροφής	0	0	0
DVD player	0,03	2	0,06
Ραδιόφωνο	0,08	1	0,08
Σίδερο Σιδερώματος	1	0,5	0,5
Ηλεκτρική Σκούπα	1	1	1
Στεγνωτήρας Μαλλιών	1	0,1	0,1
Στερεοφωνικό Συγκρότημα	0,15	1,5	0,225
2 χ Τηλεόραση	0,21	4	1,68
Υπολογιστής	0,1	3	0,3
Εκτυπωτής	0,1	0,15	0,015
Φούρνος Μικροκυμάτων	1,5	0,15	0,225
Τοστιέρα	1	0,3	0,3
Αναμικτήρας Τροφών	0,2	0,15	0,03
Ψυγείο με Αυτόματη Απόψυξη	0,25	24	6
Σκούπα	1	1	1
Καφετιέρα	0,8	0,1	0,08
Εσωτερικός Φωτισμός 1	0,3	6	1,8
Εσωτερικός Φωτισμός 2	0,2	3	0,6
Εξωτερικός Φωτισμός	0,3	1	0,3
2 χ Φορτιστής Κινητού	0,075	1	0,15
Σύνολο	13,045		23,470

Πίνακας 7.2. Για το μήνα Δεκέμβριο, χρησιμοποιούμενες ηλεκτρικές συσκευές, ισχύς και χρόνος λειτουργίας τους, ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωσή τους, συνολική εγκατεστημένη ισχύς τους και ολική κατανάλωση οικίας.

Το Δεκέμβριο δε χρησιμοποιούνται οι 6 ανεμιστήρες οροφής, συνολικής ισχύος 0,5 kW. Όμως χρησιμοποιείται καυστήρας πετρελαίου ισχύος 0,3 kW και επιπλέον ο φωτισμός εκτιμάται ότι λειτουργεί για περισσότερες ώρες. Αντίθετα, τον Αύγουστο, χρησιμοποιούνται οι 6 ανεμιστήρες ισχύος 0,5 kW, αλλά δε χρησιμοποιείται ο καυστήρας πετρελαίου, ενώ ο φωτισμός λειτουργεί λιγότερες ώρες.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ	ΙΣΧΥΣ (kW)	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (kWh)
Καυστήρας Πετρελαίου	0	0	0
Κυκλοφορητής Καυστήρα	0	0	0
Πλυντήριο Πιάτων	1,3	1	1,3
Πλυντήριο Ρούχων	1,5	1	1,5
Απορροφητήρας Κουζίνας	0,25	0,5	0,125
6 χ Ανεμιστήρας Οροφής	0,5	14	7
DVD player	0,03	2	0,06
Ραδιόφωνο	0,08	1	0,08
Σίδερο Σιδερώματος	1	0,5	0,5
Ηλεκτρική Σκούπα	1	1	1
Στεγνωτήρας Μαλλιών	1	0,1	0,1
Στερεοφωνικό Συγκρότημα	0,15	1,5	0,225
2 χ Τηλεόραση	0,21	4	0,84
Υπολογιστής	0,1	3	0,3
Εκτυπωτής	0,1	0,5	0,05
Φούρνος Μικροκυμάτων	1,5	0,08	0,225
Τοστιέρα	1	0,3	0,3
Αναμικτήρας Τροφών	0,2	0,15	0,03
Ψυγείο με Αυτόματη Απόψυξη	0,25	24	6
Σκούπα	1	1	1
Καφετιέρα	0,8	0,07	0,056
Εσωτερικός Φωτισμός 1	0,3	3	0,9
Εσωτερικός Φωτισμός 2	0,2	1,5	0,3
Εξωτερικός Φωτισμός	0,3	2	0,6
2 χ Φορτιστής Κινητού	0,075	1	0,075
Σύνολο	12,845		22,461

Πίνακας 7.3. Για το μήνα Αύγουστο, χρησιμοποιούμενες ηλεκτρικές συσκευές, ισχύς και χρόνος λειτουργίας τους, ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωσή τους, συνολική εγκατεστημένη ισχύς τους και ολική κατανάλωση οικίας.

Η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια από τις συσκευές τους χειμερινούς μήνες είναι 23,470 kWh, ενώ τους καλοκαιρινούς 22,461 kWh. Κοιτώντας τον Πίνακα 7.1 κατανοούμε ότι η απόκλιση καλύπτεται πλήρως από τη μεγάλη

ηλιακή ακτινοβολία (καλύτερη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος).

Συνεπώς, η μελέτη της λειτουργίας της υβριδικής εγκατάστασης αποφασίσαμε να γίνει για το μήνα Δεκέμβριο (που επικρατούν οι χειρότερες συνθήκες).

7.3 Υπολογισμός Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος

Στην προηγούμενη ενότητα (7.2) επιλέξαμε με τη χρήση του προγράμματος PVGIS κλίση 50 για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και Νότιο προσανατολισμό. Επιπλέον, δείξαμε ότι η μικρότερη μέση ημερήσια ενέργεια ηλιακής ακτινοβολίας για την περιοχή της Πάτρας σ' αυτή την κλίση είναι:

$$E_{HA} = 2,2 \text{ kWh/m}^2/\text{day} \text{ (για το μήνα Δεκέμβριο)}$$

Η ισχύς αιχμής $P_{P\Sigma}$ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων μίας ημέρας αυτονομίας είναι:

$$P_p = \frac{E_k * P_{STC} N}{E_{HA} * \sigma_{A\Sigma} * (n)} \quad (7.1)$$

όπου,

$P_{STC} = 1 \text{ kW/m}^2$, ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις πρότυπες συνθήκες STC.

$E_k = 23,470 \text{ kWh}$, η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης το Χειμώνα.

$E_{HA} = 2,2 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ (για το μήνα Δεκέμβριο), ημερήσια ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

$\sigma_{A\Sigma} = 0,8$, συντελεστής απωλειών συστοιχίας για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα.

Συντελεστής θερμοκρασίας:

$$\psi_{\theta} = 1 - [(t_a + 30) - 25] * 0,004 = 0,94 \text{ με}$$

$t_a = 10,3 \text{ C}$, μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα το Δεκέμβριο (Πίνακας 7.1).

$\sigma_m = 0,9$, συντελεστής μεταφοράς απωλειών ενέργειας της εγκατάστασης, η οποία

περιλαμβάνει ηλεκτρικό συσσωρευτή, ελεγκτή φόρτισης και inverter.

=31 ημέρες (χρονική περίοδος αναφοράς).

$n = 1$ ημέρα (αριθμός ημερών αυτονομίας).

Μετά τους απαραίτητους υπολογισμούς, προκύπτει από τη σχέση (7.1):

$$P^D = 14,186 \text{ kW}^D$$

Άρα, η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων πρέπει να είναι κοντά σε αυτή την τιμή για την κάλυψη των ενεργειακών μας αναγκών για τους χειμερινούς μήνες.

Για τους καλοκαιρινούς μήνες (Ιούλιος από Πίνακα 7.1) ισχύει:

$\omega_{\theta} = 0,88$ (αφού $t_a = 25,3 \text{ C}$).

$E_K = 22,461 \text{ kWh}$.

$E_{HA} = 5,48 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$.

Άρα, η απαιτούμενη ισχύς αιχμής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για το Καλοκαίρι είναι:

$$P^D = 5,82 \text{ kW}^D$$

Συνεπώς, αρκεί η κάλυψη των αναγκών μας το μήνα Δεκέμβριο για να καλύψουμε όλο το έτος.

Στη συνέχεια, για να υπολογίσουμε τον ακριβή τύπο, αριθμό και συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πλαισίων έπρεπε να ορίσουμε τη μέγιστη τάση V_m της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Ισχύει:

$$V_m = 1,2 * V_B \quad (7.2)$$

όπου,

V_B η ονομαστική τάση του ηλεκτρικού συσσωρευτή και με τιμή 48 V.

Άρα,

$$V_m > 57,6 \text{ V}$$

Επιλέγουμε τη χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων Γερμανικής προέλευσης Luxor Eco Line 60 / 225W_p (Σχήμα 7.1).



Σχήμα 7.1.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	LX 225 - P
Ονομαστική Ισχύς (W_p)	225
Ονομαστικό Ρεύμα (I_{mpp})	7,62
Ονομαστική Τάση (V_{mpp})	29,6
Ρεύμα Βραχυκυκλώσεως (A)	8,14
Τάση Ανοικτοκυκλώσεως (V)	37
Βαθμός Απόδοσης (STC)	13,83 %

Πίνακας 7.4. Τεχνικά χαρακτηριστικά του πλαισίου Luxor LX 225 – P.

Ο αριθμός των πλαισίων που απαιτούνται είναι:

$$N = \frac{P}{P_p} \quad (7.3)$$

όπου,

$$P = 225 \text{ W και } P_p = 14,2 \text{ kW}_p.$$

Άρα,

$$N = 64 \text{ περίπου φωτοβολταϊκά πλαίσια.}$$

Για να καλύπτουμε τον περιορισμό της τάσης που θέσαμε νωρίτερα, επιλέξαμε τη δημιουργία 22 παράλληλων κλάδων , ο καθένας εκ των οποίων θα έχει 3 πλαίσια συνδεδεμένα εν σειρά. Με τη χρήση 64 πλαισίων 225 W_p το καθένα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι τελικά 14,40 kW_p .

Με τη χρήση του προγράμματος PVGIS, προκύπτει ο παρακάτω Πίνακας (7.5), στον οποίο φαίνεται η μέση ημερήσια ενεργειακή απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (σε κλίση 50).

ΜΗΝΑΣ	ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (kWh)
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	29,3
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	34,6
ΜΑΡΤΙΟΣ	45,7
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	55,7
ΜΑΙΟΣ	57,8
ΙΟΥΝΙΟΣ	60
ΙΟΥΛΙΟΣ	59,8
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	60,3
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	56,8
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	44,7
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	31
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	24,4
ΕΤΗΣΙΟ	46,7

Πίνακας 7.5. [52]

Από τον Πίνακα 7.5, φαίνεται ότι η εγκατάσταση καλύπτει πλήρως τις ενεργειακές μας ανάγκες, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, άρα το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (που θα επιλεγεί στη συνέχεια) θα έχει στόχο να καλύψει τις αιχμές ζήτησης μέσα στη μέρα και τις ημέρες αυτονομίας.

