



**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ
ΜΕ ΚΑΤΑΓΕΓΡΑΜΜΕΝΕΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ**

Του σπουδαστή :

ΣΟΦΟΚΛΗ ΕΜΜ. ΚΑΛΥΚΑΚΗ

Εισηγητής :

Δρ. Εμμανουήλ Κυμάκης

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2008

Πίνακας περιεχομένων

Μελέτη απόδοσης υφιστάμενου φωτοβολταϊκού πάρκου με καταγεγραμμένες πραγματικές μετρήσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή στις Α.Π.Ε.	4
1.1 Γενική εισαγωγή και περιγραφή των Α.Π.Ε.	4
1.2 Κατηγορίες των Α.Π.Ε. και πλεονεκτήματα.	5
1.2.1 Ηλιακή ενέργεια	6
1.2.2 Αιολική ενέργεια	6
1.2.3 Βιομάζα	6
1.2.4 Γεωθερμική ενέργεια	6
1.2.5 Υδροηλεκτρική ενέργεια	7
1.3 Η ανάπτυξη των Α.Π.Ε. στην Ελλάδα	7
1.3.1 Η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα	8
1.3.2 Η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Κρήτη	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Ηλιακή ενέργεια και φωτοβολταϊκό στοιχείο.	10
2.1 Εισαγωγή στην ηλιακή ενέργεια	10
2.1.1 Ηλιακή ακτινοβολία	10
2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	11
2.2.1 Απορρόφηση της ακτινοβολίας από το φωτοβολταϊκό στοιχείο	12
2.2.2 Ο συντελεστής απορρόφησης	13
2.2.3 Η δημιουργία του φωτορεύματος	14
2.3 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο	16
2.3.1 Η χρήση του πυριτίου στα φωτοβολταϊκά στοιχεία	17
2.3.1.2 Οι διάφοροι τύποι των φωτοβολταϊκών στοιχείων του πυριτίου	19
2.3.1.3 Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων άλλων υλικών (λεπτών επιστρώσεων)	20
2.3.2 Η διαδικασία παρασκευής του ράβδου πυριτίου	21
2.4 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού στοιχείου	22
2.4.1 Η χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$ του φωτοβολταϊκού στοιχείου και το σημείο της μέγιστης ισχύος (σταθερές συνθήκες)	23
2.4.1.1 Maximum Power Point Tracking (MPPT), (Σημείο μέγιστης λειτουργίας)	25
2.4.1.2 Ο συντελεστής πλήρωσης FF (Fill Factor) του φωτοβολταϊκού στοιχείου	25
2.4.1.3 Συντελεστής απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου	25
2.4.2 Λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου με επίδραση των εξωτερικών παραμέτρων (μεταβαλλόμενες συνθήκες)	26
2.4.3 Οι πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων (Standard Test Conditions, STC)	29
2.5 Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων	29
2.6 Απολαβή και χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας	30
2.7. Κατηγορίες των Φ/Β συστημάτων	31
2.8 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Φ/Β συστημάτων έναντι των υπολοίπων Α.Π.Ε.	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Φωτοβολταϊκό πλαίσιο.	36
3.1 Γενικά	36
3.2 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων	36
3.3 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πλαισίων	36
3.4 Απόδοση του Φωτοβολταϊκού πλαισίου	36

3.5 Επίδραση εξωτερικών παραμέτρων(θερμοκρασίας και ρύπανσης) κατά την λειτουργία του πλαισίου.	37
3.6 Ισχύς αιχμής του φωτοβολταϊκού πλαισίου.	38
3.7 Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.	39
3.7.1 Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά.	39
3.7.2 Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων παράλληλα.	39
3.7.3 Η μικτή σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.	40
3.8 Διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Παράγοντας γήρανσης του πλαισίου)	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Ηλεκτρονικοί μετατροπείς - αντιστροφείς ισχύος.	42
4.1 Γενικά για τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.	42
4.2 Μετατροπέας DC/DC.	43
4.2.1 Τεχνική της Διαμόρφωσης του Εύρους των Παλμών.	44
4.2.1.1 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (BUCK).	45
4.2.1.2 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (BOOST).	47
4.2.1.3 Μικτός (υποβιβασμού – ανύψωσης) μετατροπέας (BUCK – BOOST).	48
4.2.1.4 Μετατροπέας Cύκ.	49
4.2.1.5 Μετατροπέας με πλήρη γέφυρα.	50
4.3 Αντιστροφείς DC/AC.	51
4.4 Η ηλεκτρική απομόνωση των μετατροπέων ισχύος.	51
4.5 Αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας (Anti-Islanding detection).	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Οι απώλειες στα φωτοβολταϊκά συστήματα.	54
5.1 Γενικά για τις απώλειες στα φωτοβολταϊκά συστήματα.	54
5.2 Υπολογισμός της απόδοσης διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού πάρκου (park performance).	54
5.2.1 Υπολογισμός της τελικής παραγωγής (final yield).	54
5.2.2 Υπολογισμός της παραγωγής αναφοράς (reference yield).	55
5.2.3 Υπολογισμός του βαθμού απόδοσης (performance ratio)	55
5.2.3.1 Ο συνολικός συντελεστής απωλειών ($\eta_{\text{απ}}$).	55
5.2.4 Υπολογισμός παραγωγής συστοιχίας (array yield).	56
5.2.5 Υπολογισμός των απωλειών του συστήματος (system losses).	56
5.2.6 Υπολογισμός απωλειών μεταξύ των συστοιχιών (array capture losses)	56
5.2.7 Υπολογισμός του συντελεστή δυναμικού (capacity factor).	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Φωτοβολταϊκό πάρκο Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ.	58
6.1 Το φωτοβολταϊκό πάρκο Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ.	58
6.2 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πάρκου Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ.	59
6.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πάρκου Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ.	59
6.2.2 Οι εργασίες εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού πάρκου.	59
6.2.3 Ο βασικός εξοπλισμός του φωτοβολταϊκού πάρκου.	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Ενεργειακή ανάλυση φωτοβολταϊκού πάρκου Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ.	70
7.1 Εισαγωγή.	70
7.2 Υπολογισμός της μέσης μηνιαίας ενεργειακής απολαβής (kWh/m ²)	71
7.3 Υπολογισμός της θεωρητικής παραγωγής φωτοβολταϊκών πλαισίων ($P_{\text{ΦΒ}}$).	71
7.4 Υπολογισμός της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_c)	72
7.5 Υπολογισμός του θερμικού Συντελεστή N_{temp} (%).	73
7.6 Υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος με απώλειες θερμοκρασίας (E_{θ})	74
7.7 Η επίδραση της ρύπανσης στις απώλειες (E_p).	75
7.8 Υπολογισμός απωλειών εσωτερικού δικτύου ($E_{\text{εσ}}$).	76
7.9 Υπολογισμός απωλειών αντιστροφή ($E_{\text{αντ}}$).	77

7.10 Υπολογισμός απωλειών μετασχηματιστή ($E_{μετ}$)	78
7.11 Υπολογισμός απωλειών διαθεσιμότητας και διασύνδεσης($E_{διαθ}$).....	79
7.12 Υπολογισμός συνολικού συντελεστή απωλειών του συστήματος ($\eta_{σππ}$)	80
7.13 Υπολογισμός της τελικής παραγωγής (final yield).....	81
7.14 Υπολογισμός παραγωγής αναφοράς (reference yield)	82
7.15 Υπολογισμός της παραγωγής συστοιχίας (array yield)	83
7.16 Υπολογισμός απωλειών μεταξύ συστοιχιών (array capture losses)	84
7.17 Υπολογισμός απωλειών συστήματος (system losses)	85
7.18 Υπολογισμός βαθμού απόδοσης (performance ratio)	86
7.19 Υπολογισμός απόδοσης ανά εγκατεστημένο kW (YIELD), και υπολογισμός του συντελεστή δυναμικού (CAPACITY FACTOR) του φωτοβολταϊκού πάρκου.	87
7.20 Αποτελέσματα συντελεστών απωλειών φωτοβολταϊκού πάρκου.	88
Κεφάλαιο 8 – Συμπεράσματα και προτάσεις.....	90
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Πίνακες υπολογισμών.	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή στις Α.Π.Ε.

1.1 Γενική εισαγωγή και περιγραφή των Α.Π.Ε. .

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε) ορίζονται οι ενεργειακές πηγές (ο ήλιος, το νερό, ο άνεμος, η βιομάζα κλπ) οι οποίες και υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον και ανανεώνονται μέσω του κύκλου της φύσης και έτσι θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες. Οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας είναι οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, σχεδόν αποκλειστικά μέχρι και τις αρχές του 20ου αιώνα, οπότε και στράφηκε στην εντατική χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων. Η ευρύτερη αξιοποίηση των Α.Π.Ε. καθώς γενικά και η ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών και μορφών ενέργειας που μπορούν και δεσμεύουν το δυναμικό τους παρουσιάστηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1979 και παγιώθηκε την τελευταία δεκαετία, μετά και την συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων στον κόσμο. Η παγκόσμια οικονομία έχει γνωρίσει εδώ και δυο αιώνες μια σταθερή και πρωτοφανή ανάπτυξη που υποστηρίχθηκε από την εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων. Αυτή η τάση ανάπτυξης φαίνεται να συνεχίζεται, αλλά είναι επίσης ευρέως αποδεκτό ότι ο κόσμος σε μεγάλο βαθμό θα συνεχίσει να βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα για να καλύψει τις ενεργειακές του ανάγκες τουλάχιστον στο πρώτο μισό του 21ου αιώνα.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν προκύψει αυξανόμενες ανησυχίες για τις περιβαλλοντικές επιδράσεις της μεταβολής του κλίματος στον πλανήτη από την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα στα οποία περιλαμβάνεται και το διοξείδιο του άνθρακα CO₂, τα οποία και είναι αποτέλεσμα της αλόγιστης καύσης των ορυκτών καυσίμων (υδρογονανθράκων), καθώς και από την δημιουργία ραδιενεργών αποβλήτων από την χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Η υπερθέρμανση του πλανήτη είναι η βασικότερη επίπτωση του φαινομένου αυτού, με τα αποτελέσματα να είναι ορατά πλέον σε κάθε γωνιά του πλανήτη.

Η σταθεροποίηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα απαιτεί την μείωση των εκπομπών σε επίπεδο σημαντικά χαμηλότερο από το σημερινό, με την χρήση μιας δέσμης μέτρων που περιλαμβάνουν την μείωση της ζήτησης σε ενέργεια και την αύξηση του βαθμού απόδοσης των ενεργειακών εγκαταστάσεων, την αύξηση χρήσης του φυσικού αερίου, την χρήση τεχνολογιών δέσμεισης του διοξειδίου του άνθρακα CO₂ και φυσικά την αύξηση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παγκοσμίως.

Οι Α.Π.Ε. λοιπόν δημιουργήθηκαν για να αντικαταστήσουν τις γνωστές μας πλέον συμβατικές μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ορυκτά καύσιμα, πετρέλαιο). Γνωρίζοντας λοιπόν ότι οι συμβατικές αυτές μορφές καθημερινά εξαντλούνται με πολύ γρήγορο ρυθμό καθώς οι σύγχρονες κοινωνίες καταναλώνουν καθημερινά τεράστιες ποσότητες ενέργειας για τη θέρμανση χώρων (κατοικιών και γραφείων), τα μέσα μεταφοράς, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και για τη λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων, οι Α.Π.Ε. έρχονται να δώσουν λύση στο παγκόσμιο αυτό ενεργειακό πρόβλημα του πλανήτη.

Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μία σημαντική εγχώρια πηγή ενέργειας, με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Συνεισφέρουν σημαντικά στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό και εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συντελούν και στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς η αξιοποίησή τους δεν το επιβαρύνει, αφού δεν συνοδεύεται από παραγωγή ρύπων ή αερίων που ενισχύουν τον κίνδυνο για κλιματικές αλλαγές. Έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο πρωταρχικός υπεύθυνος για τη ρύπανση του περιβάλλοντος, καθώς σχεδόν το 95% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης οφείλεται στην παραγωγή, το μετασχηματισμό και τη χρήση των συμβατικών καυσίμων.

1.2 Κατηγορίες των Α.Π.Ε. και πλεονεκτήματα.

Οι μορφές των Α.Π.Ε. που σήμερα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας από το περιβάλλον είναι η ηλιακή και αιολική ενέργεια, η υδάτινη ενέργεια, τόσο στη ξηρά (μικρά υδροηλεκτρικά) όσο και στη θάλασσα (ενέργεια των κυμάτων), τη βιομάζα, αλλά και η γεωθερμία. Σε μια σύντομη περιγραφή των μορφών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βλέπουμε παρακάτω :

- **Αιολική Ενέργεια:** Η κινητική ενέργεια που παράγεται από τη δύναμη του ανέμου και μετατρέπεται σε απολήψιμη μηχανική ενέργεια ή / και σε ηλεκτρική ενέργεια.
- **Υδροηλεκτρική Ενέργεια:** Τα Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα (μέχρι 10 MW ισχύος) αξιοποιούν τις υδατοπτώσεις, με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή και το μετασχηματισμό της σε απολήψιμη μηχανική ενέργεια.
- **Βιομάζα:** είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, που μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια με μία σειρά διεργασιών των φυτικών οργανισμών χερσαίας ή υδρόβιας προέλευσης.

Ηλιακή Ενέργεια, η οποία περιλαμβάνει τις παρακάτω μορφές ενέργειας:

- **Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα:** Μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα.
- **Βιοκλιματικός σχεδιασμός και παθητικά ηλιακά συστήματα:** Αφορούν αρχιτεκτονικές λύσεις και χρήση κατάλληλων δομικών υλικών για τη μεγιστοποίηση της απ' ευθείας εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση, κλιματισμό ή φωτισμό.
- **Φωτοβολταϊκά Ηλιακά Συστήματα:** Μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια.
- **Γεωθερμική Ενέργεια:** η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμπεριέχεται σε φυσικούς ατμούς, σε επιφανειακά ή υπόγεια θερμά νερά και σε θερμά ξηρά πετρώματα.
- **Υδρογόνο:** Το υδρογόνο αποτελεί το 90% του σύμπαντος και θα αποτελέσει ένα νέο καύσιμο που θα χρησιμοποιούμε στο μέλλον.

Η ανάπτυξη των Α.Π.Ε. παρουσιάζει ένα πλήθος από πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μορφών ενέργειας. Τα κύρια εκ των οποίων και είναι τα εξής :

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικούς ενεργειακούς πόρους.
- Απαντούν στο ενεργειακό πρόβλημα για τη σταθεροποίηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και των υπόλοιπων αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, υποκαθιστώντας τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας από συμβατικές πηγές οδηγούν σε ελάτπωση εκπομπών από άλλους ρυπαντές π.χ. οξείδια θείου και αζώτου που προκαλούν την όξινη βροχή.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή).
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ δημιουργούν σημαντικό αριθμό νέων θέσεων εργασίας, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας).
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

1.2.1 Ηλιακή ενέργεια.

Ο ήλιος αποτελεί μια τεράστια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Από την ηλιακή ενέργεια έχουμε ένα πλήθος εκμεταλλεύσιμων μορφών ενέργειας(Ενεργειακά ηλιακά συστήματα, Βιοκλιματικός αρχιτεκτονικός σχεδιασμός κτιρίων, Φωτοβολταϊκά συστήματα κ.α.)

Η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο διαδεδομένη πηγή ενέργειας και αυτό γιατί μπορούμε να έχουμε την αξιοποίηση της με την απ' ευθείας μετατροπή της σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων και γενικά των φωτοβολταϊκών πάρκων.

Εκτός όμως από την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική, μπορεί να αξιοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές όπως είναι η θέρμανση του νερού και η αξιοποίηση των τοπικών κλιματικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων για την θέρμανση την ψύξη και τον φωτισμό στον οικιακό τομέα με την ανάπτυξη του βιοκλιματικού αρχιτεκτονικού σχεδιασμού των κτιρίων, με σκοπό την βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου.

1.2.2 Αιολική ενέργεια.

Ο άνεμος όπως και ο ήλιος αποτελούν ανεξάντλητες πηγές ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί γενεσιουργό αιτία της αιολικής ενέργειας, και αυτό γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο προκαλεί την μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργεί δηλαδή τους ανέμους.

Συγκεκριμένα, η εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου γίνεται μέσω ανεμοκινητήρων, που τη μετατρέπουν σε ωφέλιμη μηχανική ενέργεια, και μέσω ανεμογεννητριών, ανεμοκινητήρων δηλαδή που διαθέτουν ηλεκτρογεννήτρια, που τη μετατρέπουν απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια ώριμη πλέον και συνεχώς εξελισσόμενη μορφή των Α.Π.Ε. ανά τον κόσμο καθώς έχει παρουσιάσει μεγάλη πρόοδο στην τεχνολογία της.

Καλύπτεται έτσι ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών: η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη λειτουργία αντλιών νερού στην ύδρευση και άρδευση περιοχών, για θέρμανση αγροτικών μονάδων και κατοικιών, για τη λειτουργία εγκαταστάσεων αφαλάτωσης νερού σε συνδυασμό με άλλες πηγές ενέργειας κ.ά., ενώ η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να τροφοδοτεί το ηλεκτρικό δίκτυο. Για την παραγωγή αξιόλογων ποσών ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργούνται συγκροτήματα από πολλές ανεμογεννήτριες μαζί μεγάλης ονομαστικής ισχύος (800 kW – 3MW), τα οποία ονομάζονται αιολικά πάρκα. Στην Ελλάδα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ανεμογεννητριών ξεπερνά τα 750 MW.

1.2.3 Βιομάζα.

Με τον όρο ενέργεια από βιομάζα αναφερόμαστε στην ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από τα υλικά ή τα υποπροϊόντα και κατάλοιπα της φυσικής, ζωικής, δασικής και αλιευτικής παραγωγής, καθώς επίσης και από τα υποπροϊόντα που προέρχονται από την βιομηχανική επεξεργασία των υλικών αυτών. Ενέργεια από βιομάζα μπορεί να παραχθεί από τα αστικά λύματα και τα σκουπίδια, από τις φυσικές ύλες που προέρχονται είτε από φυσικά οικοσυστήματα (όπως δάση), είτε από τεχνητές φυτείες αγροτικού ή δασικού τύπου.

Η βιομάζα είναι ανανεώσιμη αφού αποτελεί αποθήκη ενέργειας της οποίας πηγή είναι ο ήλιος, καθώς και κατά την καύση της δεν παράγεται διοξείδιο του άνθρακα CO₂. Η βιομάζα είναι λοιπόν αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών. Έτσι λοιπόν η βιομάζα είναι ευρύτερα διαθέσιμη από τα στερεά ορυκτά καύσιμα καθώς και από μια ποικιλία αποβλήτων (όπως τα βιομηχανικά, αγροτικά κ.α.), τα οποία και παρέχουν μια ανανεώσιμη πηγή καυσίμου.

Η βιομάζα που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι σε ακατέργαστη μορφή όπως καυσόξυλα, πυρηνόξυλο, σπασμένα κουκούτσια κ.λπ. ή επεξεργασμένη για την εύκολη χρήση, αποθήκευση και μεταφορά όπως μπρικόπτες (κυρίως σε ενεργειακά τζάκια ή σόμπες).

1.2.4 Γεωθερμική ενέργεια.

Γεωθερμία χαρακτηρίζεται η ενέργεια που εκμεταλλεύεται ο άνθρωπος από τα επιφανειακά ή βαθύτερα στρώματα των γεωλογικών σχηματισμών και του υπόγειου ή επιφανειακού υδροφόρου ορίζοντα της Γης.

Η ενέργεια που προέρχεται από τα επιφανειακά στρώματα της Γης ονομάζεται αβαθής γεωθερμία, ενώ όταν η ενέργεια αυτή προέρχεται από τα έγκατα της χαρακτηρίζεται ως γεωθερμικό δυναμικό.

Η γεωθερμική αντλία θερμότητας εκμεταλλεύεται την επιφανειακή ενέργεια του φλοιού της Γης και με την βοήθεια της ηλεκτρικής ενέργειας την μετατρέπει σε ένα ωφέλιμο θερμικό ή ψυκτικό σύστημα για να χρησιμοποιηθεί ως κλιματισμός στην εγκατάσταση.