Κατόπιν, υπολογίζεται η χωρητικότητα C του ηλεκτρικού συσσωρευτή. Ισχύει ο παρακάτω τύπος:

$$C = \frac{n * E}{V_B * \beta_{εκ} * U_{Εκ} * \sigma_{γΒ}} \quad (7.4)$$

όπου,

$E = 14,186 \text{ kWh/ day}$, η ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση οικίας (για τους χειμερινούς μήνες).

$\sigma_{\gamma B} = 0,8$, συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή.

$\sigma_{Eκ} = 0,91$, συντελεστής μεταφοράς ενέργειας στο κύκλωμα εκφόρτισης.

$\beta_{εκ} = 0,4$, βάθος εκφόρτισης συσσωρευτών για 1-3 ημέρες αυτονομίας.

V_B , n γνωστά.

Από τη σχέση (7.4), υπολογίζουμε τη χωρητικότητα $C = 2029,8$ Ah.

Θα χρησιμοποιηθούν για ακόμα μεγαλύτερη ασφάλεια μπαταρίες PVX – 2120L της εταιρείας SUN – XTENDER με τάση 12 V και χωρητικότητα 253 Ah (Σχήμα 7.2).



Σχήμα 7.2.

Η συστοιχία των συσσωρευτών θα περιλαμβάνει 8 παράλληλους κλάδους με 4 συσσωρευτές σε σειρά ανά κλάδο, δηλαδή συνολικά απαιτούνται 32 συσσωρευτές. Η σύνδεση σε σειρά καθορίζει την ονομαστική τάση ($V_B = 4 \times 12 = 48$ V) και η παράλληλη σύνδεση καθορίζει την ονομαστική χωρητικότητα ($C = 8 \times 253 = 2024$ Ah).

Το επόμενο βήμα μας είναι η επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή φόρτισης. Η τάση του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να είναι ίση με την ονομαστική τάση του συσσωρευτή, δηλαδή 48 V.

Το μέγιστο ρεύμα εισόδου του ελεγκτή είναι $1,5 I_{m\Sigma}$, όπου $I_{m\Sigma}$ είναι η μέγιστη ένταση ρεύματος φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Ισχύει ,

$$I_{m\Sigma} = I_{m\Pi} * N = 167,64 \text{ A} \quad (7.5)$$

όπου,

$I_{m\Pi} = 7,62 \text{ A}$, μέγιστη ένταση ρεύματος φωτοβολταϊκού πλαισίου.

$N = 22$, ο αριθμός των παράλληλων κλάδων της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Άρα, το μέγιστο **ρεύμα εισόδου** του ρυθμιστή φόρτισης είναι $1,5 I_{m\Sigma} = 251,46 \text{ A}$.

Το **ρεύμα εξόδου** του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να μπορεί να δώσει το μέγιστο ρεύμα στα φορτία κατανάλωσης που λειτουργούν ταυτόχρονα.

Θεωρούμε ότι η μέγιστη απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς για την ταυτόχρονη λειτουργία συσκευών είναι $P = 8 \text{ kW}$. Η τάση κατανάλωσης είναι $V = 230 \text{ V}$. Άρα το **ρεύμα εξόδου** θα είναι $P / V = 34,78 \text{ A}$ περίπου.

Συνεπώς, θα πρέπει να επιλέξουμε **ελεγκτή φόρτισης 48V / 252 A / 35A**.

Επιλέγεται ο ελεγκτής GS-300D PV controller, της εταιρείας Guyana Power Equipment Co. (Σχήμα 7.3).



Σχήμα 7.3.

Στη συνέχεια, προχωρούμε στην επιλογή του κατάλληλου μετατροπέα τάσεως DC/AC (inverter). Ο μετατροπέας αυτός θα πρέπει να καλύπτει τις παρακάτω απαιτήσεις:

Τάση εισόδου ίση με την ονομαστική τάση των συσσωρευτών (δηλαδή 48 V).

Η ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ P των φορτίων που λειτουργούν ταυτόχρονα (δηλαδή 8 kW, όπως θεωρήσαμε νωρίτερα).

Η ισχύς αιχμής του μετατροπέα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ κατανάλωσης (περίπου 12 kW, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7.3).

Η τάση εξόδου του μετατροπέα πρέπει να είναι ίση με την τάση των φορτίων κατανάλωσης, δηλαδή 230 V.

Επειδή τα φορτία της οικίας είναι πολυάριθμα, επιλέξαμε σ' αυτό το σημείο να χρησιμοποιήσουμε ένα τριφασικό μετατροπέα στον οποίο θα μοιράζονται τα συνολικά φορτία και θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ισχύ εξόδου 8 kW και ισχύ αιχμής 10 kW.

Έτσι, επιλέγουμε ένα μετατροπέα Sunny Island 5048 (σχήμα 7.4), της εταιρείας SMA. Οι μετατροπείς αυτοί προσφέρουν ολοκληρωμένη διαχείριση του αυτόνομου συστήματος, υψηλό βαθμό απόδοσης, έξυπνη διαχείριση του συσσωρευτή για μέγιστη διάρκεια ζωής, καθώς και υπολογισμό φόρτισης του συσσωρευτή. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα φαίνονται στον Πίνακα 7.6.



Σχήμα 7.4.

Έξοδος AC (καταναλωτές)	Τιμές
Ονομαστική Τάση Εξόδου AC	230 V (202 V - 253 V)
Συχνότητα Δικτύου AC	50 – 60 Hz
Συνεχής Ισχύς AC στους 25^οC / 45^οC	8000 W / 7000 W
Ισχύς AC στους 25^οC για 30min	10500 W
DC Τάση Συσσωρευτή (Εύρος)	48 V (41 – 63 V)
Μέγιστος Βαθμός Απόδοσης	95 %
Διαστάσεις (Π / Υ / Β) σε mm	467 / 612 / 235

Πίνακας 7.6. Τεχνικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα Sunny Island 5048.

Τέλος, απομένει να επιλέξουμε το κατάλληλο Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος (Η/Ζ). Στο σημείο αυτό οφείλουμε να υπενθυμίσουμε, ότι στην περίπτωση ενός υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος, σχεδιάζουμε το σύστημα με λίγες μέρες αυτονομίας (εμείς επιλέξαμε μία), καθώς η κάλυψη των απαιτήσεων πέραν του χρόνου αυτονομίας γίνεται από το Η/Ζ. Η επιλογή του κατάλληλου Η/Ζ γίνεται με βάση τις 2

παρακάτω παραμέτρους:

1. Το H/Z πρέπει να εξασφαλίζει τη λειτουργία της εγκατάστασης όταν το φωτοβολταϊκό σύστημα δε μπορεί να ανταποκριθεί στην επιπλέον ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Το H/Z πρέπει επίσης να είναι ικανό να επαναφέρει τον εκφορτισμένο ηλεκτρικό συσσωρευτή στην κατάσταση πλήρους φόρτισης.

Ο **χρόνος φόρτισης** t του συσσωρευτή από το H/Z καθορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$t = \frac{C}{n_q * I} \quad (\text{h}) \quad (7.6)$$

όπου,

= 0,4, το βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή για 1-3 ημέρες αυτονομίας.

$C = 506 \text{ Ah}$, η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή.

n_q , ο βαθμός απόδοσης φορτίου, δηλαδή ο λόγος του φορτίου κατά την εκφόρτιση προς το φορτίο κατά τη φόρτιση (τυπική τιμή 0,9).

I , το ρεύμα φόρτισης του συσσωρευτή (επιλέγεται συνήθως $< C/10$). Εμείς επιλέξαμε $I = C/12$.

Έτσι, από τη σχέση (7.6) προκύπτει $t = 5,33 \text{ h}$. Άρα, το H/Z θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί συνεχώς για τουλάχιστον 6 h.

Η **ηλεκτρική ισχύς** P του H/Z για τη φόρτιση του συσσωρευτή δίνεται από τη σχέση:

$$P = V_{\text{HZ}} \quad (7.7)$$

όπου,

$V_{HZ} = 1,25 V_B$, η τάση εξόδου του Η/Ζ προς τον συσσωρευτή και V_B η τάση του συσσωρευτή (48 V).

Άρα, από τη σχέση (7.7), η ηλεκτρική ισχύς του Η/Ζ προκύπτει $P = 3,8 \text{ kW}$.

Δηλαδή χρειαζόμαστε μια γεννήτρια ισχύος τουλάχιστον 5 kW.

Επιλέγουμε τη γεννήτρια KG 5.5 W 63752 της εταιρείας KRAFT (σχήμα 7.5), της οποίας τα χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 7.7.



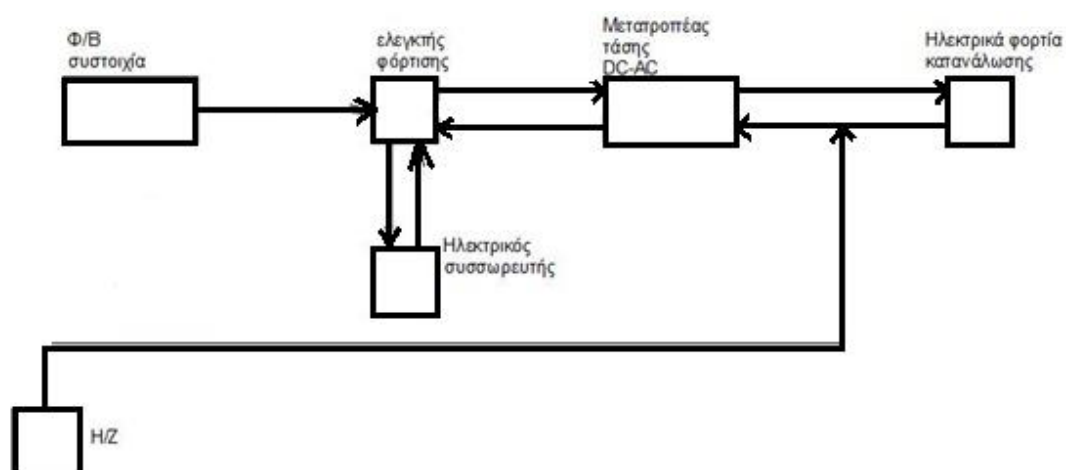
Σχήμα 7.5.