Η φιλοσοφία λειτουργίας ενός γεωθερμικού συστήματος βασίζεται στην ανταλλαγή θερμικών και ψυκτικών φορτίων μεταξύ του εδάφους και του κλιματιζόμενου χώρου.

Η γεωθερμική αντλία θερμότητας είναι υπεύθυνη για την μεταφορά οποιουδήποτε ενεργειακού φορτίου. Κατά την χειμερινή περίοδο απορροφά από το έδαφος ένα υψηλό για την εποχή θερμικό φορτίο και το αποδίδει στην εγκατάσταση ενώ κατά την περίοδο του

θέρους μεταφέρει το ενεργειακό φορτίο από τον κλιματιζόμενο χώρο προς το έδαφος, με στόχο την ψύξη της εγκατάστασης. Έτσι λοιπόν τα συστήματα με γεωθερμική ενέργεια παράγουν θέρμανση, ψύξη, και ζεστό νερό, στις διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται.

1.2.5 Υδροηλεκτρική ενέργεια.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια από τις πρώτες μορφές ενέργειας. Στην υδροηλεκτρική ενέργεια εκμεταλλευόμαστε την υδατόπτωση σε συγκεκριμένες περιοχές αυξημένης υδατόπτωσης, με την συλλογή των όμβριων υδάτων κατασκευάζοντας φράγματα καθώς και την δημιουργία υδατινών ταμιευτήρων μεγάλων ποταμών. Η υδατόπτωση από μεγάλα ύψη προκαλεί την κίνηση των υδροστροβίλων και ακολούθως την κίνηση των ηλεκτρογεννητριών, για την παραγωγή ενέργειας.

Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα (ισχύος μέχρι 10 MW) αξιοποιούν τις υδατοπτώσεις, με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εγκαθίστανται σε μικρά σχετικά ρέματα και έχουν περιορισμένη επίπτωση στο περιβάλλον.

Τέλος για την κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού έργου θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά τα κριτήρια επιλογής της θέσης καθώς και όλης της σχεδίασης του έργου, με στόχο να μην προκαλέσει κάποια οικολογική καταστροφή του μέρους.

1.3 Η ανάπτυξη των Α.Π.Ε. στην Ελλάδα.

Σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Κιότο (11 Δεκεμβρίου 1997), τα κράτη μέλη της Ε.Ε. οφείλουν συλλογικά να μειώσουν τις εκπομπές των έξι αερίων του θερμοκηπίου κατά 8% μεταξύ 2008 – 2012, σε με τα επίπεδα του 1990. Εάν δεν επιτευχθεί η μείωση της ρύπανσης και δημιουργηθεί μια στασιμότητα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, τότε η μέση θερμοκρασία του περιβάλλοντος μέχρι το 2100 θα ανέλθει από 1,4 βαθμούς Κελσίου έως και 5,8 βαθμούς Κελσίου. Ο στόχος της μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου διαφοροποιείται για κάθε κράτος μέλος της Ε.Ε. με δεδομένη όμως την διατήρηση του καθολικού στόχου. Για την επίτευξη του καθολικού στόχου του Πρωτοκόλλου του Κιότο (Παγκόσμια μείωση 5,2% των εκπομπών αερίων, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990) με μειωμένο κόστος, προτείνονται μεταξύ άλλων μέτρων και τρεις *ευέλκτοι μηχανισμοί* : Η εμπορία εκπομπών (Emissions Trading: ET) τα έργα κοινής εφαρμογής (Joint Implementation: JI) και ο μηχανισμός καθαρής ανάπτυξης (Clean Development Mechanism: CDM). Για την Ευρωπαϊκή Ένωση και για τα κράτη μέλη της, έχει προβλεφθεί πιλοτική περίοδος εφαρμογής του Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών για την περίοδο 2005-2007, σύμφωνα με την οδηγία 2003/87 η οποία θα αφορά μόνο τις εκπομπές CO₂ ενώ το πρόστιμο για κάθε επιπλέον εκπεμπόμενο τόνο διοξειδίου του άνθρακα θα είναι 40€/tCO₂.

Οι υποχρεώσεις της Ελλάδας προβλέπουν μια συγκράτηση του ρυθμού αύξησης κατά το έτος του 2010 του διοξειδίου του άνθρακα κατά 27% σε σχέση με το έτος βάση 1990.

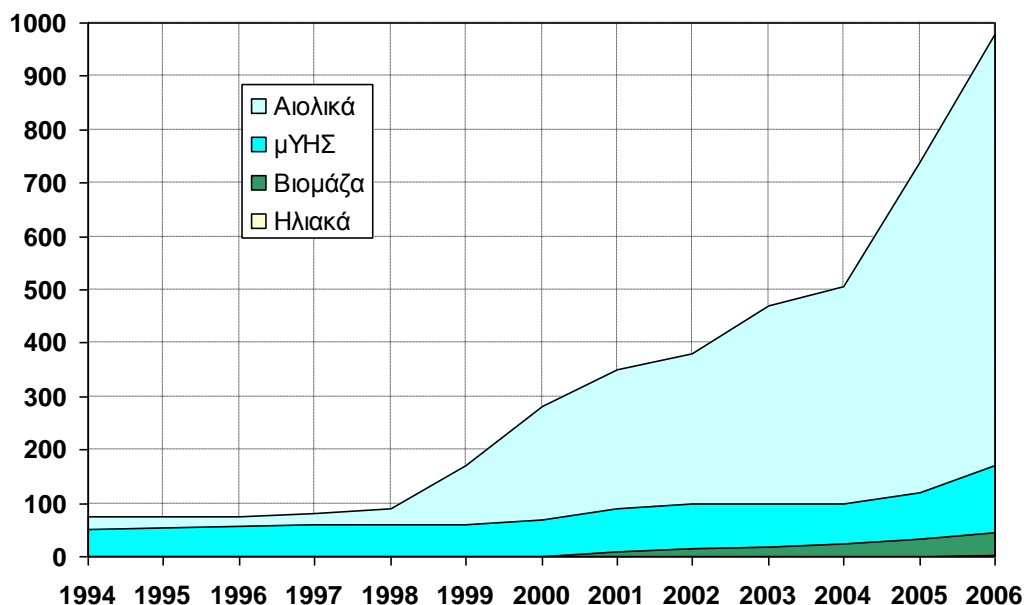
Σ' αυτήν την κατεύθυνση κινείται και η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές στην εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας η οποία προβλέπει ενδεικτικό στόχο κάλυψης από ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές ίσο με 20,1% της ακαθάριστης κατανάλωσης ενέργειας κατά το έτος 2010 για την Ελλάδα.

Είναι λοιπόν εμφανής η ανάγκη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. . Από εκτιμήσεις του Υπουργείου Ανάπτυξης και της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.) η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας θα συνεχίσει να αυξάνεται με μέσο όρο 4% για το ηπειρωτικό σύστημα και 5,5% για τα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα μέχρι και να κινηθεί ενιαία σε ποσοστό αύξησης 3,6% για όλη τη χώρα.

Με αυτούς τους ρυθμούς βλέπουμε ότι η Ελλάδα κινείται εκτός των προβλεπόμενων ορίων, σύμφωνα με τους ρυθμούς αύξησης αυτών, η Ελλάδα το 2010 θα έχει αυξήσει τους ρύπους της κατά 35,8%. Το ποσοστό αυτό ξεπερνά τα όρια που έχουν θεσπισθεί από το πρωτόκολλο του Κιότο.

Η μείωση λοιπόν των εκπομπών του αερίου του θερμοκηπίου επιβάλει την στροφή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, με την κατασκευή σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο, μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας καθώς και η κατασκευή μικρών φραγμάτων και αιολικών πάρκων είναι από τα μέτρα που κινούνται προς την κατεύθυνση μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου, ταυτόχρονα με την προσπάθεια κάλυψης της συνεχώς αυξημένης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η εγκατάσταση και η χρήση των Α.Π.Ε. αποτελούν ενδεικτική λύση για την μείωση των εκπομπών του αερίου του θερμοκηπίου στην Ελλάδα. Η εγκατάσταση των Α.Π.Ε. στην Ελλάδα θεωρείται ιδανική και λόγω της μορφολογίας της που ευνοεί την ανάπτυξη τους.



Σχ.1.1 Εγκατεστημένη ισχύς Α.Π.Ε. στην Ελλάδα.

1.3.1 Η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα.

Η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα έκανε την εμφάνιση της ουσιαστικά την δεκαετία το '80, βρίσκοντας εφαρμογές αρχικά σε πειραματικά προγράμματα τεχνολογικής έρευνας και ανάπτυξης και συνέχισαν την ανάπτυξη τους κατά την δεκαετία του '90 και του '00. Η χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα αποτελεί κυρίως εγκαταστάσεις της ΔΕΗ για την τροφοδότηση με ηλεκτρική ενέργεια στα νησιά (Κύθνος, Αρκοί, Αντικύθηρα, Γαύδος, Σίφνος κ.λπ.), επίσης βρίσκουν εφαρμογή στην ηλεκτροδότηση του συνόλου του δικτύου φάρων από την αντίστοιχη υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού που έχει εγκαταστήσει πάνω από 1000 μικρά Φ/Β συστήματα σε όλη την Ελλάδα συνολικής ισχύος πάνω από 70 kWp έχοντας ηλεκτροδοτήσει με Φ/Β σχεδόν όλους τους φάρους, εφαρμογή σε αναμεταδότες σταθερής και κινητής τηλεφωνίας, σε αυτόνομα συστήματα τροφοδότησης απομακρυσμένων συνήθως από το δίκτυο της ΔΕΗ εγκαταστάσεων (π.χ. εξοχικών κατοικιών), καθώς και σε διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά πάρκα.



Σχ.1.2 Φ/Β Πάρκο της ΔΕΗ στην Κύθνο (1983) 100 kWp.

Η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα προήλθε από την θέσπιση αναπτυξιακών κινήτρων όπως τα διάφορα Επιχειρησιακά Προγράμματα. Συγκεκριμένα, το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ενέργειας ΕΠΕ κατά το Β' ΚΠΣ και το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα ΕΠΑΝ κατά το Γ' ΚΠΣ με τις Δράσεις 2.1.3 και 6.5. Σύμφωνα με τα οποία υπήρχε δυνατότητα επιδότησης των δαπανών εγκαταστάσεως ΑΠΕ και Συμπαράγωγής. Με την θέσπιση αυτών των κινήτρων τα φωτοβολταϊκά συστήματα κοστολογούνται με υψηλή τιμή πώλησης της kWh για τον ηλεκτρο-παραγωγό, ιδιαίτερα ελκυστική για τις συνθήκες ηλιοφάνειας της χώρας μας. Το μέτρο αυτό εφαρμόζεται ήδη σε χώρες όπως η Γερμανία, Ισπανία, Ιταλία, Κύπρος κλπ και πρόσφατα στην Ελλάδα, έχει στόχο να αυξηθεί η ζήτηση Φ/Β συστημάτων με αποτέλεσμα να γίνουν επενδύσεις για την μαζική παραγωγή τους που θα οδηγήσει σε οικονομικότερα προϊόντα λόγω της οικονομίας κλίμακας που θα πετύχουν.



Σχ.1.3 Φ/Β Πάρκο στην Σίφνο (1999) 60 kWp.



Σχ.1.4 Πάνω από 1000 φάρους στην χώρα μας ισχύος πάνω από 70 kWp τροφοδοτούνται με φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς και πλήθος από αυτόνομα τηλεπικοινωνιακά συστήματα σε αναμεταδότες σταθερής και κινητής τηλεφωνίας.

1.3.2 Η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Κρήτη.

Λόγο των κλιματολογικών συνθηκών που ευνοούν την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Κρήτη, έχουν αναπτυχθεί και λειτουργούν πλήθος εφαρμογών φωτοβολταϊκών συστημάτων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Ένας από τους πρώτους φωτοβολταϊκούς σταθμούς δημιουργήθηκε και λειτουργεί επιτυχώς στο νησί Γαύδος ισχύος 20 kWp , για την κάλυψη των αναγκών των 2 οικισμών, καθώς επίσης λειτουργούν και 22 αυτόνομες φωτοβολταϊκές μονάδες των 700 Wp ή κάθε μία. Επίσης η υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού έχει εγκαταστήσει στους περισσότερους φάρους του νησιού φωτοβολταϊκά συστήματα για την κάλυψη των αναγκών τους σε ηλεκτρική ενέργεια, καθώς και πλήθος εφαρμογών από αυτόνομα τηλεπικοινωνιακά συστήματα σε αναμεταδότες τηλεφωνίας βρίσκονται εγκατεστημένα στα βουνά της Κρήτης.

Επίσης φωτοβολταϊκές μονάδες έχουν εγκατασταθεί σε δυο συγκροτήματα παραδοσιακών ενοικιαζόμενων διαμερισμάτων (Άσπρος Ποταμός στο Ν.Λασιθίου και Μηλιά στο Ν.Χανίων), σε ένα ξενοδοχείο 50 κλινών (Elounda island village) και σε ένα ορειβατικό καταφύγιο (Καλλέργη), όπου καλύπτουν (με τη χρήση μπαταριών) όλες τις ανάγκες τους σε ηλεκτρισμό. Παράλληλα ένα σχολείο (στο Γούδουρα Ν. Λασιθίου) καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος των αναγκών του με Φ/Β. Επίσης στο Πρασσέ Χανίων λειτουργεί ηλιακό ψυγείο εγκατεστημένης ισχύος 8 kW. Υπάρχουν επίσης αρκετές άλλες επιχειρήσεις και μεγάλα ξενοδοχεία που έχουν εγκαταστήσει σημαντικές εγκαταστάσεις Φωτοβολταϊκών.

Στο ΑΤΕΙ Ηρακλείου έχει οργανωθεί Φ/Β Πάρκο (συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 4,3 kW) καλύπτοντας τις ανάγκες φωτισμού γειτονικών εργαστηρίων. Παράλληλα στο Πολυτεχνείο Κρήτης και στο ΑΤΕΙ Κρήτης υπάρχουν επίσης υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών στοιχείων με ανεμογεννήτριες.

Τέλος άλλες μικρότερες εγκαταστάσεις (π.χ. φωτιστικά δρόμων, ανεμόμετρα, μονάδες ελέγχου αντλιοστασίων κλπ.) εγκατεστημένες από ιδιώτες, την τοπική αυτοδιοίκηση, τις Δημοτικές Επιχειρήσεις Ύδρευσης και Αποχέτευσης (Ηρακλείου και Χανίων) και Εκπαιδευτικά Ιδρύματα λειτουργούν ήδη στην Κρήτη διαμορφώνοντας ένα καλό υπόβαθρο για την περαιτέρω ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών στο νησί.

Πολλοί ιδιώτες επίσης έχουν εγκαταστήσει Φ/Β στις οικίες τους για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τους. Συνήθως φωτισμός, λειτουργία τηλεόρασης και ψυγείου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Ηλιακή ενέργεια και φωτοβολταϊκό στοιχείο.

2.1 Εισαγωγή στην ηλιακή ενέργεια.

Ο ήλιος αποτελεί την απαραίτητη προϋπόθεση για την ύπαρξη κάθε είδους ζωής στον πλανήτη. Σχεδόν κάθε φυσική λειτουργία πάνω στην Γη είναι άμεσα εξαρτώμενη από την ύπαρξη του. Οι εποχιακές αλλαγές, οι εναλλαγές της μέρας με την νύχτα, η ανάπτυξη κάθε είδους χλωρίδας και συνεπώς η ύπαρξη της διατροφικής αλυσίδας που συντηρεί και την πανίδα του πλανήτη μας είναι όλα αποτέλεσμα της δράσης του ήλιου.

Ο ήλιος η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας που έχει γνωρίσει ο άνθρωπος. Ο ήλιος αποτελεί μια τεράστια και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, καθώς ακτινοβολεί κάθε δευτερόλεπτο περίπου 50 δισεκατομμύρια κιλοβατώρες ενέργειας πάνω στην γη. Αυτό αντιστοιχεί σε απόδοση ισχύος 150 εκατομμυρίων μεγάλων πυρηνικών εργοστασίων. Μόνο το 0,05% αυτής της ηλιακής ενέργειας θα επαρκούσε για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες όλου του πλανήτη.

Συγκεκριμένα, σε κάθε τετραγωνικό μέτρο του πλανήτη μας προσπίπτει ισχύς μόνο 1 kW. Παρόλο το μικρό μέγεθος της ισχύος αυτής, η ενέργεια που δέχεται η Γη σε όλη της την επιφάνεια είναι 20.000 φορές μεγαλύτερη από την ενέργεια που ξοδεύει όλη η ανθρωπότητα για τις ανάγκες της με οποιαδήποτε μορφή.

Σε αντίθεση, κάθε κιλοβάτώρα ηλεκτρισμού που από το δίκτυο της ΔΕΗ, που παράγεται από ορυκτά καύσιμα επιβαρύνει την ατμόσφαιρα με ένα τουλάχιστον κιλό διοξειδίου του άνθρακα ($1 \text{ kWh} = 1 \text{ kg CO}_2$).

Η εκμετάλλευση λοιπόν της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω των φωτοβολταϊκών αποτελεί αδιαμφισβήτητο ένα μεγάλο περιβαλλοντικό πλεονέκτημα.

2.1.1 Ηλιακή ακτινοβολία.

Γνωρίζουμε ότι η πυκνότητα ισχύος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας η οποία και εκπέμπεται από τα σώματα, προέρχεται λόγω της θερμοκρασία τους. Έτσι η πυκνότητα της ισχύος είναι ανάλογη του μήκους κύματος (στην περίπτωση μας της ηλιακής ακτινοβολίας), της θερμοκρασίας του σώματος καθώς και της φύσης του σώματος που εκπέμπει την ακτινοβολία.

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φάσμα συχνοτήτων ακτινοβολίας με μήκος κύματος από 0,3 έως 1,7 μm , με μέγιστο ενεργειακό περιεχόμενο στην περιοχή των 0,5 μm .

Το μέγεθος που περιλαμβάνει την συνολική ηλιακή ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια πηγή ακτινοβολίας και προσπίπτει σε μια επιφάνεια ή την διαπερνά, ορίζεται σαν πυκνότητα ισχύος (Irradiance) ή ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και έχει μονάδα μέτρησης σε W/m^2 , επίσης συμβολίζεται με το γράμμα G (όπως θα δούμε και πιο κάτω). Μπορούμε λοιπόν να διαπιστώσουμε ότι η τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται την κάθε χρονική στιγμή από την ώρα, από την θέση του ήλιου την συγκεκριμένη χρονική στιγμή, καθώς και από τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν. Καταλαβαίνουμε ότι ο σχεδιασμός μίας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης απαιτεί την συλλογή στοιχείων της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας για την περιοχή εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την απόσταση την οποία και βρίσκεται ο ήλιος από την γη, η οποία και όπως γνωρίζουμε μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του έτους. Έτσι η ηλιακή ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο δεν φτάνει όλη στην γη. Ένα μέρος από την συνολική εκπεμπόμενη ακτινοβολία απορροφάτε από τα μόρια του αέρα, τα σύννεφα κλπ., ένα άλλο διαχέεται (διάχυτη) εντός της ατμόσφαιρας και ένα τρίτο προσπίπτει απ' ευθείας στην επιφάνεια του συλλέκτη (απ' ευθείας (άμεση) ή ακτινική ακτινοβολία). Έτσι λοιπόν στην επιφάνεια της γη φτάνει η απ' ευθείας ακτινοβολία ή άμεση ακτινοβολία (Beam), που εξαρτάται από την ατμόσφαιρα (σύννεφα, υγρασία κ.α.) και η διάχυτη ακτινοβολία (Diffuse), που εξαρτάται από την επιφάνεια που βρίσκεται η φωτοβολταϊκή συστοιχία. Η συνολική ακτινοβολία που καταλήγει τελικά στον συλλέκτη (Global Irradiation, συμβολίζεται με το γράμμα G) αποτελείται από την απ' ευθείας ακτινοβολία καθώς και από την διάχυτη ακτινοβολία που διαχέεται στην ατμόσφαιρα και από την διάχυτα ανάκλαση που δέχεται από το έδαφος και παράπλευρα αντικείμενα (albedo radiation).