Με τη χρήση του παραπάνω Η/Ζ εξασφαλίζουμε την αξιόπιστη λειτουργία του αυτόνομου συστήματος, ακόμα και σε αρκετές μέρες συνεχούς συννεφιάς.

Μέγιστη Απόδοση (VA)	-
Ισχύς (kW)	5,5
Στροφές (rpm)	1500
Χρόνος Συνεχούς Λειτουργίας (h)	6

Πίνακας 7.7. Τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας KG 5.5 W 63752

Συνοπτικά, τα στοιχεία που απαρτίζουν συνολικά το υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα που εξετάσαμε φαίνονται στο σχήμα 7.6.



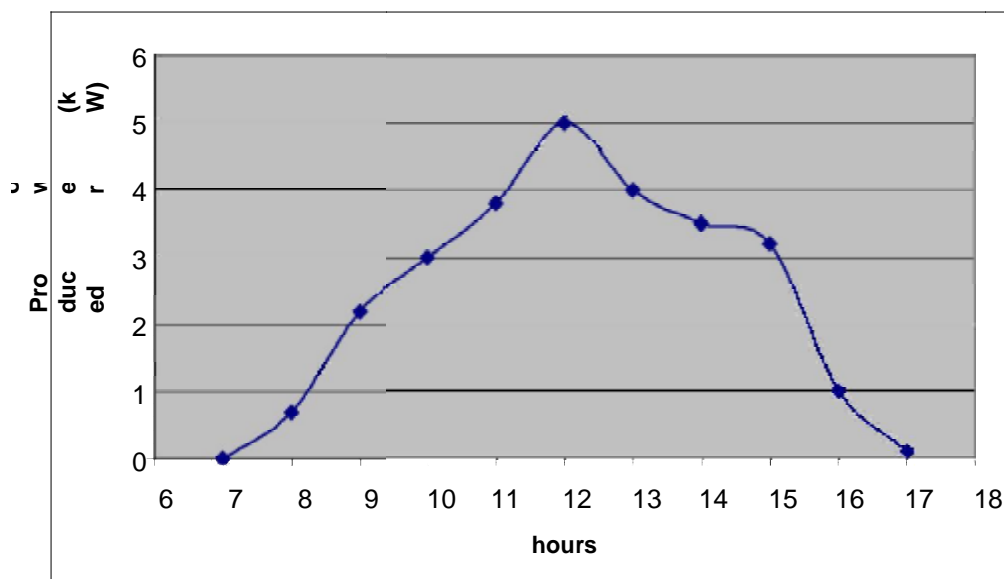
Σχήμα 7.6. Υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα αυτόνομης κατοικίας με ηλεκτρικό συσσωρευτή και Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος.

7.4 Καταμερισμός της ισχύος ζήτησης

Είναι απολύτως λογικό η ισχύς ζήτησης μίας αυτόνομης κατοικίας να διαφέρει κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, αλλά και ανάμεσα σε μία τυπική καλοκαιρινή και χειμερινή ημέρα. Στην υποενότητα αυτή θα γίνει μια προσπάθεια να υπολογίσουμε τη

κατανομή της ισχύος ζήτησης στο διάστημα μιας καλοκαιρινής και μιας χειμερινής ημέρας, με τελικό σκοπό να εντοπίσουμε πότε εμφανίζεται η αιχμή της ισχύος ζήτησης, δηλαδή πότε ενεργοποιείται το Η/Ζ.

Αρχικά, μελετήσαμε μια χειμερινή ημέρα. Με βάση τα αποτελέσματα του προγράμματος PVGIS δημιουργήσαμε (με τη βοήθεια του Excel) την καμπύλη μέγιστης παραγόμενης ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για μια τυχαία ημέρα του Δεκεμβρίου.

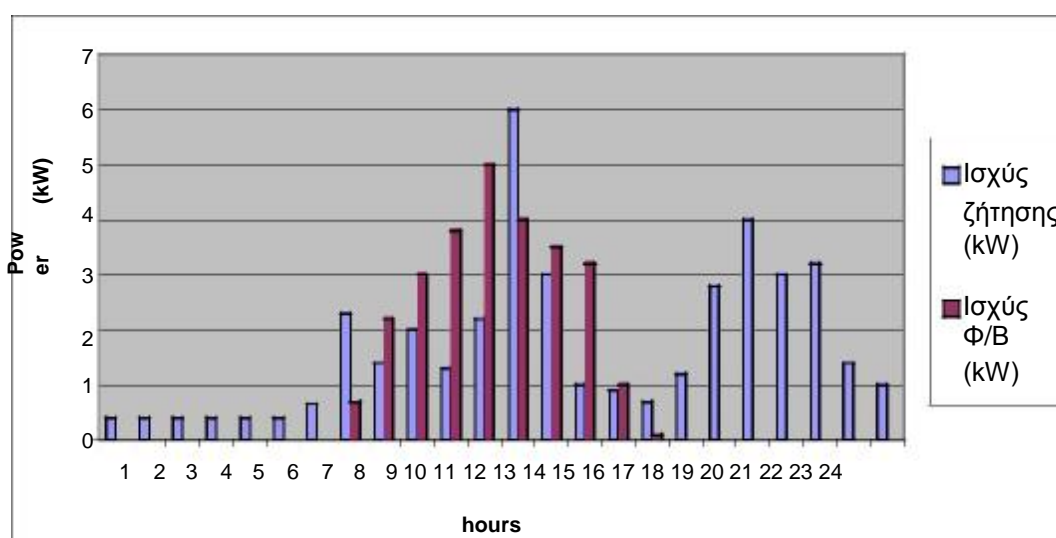


Σχήμα 7.7. Διακύμανση της μέγιστης παραγόμενης ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για μια τυχαία ημέρα του Δεκεμβρίου για κάθε ώρα της ημέρας.

Ύστερα, ορίσαμε με βάση τη δικιά μας αξιολόγηση τις καταναλώσεις της οικίας για κάθε ώρα του εικοσιτετράωρου. Για παράδειγμα, τις νυχτερινές ώρες που η οικογένεια κοιμάται, η μόνη κατανάλωση προέρχεται από τη λειτουργία του ψυγείου, ενώ το μεσημέρι και το απόγευμα που ενδεχομένως όλα τα μέλη της οικογένειας βρίσκονται στο σπίτι έχουμε αυξημένη ισχύ ζήτησης. Συνολικά, η εκτιμώμενη κατανάλωση κάθε ώρα της ημέρας φαίνεται στον Πίνακα 7.8.

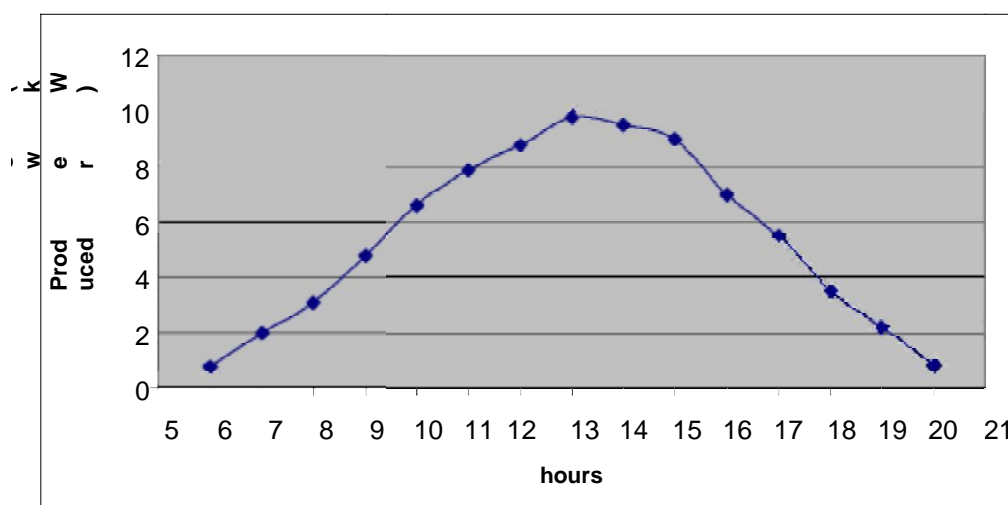
Έτσι, προκύπτει ένα συγκριτικό ιστόγραμμα (Σχήμα 7.8), που παρουσιάζει την κατανάλωση κάθε ώρα της ημέρα, καθώς και την παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύ.

Με τη γαλάζια ράβδο παρουσιάζεται η ισχύς ζήτησης για κάθε ώρα, ενώ με την κόκκινη παρουσιάζεται η παραγόμενη από τα πλαίσια ισχύς κάθε ώρα. Τις νυκτερινές ώρες η ζήτηση καλύπτεται πλήρως από τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές και μόνο στη σπάνια περίπτωση αυτοί να είναι εκφορτισμένοι, τίθεται σε λειτουργία το Η/Ζ. Κατά τη διάρκεια της ημέρας παρατηρούμε ότι στις 8 π.μ. και στη 1 μ.μ. έχουμε αιχμές ζήτησης που δεν καλύπτονται από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Αυτές τις ώρες τίθεται σε λειτουργία το Η/Ζ και καλύπτει την επιπλέον ζήτηση, ενώ ταυτόχρονα φορτίζει τους συσσωρευτές.