Αν θεωρήσουμε ότι στην ατμόσφαιρα δεν υπάρχουν σύννεφα, τότε μπορούμε να πούμε ότι η πυκνότητα της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας στην γήινη ατμόσφαιρα ονομάζεται αέριος μάζα (Air mass) ή AM. Η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας στο διάστημα κυμαίνεται σε μικρά όρια περί μέση τιμή $G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$, ονομάζεται ηλιακή σταθερά και σημειώνεται ως AM0. Το μήκος της αέριας μάζας, αν αγνοηθεί η καμπυλότητα της γης, ισούται με το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας δια του συνημίτονου της ζενιθιακής γωνίας θ_z , δηλαδή της γωνίας που σχηματίζει η ευθεία γη - ήλιος με την κατακόρυφο (ζενίθ) στο συγκεκριμένο σημείο. Ηλιακή ακτινοβολία που σημειώνεται AM1,5 με πυκνότητα περίπου 1000 W/m^2 , η οποία αντιστοιχεί σε μία μέγιστη ακτινοβολία που δέχεται μία κάθετη προς αυτή επιφάνεια υπό τις πιο ευνοϊκές συνθήκες (μεσημέρι καλοκαιριού, καθαρή και ξερή ατμόσφαιρα), ονομάζεται ακτινοβολία ενός ήλιου και χρησιμοποιείται για την έκφραση της ισχύος αιχμής (peak)- W_p των Φ/Β στοιχείων, η οποία και λαμβάνεται ως η ονομαστική ισχύς αναφοράς αυτών.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας, η οποία εξαρτάται από την κίνηση της γης περί τον ήλιο, μπορεί να υπολογίζεται με ακρίβεια, με βάση γεωμετρικές σχέσεις. Αντίθετα η μείωση που υφίσταται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διαδρομή της στην ατμόσφαιρα, εξαρτάται από την κατάστασή της και αποτελεί στατιστικό μέγεθος.

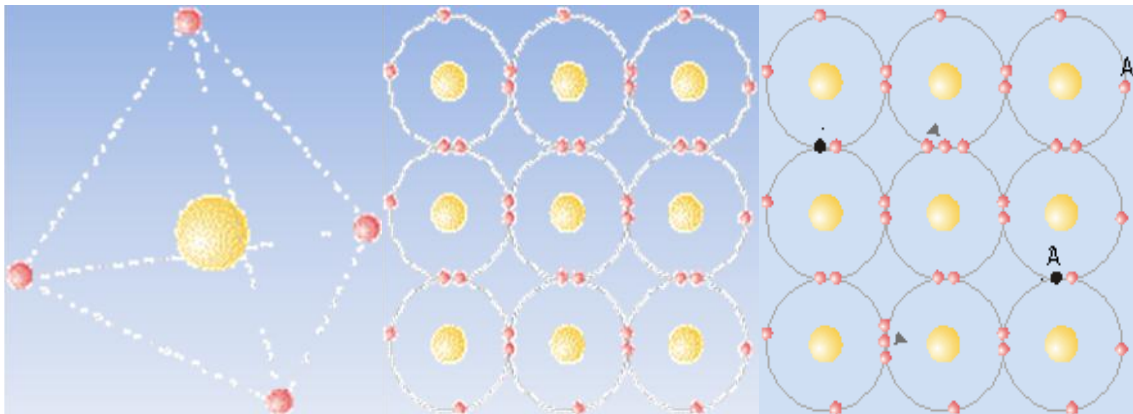
2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας και η μετατροπή της για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται σήμερα σχεδόν αποκλειστικά μέσω των Φωτοβολταϊκών - Φ/Β συστημάτων.

Η κατηγοριοποίηση των σωμάτων ανάλογα με την ηλεκτρική τους συμπεριφορά αποτελεί τρεις κατηγορίες, τους αγωγούς, τους μονωτές και τους ημιαγωγούς.

Οι ημιαγωγοί αν βρεθούν μέσα σε κατάλληλες συνθήκες τότε μπορούν να εμφανίσουν τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτά των άλλων δύο κατηγοριών. Άρα λοιπόν μπορούν να εμφανιστούν είτε σαν αγωγοί είτε σαν μονωτές.

Κάθε άτομο το οποίο και περιέχεται στην ύλη αποτελείται από τον πυρήνα και από τα ηλεκτρόνια που περιφέρονται γύρω από αυτόν, τοποθετημένα πάνω σε στοιβάδες. Ηλεκτρόνια σθένους είναι τα ηλεκτρόνια τα οποία που βρίσκονται μακριά από τον πυρήνα δηλαδή στην εξωτερική στοιβάδα σθένους. Το κάθε άτομο προσπαθεί να συμπληρώσει στην εξωτερική του στοιβάδα σθένους 8 ηλεκτρόνια. Το άτομο του πυριτίου στην εξωτερική στοιβάδα σθένους περιέχει 4 ηλεκτρόνια, όπως φαίνεται στο σχήμα και στο κέντρο του βρίσκεται ο πυρήνας του.



Σχ.2.1 Δομή ατόμου του πυριτίου (Si) με τα ηλεκτρόνια και τον πυρήνα του, κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου με τα 8 ηλεκτρόνια στην στοιβάδα σθένους και η μετακίνηση ενός ηλεκτρονίου A σε άλλο άτομο και η θέση που γίνεται σπή.

Έτσι το άτομο του πυριτίου για να μπορέσει να συμπληρώσει με τα 8 ηλεκτρόνια την εξωτερική του στοιβάδα σθένους συνεργάζεται με άλλα 4 άτομα, που το περιβάλλουν στο χώρο και συνεισφέρουν ανά δύο από ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι σχηματίζεται το κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου.

Βάση λοιπόν της κατηγοριοποίησης των σωμάτων ανάλογα με την ηλεκτρική τους συμπεριφορά που αναφέραμε, στους αγωγούς τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας είναι πολύ ευκίνητα και σ' αυτήν την ευκινησία οφείλονται οι αγωγίμες ιδιότητες του υλικού. Στους μονωτές ηλεκτρόνια σθένους είναι πολύ ισχυρά συνδεδεμένα με τον πυρήνα και αυτό λόγω των μονωτικών του ιδιοτήτων των μονωτών. Στους ημιαγωγούς τα εξωτερικά ηλεκτρόνια σθένους είναι συνδεδεμένα χαλαρά με τον πυρήνα, αλλά χωρίς να παρουσιάζουν την ευκινησία των ηλεκτρονίων των αγωγών.

Σε περίπτωση που για κάποιο λόγο ένα ηλεκτρόνιο αποκτήσει μια παραπάνω ενέργεια, τότε μπορεί αυτό να σπάσει τους δεσμούς του με τον πυρήνα και να φύγει απ' αυτόν, δηλαδή να πάει σε άλλο άτομο. Έτσι λοιπόν η θέση από την οποία και θα φύγει το ηλεκτρόνιο είναι περιοχή με ηλεκτρικό έλλειμμα και παρουσιάζει θετικό φορτίο το οποίο και είναι ίσο με αυτό του ηλεκτρονίου που έφυγε και το οποίο ονομάζεται σπή.

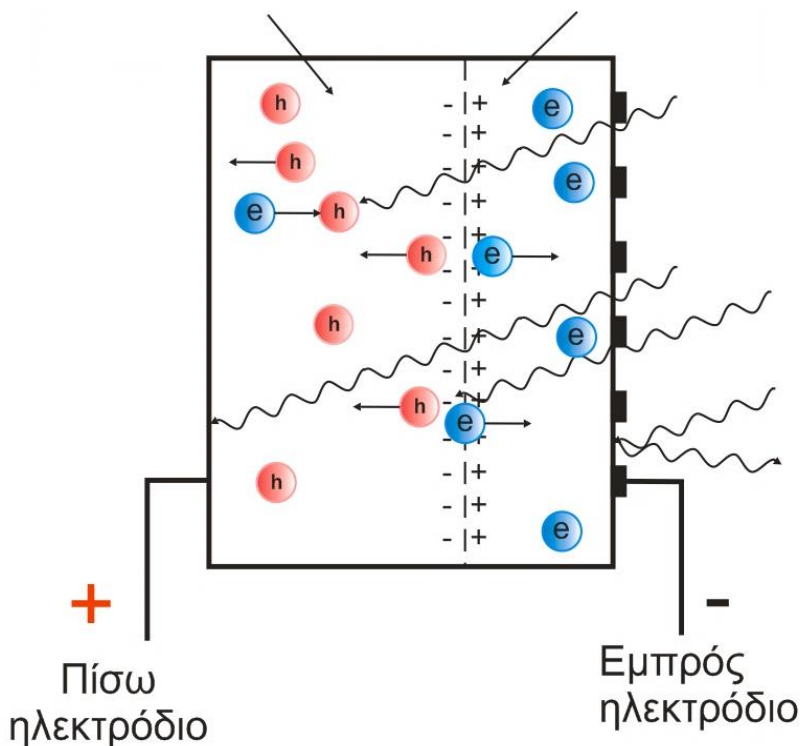
Ένας λοιπόν τρόπος με τον οποίο ένα ηλεκτρόνιο αποκτά την παραπάνω αυτή ενέργεια ώστε να σπάσει τους δεσμούς του με τον πυρήνα και να φύγει από αυτόν είναι αν του προσφέρουμε θερμότητα ή αν το φωτίσουμε.

Το φως αποτελείται από μικρά σωματίδια, που λέγονται φωτόνια και τα οποία μεταφέρουν ενέργεια. Έτσι όταν φωτιστεί ο ημιαγωγός κάποια από τα φωτόνια συγκρούονται με τα ηλεκτρόνια σθένους της εξωτερικής στοιβάδας και μεταβιβάζουν σ' αυτά όλη τους την ενέργεια. Βλέπουμε λοιπόν ότι σε περίπτωση που φωτιστεί ένας κρύσταλλος πυριτίου, τότε λόγω της ενέργειας που θα έχουν αποκτήσει κάποια ηλεκτρόνια θα φύγουν από τα άτομα τους και θα τοποθετηθούν σε άλλα. Με τον τρόπο αυτό στον κρύσταλλο θα υπάρχουν άτομα με 9 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα, που θα είναι αρνητικά φορτισμένα, και άτομα με 7 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα ή, ισοδύναμη πρόταση, με μια σπή στην εξωτερική στοιβάδα, που θα είναι θετικά φορτισμένα. Στο μεταξύ ελευθερώνονται κι άλλα ηλεκτρόνια που προσκολλώνται σε άτομα ή καταλαμβάνουν τη θέση μιας σπής που χάνεται.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια άτακτη μετακίνηση ηλεκτρονίων και σπών.

Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με ένωση τύπου p-n που έχουν επίπεδη μορφή και δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω προσπίπτοντας ηλιακή ενέργεια πάνω στην επιφάνεια των στοιχείων, δηλαδή κάθε φωτόνιο της ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο και περιέχει ενέργεια ίση ή και μεγαλύτερη του ενεργειακού διακένου του ημιαγωγού, έχει την δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι παράγονται ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και σπές), μέρος των οποίων διαχωρίζεται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα μπρος δημιουργώντας διαφορά δυναμικού στις δύο όψεις του στοιχείου.

Η δημιουργία διαφοράς δυναμικού στις δυο όψεις του στοιχείου όπου και αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου ονομάζεται **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**.



Σχ.2.2 Δημιουργία διαφοράς δυναμικού σε ηλιακό στοιχείο. Η ηλιακή ενέργεια προσπίπτοντας στην διόδο p-n δημιουργεί ζεύγη φορέων ηλεκτρονίων και οπών άρα και διαφορά δυναμικού, δημιουργώντας το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

2.2.1 Απορρόφηση της ακτινοβολίας από το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει τελικά στο φωτοβολταϊκό στοιχείο με την μορφή φωτονίων δεν μπορεί εξολοκλήρου να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια αλλά μόνο κάποιο μέρος από αυτήν.

Έτσι λοιπόν ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτει επάνω στο φωτοβολταϊκό στοιχείο και απορροφάται από αυτό ενώ το υπόλοιπο διαχέεται προς το περιβάλλον. Έπειτα η ενέργεια που εισχωρεί στον ημιαγωγό, ένα μέρος από αυτήν θα απορροφηθεί δηλαδή εκείνο το μέρος το οποίο και θα αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Τα φωτόνια αυτά θα διαπεράσουν το στοιχείο και θα περάσουν στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του, με αποτέλεσμα να το θερμαίνει. Αυτός είναι και ο λόγος που αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες κατά την λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τέλος όπως είδαμε από την λειτουργία του φωτοβολταϊκού φαινομένου το μέρος εκείνο της ακτινοβολίας που είναι ίσο με το ενεργειακό διάκενο συμβάλλει για την παραγωγή του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το υπόλοιπο μέρος της ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμότητα. Έτσι λοιπόν ένα μικρό μέρος της ηλιακής ενέργειας θα καταφέρει να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια.

2.2.2 Ο συντελεστής απορρόφησης.

Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η ηλιακή ενέργεια η οποία και τελικά θα προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, δεν μπορεί να μετατραπεί εξολοκλήρου σε ηλεκτρική ενέργεια αλλά μόνον ένα ποσοστό από αυτήν.

Ο συντελεστής απορρόφησης είναι το μέγεθος εκείνο το οποίο και αναφέρεται στο ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που θα μπορέσει να απορροφηθεί από το φωτοβολταϊκό στοιχείο, δηλαδή αναφέρεται στον ρυθμό απορρόφησης των φωτονίων από το φωτοβολταϊκό στοιχείο και τελικά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται από το υλικό και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Ο συντελεστής απορρόφησης έχει μονάδες το cm^{-1} ενώ η αντίστροφη τιμή του μας δηλώνει το πάχος που έχει το υλικό, όπου με την αύξηση του πάχους του υλικού έχουμε και την ανάλογη μείωση της έντασης του φωτός, από την τιμή που είχε πριν μπει στο στρώμα του υλικού.

Η σχέση η οποία και συνδέει την ενέργεια ενός φωτονίου E , με την συχνότητα της ακτινοβολίας ν , και με το μήκος κύματος λ , δίνεται από την σχέση: $E=h\nu=hc/\lambda$, όπου h είναι η σταθερά δράσης του Planck ($h=6,3 \times 10^{-34}$ JS) και c είναι η ταχύτητα του φωτός ($c=3 \cdot 10^8$ m/s).

Σαν ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού ορίζεται το μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας κάτω από το οποίο και ο ημιαγωγός αρχίζει να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία, με μονάδες το ηλεκτροβόλτ (eV). Έτσι λοιπόν για να υπολογίσουμε το μέγιστο μήκος κύματος (λ_g) ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται τελικά από τον ημιαγωγό, με ενεργειακό διάκενο E_g (με μονάδα το eV), και με μήκος κύματος μετρούμενο σε μικρόμετρα (μm), τότε το μέγιστο μήκος κύματος ακτινοβολίας σε έναν ημιαγωγό, δύνεται από την σχέση:

$$\lambda_g = 1,238/E_g$$

Στην συνέχεια αν θεωρήσουμε ότι στην επιφάνεια του ημιαγωγού προσπίπτει μια μονοχρωματική ακτινοβολία που αποτελείται από όμοια φωτόνια ενέργειας $h\nu$ και με ένταση ίση με H μονάδα ισχύος ανά μονάδα επιφανείας. Το πλήθος των φωτονίων (Φ), ανά μονάδα επιφανείας και χρόνου είναι: $\Phi = H/h\nu = H\lambda/hc$.

Από την σχέση αυτή παρατηρούμε ότι για σταθερή ένταση H ροή Φ είναι αντίστροφα ανάλογα με την ενέργεια των φωτονίων.

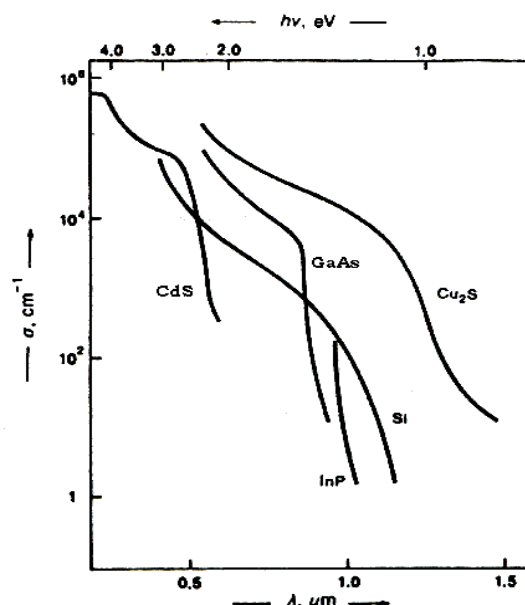
Για να υπολογίσουμε την τιμή της ροής των φωτονίων (Φ_x), σε σχέση με την απόσταση που διανύει η ακτινοβολία μέσα στον ημιαγωγό, θα πρέπει να γνωρίζουμε την αρχική τιμή της ροής Φ_0 , των φωτονίων στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού, την απόσταση που διανύει η ακτινοβολία μέσα στον ημιαγωγό αρχίζοντας από την επιφάνειά του.

Επίσης ο ρυθμός με τον οποίο και πραγματοποιείται η απορρόφηση των φωτονίων, δίνεται από το ρυθμό της μεταβολής της Φ με την αύξηση της απόστασης που διανύει η ακτινοβολία. Όπως καταλαβαίνουμε ο ρυθμός αυτός παρουσιάζει αρνητική τιμή και αυτό γιατί η ροή Φ των φωτονίων μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση (x), άρα είναι ανάλογος της $\Phi(x)$, οπότε είναι εύκολο να καταλάβουμε ότι ισχύει η σχέση: $d\Phi/dx = -\alpha\Phi(x)$.

Ο Νόμος του BEER, μας λέει ότι αν η απόσταση (x) που διανύει η ακτινοβολία μέσα στον ημιαγωγό είναι ίση με $x=0$, τότε η τιμή της ροής των φωτονίων $\Phi(x)$, παίρνει την τιμή της αρχικής ροής των φωτονίων (Φ_0): $\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-\alpha x)$.

Αν αντικαταστήσουμε στην σχέση που μας δίνει την απορρόφηση των φωτονίων την σχέση από τον Νόμο του BEER, καταλήγουμε στην σχέση: $d\Phi/dx = -\alpha\Phi_0 \exp(-\alpha x)$, η οποία και μας λέει ότι ο ρυθμός της απορρόφησης των φωτονίων, επομένως και της δημιουργίας των φορέων από την ακτινοβολία που δέχεται ο ημιαγωγός, είναι μεγαλύτερος κοντά στην επιφάνειά του και εξασθενίζει με την απόσταση από αυτή.

Όπως φαίνεται στο σχήμα Σχ.2.3, βλέπουμε την μεταβολή του συντελεστή απορρόφησης (α), είναι ανάλογη με το μήκος κύματος (λ) της ακτινοβολίας. Παρατηρούμε ότι όταν το λ είναι μεγαλύτερο από το λ_g ($\lambda > \lambda_g$), ο συντελεστής απορρόφησης (α) μηδενίζεται δηλαδή για αυτά τα μήκη κύματος δεν πραγματοποιείται καμιά απορρόφηση φωτονίων. Ενώ για μικρά μήκη κύματος παίρνει μεγάλες τιμές, οπότε και η απορρόφηση των φωτονίων γίνεται πολύ κοντά στην επιφάνεια του ημιαγωγού.