Σχήμα 7.8. Συγκριτικό ιστόγραμμα παραγόμενης ισχύος πλαισίων και καταναλισκομένης ισχύος από οικιακές συσκευές για κάθε ώρα ημέρας Δεκεμβρίου.

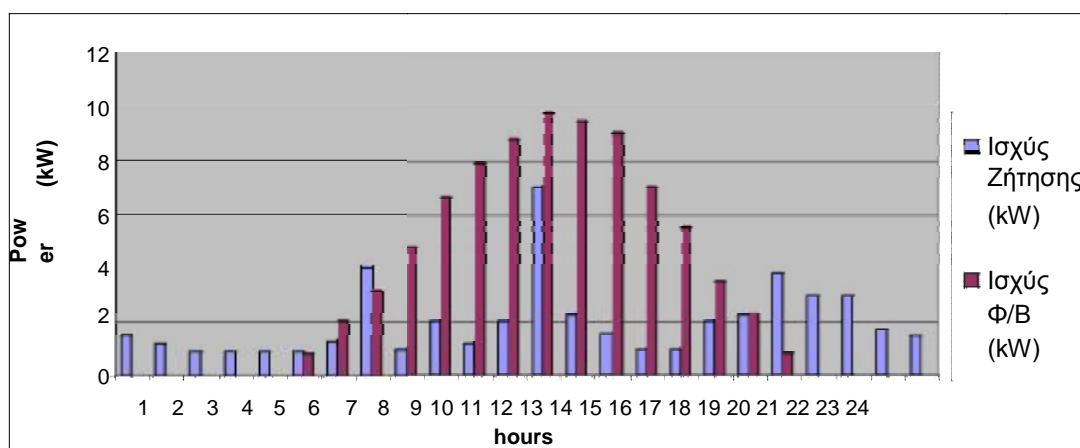
Μετέπειτα, μελετήσαμε μια καλοκαιρινή ημέρα. Με βάση τα αποτελέσματα του προγράμματος PVGIS δημιουργήσαμε την καμπύλη μέγιστης παραγόμενης ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για μια τυχαία ημέρα του Αυγούστου.



Σχήμα 7.9. Διακύμανση της μέγιστης παραγόμενης ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για μια τυχαία ημέρα του Αυγούστου για κάθε ώρα της ημέρας.

Ορίσαμε με βάση τη δικιά μας αξιολόγηση τις καταναλώσεις της οικίας για κάθε ώρα του εικοσιτετραώρου. Για παράδειγμα, τις νυχτερινές ώρες που η οικογένεια κοιμάται, η κατανάλωση προέρχεται από τη λειτουργία του ψυγείου και κάποιων ανεμιστήρων οροφής, ενώ το μεσημέρι και το απόγευμα που ενδεχομένως όλα τα μέλη της οικογένειας βρίσκονται στο σπίτι έχουμε αυξημένη ισχύ ζήτησης. Συνολικά, η εκτιμώμενη κατανάλωση κάθε ώρα της ημέρας φαίνεται στον Πίνακα 7.8.

Έτσι, προκύπτει ένα συγκριτικό ιστόγραμμα (Σχήμα 7.10), που παρουσιάζει την κατανάλωση κάθε ώρα της ημέρας, καθώς και την παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύ.



Σχήμα 7.10. Συγκριτικό ιστόγραμμα παραγόμενης ισχύος πλαισίων και καταναλισκομένης ισχύος από οικιακές συσκευές για κάθε ώρα ημέρας Αυγούστου.

Από το σχήμα 7.10 παρατηρούμε ότι η παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύς είναι σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας πολύ μεγάλη σε σχέση με την ισχύ κατανάλωσης. Άρα στην ουσία δεν χρησιμοποιείται το Η/Ζ, γιατί ακόμα και αν έχουμε μεγαλύτερη ζήτηση κάποιες ώρες της ημέρας (π.χ. στις 8 π.μ.) ή και κάποιες νυκτερινές ώρες, οι συσσωρευτές είναι φορτισμένοι και επαρκούν για την κάλυψη αυτής.

ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ	ΙΣΧΥΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ (kW)	ΙΣΧΥΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ(kW)
1	0,4	1,5
2	0,4	1,2
3	0,4	0,9
4	0,4	0,9
5	0,4	0,9
6	0,4	0,9
7	0,65	1,3
8	2,3	4
9	1,4	1
10	2	2
11	1,3	1,2
12	2,2	2
13	6	7
14	3	2,2
15	1	1,6
16	0,9	1
17	0,7	1
18	1,2	2
19	2,8	2,2
20	4	3,8
21	3	3
22	3,2	3
23	1,4	1,7
24	1	1,5

Πίνακα 7.8. Ισχύς ζήτησης για κάθε ώρα της ημέρας, για μια τυχαία μέρα του Δεκεμβρίου και μία του Αυγούστου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση της μελέτης τροφοδότησης οικίας 150 τ.μ. μέσω υβριδικού συστήματος και ποιο συγκεκριμένα με χρήση φωτοβολταϊκών και ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα και συμπεράσματα.

Μετά από διαδοχικές δοκιμές στο πρόγραμμα PVGIS προέκυψε ότι η βέλτιστη κλίση τοποθέτησης της φ/β συστοιχίας είναι 50. Η μελέτη της λειτουργίας της υβριδικής εγκατάστασης αποφασίσαμε να γίνει για το μήνα Δεκέμβριο, που επικρατούν οι χειρότερες συνθήκες.

Η συνολική ισχύς των ηλεκτρικών συσκευών της εγκατάστασης ανέρχεται σε **13,045 kW** για το μήνα Δεκέμβριο (χειμώνας) με συνολική κατανάλωση **23,470 kWh** και αντίστοιχα για το μήνα Αύγουστο (καλοκαίρι) η συνολική ισχύς ανέρχεται σε **12,845 kW** με συνολική κατανάλωση **22,461 kWh** (δηλ. με συντελεστή ταυτοχρονισμού =1). Η ισχύς αιχμής P^p της φ/β συστοιχίας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων μιας ημέρας αυτονομίας υπολογίστηκε ότι είναι **14,186 kW_p** για τους χειμερινούς μήνες και **5,82 kW_p** για τους καλοκαιρινούς (δηλ. με συντελεστή ταυτοχρονισμού =0,5).

Ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων υπολογίστηκε σε **64** πλαίσια των **225 W_p** το καθένα. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς θα ανέρχεται σε **14,4 kW_p**. Με βάση την τιμή αυτή και το πρόγραμμα PVGIS, προέκυψε ο πίνακας που δίνει την ημερήσια ενεργειακή απόδοση της φ/β συστοιχίας με κλίση 50°. Υπολογίστηκε επίσης και η χωρητικότητα των συσσωρευτών, για αυτονομία δύο ημερών, τάση 48V και βάθος εκφόρτισης 40% (μπαταρίες στο 60%) όπου και ανέρχεται σε **2029,8Ah**. Με χρήση συσσωρευτών 12V, χωρητικότητας **253 Ah** βρέθηκε ότι τελικά η εγκατάσταση θα περιλαμβάνει **32** συσσωρευτές που συνδέονται σε 8 παράλληλους κλάδους των τεσσάρων συσσωρευτών (4x12V=48V). Στη συνέχεια επιλέχτηκε ο κατάλληλος ελεγκτής φόρτισης με χαρακτηριστικά **48 V/ 252 A/ 35 A**.

Με δεδομένο το γεγονός ότι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς P των φορτίων που λειτουργούν ταυτόχρονα υποτέθηκε ότι είναι **8 kW**, ενώ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς **10 kW**, χρησιμοποιήθηκε ένας τριφασικός μετατροπέας με ισχύ εξόδου **8 kVA** και ισχύ αιχμής **10 kW**. Όσον αφορά το Η/Ζ, ο χρόνος φόρτισης t των συσσωρευτών από το Η/Ζ βρέθηκε ότι είναι **7,37 h**, ενώ η ηλεκτρική ισχύς P του Η/Ζ που απαιτείται για τη φόρτιση του συσσωρευτή **3,8 kW**. Η συνολική απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς του Η/Ζ P_{HZ} υπολογίστηκε ότι πρέπει να είναι **> 4 kW**. Γι' αυτό τελικά έγινε χρήση ντιζελογεννήτριας **5,5 kVA** και χρόνου φόρτισης **5,1 h** χωρίς φορτία.

Η μελέτη παρουσιάζει επίσης και τα διαγράμματα που απεικονίζουν τη διακύμανση της μέγιστης παραγόμενης ισχύς της φ/β συστοιχίας για μια τυχαία ημέρα του Δεκεμβρίου και του Αυγούστου αντίστοιχα, για κάθε ώρα της ημέρας και με τα συγκριτικά ιστογράμματα παραγόμενης ισχύς πλαισίων και καταναλισκόμενης ισχύς από οικιακές συσκευές, για κάθε ώρα ημέρας Δεκεμβρίου και Αυγούστου αντίστοιχα.

Η μελέτη λοιπόν ενός υβριδικού αυτόνομου συστήματος δεν είναι ιδιαίτερα απλή. 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.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία δεν λαμβάνεται υπόψη το οικονομικό κόστος του υβριδικού συστήματος, το οποίο είναι πολύ υψηλό. Για το λόγο αυτό στην πράξη γίνεται εξοικονόμηση της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και χρησιμοποίηση άλλων μορφών ενέργειας π.χ. γκάζι αντί ηλεκτρικού για μαγείρεμα, έτσι ώστε να γίνει όσο το δυνατόν ποιο σωστή και οικονομική η μελέτη και η κατασκευή του υβριδικού συστήματος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Monthly Solar Irradiation

PVGIS Estimates of long-term monthly averages

Location: 38°15'16" North, 21°44'13" East, Elevation: 4 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-classic

Optimal inclination angle is: 27 degrees

Annual irradiation deficit due to shadowing (horizontal): 0.0 %

Month	H_h	H_{opt}	$H(30)$	I_{opt}	T_{24h}	N_{DD}
Jan	1640	2200	2240	55	8.8	276
Feb	2240	2780	2810	47	9.4	230
Mar	3420	3930	3950	37	11.2	185
Apr	4870	5190	5180	24	14.3	50
May	5950	5900	5840	13	19.3	0
Jun	6770	6490	6390	6	23.4	0
Jul	6570	6410	6330	9	25.3	0
Aug	5860	6100	6060	20	25.5	0
Sep	4510	5180	5210	35	22.1	0
Oct	3000	3750	3790	46	18.2	50
Nov	1850	2430	2470	53	13.8	161
Dec	1380	1840	1880	56	10.3	246
Year	4010	4360	4350	27	16.8	1198

H_h : Irradiation on horizontal plane ($Wh/m^2/day$)

H_{opt} : Irradiation on optimally inclined plane ($Wh/m^2/day$)

$H(30)$: Irradiation on plane at angle: 30deg. ($Wh/m^2/day$)

I_{opt} : Optimal inclination (deg.)

T_{24h} : 24 hour average of temperature ($^{\circ}C$)

N_{DD} : Number of heating degree-days (-)

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Πίνακας 1. Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 30° για την περιοχή της Πάτρας. [52]

Monthly Solar Irradiation

PVGIS Estimates of long-term monthly averages

Location: 38°15'16" North, 21°44'13" East, Elevation: 4 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-classic

Optimal inclination angle is: 27 degrees

Annual irradiation deficit due to shadowing (horizontal): 0.0 %

Month	H_h	H_{opt}	$H(35)$	I_{opt}	T_{24h}	N_{DD}
Jan	1640	2200	2300	55	8.8	276
Feb	2240	2780	2860	47	9.4	230
Mar	3420	3930	3970	37	11.2	185
Apr	4870	5190	5130	24	14.3	50
May	5950	5900	5710	13	19.3	0
Jun	6770	6490	6210	6	23.4	0
Jul	6570	6410	6160	9	25.3	0
Aug	5860	6100	5980	20	25.5	0
Sep	4510	5180	5220	35	22.1	0
Oct	3000	3750	3860	46	18.2	50
Nov	1850	2430	2540	53	13.8	161
Dec	1380	1840	1930	56	10.3	246
Year	4010	4360	4330	27	16.8	1198

H_h : Irradiation on horizontal plane ($Wh/m^2/day$)

H_{opt} : Irradiation on optimally inclined plane ($Wh/m^2/day$)

$H(35)$: Irradiation on plane at angle: 35deg. ($Wh/m^2/day$)

I_{opt} : Optimal inclination (deg.)

T_{24h} : 24 hour average of temperature ($^{\circ}C$)

N_{DD} : Number of heating degree-days (-)

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Πίνακας 2. Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 35° για την περιοχή της Πάτρας. [52]

Monthly Solar Irradiation

PVGIS Estimates of long-term monthly averages

Location: 38°15'16" North, 21°44'13" East, Elevation: 4 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-classic

Optimal inclination angle is: 27 degrees

Annual irradiation deficit due to shadowing (horizontal): 0.0 %

Month	H_h	H_{opt}	$H(50)$	I_{opt}	T_{24h}	N_{DD}
Jan	1640	2200	2410	55	8.8	276
Feb	2240	2780	2900	47	9.4	230
Mar	3420	3930	3890	37	11.2	185
Apr	4870	5190	4820	24	14.3	50
May	5950	5900	5150	13	19.3	0
Jun	6770	6490	5450	6	23.4	0
Jul	6570	6410	5480	9	25.3	0
Aug	5860	6100	5520	20	25.5	0
Sep	4510	5180	5080	35	22.1	0
Oct	3000	3750	3910	46	18.2	50
Nov	1850	2430	2630	53	13.8	161
Dec	1380	1840	2020	56	10.3	246
Year	4010	4360	4110	27	16.8	1198

H_h : Irradiation on horizontal plane ($Wh/m^2/day$)

H_{opt} : Irradiation on optimally inclined plane ($Wh/m^2/day$)

$H(50)$: Irradiation on plane at angle: 50deg. ($Wh/m^2/day$)

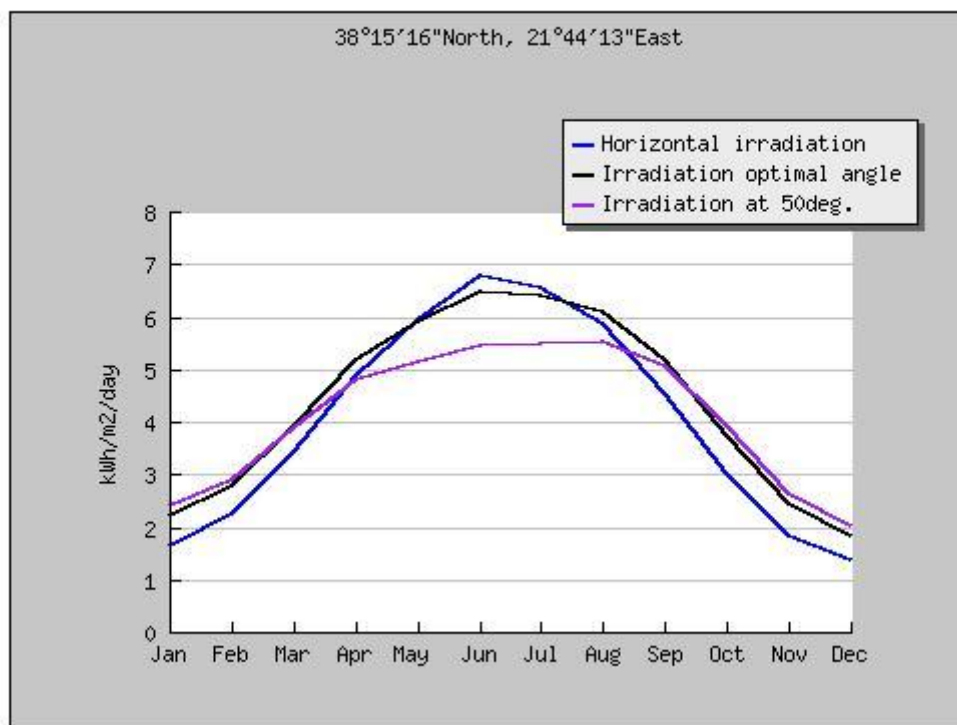
I_{opt} : Optimal inclination (deg.)

T_{24h} : 24 hour average of temperature ($^{\circ}C$)

N_{DD} : Number of heating degree-days (-)

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

Πίνακας 3. Στοιχεία μηνιαίας ακτινοβολίας για κλίση 50° για την περιοχή της Πάτρας. [52]



Σχήμα 1. Διάγραμμα της προσπιπώμενης ακτινοβολίας στην περιοχή της Πάτρας σε οριζόντια επιφάνεια, (μπλε καμπύλη), σε επιφάνεια με βέλτιστη κλίση (μαύρη καμπύλη) και σε επιφάνεια με κλίση 50° (μωβ καμπύλη). [52]

Performance of Grid-connected PV

NOTE: before using these calculations for anything serious, you should read [\[this\]](#)

PVGIS estimates of solar electricity generation

Location: 38°15'16" North, 21°44'13" East, Elevation: 4 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-classic

Nominal power of the PV system: 1.0 kW (crystalline silicon)
 Estimated losses due to temperature: 10.5% (using local ambient temperature)
 Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.7%
 Other losses (cables, inverter etc.): 12.0%
 Combined PV system losses: 23.4%

Fixed system: inclination=30°, orientation=0°				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	1.84	57.1	2.24	69.6
Feb	2.27	63.5	2.81	78.7
Mar	3.12	96.9	3.95	122
Apr	4.02	121	5.18	155
May	4.41	137	5.84	181
Jun	4.73	142	6.39	192
Jul	4.64	144	6.33	196
Aug	4.45	138	6.06	188
Sep	3.92	118	5.21	156
Oct	2.93	90.8	3.79	118
Nov	1.97	59.1	2.47	74.2
Dec	1.53	47.5	1.88	58.2
Yearly average	3.32	101	4.35	132
Total for year		1210		1590

E_d : Average daily electricity production from the given system (kWh) E_m :

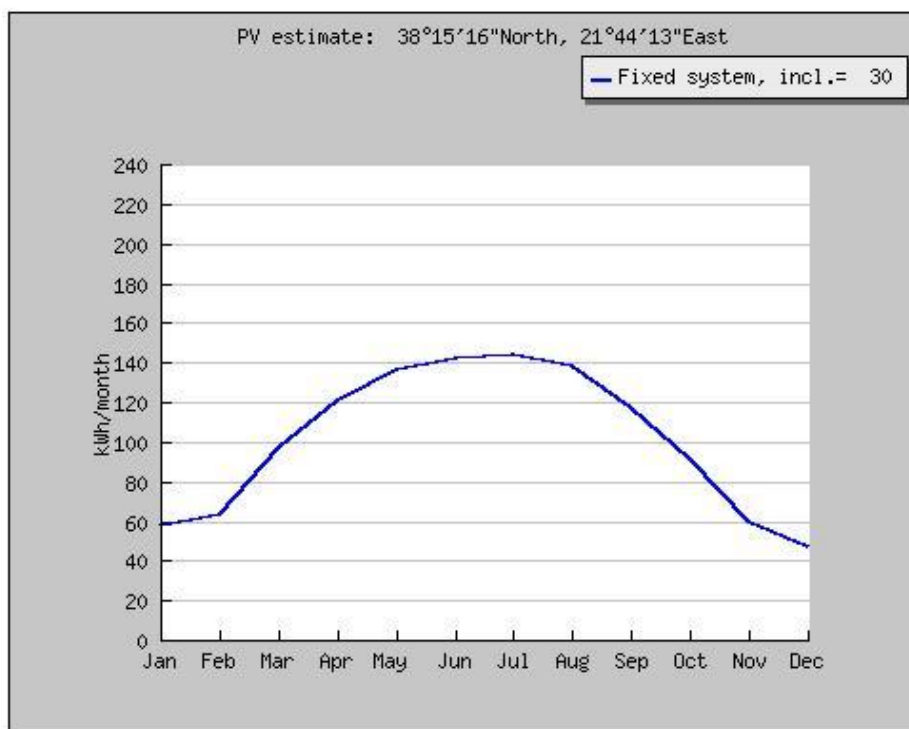
Average monthly electricity production from the given system (kWh)