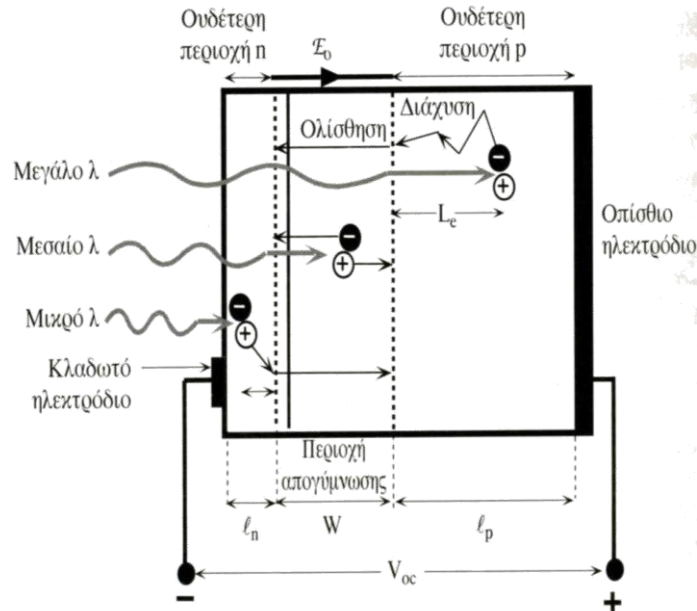
Σχ.2.3 Γραφική παράσταση της μεταβολής του συντελεστή απορρόφησης (α), σε σχέση με το μήκος κύματος (λ) ή της ενέργειας των φωτονίων ($h\nu$) για διάφορους ημιαγωγούς φωτοβολταϊκών στοιχείων.

2.2.3 Η δημιουργία του φωτορεύματος.

Όπως γνωρίζουμε είδη, η δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων και οπών δημιουργούνται σε όλο τον χώρο των ημιαγωγών που βρίσκονται σε επαφή, είτε λόγω της θερμότητας στην οποία και βρίσκεται το στοιχείο, είτε λόγω μίας κατάλληλης ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο, δηλαδή κατάλληλου μήκους κύματος.

Γνωρίζοντας ότι η περιοχή τύπου n αποτελείται από φορείς πλειονότητας τα οποία και είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, ενώ η περιοχή τύπου p αποτελείται από τις οπές. Έτσι η ακτινοβολία του καταλλήλου μήκους κύματος όταν φτάσει στο στοιχείο φορτίζει με την σειρά της με πλεονάζοντα φορτία. Με την εισχώρηση αυτών των φορτίων έχουμε μια αύξηση του δυναμικού στον χώρο της περιοχής τύπου p με την προσθήκη οπών, ενώ στον χώρο της περιοχής τύπου n έχουμε το σύνολο των ηλεκτρονίων τα οποία και δημιουργήθηκαν από την επαφή της ακτινοβολίας με το στοιχείο. Η αύξηση του δυναμικού στην περιοχή τύπου p, καθώς και συνεχής κίνηση των φορέων που δημιουργήθηκαν από την κατάλληλου μήκους ακτινοβολία δημιουργεί κάποιο ρεύμα, το οποίο και έχει φορά από την περιοχή του ημιαγωγού τύπου n, προς την περιοχή του ημιαγωγού τύπου p. Το ρεύμα αυτό είναι συνάρτηση των φωτονίων που θα απορροφηθούν τελικά από το σύνολο των φωτονίων που θα προσπέσουν στο στοιχείο και γι' αυτό ονομάζεται φωτόρευμα (I_{Φ}).

Η δημιουργία και η τιμή του φωτορεύματος είναι ανάλογη με το πλήθος των φωτονίων που θα απορροφηθούν από το στοιχείο, το οποίο και εξαρτάται από το πλήθος των φωτονίων που θα προσπέσουν στο στοιχείο. Η πυκνότητα του φωτορεύματος εξαρτάται από το σύνολο των φωτονίων που προσπίπτουν στο στοιχείο ανά μονάδα του χρόνου και της επιφάνειας. Εξαρτάται από τον ρυθμό δημιουργίας ζευγών φορέων από τα φωτόνια της ακτινοβολίας (πλήθος ζευγών ηλεκτρονίων-οπών ανά μονάδα χρόνου και μονάδα όγκου του ημιαγωγού), καθώς και από τα μέσα μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών. Η σχέση που μας δίνει το φωτόρευμα είναι : $I_{\Phi} = eg(L_n + L_p)$, όπου : e : Το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, g : ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών φορέων από τα φωτόνια της ακτινοβολίας, L_n και L_p : Τα μέσα μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών.



Σχ.2.4 Δημιουργία του φωτορεύματος ανάλογα με το μήκος κύματος λ , των φωτονίων που προσπίπτουν στο στοιχείο.

Στο σχήμα Σχ.2.4 φαίνεται η δημιουργία του φωτορεύματος, η οποία και είναι ανάλογη με το μήκος κύματος λ των φωτονίων τα οποία και προσπίπτουν πάνω στο στοιχείο. Όπως φαίνεται η περιοχή τύπου n είναι μια περιοχή πολύ λεπτή και ισχυρά νοθευμένη η οποία και απορροφά φωτόνια με μικρό μήκος κύματος, ενώ η περιοχή τύπου p και η περιοχή απογύμνωσης απορροφούν τα περισσότερα φωτόνια, τα οποία και παρουσιάζουν μεγαλύτερο μήκος κύματος λ .

Όπως φαίνεται και στο Σχ.2.4 αφού τα φωτόνια προσπίπτουν στο στοιχείο και εφόσον έχουν μεγάλο μήκος κύματος λ , θα περάσουν την περιοχή απογύμνωσης και θα περάσουν στην περιοχή τύπου p όπου και θα σχηματιστεί η φωτοδιέγερση των ζευγών των

ηλεκτρονίων και των οπών με σκοπό την δημιουργία του φωτορεύματος. Το μήκος διάχυσης του ηλεκτρονίου μέσα στην περιοχή τύπου p, δίνεται από την σχέση: $L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$.

Η φωτοδιέγερση των ζευγών των ηλεκτρονίων και των οπών για την δημιουργία του φωτορεύματος όπως φαίνεται στο Σχ.2.4, λαμβάνει χώρα στην περιοχή μεγέθους: $L_e + W + L_n$.

Παρατηρούμε ότι στην περιοχή τύπου p όπου και έχει δημιουργηθεί το ζεύγος των ηλεκτρονίων και των οπών σε μήκος διάχυσης L_e εμφανίζετε μια ολίσθηση του ζεύγους η οποία και περνάει την περιοχή απογύμνωσης και φτάνει έως την περιοχή τύπου n, όπου και δημιουργεί μία ισχυρή επανασύνδεση, και η απόσταση αυτή είναι μεγαλύτερη από το μέσο μήκος διάχυσης L_n . Η περιοχή αυτή εκφράζεται και σαν λεπτή περιοχή n.

Η δέσμευση φωτονίων μεγάλου μήκους κύματος λ , εμφανίζεται στην περιοχή τύπου p, και παρουσιάζει μεγάλο μήκος διάχυσης L_e σε αυτήν την περιοχή. Η περιοχή αυτή εκφράζεται στο σχήμα σαν την παχιά περιοχή του τύπου p.

Είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε κατά τον υπολογισμό του φωτορεύματος ένα μέγεθος το οποίο και θα μας δίνει την σχέση ανάμεσα στο πλήθος των φορέων που υπάρχουν στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε συνάρτηση με το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου, δηλαδή την φωτονική ροή (Φ). Το μέγεθος το οποίο και συνδέει τα παραπάνω στοιχεία ονομάζεται φασματική απόκριση S (ή απόδοση συλλογής). Έτσι για μια ακτινοβολία μήκους κύματος λ , η φασματική απόκριση $S_{(\lambda)}$ είναι: $S_{(\lambda)} = I_{\varphi(\lambda)} / e\Phi_{(\lambda)}$, όπου: $\Phi_{(\lambda)}$: Το πλήθος των φωτονίων που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από λ , μέχρι $\lambda + d\lambda$.

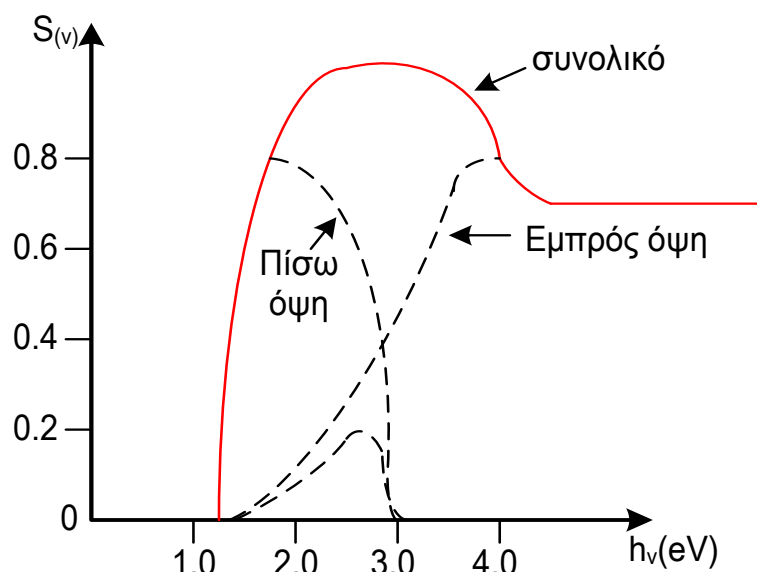
Άρα όταν το στοιχείο δέχεται μια πολυχρωματική ακτινοβολία το φωτόρευμα του είναι: $I_{\varphi} = e \int_0^{\lambda_g} S_{(\lambda)} \Phi_{(\lambda)} d\lambda$

Στην περίπτωση που θέλουμε να συμπεριλάβουμε στον υπολογισμό του φωτορεύματος το ποσοστό της επιφάνεια που έχει το στοιχείο, η παραπάνω σχέση γίνεται: $I_{\Phi} = e \int_0^{\lambda_g} S_{(\lambda)} [1 - R_{(\lambda)}] \Phi_{(\lambda)} d\lambda$, όπου: $R_{(\lambda)}$: ο δείκτης ανάκλασης για την ακτινοβολία μήκους κύματος λ .

Η φασματική απόκριση $S_{(\lambda)}$ καθώς και το φωτόρευμα για ένα στοιχείο εξαρτώνται από τους παρακάτω κατασκευαστικούς παράγοντες:

- Ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου.
- Ο συντελεστής απορρόφησης.
- το πάχος του ημιαγωγού και το εμβαδόν της επαφής των δύο ημιαγωγών.
- Το πλήθος των επανασυνδέσεων των φορέων.

Στο σχήμα Σχ.2.4 βλέπουμε την μεταβολή της φασματικής απόκρισης $S_{(\lambda)}$ ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας $h\nu$ (eV) που δέχεται, στην εμπρός όψη (περιοχή τύπου n), στην πίσω όψη (περιοχή τύπου p), καθώς και στην ζώνη εξάντλησης.



Σχ.2.4 Μεταβολή της φασματικής απόκρισης $S(\nu)$, σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας $h\nu(\text{eV})$ που δέχεται.

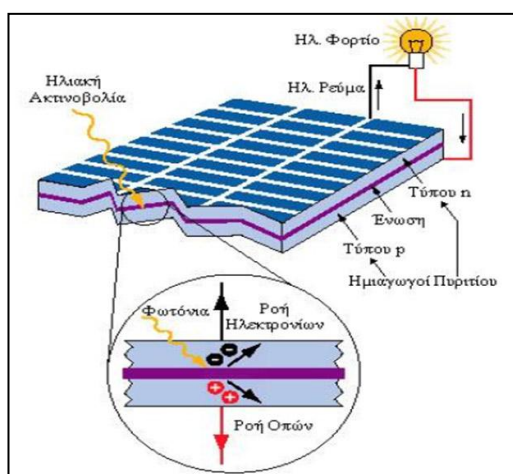
2.3 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Φωτοβολταϊκό στοιχείο ορίζεται η διάταξη εκείνη η οποία και μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν δεχθεί την κατάλληλου μήκους κύματος ακτινοβολία. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο ονομάζεται επίσης και φωτοβολταϊκό κύτταρο ή φωτοβολταϊκή κυψέλη (PV cell).

Η αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο (Κεφ.2.2) την εκμετάλλευση δηλαδή της ηλιακής ενέργειας και την μετατροπή της για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελεί όπως είδαμε μια δίοδο ημιαγωγικών ενώσεων τύπου p-n με τη μορφή επίπεδης πλάκας. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει την δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι κατά την διάρκεια της ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργούνται περίσσια φορέων (ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών). Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου) δέχονται την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου της ένωσης p – n .

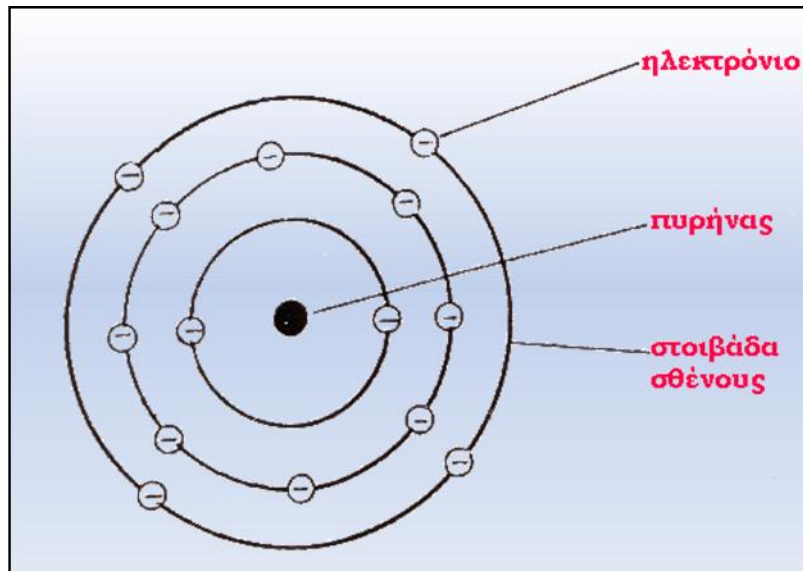
Εξαιτίας αυτού τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της δόδου. Αν στους ακροδέκτες αυτούς συνδεθεί κατάλληλο ηλεκτρικό φορτίο παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος και ισχύος από τη φωτοβολταϊκή διάταξη προς το φορτίο. Συμπερασματικά η όλη διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια το φωτοβολταϊκού κύτταρου.



Σχ.2.5 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο και η διαδικασία μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα.

2.3.1 Η χρήση του πυριτίου στα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Όπως έχει αναφερθεί και στην αρχή του κεφαλαίου τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι φτιαγμένα από ειδικά υλικά που λέγονται ημιαγωγοί. Οι ημιαγωγοί στοιχεία που βρίσκονται από πλευράς ηλεκτρικής αγωγιμότητας μεταξύ καλών αγωγών και μονωτών. Τα άτομά τους έχουν 3, 4 ή 5 ηλεκτρόνια στην στοιβάδα σθένους και για αυτό μπορούν να συνεισφέρουν κατά μικρά μεταβλητά ποσά στο ηλεκτρικό ρεύμα ανάλογα με τα αίτια που το προκαλούν.



Σχ.2.6 Δομή του ατόμου του πυριτίου, με την στοιβάδα σθένους, τα ηλεκτρόνια που την αποτελούν και τον πυρήνα του ατόμου.

Γνωρίζουμε ότι τα ηλεκτρόνια τα οποία και περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα του ατόμου κατατάσσονται σε στοιβάδες. Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην εξωτερική στοιβάδα ονομάζονται ηλεκτρόνια σθένους καθότι και βρίσκονται στην εξωτερική στοιβάδα σθένους. Τα ηλεκτρόνια αυτά τα οποία και βρίσκονται στην στοιβάδα σθένους επηρεάζουν την αγωγιμότητα του ηλεκτρικού ρεύματος. Αν από κάποιο εξωτερικό παράγοντα όπως είναι στην περίπτωση μας η ακτινοβολία, τα ηλεκτρόνια σθένους αποκτήσουν αρκετή ενέργεια για να ξεφύγουν από την έλξη του πυρήνα και μεταπηδούν στη στοιβάδα αγωγιμότητας που είναι στοιβάδα μεγαλύτερης ενέργειας. Τα ηλεκτρόνια αυτά κινούνται άτακτα μεταξύ των ατόμων και λέγονται ελεύθερα ηλεκτρόνια. Συγκεκριμένα το πυρίτιο έχει κάποιες ιδιαίτερες χημικές ιδιότητες στην κρυσταλλική του μορφή. Όπως φαίνεται και στο σχήμα Σχ.2.5 ένα άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια κατανεμημένα σε τρεις διαφορετικές στοιβάδες. Οι πρώτες δύο, αυτές που είναι πιο κοντά στο κέντρο, είναι συμπληρωμένες (2 και 8). Η εξωτερική όμως έχει μόνο 4 ενώ θα έπρεπε να έχει 8. Για αυτόν λοιπόν τον λόγο κάθε άτομο του πυριτίου μοιράζεται ηλεκτρόνια με τα γειτονικά του άτομα. Την δομή αυτήν την παρουσιάζει το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο. Αυτό όμως έχει σαν συνέπεια να μην υπάρχει κανένα ηλεκτρόνιο ελεύθερο ώστε να μετακινηθεί όπως τα ηλεκτρόνια στους καλούς αγωγούς σαν το χαλκό. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο και γίνεται μια τροποποίηση του πυριτίου ώστε να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί στο φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Έτσι λοιπόν το φωτοβολταϊκό στοιχείο περιέχει και άλλα άτομα αναμειγμένα με άτομα πυριτίου τα οποία και τα εισάγουμε με σκοπό να αυξήσουν την απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Κατά την απελευθέρωση του ηλεκτρονίου δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου και κενής θέσης (οπής). Τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών έχουν την τάση να συμπληρώνονται αυτόματα αλλά η διαδικασία μπορεί να αποφευχθεί ενσωματώνοντας στο υλικό ένα φράγμα διαφοράς δυναμικού κατά την κατασκευή του. Αυτό επιτυγχάνεται με εμπλουτισμό της άνω επιφάνειας του πυριτίου, η οποία εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία, με μικρή ποσότητα ($1:10^6$) φωσφόρου (P) ή αρσενικού (As) που έχουν ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο στην εξωτερική τους στοιβάδα σε σχέση με το πυρίτιο. Αν για παράδειγμα διοχετεύουμε ενέργεια στο καθαρό πυρίτιο, με τη μορφή θερμότητας, μερικά ηλεκτρόνια σπάζουν τους δεσμούς τους και φεύγουν από τα άτομά τους. Τότε δημιουργείται μια κενή θέση στο άτομο. Αυτά τα ηλεκτρόνια περιφέρονται τυχαία μέσα στο κρυσταλλικό πυρίτιο ψάχνοντας να μπουν σε μια άλλη θέση. Έτσι μεταφέρουν την ενέργεια (ηλεκτρικό ρεύμα). Αν όμως το πυρίτιο εμπλουτιστεί με ποσότητα φωσφόρου χρειάζεται λιγότερη ενέργεια για να απελευθερωθεί το επιπλέον ηλεκτρόνιο του φωσφόρου αφού αυτό δεν σχηματίζει δεσμό με άλλο - τα γειτονικά ηλεκτρόνια δεν το συγκρατούν. Σαν αποτέλεσμα τα περισσότερα από αυτά τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται και γίνονται φορείς ηλεκτρικού ρεύματος που είναι πολύ περισσότεροι από αυτούς του κρυσταλλικού πυριτίου. Η

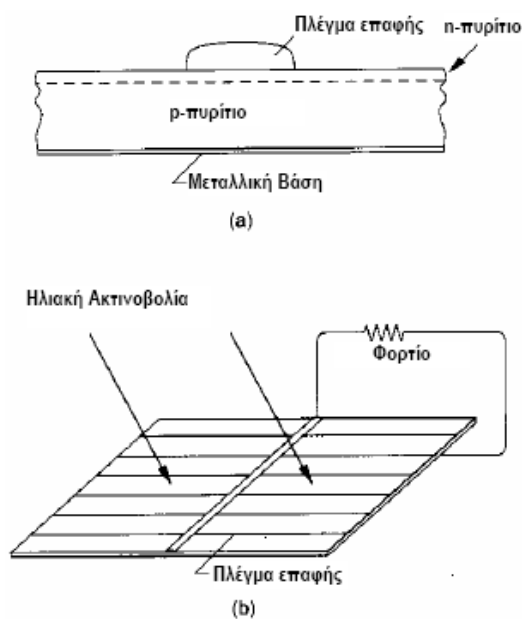
διαδικασία μίξης ατόμων κρυσταλλικού πυριτίου με άτομα φωσφόρου δημιουργεί πυρίτιο που ονομάζεται πυρίτιο τύπου N (Negative, Αρνητικό) εξαιτίας της υπεροχής του αριθμού των ηλεκτρονίων και είναι καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος. Στην πραγματικότητα μόνο ένα μέρος του φωτοβολταϊκού κυττάρου είναι πυρίτιο τύπου N. Το άλλο μέρος είναι ανάμειξη κρυσταλλικού πυριτίου με Βόριο το οποίο έχει μόνο 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα αντί για 4, και μετατρέπεται σε πυρίτιο τύπου P. Αντί να έχει ελεύθερα ηλεκτρόνια το πυρίτιο τύπου P (Positive, θετικό) έχει ελεύθερες θέσεις. Οι θέσεις αυτές είναι ουσιαστικά απουσία ηλεκτρονίων, και έτσι μεταφέρουν αντίθετο φορτίο (θετικό) και περιφέρονται όπως και τα ηλεκτρόνια. Το ενδιαφέρον μέρος αρχίζει όταν τοποθετούμε μαζί πυρίτιο τύπου N και P. Το φωτοβολταϊκό κύτταρο έχει τουλάχιστον ένα ηλεκτρικό πεδίο. Χωρίς ηλεκτρικό πεδίο το κύτταρο δεν θα δούλευε. Αυτό το πεδίο σχηματίζεται όταν πυρίτιο τύπου N και P έρχονται σε επαφή. Ξαφνικά τα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου N που ψάχνουν για ελεύθερες θέσεις βλέπουν τις κενές θέσεις στο πυρίτιο τύπου P και τρέχουν να τις καλύψουν.