H_d : Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m^2)

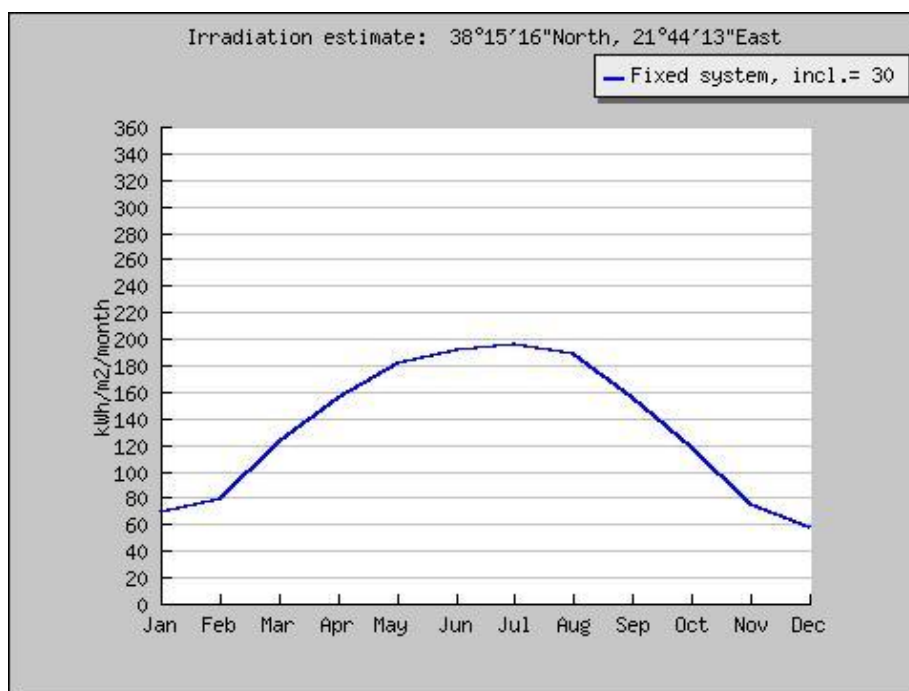
H_m : Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m^2)

ΠΙΝΑΚΑΣ 4

Πίνακας 4. Υπολογισμός φωτοβολταϊκού συστήματος με ονομαστική ισχύ συστήματος 1 kW στην περιοχή της Πάτρας και σε κλίση 30°. [52]



Σχήμα 2. Μέση μηνιαία ηλεκτρική παραγωγή από το σύστημα 1 kW (kWh), στην περιοχή της Πάτρας και με κλίση 30°. [52]



Σχήμα 3. Μέση συνολική ακτινοβολία ανά τ.μ. που λαμβάνεται από τα πλαίσια του συστήματος 1 kW (kWh/m²), στην περιοχή της Πάτρας και με κλίση 30°. [52]

Performance of Grid-connected PV

NOTE: before using these calculations for anything serious, you should read [\[this\]](#)

PVGIS estimates of solar electricity generation

Location: 38°15'16" North, 21°44'13" East, Elevation: 4 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-classic

Nominal power of the PV system: 1.0 kW (crystalline silicon)
 Estimated losses due to temperature: 10.5% (using local ambient temperature)
 Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.7%
 Other losses (cables, inverter etc.): 12.0%
 Combined PV system losses: 23.4%

Fixed system: inclination=35°, orientation=0°				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	1.89	58.6	2.30	71.5
Feb	2.30	64.4	2.86	80.0
Mar	3.14	97.2	3.97	123
Apr	3.98	119	5.13	154
May	4.31	134	5.71	177
Jun	4.60	138	6.21	186
Jul	4.52	140	6.16	191
Aug	4.39	136	5.98	185
Sep	3.93	118	5.22	157
Oct	2.97	92.2	3.86	120
Nov	2.02	60.5	2.54	76.1
Dec	1.57	48.7	1.93	59.8
Yearly average	3.31	101	4.33	132
Total for year		1210		1580

E_d : Average daily electricity production from the given system (kWh) E_m :

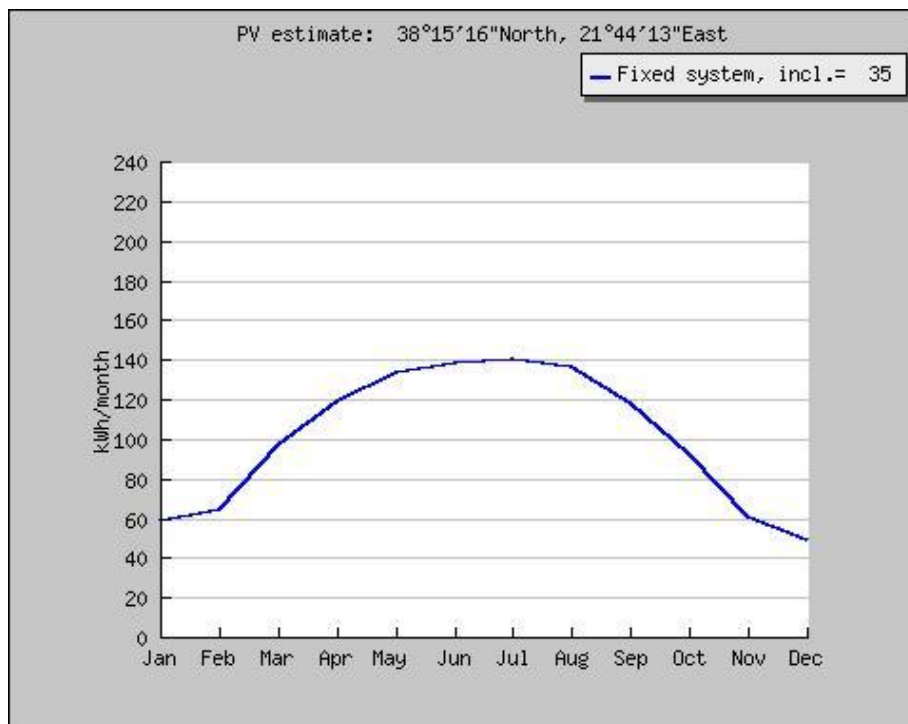
Average monthly electricity production from the given system (kWh)

H_d : Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m^2)

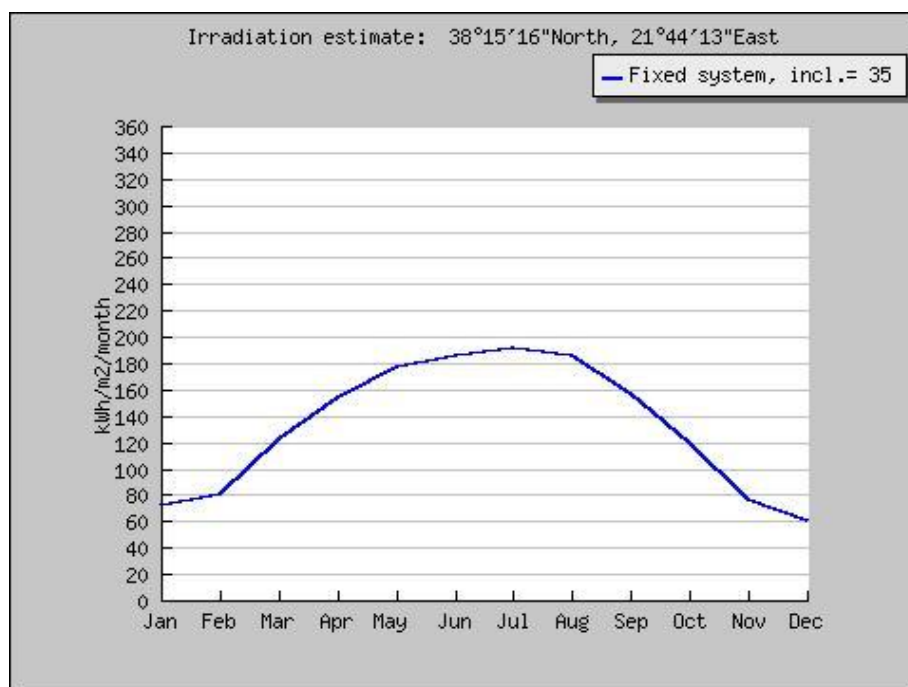
H_m : Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m^2)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5

Πίνακας 5. Υπολογισμός φωτοβολταϊκού συστήματος με ονομαστική ισχύ συστήματος 1 kW στην περιοχή της Πάτρας και σε κλίση 35°. [52]



Σχήμα 4. Μέση μηνιαία ηλεκτρική παραγωγή από το σύστημα 1 kW (kWh), στην περιοχή της Πάτρας και με κλίση 35°. [52]



Σχήμα 5. Μέση συνολική ακτινοβολία ανά τ.μ. που λαμβάνεται από τα πλαίσια του συστήματος 1 kW (kWh/m²), στην περιοχή της Πάτρας και με κλίση 35°. [52]

Performance of Grid-connected PV

NOTE: before using these calculations for anything serious, you should read [\[this\]](#)

PVGIS estimates of solar electricity generation

Location: 38°15'16" North, 21°44'13" East, Elevation: 4 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-classic

Nominal power of the PV system: 1.0 kW (crystalline silicon)

Estimated losses due to temperature: 10.2% (using local ambient temperature)

Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.8%

Other losses (cables, inverter etc.): 12.0%

Combined PV system losses: 23.2%

Fixed system: inclination=50°, orientation=0°				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	1.97	61.1	2.41	74.6
Feb	2.33	65.2	2.90	81.1
Mar	3.08	95.4	3.89	121
Apr	3.75	112	4.82	145
May	3.89	121	5.15	160
Jun	4.04	121	5.45	164
Jul	4.02	125	5.48	170
Aug	4.06	126	5.52	171
Sep	3.82	115	5.08	152
Oct	3.01	93.3	3.91	121
Nov	2.09	62.7	2.63	79.0
Dec	1.64	50.9	2.02	62.6
Yearly average	3.15	95.7	4.11	125
Total for year		1150		1500

E_d : Average daily electricity production from the given system (kWh) E_m :

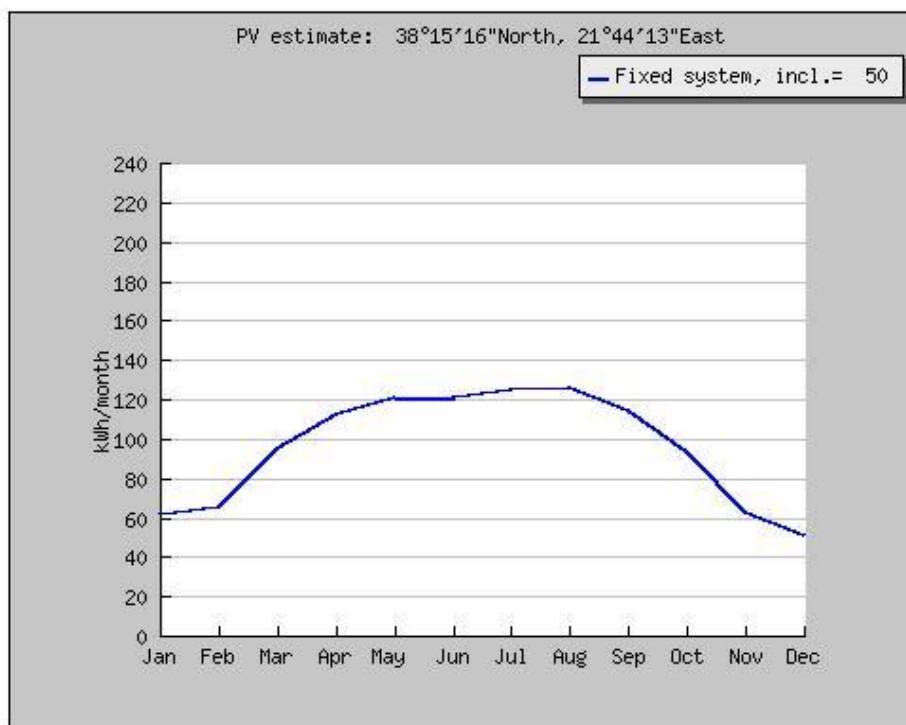
Average monthly electricity production from the given system (kWh)

H_d : Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m^2)

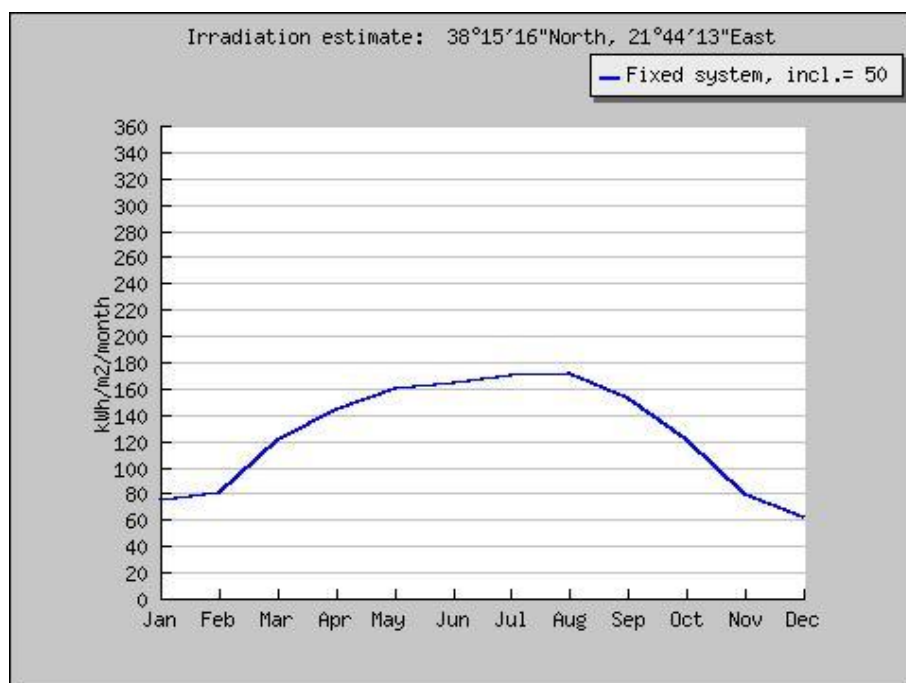
H_m : Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m^2)

ΠΙΝΑΚΑΣ 6

Πίνακας 6. Υπολογισμός φωτοβολταϊκού συστήματος με ονομαστική ισχύ συστήματος 1 kW στην περιοχή της Πάτρας και σε κλίση 50°. [52]



Σχήμα 6. Μέση μηνιαία ηλεκτρική παραγωγή από το σύστημα 1 kW (kWh), στην περιοχή της Πάτρας και με κλίση 50° . [52]



Σχήμα 7. Μέση συνολική ακτινοβολία ανά τ.μ. που λαμβάνεται από τα πλαίσια του συστήματος 1 kW (kWh/m^2), στην περιοχή της Πάτρας και με κλίση 50° . [52]

Performance of Grid-connected PV

NOTE: before using these calculations for anything serious, you should read [\[this\]](#)

PVGIS estimates of solar electricity generation

Location: 38°15'16" North, 21°44'13" East, Elevation: 4 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-classic

Nominal power of the PV system: 14.8 kW (crystalline silicon)

Estimated losses due to temperature: 10.2% (using local ambient temperature)

Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.8%

Other losses (cables, inverter etc.): 12.0%

Combined PV system losses: 23.2%

Fixed system: inclination=50°, orientation=0°				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	29.30	908	2.41	74.6
Feb	34.60	969	2.90	81.1
Mar	45.70	1420	3.89	121
Apr	55.70	1670	4.82	145
May	57.80	1790	5.15	160
Jun	60.00	1800	5.45	164
Jul	59.80	1850	5.48	170
Aug	60.30	1870	5.52	171
Sep	56.80	1700	5.08	152
Oct	44.70	1390	3.91	121
Nov	31.00	931	2.63	79.0
Dec	24.40	755	2.02	62.6
Yearly average	46.7	1420	4.11	125
Total for year		17100		1500

E_d : Average daily electricity production from the given system (kWh) E_m :

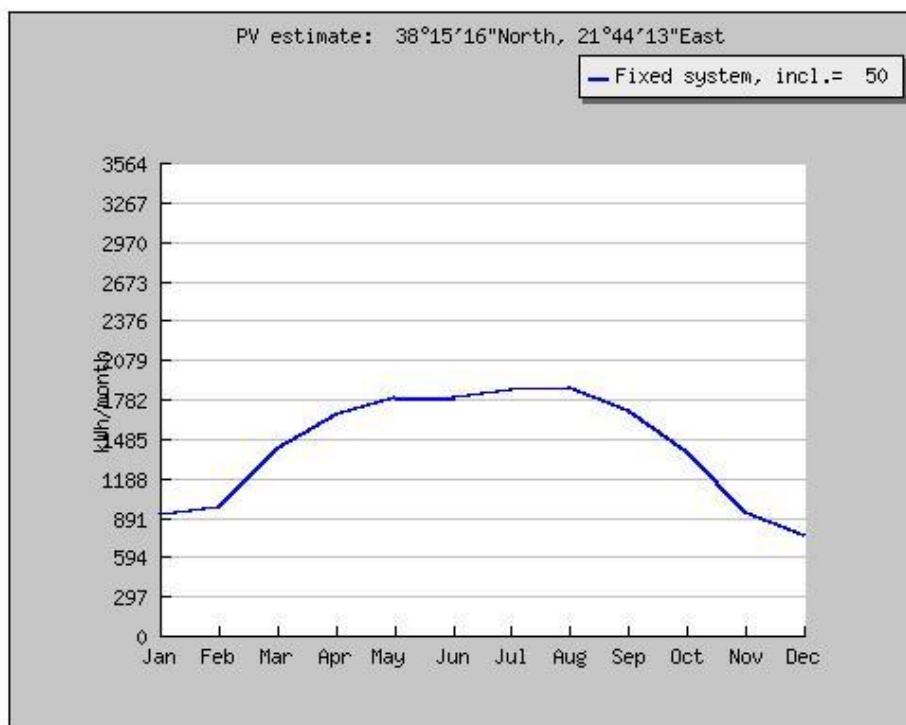
Average monthly electricity production from the given system (kWh)

H_d : Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m^2)

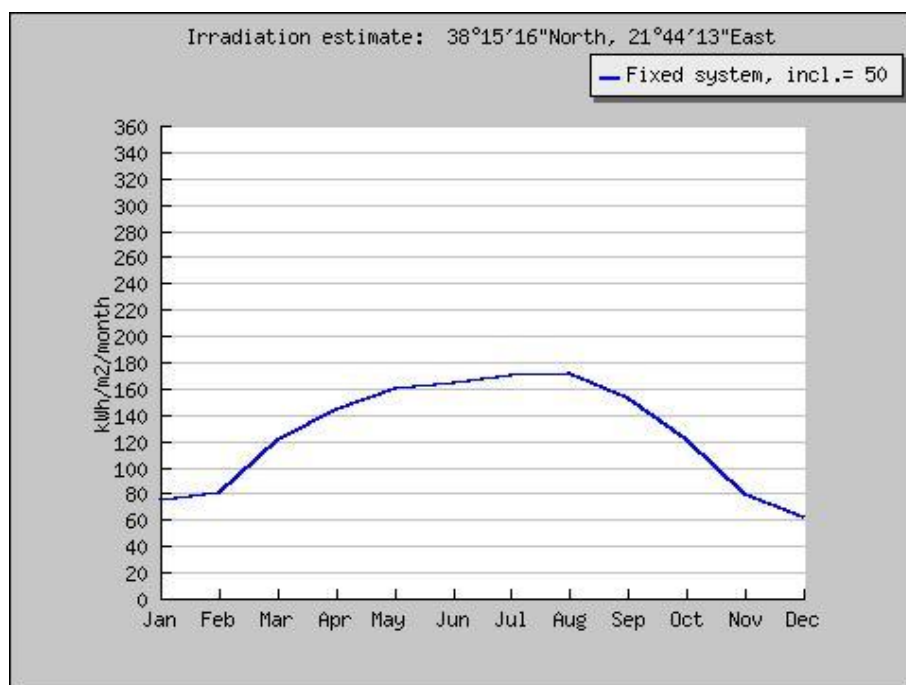
H_m : Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m^2)