Στην αρχή το πυρίτιο ήταν ηλεκτρικά ουδέτερο. Τα επιπλέον ηλεκτρόνια ισορροπούσαν με τα επιπλέον πρωτόνια του φωσφόρου. Οι κενές θέσεις ισορροπούσαν με την έλλειψη πρωτονίων του βορίου. Όταν οι κενές θέσεις και τα ηλεκτρόνια αναμειγνύονται στην ένωση πυριτίου P και N η ισορροπία ανατρέπεται.

Καταλήγουμε λοιπόν ότι υλικά από τα οποία κατασκευάζονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ποικίλλουν, όπως και οι μέθοδοι κατασκευής τους. Συνηθισμένα υλικά είναι το μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό και άμορφο πυρίτιο Si, το θειούχο κάδμιο CdS και το αρσενικούχο γάλλιο GaAs κ.α.

Ενδεικτικά θα δούμε ότι το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο τα άτομα κατέχουν ορισμένες θέσεις στο χώρο ώστε να σχηματίζουν κρύσταλλο γεωμετρικού σχήματος. Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο παρουσιάζει δομή όπου υπάρχουν πολλοί μικροί κρύσταλλοι προσανατολισμένοι κατά διαφορετικές διευθύνσεις όπως για παράδειγμα είναι τα μέταλλα.

Στο άμορφο πυρίτιο δεν υπάρχει κανονική εσωτερική δομή και παρομοιάζονται με υγρά που έχουν πολύ μεγάλη εσωτερική τριβή ώστε να μη κινούνται σχεδόν καθόλου.



Σχ.2.7 α) Τομή επιφάνειας φωτοβολταϊκού στοιχείου με n-Si και p-Si.
 β) Φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελούμενο από πολλά φ/β στοιχεία και συνδεδεμένο με φορτίο.

2.3.1.2 Οι διάφοροι τύποι των φωτοβολταϊκών στοιχείων του πυριτίου.

Όπως έχει είδη αναφερθεί το κατ' εξοχήν διαδεδομένο υλικό που χρησιμοποιείται για την δημιουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι το πυρίτιο (Si).

Το πυρίτιο είναι ένα υλικό που μπορεί να βρεθεί εύκολα στην φύση. Είναι το δεύτερο σε αφθονία υλικό που υπάρχει στον πλανήτη μετά το οξυγόνο. Το οξείδιο του πυριτίου (ή κοινώς η άμμος) και ο χαλαζίτης αποτελούν το 28% του φλοιού της γης, καθώς επίσης είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον. Σημαντικό πλεονέκτημα του πυριτίου αποτελεί το ότι μπορεί εύκολα να λιώσει και να μορφοποιηθεί. Επίσης είναι σχετικά εύκολο να μετατραπεί στην μονοκρυσταλλική του μορφή. Επίσης σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το ότι οι ηλεκτρικές του ιδιότητες μπορούν να διατηρηθούν μέχρι και στους 125 °C κάτι που επιτρέπει την χρήση του πυριτίου σε ιδιαίτερα δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η κατηγοριοποίηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου μπορεί να γίνει ανάλογα με την δομή του υλικού, με τον τρόπο παρασκευής του στοιχείου ή και με βάση το πάχος του υλικού που χρησιμοποιείται.

Παρακάτω θα δούμε τους διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου :

1) Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Monocrystalline Silicon, sc-Si) :

Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά. Η απόδοσή τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 - 18% για το πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%. Το μονοκρυσταλλικό στοιχείο χαρακτηρίζεται από καλύτερη σχέση απόδοσης / επιφάνειας. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) καθώς και η μέθοδος FZ (float zone) και οι δύο πάντως βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου.



2) Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Polycrystalline Silicon, mc-Si) :

Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση των πολυκρυσταλλικών στοιχείων. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως και 15% για το ΦΒ πλαίσιο. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι η ανάπτυξη φύλλων πολυκρυσταλλικού υλικού και η μέθοδος εναπόθεσης.



3) Φ/Β στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon) :

Πρόκειται ουσιαστικά για μια ταινία πολυκρυσταλλικού υλικού. Δεν υπάρχει προς το παρόν εμπορική εκμετάλλευση λόγω του εξαιρετικά υψηλού κόστους παραγωγής του. Η απόδοσή του είναι γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά.



2.3.1.3 Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων άλλων υλικών (λεπτών επιστρώσεων).

Εκτός από την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων από πυρίτιο λεπτών επιστρώσεων, κατασκευάζονται και φωτοβολταϊκά στοιχεία και από άλλα υλικά. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με αυτά του πυριτίου, άλλα και κάποια μειονεκτήματα τα οποία και θα πρέπει να εξεταστούν κατάλληλα ώστε να χρησιμοποιηθούν στην κατάλληλη εφαρμογή. Παρακάτω βλέπουμε τις κατηγορίες των φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτών επιστρώσεων :

1) Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS με προσθήκη γαλλίου CIGS) :

Ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παράλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο). Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8% η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γαλλίου η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο CIGS. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το ίδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.



2) Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si) :

Τα στοιχεία αυτά έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι και λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη. Η λέξη άμορφο προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται με την χρήση των thin films πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6 έως 8% ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό της τεχνολογίας αυτής είναι η αρκετά μικρότερη διάρκεια ζωής. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά.



3) Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe) :

Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων έχει φθάσει το 16%. Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Τροχοπέδη για την χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Ήδη η Greenpeace έχει εναντιωθεί στην χρήση του. Επίσης προβληματίζει ή έλλειψη του Τελλουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό (BIPV Building Integrated Photovoltaic).



4) Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs) :

Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το Αρσένιο δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης είναι εξαιρετικά ανθεκτικό στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση του σε εφαρμογές ηλιακών concentrators. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι αντέχει σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής



απόδοσης του ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.

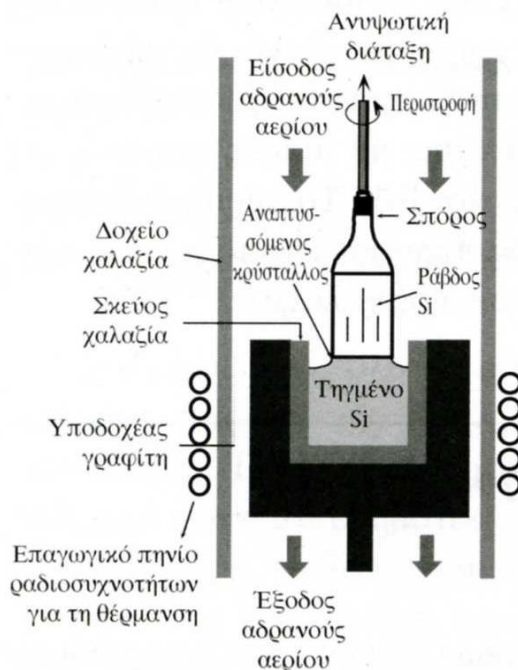
2.3.2 Η διαδικασία παρασκευής του ράβδου πυριτίου.

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο το πυρίτιο αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα στοιχεία για την παρασκευή των φωτοβολταϊκών διατάξεων. Είδαμε ότι το πυρίτιο καθώς και κάθε κρυσταλλικός ημιαγωγός για να μπορέσει να αποδώσει τις ιδιότητες του για την λειτουργία του σαν φωτοβολταϊκή διάταξη, θα πρέπει να είναι μεγάλης καθαρότητας και το κρυσταλλικό τους πλέγμα να μην έχει αταξίες δομής και αυτό ώστε να μπορέσουμε να εισάγουμε διάφορες προσμείξεις ατόμων άλλων στοιχείων με σκοπό να αυξήσουμε την απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Για την παρασκευή ενός καθαρού ημιαγωγού και την εισαγωγή των διάφορων προσμειξεων χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, αλλά πριν την διαδικασία της πρόσμειξης θα πρέπει να γίνει μια σειρά από εργασίες οι οποίες θα έχουν σαν αποτέλεσμα την παραγωγή του καθαρού πυριτίου το οποίο και θα έχει την μορφή κυλίνδρου.

Αρχικά το πυρίτιο βρίσκεται στην άμμο, το οποίο και με κατάλληλο καθαρισμό το παίρνουμε με την μορφή του οξειδίου του πυριτίου (SiO_2) το οποίο και έχει καθαρότητα περίπου 99%. Στην συνέχεια το πυρίτιο ανατήκεται και μετατρέπεται σε αέριο τριχλωροσιλάνιο ($SiHCl_3$) που αποχωρίζεται από τις διάφορες προσμείξεις με κλασματική απόσταξη. Έπειτα το αέριο αυτό ανάγεται με υδρογόνο και συμπυκνώνεται έτσι πυρίτιο ακόμη μεγαλύτερης καθαρότητας, το οποίο τήκεται στους 1410 °C και ανακρυσταλλώνεται σε κυλινδρική μονοκρυσταλλική μορφή, με καθαρότητα 99,999999%. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται και μέθοδος Czochralski (ή μέθοδος αναπτύξεως μονοκρυστάλλικου πυριτίου) και το τελικό προϊόν είναι ένας μεγάλος κύλινδρος διαμέτρου περίπου 10 εκατοστών από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.

Στη συνέχεια αυτό κόβεται σε λεπτούς δίσκους πάχους περίπου 0,5 mm οι οποίοι διαμορφώνονται σε διόδους p-n με επίταξη. Η διαδικασία κοπής σε τόσο λεπτές φέτες είναι που κάνει πολύ δαπανηρή την όλη αυτή διεργασία, καθώς το 50% του υλικού του κρυστάλλου χάνεται κατά τη διάρκεια της κοπής και της λείανσης. Στους δίσκους αυτούς επικολλούνται από την εμπρός και την πίσω πλευρά ηλεκτρόδια, τα οποία θα απάγουν το παραγόμενο ρεύμα. Από την μπροστινή πλευρά του στοιχείου όπου είναι απαραίτητο να εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία το ηλεκτρόδιο διαμορφώνεται σε μορφή σχάρας καλύπτοντας το 15% της επιφάνειας του στοιχείου, και αποτελείται συνήθως από κράματα του αργύρου. Αντίθετα από την πίσω πλευρά του στοιχείου δεν εισέρχεται ακτινοβολία έτσι καλύπτεται όλη από ηλεκτρόδιο, συνήθως ένα φύλλο αλουμινίου.



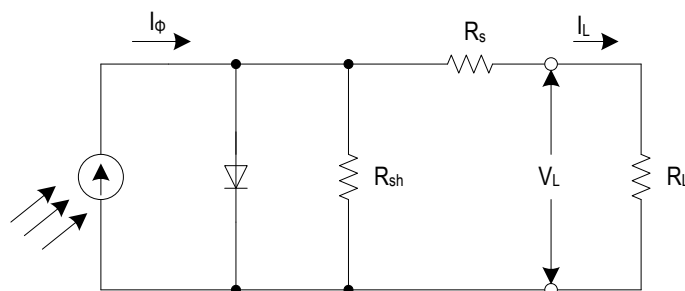
Σχ.2.8 Η διαδικασία της παρασκευής της ράβδου πυριτίου με την μέθοδο Czochralski. Σε αυτήν την μέθοδο το τηγμένο πυρίτιο που βρίσκεται μέσα σε σκεύος χαλαζία περιστρέφεται αργά προς τα επάνω σχηματίζοντας μία ράβδο πυριτίου, διαμέτρου περίπου 10cm.

Εκτός όμως από την μέθοδο Czochralski (ή μέθοδος αναπτύξεως μονοκρυστάλλινου πυριτίου) , υπάρχουν και μία σειρά από άλλες μεθόδους για την παρασκευή καθαρού ημιαγωγού καθώς και την εισαγωγή διάφορων προσμίξεων, οι οποίες είναι οι παρακάτω :

- Μέθοδος της επιπλέουσας ζώνης (Float Zone method).
- Μέθοδος κράματος (Alloying technique).
- Τεχνική της διάχυσης (Diffusion technique).
- Τεχνική της εμφύτευσης ιόντων (Ion implantation technique).

2.4 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Αρχικά για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού στοιχείου βλέπουμε στο σχήμα Σχ.2.9 το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Παρατηρούμε ότι το ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτελείται από μια πηγή ρεύματος (I_ϕ) , η οποία και ελέγχεται από μια δίοδο. Επίσης παρατηρούμε ότι περιλαμβάνει μια εσωτερική αντίσταση R_{sh} (Shunt resistance), που βρίσκεται παράλληλα με τα άκρα της διόδου, και η οποία εκφράζει τις απώλειες διαρροής του ρεύματος που υφίσταται στα άκρα του στοιχείου (οφείλεται στην μη ιδανική συμπεριφορά της διόδου). Βλέπουμε επίσης και την εσωτερική αντίσταση R_s (Series resistance), που συναντά το παραγόμενο φωτόρρευμα μέσα στον ημιαγωγό.



Σχ.2.9 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Όταν βρεθούμε σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος τότε θα υπάρξει μια ισορροπία όταν η αναπτυσσόμενη τάση μεταξύ των δύο όψεων του φωτοβολταϊκού στοιχείου, η οποία και θα προκαλέσει την ανάπτυξη ενός ρεύματος το οποίο και θα αντισταθμίσει το

φωτόρρευμα, οπότε και θα ισχύει η σχέση : $I_\phi = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{\gamma kT}\right) - 1 \right]$

όπου : I_0 το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου.

γ συντελεστής ποιότητας της διόδου (μεταξύ 1 και 2).

k σταθερά Boltzmann.

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει στο ότι η ανοικτοκυκλωμένη τάση (open -circuit Voltage) του φωτοβολταϊκού στοιχείου, θα

είναι ίση με : $V_{oc} = \left(\frac{\gamma kT}{e}\right) \ln \left[\left(\frac{I_\phi}{I_0}\right) - 1 \right]$

Επίσης κατά την λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου το ρεύμα από την πηγή ρεύματος I_ϕ , είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το I_0 , δηλαδή το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου. Οπότε η παραπάνω σχέση που μας δίνει την ανοικτοκυκλωμένη τάση του

στοιχείου θα γίνει : $V_{OC} = \left[\left(\frac{\gamma k T}{e} \right) \ln \frac{I_\phi}{I_0} \right]$, η σχέση αυτή μας δείχνει την μεταβολή της τάσης του ανοιχτού κυκλώματος σε συνάρτηση με το φωτόρευμα, δηλαδή με την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Κατά την περίπτωση όπου και υπάρχει βραχυκύκλωση ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτοβολταϊκού στοιχείου, τότε το ρεύμα I_{SC} , (short circuit current) θα είναι ίσο με το παραγόμενο φωτόρευμα I_ϕ , δηλαδή $I_{SC} = I_\phi$.

Στην περίπτωση όμως που το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου κλείσει διαδρομή μέσω μιας εξωτερικής αντίστασης R_L (Load Resistance), όπως φαίνεται και στο σχήμα Σχ.2.9, τότε το ρεύμα θα γίνει : $I_L = I_\phi - I_0 \left[\exp \left(\frac{e I_L R_L}{\gamma k T} \right) - 1 \right]$.

Επίσης θα πρέπει να πούμε ότι για μια τιμή του φορτίου του κυκλώματος, το οποίο και συμβολίζεται σαν μια αντίσταση στο σχήμα Σχ.2.9 η ισχύς που παράγεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο γίνεται μέγιστη. Έτσι αντιστοιχεί μια βέλτιστη τάση V_m , η οποία και

δίνεται από την σχέση : $\left(\frac{I_\phi}{I_0} \right) + 1 = \left[1 + \left(\frac{e V_m}{\gamma k T} \right) \right] \exp \left(\frac{e V_m}{\gamma k T} \right)$.

2.4.1 Η χαρακτηριστική καμπύλη I – V του φωτοβολταϊκού στοιχείου και το σημείο της μέγιστης ισχύος (σταθερές συνθήκες).

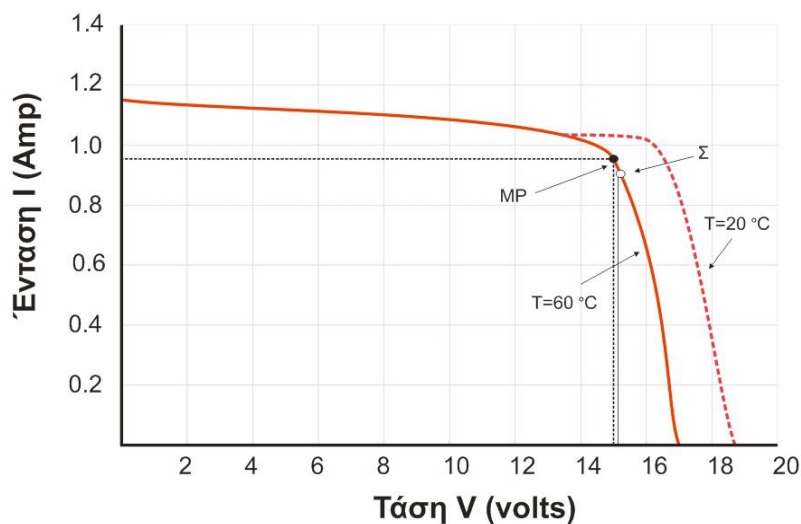
Όπως γνωρίζουμε η παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελεί συνάρτηση της πυκνότητας της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μεταβάλλεται συνεχώς η τάση και το ρεύμα του κυκλώματος του στοιχείου, μη γραμμικά λόγω της μεταβολής της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο στοιχείο. Για αυτόν λοιπόν τον λόγο θα πρέπει να γνωρίζουμε τα σημεία της μέγιστης ισχύος του στοιχείου, τα οποία και αναφέρονται στις διάφορες συνθήκες λειτουργίας του στοιχείου. Ο προσδιορισμός των σημείων της μέγιστης ισχύος του στοιχείου λαμβάνεται υπόψη και για την επιλογή των ηλεκτρονικών διατάξεων που θα χρησιμοποιηθούν.

Από το σχήμα Σχ.2.9 παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που η τιμή της αντίστασης R_L , είναι μηδέν, δηλαδή στην περίπτωση όπου και υπάρχει βραχυκύκλωση ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτοβολταϊκού στοιχείου, τότε το ρεύμα I_{SC} , (short circuit current) θα είναι ίσο με το παραγόμενο φωτόρευμα I_ϕ , δηλαδή $I_{SC} = I_\phi$, ενώ η τάση θα μηδενιστεί.

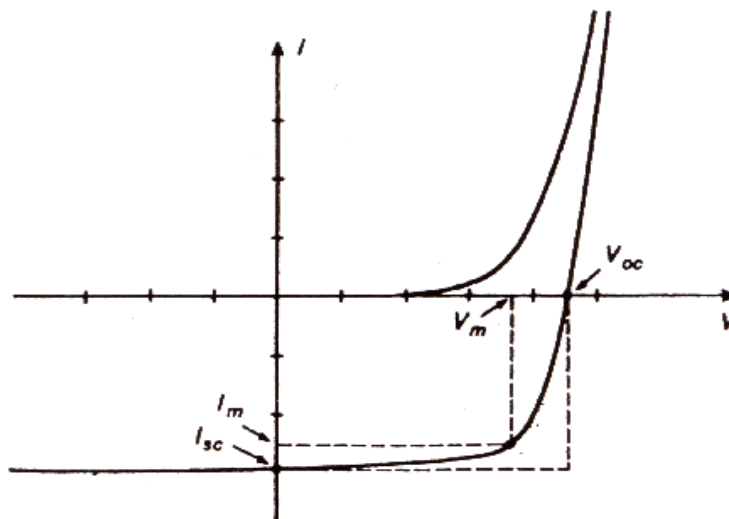
Ενώ στην περίπτωση όπου η τιμή της αντίστασης είναι πολύ μεγάλη και τείνει ως προς το άπειρο, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφ.2.4), δηλαδή όταν βρίσκεται στην ανοικτοκυκλωμένη κατάσταση, τότε σε αυτήν την περίπτωση έχουμε μηδενισμό της έντασης του ρεύματος, ενώ η τάση παίρνει την μέγιστη τιμή της V_{OC} (ανοικτοκυκλωμένη τάση).

Έτσι λοιπόν για τις δύο αυτές ακραίες καταστάσεις λειτουργίας παρατηρούμε ότι η ηλεκτρική ισχύς ($P = V * I$) η οποία και παράγεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι ίση με μηδέν, καθώς παρουσιάζεται μηδενική τάση στην περίπτωση που η τιμή της αντίστασης R_L είναι μηδενική, ενώ παρουσιάζεται μηδενική την ένταση του ρεύματος στην περίπτωση όπου η αντίσταση είναι πολύ μεγάλη και τείνει ως προς το άπειρο.

Στην περίπτωση λοιπόν που έχουμε σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας, ενώ μεταβάλλεται η τιμή της αντίστασης R_L , του φορτίου ανάμεσα στις δυο παραπάνω ακραίες καταστάσεις λειτουργίας, οι τιμές της τάσης και της έντασης του ρεύματος παίρνουν τιμές ανάμεσα στις δυο ακραίες καταστάσεις.



Σχ.2.10 Καμπύλες $I-V$ και ισχύος για το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Βλέπουμε με διακεκομμένη την καμπύλη ισχύος, η οποία και σχηματίζεται από το γινόμενο των μεγεθών I και V για θερμοκρασία 60°C (συνεχής γραμμή), και στη συμβατική θερμοκρασία 20°C (ασυνεχής γραμμή). Το σημείο MP που φαίνεται στην καμπύλη είναι το σημείο της μέγιστης ισχύος.



Σχ.2.11 Καμπύλη $I-V$ φωτοβολταϊκού στοιχείου στο σκοτάδι.

Στο σχήμα Σχ.2.10 παρατηρούμε την καμπύλη $I-V$ (ένταση ηλεκτρικού ρεύματος και τάσης) που δημιουργείται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο όταν δέχεται σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, καθώς μεταβάλλεται η αντίσταση R_L , του φορτίου ανάμεσα στις δύο ακραίες καταστάσεις. Επίσης παρατηρούμε και την χαρακτηριστική καμπύλη της μέγιστης ισχύος P_m , η οποία και προκύπτει από τα ζεύγη των V_m και I_m , τα οποία και αντιστοιχούν στην μέγιστη τάση και ένταση.

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα η τιμή της έντασης φορτίου παραμένει σταθερή σε μεγάλο εύρος τιμών της τάσης και ότι για τιμές τάσης μεγαλύτερες από κάποιο όριο αρχίζει να μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί για άπειρη αντίσταση φορτίου.

Επίσης παρατηρείται ότι το σημείο μέγιστης ισχύος εμφανίζεται για τιμές τάσης και έντασης λίγο μικρότερες από τις V_{OC} και I_{SC} αντίστοιχα και αντιστοιχεί στο σημείο της καμπύλης $I-V$ όπου το περικλειόμενο εμβαδόν της είναι μέγιστο.

2.4.1.1 Maximum Power Point Tracking (MPPT), (Σημείο μέγιστης λειτουργίας).

Είναι πολύ σημαντικό να καταλάβουμε ότι για να μπορέσουμε να κάνουμε μια σωστή χρήση και εκμετάλλευση της παραγόμενης ισχύος από το φωτοβολταϊκό στοιχείο, θα πρέπει να διαμορφώσουμε κατάλληλα την τιμή της αντιστάσεως του φορτίου, ώστε ανάλογα με της υπάρχουσες συνθήκες ακτινοβολίας να έχουμε την μέγιστη δυνατή παραγωγή από το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Η τεχνολογία της ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος, άρχισε να χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα στις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών και αποτελεί πλέον χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο.

Η λογική πάνω στην οποία και βασίζεται η λειτουργία αυτή είναι να παρακολουθεί συνεχώς τις τιμές τάσης και έντασης εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, προκαλούν ανά τακτά χρονιά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης, αυξάνεται η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό είναι και το σημείο μέγιστης λειτουργίας.

2.4.1.2 Ο συντελεστής πλήρωσης FF (Fill Factor) του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Αν δούμε την χαρακτηριστική καμπύλη I - V του σχήματος Σχ.2.10 και Σχ.2.11 που περιγράφει την μέγιστη ισχύς P_m του φωτοβολταϊκού στοιχείου, μέσα από το εμβαδόν που περικλείουν τα I_m και V_m , μας δίνει τον λόγο της μέγιστης ισχύος που μπορεί να δώσει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο $P_m = I_m \times V_m$.

Το εμβαδόν αυτό της μέγιστης ισχύος προς το εμβαδόν το οποίο και περιγράφεται από το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης I_{SC} και της ανοικτωκυκλωμένης τάσης V_{OC} ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, δηλαδή με ιδανική συμπεριφορά του στοιχείου σαν πηγή σταθερού ρεύματος. Ο λόγος των δύο παραπάνω εμβαδών λέγεται συντελεστής πλήρωσης FF (Fill Factor). Οι τιμές τις οποίες και παίρνει είναι από 0 έως 1, ενώ η τιμή αναφοράς του είναι στις πρότυπες συνθήκες STC. Ο συντελεστής πλήρωσης εκφράζεται

$$\text{από την σχέση : } FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{SC} \cdot V_{OC}}$$

Οι τιμές τις οποίες και παίρνει ο συντελεστής πλήρωσης FF, κυμαίνονται μεταξύ από 0 έως 1. Είδαμε ότι με την ιδανική συμπεριφορά του στοιχείου περιγράφεται σαν μια πηγή σταθερού ρεύματος. Αυτό εξασφαλίζεται όταν ο συντελεστής πλήρωσης είναι κοντά στην μονάδα.

2.4.1.3 Συντελεστής απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτάται από τον συντελεστή πλήρωσης FF, από την βραχυκυκλωμένη ένταση I_{SC} και της ανοικτωκυκλωμένη τάση V_{OC}

Αν εκφράσουμε σαν H την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του Φ/β στοιχείου, και σαν A το εμβαδόν του, μπορούμε

$$\text{να ορίσουμε τον συντελεστή απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου : } n = \frac{P_m}{H \cdot A} = \frac{I_m \cdot V_m}{H \cdot A} = \frac{FF \cdot I_{SC} \cdot V_{OC}}{H \cdot A},$$

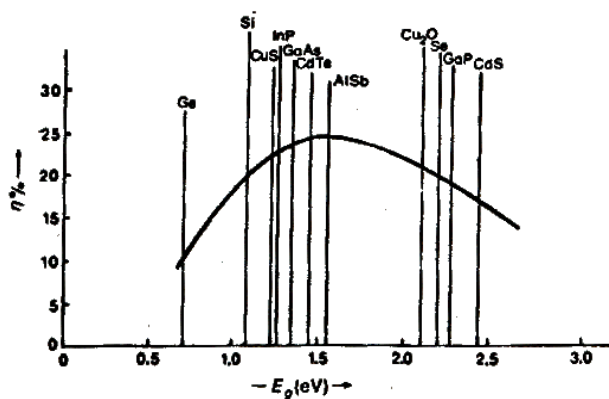
Ο συντελεστής απόδοσης εξαρτάται αρχικά από το είδος του ημιαγωγού, έτσι ο κάθε ημιαγωγός παρουσιάζει και διαφορετικό ενεργειακό διάκενο. Η περιοχή μέσα στην οποία και βρίσκονται τα ενεργειακά διάκενα των περισσοτέρων αγωγών είναι στη περιοχή μεταξύ 1,1eV έως 1,5eV (Σχ.2.12). Στην ηλιακή ακτινοβολία το ποσοστό των φωτονίων που έχουν ενεργειακό διάκενο μεγαλύτερο από το 1,1eV που παρουσιάζει το πυρίτιο είναι περίπου τα 2/3 των φωτονίων.

Έτσι αν ορίσουμε σαν $\Phi(E_g)$ την ροή των φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, όπου

Φ την φωτονική ροή στην ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο και σαν E_μ , την μέση ενέργεια των φωτονίων της

$$\text{ακτινοβολίας, παίρνουμε την σχέση του συντελεστή απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου : } n = \frac{\Phi(E_g) \cdot V_m}{\Phi \cdot E_\mu}$$

Επίσης θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται από την πυκνότητα της ακτινοβολίας, καθώς το κάθε ποσό της ακτινοβολίας, και άρα φωτονίων που προσπίπτει στον ημιαγωγό περιέχουν και διαφορετικό ενεργειακό διάκενο από εκείνο το οποίο και παρουσιάζει το κάθε είδος του ημιαγωγού.



Σχ.2.12 Θεωρητική απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σχέση με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού τους.

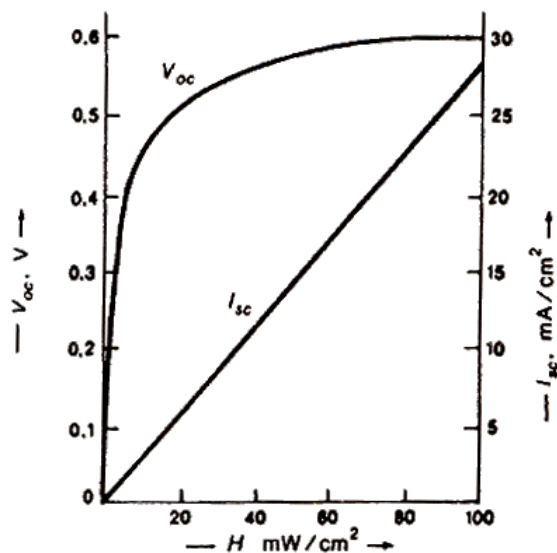
2.4.2 Λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου με επίδραση των εξωτερικών παραμέτρων (μεταβαλλόμενες συνθήκες).

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία και προσπίπτει τελικά στο φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι ανάλογη με την τιμή της ηλεκτρικής ισχύος την οποία και θα αποδώσει το στοιχείο στο κύκλωμα. Αυτό έχει σαν συνέπεια την μεταβολή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης και της βραχυκυκλωμένης έντασης του ρεύματος από το μηδέν (για το σκοτάδι) μέχρι τις μέγιστες τιμές τους, για τη μέγιστη ένταση της ακτινοβολίας (από φώς του ήλιου).

Επίσης είναι κατανοητό ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια κεκλιμένη επιφάνεια μεταβάλλεται τόσο στη διάρκεια του έτους όσο και κατά τη διάρκεια της ημέρας ενώ ποικίλει επίσης ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου όπου θα τοποθετηθεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Θα πρέπει να αναφερθεί, και με βάση τα πιο πάνω ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, παρουσιάζεται μείωση της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης του στοιχείου.

Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι με την μεταβολή της θερμοκρασίας που εμφανίζεται κατά την διάρκεια της ημέρας θα δημιουργηθεί πρόβλημα στην παραγωγή της ισχύος από το φωτοβολταϊκό στοιχείο.



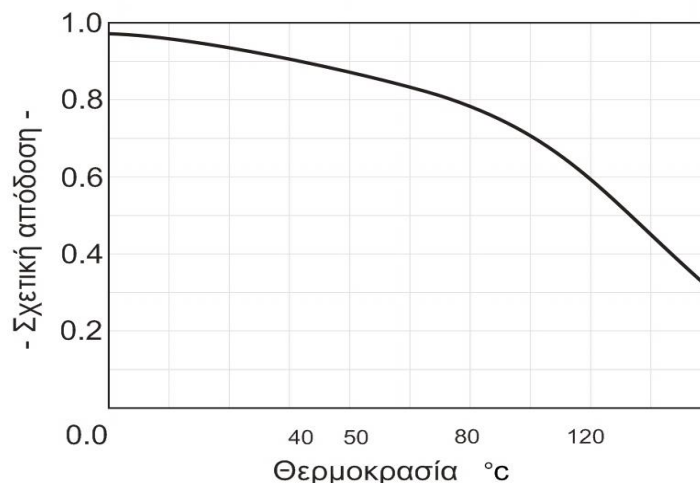
Σχ.2.11 Μεταβολή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης V_{oc} και τη βραχυκυκλωμένης έντασης I_{sc} σε σχέση με την ακτινοβολία H , σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Μπορούμε να δούμε τις σχέσεις που μας δίνουν την μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης σύμφωνα με την θερμοκρασία :

$$I_{sc} = I_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

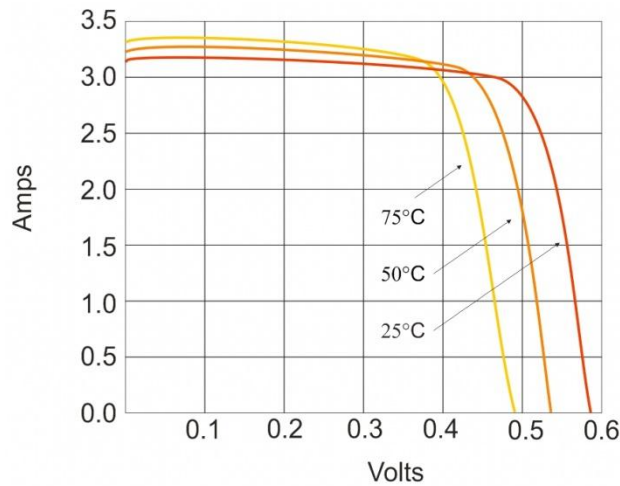
$$V_{oc} = V_0 \cdot (1 - \beta \cdot \Delta T)$$

Όπου : ΔT είναι η διαφορά θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία αναφοράς T_0 και α , β σταθερές. Από πειραματικές μετρήσεις έχει βρεθεί ότι η απόδοση του φωτοβολταϊκού μειώνεται κατά 0,5% ανά βαθμό Κελσίου, πέρα από τη θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας που είναι 30 °C.



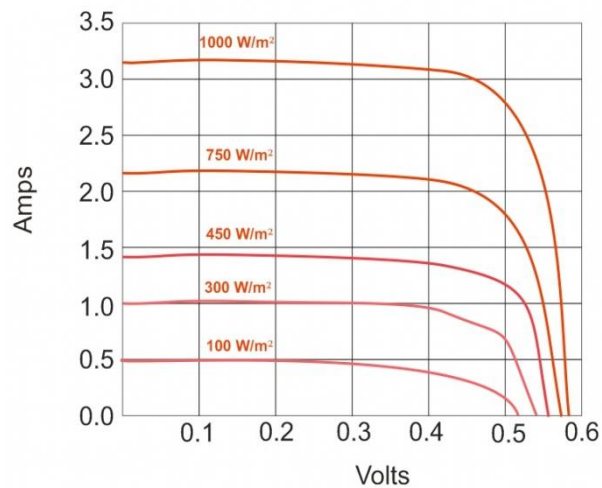
Σχ.2.12 Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου σε σχέση με την θερμοκρασία.

Επίσης σημαντική μείωση παρουσιάζεται και στην χαρακτηριστικά καμπύλη $I - V$, από την επίδραση της θερμοκρασίας του στοιχείου, στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τυπικές τιμές της καμπύλης $I - V$ για διάφορες τιμές θερμοκρασίας :



Σχ.2.13 Χααρακτηριστική $I - V$ φωτοβολταϊκού στοιχείου με την επίδραση της θερμοκρασίας.

Επίσης οι διάφορες τιμές της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζουν μετατόπιση στην χαρακτηριστικά $I - V$ του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, το μέγεθος που μεταβάλλεται περισσότερο είναι η ένταση (I), ενώ η τάση (U) έχει μικρότερη εξάρτηση. Φυσικά, και η ισχύς θα ακολουθεί ανάλογα την μεταβολή αυτή. Παρατηρείται μάλιστα ότι η γραμμή που ενώνει τα σημεία μέγιστης ισχύος για τις διάφορες τιμές έντασης ακτινοβολίας είναι σχεδόν κάθετη. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι, ανεξάρτητα από την τιμή έντασης ακτινοβολίας, η μέγιστη ισχύς του φωτοβολταϊκού εμφανίζεται για την ίδια περίπου τιμή της τάσης.



Σχ.2.14 Χααρακτηριστική $I - V$ φωτοβολταϊκού στοιχείου για διάφορες τιμές έντασης της ακτινοβολίας.

2.4.3 Οι πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων (Standard Test Conditions, STC).

Τα χαρακτηριστικά τα οποία και μας ενδιαφέρει να εξεταστούν σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι αρχικά ο συντελεστής της απόδοσης του, ο συντελεστής της απόδοσης του FF, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} του και η τάση του ανοικτού κυκλώματος V_{OC} . Ο παραπάνω έλεγχος γίνεται σε συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού, πυκνότητας και φάσματος ακτινοβολίας καθώς και σε συγκεκριμένη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ο λόγος για τον οποίο και θα πρέπει να γνωρίζουμε αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ώστε να μπορέσουμε να ξέρουμε την απόδοση του κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου σε συγκεκριμένες συνθήκες οι οποίες και αντιπροσωπεύουν τυπικές συνθήκες εκμετάλλευσης της ακτινοβολίας. Έτσι λοιπόν έχουν καθοριστεί οι πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων ή πλαισίων (STC, Standard Test Conditions), οι οποίες και περιλαμβάνουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία HM ισχύος 1kW/m^2 , καθώς και το φάσμα σε AM 1,5 το οποίο και είναι το ίδιο με αυτό του ήλιου σε κάθετη πρόσπτωση. Ενώ η θερμοκρασία του στοιχείου είναι $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Οι παραπάνω πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων εφαρμόζονται σε εξειδικευμένους χώρους ώστε να παραχθούν με την μέγιστη δυνατή απόδοση.

Με την εφαρμογή και τελικά τον καθορισμό των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων βάση των πρότυπων συνθηκών ελέγχου καταλήγουμε στο υπολογισμό ενός ακόμα χαρακτηριστικού του φωτοβολταϊκού στοιχείου, αυτού της μέγιστης ισχύος αιχμής P_p (Peak Power), η οποία και δίδεται όταν στο στοιχείο εφαρμοστούν οι πρότυπες συνθήκες ελέγχου. Η μονάδα της ισχύος αιχμής είναι W_p (Peak Watt). Η ισχύς αιχμής αποτελεί ένα βασικό χαρακτηριστικό του φωτοβολταϊκού πλαισίου και σύμφωνα με το οποίο γίνονται οι διάφοροι υπολογισμοί των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

2.5 Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Στα παραπάνω κεφάλαια είδαμε για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα οποία όμως και μόνα τους αποδίδουν πολύ μικρές τιμές ισχύος, ώστε να μπορέσουμε να τα εκμεταλλευτούμε σε εφαρμογές. Προκύπτει λοιπόν ανάγκη σύνδεσής τους κατά τρόπο που να ικανοποιεί τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Η σύνδεση λοιπόν πολλών φωτοβολταϊκών στοιχείων αποτελεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, όπως θα δούμε και πιο αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να θεωρηθούν ως βασικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες όμως συνδυαζόμενες αποδίδουν μεγαλύτερη τάση, ένταση ή και ισχύ ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία πρόκειται να αξιοποιηθούν.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να συνδεθούν σε σειρά και παράλληλα. Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των στοιχείων επιτυγχάνονται και διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.