ΠΙΝΑΚΑΣ 7

Πίνακας 7. Υπολογισμός φωτοβολταϊκού συστήματος με ονομαστική ισχύ συστήματος 14,85 kW στην περιοχή της Πάτρας και σε κλίση 50°. [52]



Σχήμα 8. Μέση μηνιαία ηλεκτρική παραγωγή από το σύστημα 14,85 kW (kWh), στην περιοχή της Πάτρας και με κλίση 50°. [52]



Σχήμα 9. Μέση συνολική ακτινοβολία ανά τ.μ. που λαμβάνεται από τα πλαίσια του συστήματος 14,85 kW (kWh/m²), στην περιοχή της Πάτρας και με κλίση 50°. [52]

	30 ⁰	35 ⁰	50 ⁰
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	2240	2300	2410
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	2810	2860	2900
ΜΑΡΤΙΟΣ	3950	3970	3890
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	5180	5130	4820
ΜΑΙΟΣ	5840	5710	5150
ΙΟΥΝΙΟΣ	6390	6210	5450
ΙΟΥΛΙΟΣ	6330	6160	5480
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	6060	5980	5520
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	5210	5220	5080
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	3790	3860	3910
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	2470	2540	2630
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	1880	1930	2020
ΕΤΗΣΙΑ	4350	4330	4110

Πίνακας 8. Σύγκριση της προσπιπτόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (Wh/m²/day) στην περιοχή της Πάτρας και για κλίσεις συλλεκτών 30⁰, 35⁰, 50⁰ αντίστοιχα.

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι η κλίση των 30⁰ υπερτερεί έναντι των άλλων, τους μήνες Απρίλιο, Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο (5 μήνες), η κλίση των 35⁰ το Μάρτιο και το Σεπτέμβριο (2 μήνες), ενώ η κλίση των 50⁰ τους μήνες Οκτώβριο, Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο (5 μήνες).

Η μικρότερη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρείται το Δεκέμβριο (μήνας με τις χειρότερες συνθήκες). Για κλίσεις συλλεκτών 30⁰ και 35⁰ η προσπιπτόμενη ακτινοβολία το Δεκέμβριο είναι μικρότερη από την ακτινοβολία που προσπίπτει όταν έχουμε κλίση 50⁰. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όπως παρατηρούμε από τη σχέση 7.1, για κλίσεις 30⁰ και 35⁰ την αύξηση της απαιτούμενη ισχύς της φ/β συστοιχίας, άρα και την αύξηση του συνολικού αριθμού των πλαισίων (Σχέση 7.3). Συνεπώς οικονομικά μας συμφέρει καλύτερα η κλίση των 50⁰, γιατί σε αυτή απαιτείται φ/β συστοιχία με μικρότερη ισχύ συγκριτικά με τις άλλες.

Η επιλογή αυτή επιβεβαιώνεται και με τον πίνακα 7.5. Σ' αυτόν παρατηρούμε ότι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους η εγκατάσταση των 50⁰ που χρησιμοποιήσαμε

καλύπτει πλήρως τις ενεργειακές μας ανάγκες. Οι κλίσεις των 30° και 35° θα έδιναν μεγαλύτερες τιμές τους μήνες από Μάρτιο έως Σεπτέμβριο που ούτως ή άλλως και με την κλίση των 50° «πετάμε» ενέργεια με αποτέλεσμα να «πετάμε» ακόμα περισσότερη, ενώ τους υπόλοιπους μήνες οι κλίσεις των 30° και 35° δίνουν χειρότερα αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] «Stand – Alone Photovoltaic Systems handbook of recommended design practices», Sandia National Laboratories, 1995.
- [2] «Stand Alone PV System Design».
- [3] «Photovoltaics in Buildings», Frierich Sick and Thomas Erge, James & James Ltd, London, 1996.
- [4] «Photovoltaic Systems», Klaus Preiser.
- [5] «Renewable and Efficient Electric Power Systems», Gilbert M. Masters.
- [6] «Planning and Installing Photovoltaic Systems- A guide for installers, architects and engineers», second edition, Earthscan.
- [7] «Batteries and charge control in stand – alone photovoltaic systems», James P. Dunlop, Florida energy center, 1997.
- [8] «Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Ι. Φραγκιαδάκης, εκδόσεις Ζήτη, 2007.
- [9] «Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία», Κ. Καγκαράκη, εκδόσεις Συμμετρία, 1992.
- [10] «Ήπιες Μορφές Ενέργειας Ι», Θωμάς Ζαχαρίας, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2006.
- [11] «Ήπιες Μορφές Ενέργειας ΙΙ», Θωμάς Ζαχαρίας, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2007.
- [12] «Φυσική των φ/β στοιχείων», Βασιλική Περράκη, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2008.
- [13] «Νέες τεχνολογίες των φ/β στοιχείων», Βασιλική Περράκη, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2008.
- [14] «Ένας πρακτικός οδηγός για τα φωτοβολταϊκά», Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών.
- [15] «Σύγχρονες εξελίξεις σε φ/β συστήματα για διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας», Ι. Κομπούγιας, Α. Κυρίτσης, Α. Νανάκος, Ε. Τατάκης.
- [16] «Σημειώσεις ΑΠΕ», Π. Αξαόπουλος.

- [17] «Μετατροπή της Ηλιακής Ενέργειας σε Ηλεκτρική με Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Νεοκλέους-Κωνσταντινίδη, Ίων, 1991.
- [18] «Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις», Σ. Περδίο, Τεχνική εκδοτική, 2011.
- [19] «Επενδύσεις Φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα», Α. Ζαχαρίου, ΤΕΕ, 2010.
- [20] «Τεχνικο-οικονομική Μελέτη Εγκατάστασης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων στα κτίρια του Ξενία», διατριβή μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης της Αικατερίνης Πολυχρονιάδου, τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγίου.
- [21] «Παραμετρική Μελέτη Μηδενισμού Σκίασης Ηλιακών Συλλεκτών-Κώδικας-Εφαρμογές», διπλωματική εργασία του Σταμάτιου Καλάκιου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010.
- [22] «Διαχείριση Δεδομένων Μέτρησης της Ηλιακής Ακτινοβολίας», διπλωματική εργασία του Παναγιώτη Κεραμιτζή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010.
- [23] «Τεχνοοικονομική Μελέτη και Σύγκριση Υβριδικών Συστημάτων. Εφαρμογή σε Αυτόνομη Κατοικία», διπλωματική εργασία των . Σαραφιανού και Μ. Σειραγάκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2009.
- [24] «Σχεδιασμός Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος για την Τροφοδότηση Αγροικίας», διπλωματική εργασία της Φ. Μπουγιούκου, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010.
- [25] <http://www.greenenergia.gr/>
- [26] http://www.selasenergy.gr/fv_systems_main.php
- [27] <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CF%8D%CE%BB%CE%B7:%CE%9A%CF%8D%CF%81%CE%B9%CE%B1>
- [28] <http://www.dei.gr/>
- [29] <http://www.scribd.com/doc/54868111/%CE%9C%CE%97%CE%A7%CE%91%CE%9D%CE%95%CE%A3-%CE%95%CE%A3%CE%A9%CE%A4%CE%95%CE%A1%CE%99%CE%9A%CE%97%CE%A3-%CE%9A%CE%91%CE%A5%CE%A3%CE%97%CE%A3>
- [30] www.solar-systems.gr
- [31] www.hellascams.gr/grc/products/solar_panel/pv_fundamentals.html
- [32] www.aenaon.net/gr/component/option,com_frontpage/Itemid,1/
- [33] www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_photovol.htm
- [34] www.physics4u.gr/energy/sunenergy.html
- [35] www.helapco.gr

- [36] <http://oikologiakaioximono.wordpress.com/tag/%CE%BC%CE%BF%CF%81%CF%86%CE%AD%CF%82-%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82/>
- [37] <http://www.ecocasa.gr/index-readmore3.html>
- [38] www.solarbotics.net/starting/200202_solar_cells/200202_solar_cell_types.html
- [39] www.britannica.com/EBchecked/topic/552875/solar-cell
- [40] www.heliosres.gr/index.php?lang=gr&id=35
- [41] www.cres.gr/energy-saving/technologies_technologies_ape.htm
- [42] www.helapco.gr
- [43] www.iqsolarpower.com/index.html
- [44] www.pvsunenergy.gr
- [45] <http://users.forthnet.gr/ath/papsomad/fwtoboltaika.html>
- [46] <http://e-fotovoltaika.blogspot.com>
- [47] www.dei.gr/ecpage.aspx?id=1223&nt=18&lang=1
- [48] www.toolhouse.gr/index.php?page=shop.product_details&flypage=ilvm_fly2_blue.tpl&product_id=1349&category_id=44&option=com_virtuemart&Itemid=67
- [49] http://lyk-vatheos.eyv.sch.gr/Ergasies/2006-2007/tech_plir_A/EnalPE07.htm
- [50] <http://www.kykladesnews.gr/greece-islands-milos/68-newscategory/48996-2010-01-29%2008-37-19.html>
- [51] http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2010-0006/DT2010-0006.pdf
- [52] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>