Στην σύνδεση σε σειρά των στοιχείων, το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ίσο με το αντίστοιχο ρεύμα του ενός στοιχείου, δηλαδή $I_{SC} = I_{SC1}$. Ενώ η τάση του ανοικτού κυκλώματος είναι ίση με το γινόμενο των n στοιχείων, δηλαδή $V_{OC} = n \cdot V_{OC}$.

Στην παράλληλη σύνδεση των στοιχείων, η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι η ίδια με την αντίστοιχη του ενός στοιχείου, δηλαδή $V_{OC} = V_{OC1}$. Ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ίσο με το γινόμενο των n στοιχείων, δηλαδή $I_{SC} = n \cdot I_{SC}$.

2.6 Απολαβή και χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας.

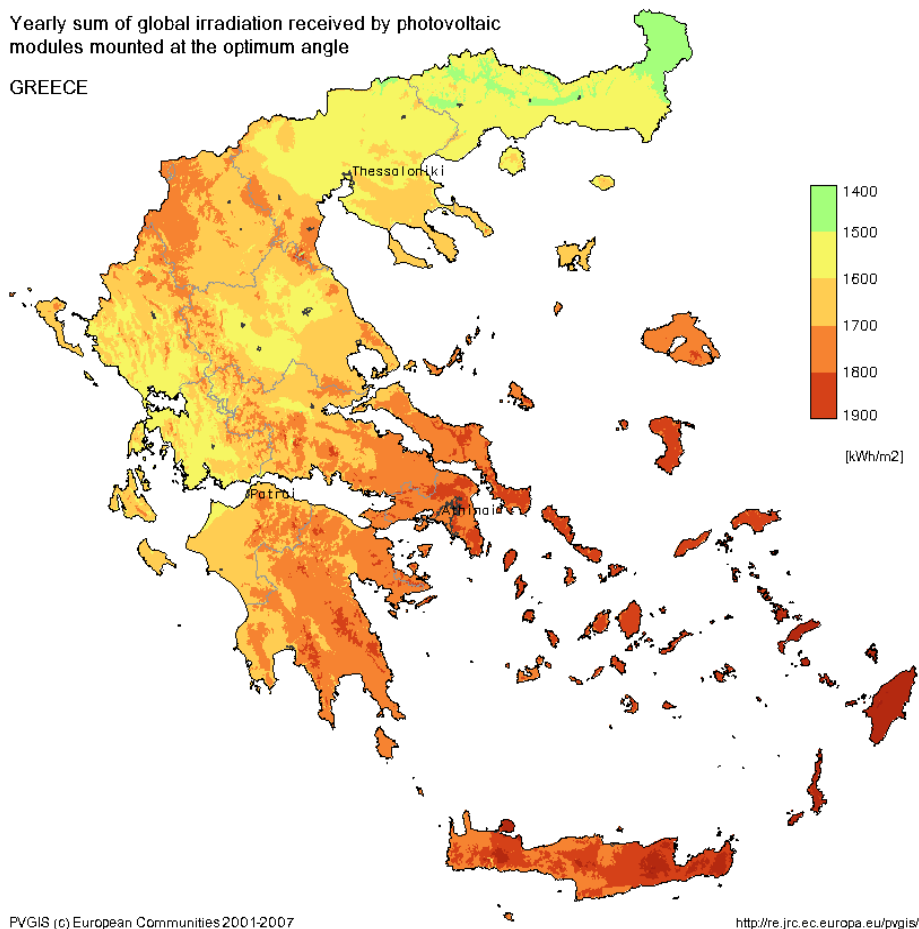
Όπως είδη έχει αναφερθεί στην παράγραφο 2.1.1 η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει τελικά στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι συνάρτηση των γεωγραφικών χαρακτηριστικών του τόπου εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, της ημέρας του έτους από την κατάσταση της ατμόσφαιρα εκείνη την ημέρα, δηλαδή αν υπάρχουν σύννεφα, υγρασία κλπ., καθώς και από την κλίση που έχει τοποθετηθεί το πλαίσιο.

Έτσι λοιπόν για να έχουμε μια βάση δεδομένων με χαρακτηριστικές μετρήσεις των τιμών, όπως είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η μέση τιμή της ημερήσιας πυκνότητας ισχύος, η μέση τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου, ανά μήνα και για συνολικά όλο το έτος θα πρέπει να τοποθετήσουμε στο εν λόγω μέρος που θέλουμε να εγκαταστήσουμε τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τους κατάλληλους αισθητήρες για την καταγραφή των παραπάνω ποσοτήτων. Η συλλογή αυτών των μετεωρολογικών στοιχείων θα αποτελέσουν στοιχεία προς μελέτη και ανάλυσή τους, με σκοπό την διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ενεργειακή ανάλυση (απόδοση) του τόπου εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθώς και την σωστή επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού με στόχο την αποδοτικότερη λειτουργία και εκμετάλλευση των ενεργειακών στοιχείων του τόπου εγκατάστασης.

Με την διεξαγωγή συμπερασμάτων από τις ενεργειακές μελέτες του τόπου εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών στοιχείων καταλήγουμε στην μέγιστη δυνατή απολαβή και τελικά χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Γνωρίζοντας είδη ότι η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια καθαρή καθώς και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, η χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελεί μονόδρομο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το μέλλον. Σύμφωνα με μελέτες το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο και προσπίπτει στην επιφάνεια της γης κάθε δευτερόλεπτο, θα μπορούσε να υπερκαλύψει κατά 10000 φορές τις συνολικές ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας. Επίσης από μελέτες που έχουν γίνει προκύπτει ότι μόνο το 1,5% της επιφάνειας που καταλαμβάνει η Ευρώπη (δηλαδή μια περιοχή που έχει επιφάνεια 380 km x 380 km) αν καλυφθεί από φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορεί να καλύψει την συνολική ζήτηση της ενέργειας παγκοσμίως.

Συγκεκριμένα στην Ελλάδα το ηλιακό δυναμικό είναι κατά πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με άλλες Ευρωπαϊκές χώρες (Μεγαλύτερο από 30% από την Γερμανία), οπότε και αποτελούν ιδανική λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αφού αποδεικνύονται πολύ πιο αποδοτικότερα από τον μέσο ευρωπαϊκό όρο.



Σχ.2.8 Χάρτης ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία (Πηγή PVGIS European Communities).

Η οικολογική και περιβαλλοντική διάσταση των φωτοβολταϊκών είναι γνωστή και αδιαμφισβήτητη. Έτσι η ανάπτυξη των μικρών ηλεκτροπαραγωγών από την ηλιακή ενέργεια μπορεί να καλύψει αποτελεσματικά την διαρκή αύξηση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας, που διαφορετικά θα καλύπτονταν από μεγάλους ρυπογόνους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Καθώς επίσης και από τα συνεπακόλουθα της εγκατάστασης των σταθμών παραγωγής, όπως οι γραμμές μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, που αυξάνουν ακόμα το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Με την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών από τους μικρούς κυρίως οικιακούς καταναλωτές μέσω των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων επιφέρουν μια σημαντική εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Επίσης με την εκμετάλλευση και την χρήση της ηλιακής ενέργειας από τους οικιακούς κυρίως καταναλωτές συμβάλουν στην εξομάλυνση των αιχμών του φορτίου και κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες όπου και η απαιτήσις ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνονται, με την αποφυγή των black – out , καθώς και στην μείωση του συνολικού κόστους της ηλεκτροπαραγωγής, καθώς η κάλυψη των αιχμών αυτών είναι ιδιαίτερα δαπανηρή για την εθνική οικονομία.

Είναι εύκολο λοιπόν να δούμε ότι με την σωστή απολαβή της ηλιακής ακτινοβολίας και με βάση των αναγκαίων ενεργειακών μελετών που θα πρέπει αρχικά να εφαρμοσθούν στον τόπο εγκατάστασης, με σκοπό την διεξαγωγή συμπερασμάτων για την βέλτιστη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, να έχουμε μια σωστή και αποτελεσματική χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας.

2.7. Κατηγορίες των Φ/Β συστημάτων.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1839 και χρησιμοποιήθηκε για πρακτικούς σκοπούς στα τέλη της δεκαετίας του '50 σε διαστημικές εφαρμογές. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο βασίζεται απευθείας μετατροπή της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Όπως γνωρίζουμε η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων συνεχώς εξελίσσεται και διαδίδεται ευρέως ανά τον κόσμο.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο, διακρίνονται σε κατηγορίες με σκοπό την αποδοτικότερη εφαρμογή και απόδοση τους στις ανάλογα με την χρήση την οποία και έχουν σε διάφορες εφαρμογές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Οι κατηγορίες λοιπόν των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανάλογα με την εφαρμογή τους διακρίνονται σε :

Καταναλωτικά προϊόντα (1mW–100 Wp) :

Τα συστήματα της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μικρής κλίμακας ισχύος όπως τροχόσπιτα, σκάφη αναψυχής, εξωτερικός φωτισμός κήπων, ψύξη και προϊόντα όπως μικροί φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές, συστήματα σηματοδότησης, φωτισμοί δρόμων κ.ά.



Σχ.2.9 Η χρήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μικρής κλίμακας.

Αυτόνομα ή απομονωμένα συστήματα (Off – Grid), (100 Wp –200k Wp) :

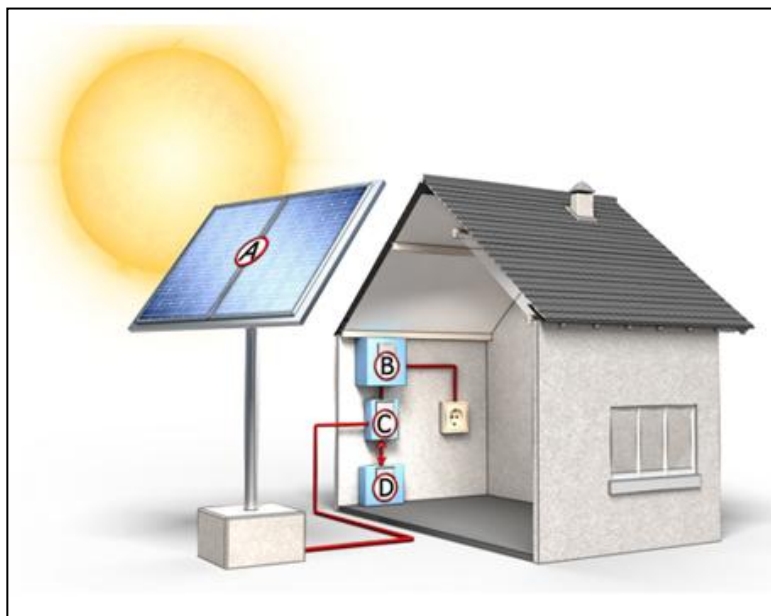
Στην κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για κατοικίες και μικρούς οικισμούς που δεν είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Βρίσκουν ακόμη εφαρμογή σε :

- Ηλεκτροδότηση Ιερών Μονών.
- Αφαλάτωση / άντληση / καθαρισμό νερού.
- Συστήματα εξωτερικού φωτισμού δρόμων, πάρκων, αεροδρομίων κλπ.
- Συστήματα τηλεπικοινωνιών, τηλεμετρήσεων και συναγερμού.
- Συστήματα σηματοδότησης οδικής κυκλοφορίας, ναυτιλίας, αεροναυτιλίας κλπ.
- Αγροτικές εφαρμογές όπως άντληση νερού, ιχθυοκαλλιέργειες, ψύξη αγροτικών προϊόντων,
- φαρμάκων κλπ.

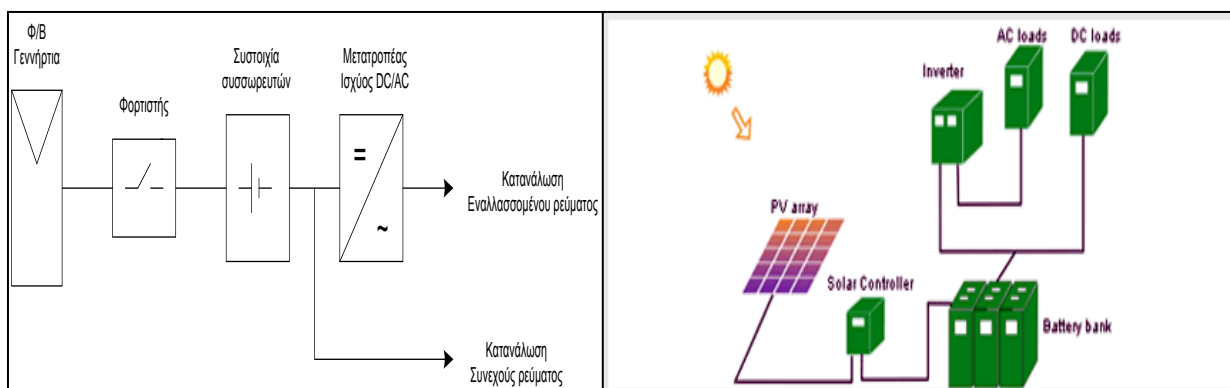
Στα αυτόνομα ή απομονωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα, είναι απαραίτητη η αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας σε μπαταρίες, η οποίες και χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια της νύχτας ή σε περιπτώσεις όπου και δεν υπάρχει αρκετή ηλιοφάνεια. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές των αυτόνομων συστημάτων είναι ειδικού τύπου (π.χ. τύπου "Solar") ώστε και να μπορούν να αντέχουν στους συνεχείς κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης τους. Οι μπαταρίες ανάλογα και με την ποιότητα τους, καθώς και από τον τρόπο χρήσης τους έχουν διάρκεια ζωής η οποία και κυμαίνεται από 3 έως και 8 χρόνια.

Επίσης στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα απαιτείτε η χρήση ενός ρυθμιστή φόρτισης ο οποίος και προστατεύει τους συσσωρευτές από την υπερφόρτιση καθώς και από την ολική εκφόρτιση τους.

Απαραίτητη είναι η χρήση ενός αντιστροφέα ισχύος (Inverter), ο οποίος και χρησιμοποιείται για την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος το οποίο και παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα, σε εναλλασσόμενο ρεύμα για την χρήση των ηλεκτρικών οικιακών συσκευών. Για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση του αντιστροφέα ισχύος και να λειτουργεί στην μέγιστη ισχύ του, θα πρέπει η ισχύς του αντιστροφέα να είναι περίπου το 80 – 90% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος των φωτοβολταϊκών.



Σχ.2.10 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα. Αποτελούμενο από το A: Φ/Β πλαίσια, B: Inverter, C: Ρυθμιστής φόρτισης, D: Μπαταρία.



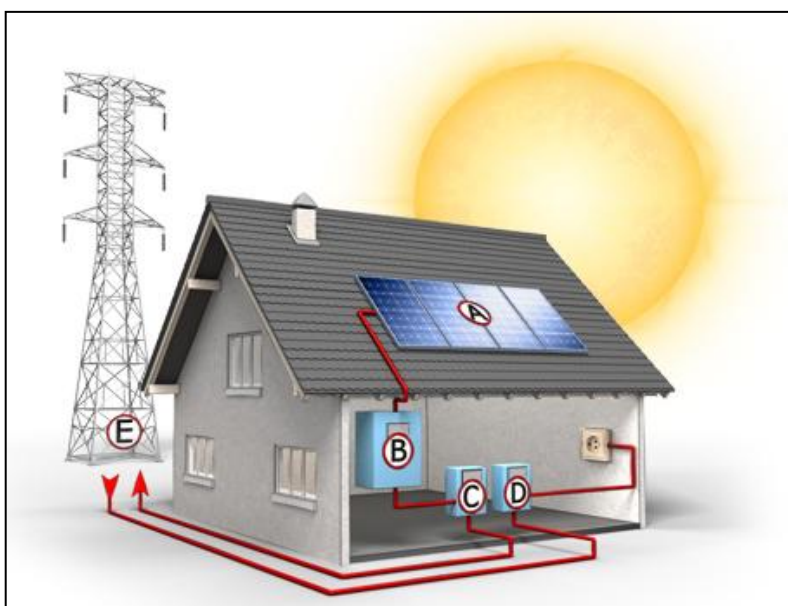
Σχ.2.11 Μονογραμμικό σχέδιο Αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

Διασυνδεδεμένα Φ/Β Συστήματα (On Grid) – Οικιακός Τομέας :

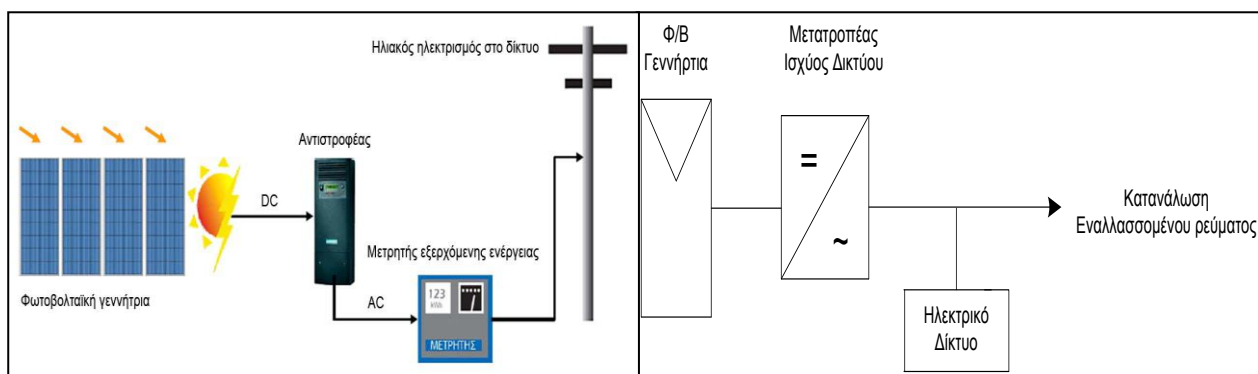
Στην κατηγορία αυτή εμπίπτουν Φ/Β συστήματα τυπικού μεγέθους 1,5kWp έως 20kWp, τα οποία έχουν εγκατασταθεί σε στέγες ή προσόψεις κατοικιών και τροφοδοτούν άμεσα τις καταναλώσεις του κτιρίου, η δε πλεονάζουσα ενέργεια διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Όπως προαναφέρθηκε, η κατηγορία αυτή αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας αγοράς Φ/Β συστημάτων.

Στα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας συστήματα μπορεί να εξοικονομηθεί το κόστος της εναλλακτικής παραγωγής και παράλληλα, εφ' όσον υπάρχει περίσσεια ισχύος, ο διαχειριστής του συστήματος (ΔΕΣΜΗΕ ή ΔΕΗ) αγοράζει την πλεονάζουσα ενέργεια σε εξαιρετικά προνομιακές τιμές. Δεδομένου ότι η παραγωγή από ΑΠΕ παρουσιάζει σημαντικές ωριαίες, ημερήσιες και εποχικές διακυμάνσεις, τα συστήματα αποθήκευσης στα διασυνδεδεμένα συστήματα διευκολύνουν τον καλύτερο συσχετισμό της τροφοδοσίας με τη ζήτηση.

Στα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά, τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία και η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας εφ' όσον υπάρχει διαβιβάζεται και πωλείται στο δίκτυο. Στις περιπτώσεις όμως που η ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά δεν επαρκεί για να καλύψει τα φορτία τότε το δίκτυο παρέχει τη συμπληρωματική ενέργεια. Έτσι στα διασυνδεδεμένα συστήματα υπάρχουν δύο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ένας μετράει την ενέργεια που δίνεται στο δίκτυο και ο άλλος την ενέργεια που παρέχει το δίκτυο. Επίσης στη περίπτωση των διασυνδεδεμένων συστημάτων δεν απαιτείται χρήση συσσωρευτών, γεγονός που ελαττώνει το αρχικό κόστος της εγκατάστασης καθώς και το κόστος συντήρησης.



Σχ.2.12 Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα. Αποτελούμενο από τα Α: Φ/Β πλαίσια, Β: Inverter, C: Μετρητής κατανάλωσης, Ε: Δημόσιο δίκτυο.

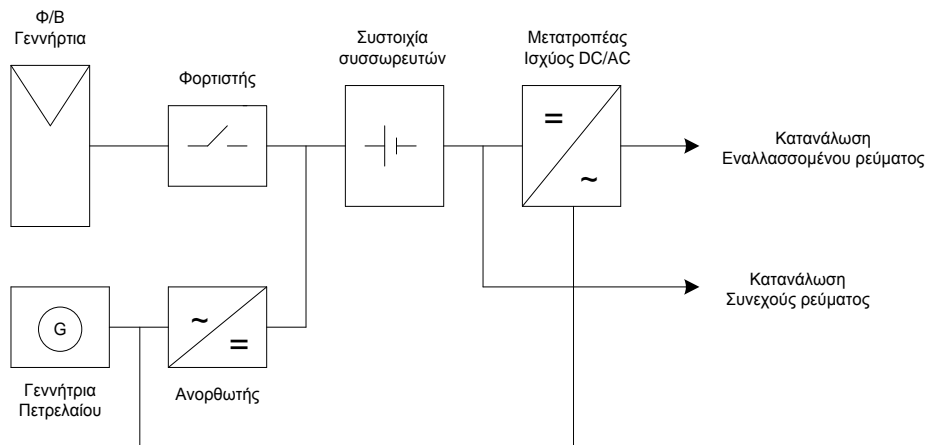


Σχ.2.13 Μονογραμμικό σχέδιο Διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος.

Αυτόνομα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα :

Πρόκειται για αυτόνομα συστήματα που αποτελούνται από τη Φ/Β συστοιχία σε συνδυασμό με άλλες πηγές ενέργειας όπως μια γεννήτρια πετρελαίου ή άλλη μορφή ΑΠΕ (π.χ. ανεμογεννήτρια).

Στα αυτόνομα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα συνήθως δεν απαιτούν μέσα αποθήκευσης (συσσωρευτές), παράγουν ενέργεια από εγκατεστημένη ντιζελογεννήτρια κατά τις ώρες απουσίας ήλιου ή/και αέρα και εξορθολογικοποιούν την εγκατεστημένη ισχύ των ηλιακών ή/και αιολικών μονάδων.



Σχ.2.14 Μονογραμμικό σχέδιο Αυτόνομου υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος.

Μεγάλα Διασυνδεδεμένα στο Δίκτυο Φ/Β Συστήματα :

Η κατηγορία αυτή αφορά Φ/Β σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεγέθους 50kWp έως μερικά MWp, στους οποίους η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο.

Οι μεγάλοι φωτοβολταϊκοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζονται φωτοβολταϊκά πάρκα, τα οποία και αποτελούνται από μεγάλο αριθμό φωτοβολταϊκών συστοιχιών συνδεδεμένες μεταξύ τους.



Σχ.2.15 Μεγάλο Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό πάρκο στο δίκτυο (11MW), στην Serra της Πορτογαλίας.

2.8 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Φ/Β συστημάτων έναντι των υπολοίπων Α.Π.Ε.

Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία απευθείας σε ηλεκτρισμό χωρίς να μεσολαβούν κινούμενα μέρη ούτε να παράγονται εκπομπές ρύπων. Εάν επιτευχθεί μείωση του κόστους παραγωγής της, η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ανταγωνιστική πηγή ενέργειας. Θα συμβάλει στην καταπολέμηση της αλλαγής του κλίματος που απειλεί τον πλανήτη μας και θα βελτιώσει την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αυτό δεν πρόκειται να επιτευχθεί στο άμεσο μέλλον, αλλά απαιτούνται ήδη από σήμερα συνεχείς επενδύσεις στη σχετική έρευνα και ανάπτυξη.

Σύμφωνα λοιπόν και με τα πιο πάνω τα βασικά πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων για τα οποία θα πρέπει να προτιμηθούν έναντι των άλλων τεχνολογιών εκμετάλλευσης των ΑΠΕ είναι :

- ✓ Παρέχουν τη δυνατότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας στο σημείο χρήσης της.(Η τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν συνοδεύεται από δαπανηρές ενεργειακές απώλειες που αντιμετωπίζει συνήθως ένα ηλεκτρικό δίκτυο, απώλειες οι οποίες στην Ελλάδα ανέρχονται σε 10% κατά μέσο όρο).
- ✓ Παρέχουν μεγάλο εύρος ηλεκτρικής ισχύος, από ελάχιστα mW έως εκατοντάδες kW ανάλογα με τις ανάγκες που πρόκειται να καλύψουν (άλλωστε όσο περισσότερα μικρά συστήματα παράγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εγκατασταθούν και συνδεθούν με το δίκτυο ηλεκτροδότησης, τόσο περισσότερα είναι τα οφέλη για την ποιότητα της ισχύος του δικτύου και για την σταθερότητα της ηλεκτρικής τάσης του).
- ✓ Βοηθούν στην εξομάλυνση των αιχμών φορτίου στους καλοκαιρινούς μήνες.(Η μέγιστη παραγωγή ηλεκτρισμού από τα Φ/Β συστήματα συμπίπτει χρονικά με τις ημερήσιες αιχμές ζήτησης ιδίως στους καλοκαιρινούς μήνες, βοηθώντας έτσι στην εξομάλυνση των αιχμών φορτίου και στη μείωση του συνολικού κόστους της ηλεκτροπαραγωγής, δεδομένου ότι η κάλυψη αυτών των αιχμών είναι ιδιαίτερα δαπανηρή).
- ✓ Είναι ιδιαίτερα εύχρηστα δίνοντας μάλιστα τον απόλυτο έλεγχο στον καταναλωτή.(Ο καταναλωτής έχοντας άμεση πρόσβαση στα στοιχεία που αφορούν την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια καθίσταται πιο προσεκτικός στον τρόπο που καταναλώνει την ενέργεια αυτή και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η ορθολογική χρήση και εξοικονόμησή της. Η εμπειρία της Δανίας για παράδειγμα έδειξε μείωση της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρισμού από τους χρήστες των Φ/Β συστημάτων της τάξης του 5-10%).
- ✓ Δεν προσβάλουν αισθητικά το περιβάλλον και μάλιστα η Φ/Β γεννήτρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό στην κατασκευή των κτιρίων (Τα ενσωματωμένα σε κτίρια Φ/Β συστήματα αποτελούν στις μέρες μας την πιο συνηθισμένη μορφή Φ/Β συστήματος. Στα συστήματα αυτά η Φ/Β γεννήτρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό παρέχοντας την δυνατότητα για καινοτόμους αρχιτεκτονικούς σχεδιασμούς, καθώς διατίθενται σε ποικιλία χρωμάτων, μεγεθών, σχημάτων και μπορούν να παρέχουν ευελιξία και πλαστικότητα στη μορφή, ενώ δίνουν και δυνατότητα διαφορετικής διαπερατότητας στο φως ανάλογα με τις ανάγκες του σχεδιασμού. Αντικαθιστώντας άλλα δομικά υλικά συμβάλλουν έτσι στη μείωση του συνολικού κόστους μιας κατασκευής. Αντίθετα, για παράδειγμα η εγκατάσταση μιας τεράστιας ανεμογεννήτριας σε μια όχη και τόσο ανοιχτή περιοχή δημιουργεί σίγουρα άσχημη οπτική εντύπωση).
- ✓ Είναι πολύ εύκολα επεκτάσιμα πράγμα αρκετά σημαντικό στη σημερινή εποχή όπου οι ανάγκες του ανθρώπου συνεχώς αυξάνονται και είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προβλεφθούν οι μελλοντικές ανάγκες του πέντε και δέκα χρόνια μετά. Έτσι με την προσθήκη κάποιων επιπλέον Φ/Β πλαισίων, και όχι με την εξολοκλήρου απόσυρση των υπαρχόντων, και ίσως την αντικατάσταση κάποιων υποσυστημάτων του συμπληρωματικού εξοπλισμού μπορεί με μικρό κόστος να επεκταθεί ένα Φ/Β σύστημα).
- ✓ Έχουν εντελώς αθόρυβη λειτουργία, μηδαμινές εκπομπές ρύπων, μηδενική ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση και γενικότερα είναι απολύτως φιλικά προς το περιβάλλον ίσως μάλιστα περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη ΑΠΕ (Πλεονεκτήματα που ενώ ίσως παλιότερα να μην έπαιζαν σπουδαίο ρόλο, στις μέρες μας αποτελούν σημαντικό κριτήριο για την επιλογή ενός συστήματος ΑΠΕ σε σχέση με ένα άλλο. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι κάθε KWh που παράγεται από Φ/Β συστήματα συνεπάγεται την αποφυγή έκλυσης 1,1 Kgr του CO₂ στην ατμόσφαιρα, καθώς και άλλων επικίνδυνων ρύπων όπως τα αιωρούμενα μικροσωματίδια, τα NOx, οι ενώσεις του θείου, κ.τ.λ.).
- ✓ Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (αυτό είναι λογικό εάν αναλογιστεί κανείς ότι ο χρόνος ζωής των Φ/Β στοιχείων είναι σήμερα μεγαλύτερος από 30 χρόνια, του αντιστροφέα 15 χρόνια, της μπαταρίας μολύβδου-οξέος 5-8 χρόνια, ενώ κατά την σχεδίαση ενός Φ/Β συστήματος συνήθως υποτίθεται καθαρός χρόνος λειτουργίας του περίπου 80.000 -100.000 ώρες και χρόνος ζωής του (κύκλος ζωής) περίπου 15-30 χρόνια. Με τον όρο κύκλος ζωής του Φ/Β συστήματος εννοούμε το χρονικό διάστημα οικονομικής αξιολόγησής του το οποίο συνήθως επιλέγεται όσο και ο χρόνος ζωής των Φ/Β πλαισίων).
- ✓ Οι απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησής τους είναι μηδαμινές (αφού αρκεί συνήθως ένας απλός τακτικός έλεγχος του Φ/Β συστήματος και καθαρισμός των επιφανειών των Φ/Β από τη σκόνη που ενδέχεται να υπάρχει).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

3.1 Γενικά.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκε η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Είδαμε ότι η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου περιορίζεται σε πολύ μικρές τιμές ισχύος για να είναι εκμεταλλεύσιμες στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές. Γι' αυτό το λόγο συνήθως γίνεται σύνδεση πολλών φωτοβολταϊκών στοιχείων έτσι ώστε να αποτελέσουν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο (Photovoltaic module).

3.2 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Όπως είδη έχει αναφερθεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο από μόνο του δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί σε πλήθος εφαρμογών και ο λόγος το ότι η τάση όπως και η ισχύς του είναι πολύ μικρή με σκοπό να μην χρίζει την αποδοχή σε πλήθος εφαρμογών. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο Κεφ.2.5 , η σύνδεση σε σειρά των φωτοβολταϊκών στοιχείων γίνεται με σκοπό να αυξηθεί η τάση ανοικτού κυκλώματος. Αν για παράδειγμα συνδεθούν σε σειρά 35 στοιχεία πυριτίου, με τάση ανοικτού κυκλώματος $V_{OC} = 0,6V$ και σε θερμοκρασία $\theta = 25^{\circ}C$, τότε η τάση του ανοικτού κυκλώματος είναι $V_{OC} = 30 \times 0,6 = 18V$.

Για 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. Τα Φ/Β πλαίσια του εμπορίου δεν έχουν τυποποιημένες διαστάσεις και ισχύεις. Σε συμβατικές συνθήκες αιχμής έχουν συνήθως, ανάλογα με τον τύπο και τον κατασκευαστή, τάση εξόδου από 4 V μέχρι 22 V , και ένταση ρεύματος από περίπου 0,5 A μέχρι 2,5A.

3.3 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Τα πλαίσια είναι κατασκευασμένα με μορφή στρώσεων. Τα φωτοβολταϊκά 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 συγκροτούνται μεταξύ τους, στεγανά και μόνιμα, με την βοήθεια μιας ταινίας από φυσικό ή συνθετικό ελαστικό και συσφιγγονται 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. Λόγω των απαιτούμενων υλικών και εργασιών για την κατασκευή του, το κόστος των Φ/Β πλαισίων είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το κόστος των ηλιακών στοιχείων που περιέχονται.

Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι πριν βγουν στο εμπόριο, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια υποβάλλονται συνήθως σε μια σειρά από αυστηρές δοκιμές ποιοτικού ελέγχου με θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις, καθώς και σε δοκιμασία 5ήμερης συνεχούς παραμονής σε ατμόσφαιρα σχετικής υγρασίας 95% και θερμοκρασίας 95 °C, για να ελεγχθεί η στεγανότητά τους.

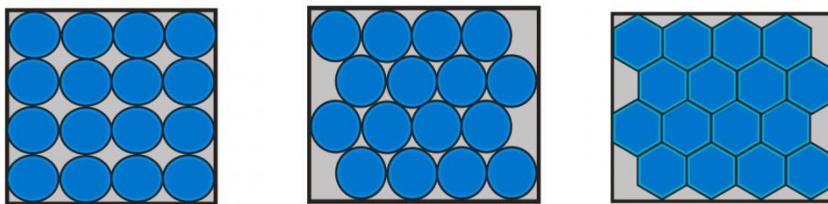
3.4 Απόδοση του Φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Η απόδοση του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου εξαρτάται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων που το αποτελούν (τάση, ισχύς κλπ.). Ο συντελεστής απόδοσης του Φ/Β πλαισίου (n_{π}) εκφράζει τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το Φ/Β πλαίσιο (P_{π}), προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του S. Επίσης 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. Οπότε ισχύει ότι : $n_{\pi} = \frac{P_{\pi}}{H \cdot S} \left[\frac{W}{(W/m^2) \cdot m^2} \right]$ και

$n_{\pi} = \frac{E}{\Pi \cdot S} \left[\frac{kW}{(kW/m^2) \cdot m^2} \right]$ (Με Π συμβολίζεται η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που πέφτει στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου).

Η τιμή του συντελεστή απόδοσης n_{π} εξαρτάται όχι μόνο από τη μέση απόδοση των ηλιακών στοιχείων (n), αλλά και από τον συντελεστή κάλυψης του πλαισίου (σ_{κ}), 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. Άρα ισχύει η σχέση : $\eta_{\pi} = \eta \cdot \sigma_{\kappa}$.



Σχ.3.1 Οι συνήθεις μορφές των φωτοβολταϊκών στοιχείων στα φωτοβολταϊκά 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).

Η τιμή του σ_{κ} εξαρτάται κυρίως από το σχήμα και την πυκνότητα της τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων πάνω στο Φ/Β πλαίσιο. Αρχικά η μορφή και η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο πλαίσιο ήταν η κυλινδρική όπως φαίνεται και στο σχήμα Σχ.3.1, τα οποία και προέκυπταν από την διαδικασία της παρασκευής της ράβδου πυριτίου με την μέθοδο Czochralski. Η τοποθέτηση των στοιχείων με αυτή την μορφή έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλο μέρος της επιφάνειας του πλαισίου που δεν χρησιμοποιείται. Για τον λόγο αυτό τα φωτοβολταϊκά στοιχεία στα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν πλέον τετραγωνικό σχήμα (mc – Si) ή την μορφή κυψελίδας (c – Si), με σκοπό αυξάνεται η περιοχή κάλυψης του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

3.5 Επίδραση εξωτερικών παραμέτρων(θερμοκρασίας και ρύπανσης) κατά την λειτουργία του πλαισίου.

Όπως είδαμε στο κεφάλαιο Κεφ.2.4.2 η απόδοση των Φ/Β στοιχείων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Όμως, ο συντελεστής απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία ή για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αντιστοιχεί σε μία συμβατική θερμοκρασία 20 °C, που συχνά, ιδίως στους θερινούς μήνες, διαφέρει αξιολογικά από την πραγματική θερμοκρασία του στοιχείου. Έτσι για να υπολογίσουμε τον συντελεστή απόδοσης των στοιχείων, για θερμοκρασίες διαφορετικές από τη συμβατική, ως συντελεστή απόδοσης των Φ/Β πλαισίων παίρνουμε το γινόμενο $\eta_{\pi} \cdot \sigma_{\theta}$. Σε συμβατική θερμοκρασία ο σ_{θ} 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.

Από το σχήμα Σχ.2.12 μπορούμε να δούμε το πώς μεταβάλλεται η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου σε σχέση με την θερμοκρασία.

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την παραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ιδίως όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειας του από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από την θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στην 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.

Έτσι λοιπόν καθορίζουμε τον συντελεστή καθαρότητας (σ_{ρ}), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο Φ/Β πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ που όταν η επιφάνεια του είναι τελείως καθαρή. Η τιμή του σ_{ρ} 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 η_{π} , που δίνεται για συμβατική θερμοκρασία και καθαρή επιφάνεια, επί τους συντελεστές διόρθωσης για τη θερμοκρασία σ_{θ} και για τη ρύπανση σ_{ρ} . Δηλαδή, η προηγούμενη σχέση παίρνει τη γενικότερη μορφή : $E = \Pi \cdot S \cdot \eta_{\pi} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\rho}$.

3.6 Ισχύς αιχμής του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Κάποιες φορές δεν είναι διαθέσιμα όλα τα λεπτομερειακά κατασκευαστικά δεδομένα και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων (διαστάσεις, συντελεστής κάλυψης, συντελεστής απόδοσης των ηλιακών στοιχείων κ.λπ.), 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/m^2 .

Οι μονάδες ισχύος που εκφράζουν την ισχύ αιχμής ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μιας ολόκληρης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης ή ενός ηλιακού στοιχείου ονομάζονται συχνά βάτ αιχμής (W_p , Watt peak) και κιλοβάτ αιχμής (kW_p).

Από την σχέση που δίνει την απόδοση η_p είναι φανερό ότι: $P_a (kW_p) = 1 (kW / m^2) \cdot S (m^2) \cdot \eta_p$

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:

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

Για να μπορούμε να μελετήσουμε την λειτουργία πλήρως ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου θα πρέπει να γνωρίζουμε τα παρακάτω βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του:

- Ισχύς αιχμής (P_a), σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
- Ανοιχτοκυκλώμενη τάση (V_{oc}) σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
- Βραχυκλωμένη ένταση ρεύματος (I_{sc}), σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
- Τάση (V_m), στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
- Ένταση ρεύματος (I_m), στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
- Συντελεστής πλήρωσης (FF), που ορίζεται ως ο λόγος του γινομένου $V_m \cdot I_m$ προς το γινόμενο $V_{oc} \cdot I_{sc}$.
- Συντελεστής απόδοσης (η_p), σε συμβατική θερμοκρασία και συντελεστής διόρθωσης της απόδοσης (σ_θ).
- Συντελεστής κάλυψης (σ_k).
- Διηλεκτρική αντοχή δηλαδή η ελάχιστη τάση που προκαλεί ηλεκτρική διάσπαση ανάμεσα στα ηλιακά στοιχεία και στο μεταλλικό περίβλημα του Φ/Β πλαισίου.

3.7 Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Με στόχο την καλύτερη απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων και την παραγωγή μεγαλύτερης τάσης ή μεγαλύτερου ρεύματος από την τάση ή το ρεύμα το οποίο και παράγει το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο χωριστά, υπάρχει και η ανάλογη σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

3.7.1 Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά.

Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου και απαιτείται τάση μεγαλύτερη από την τάση που παρέχει κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο χωριστά. Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά γίνεται με την σύνδεση του θετικού πόλου του ενός πλαισίου ο οποίος και συνδέεται με τον αρνητικό πόλο του επόμενου και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να συνδεθούν μεταξύ τους όλα τα πλαίσια. Έτσι τελικά προκύπτει μια φωτοβολταϊκή συστοιχία από φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά. Η σύνδεση λοιπόν όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων οδηγεί σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα το οποίο και αποτελείται από την ίδια τάση ανοικτού κυκλώματος, η οποία και θα ισούται με το άθροισμα των τάσεων όλων των σε σειρά φωτοβολταϊκών πλαισίων, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου θα είναι το ίδιο με το ρεύμα αυτό της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Δηλαδή η χαρακτηριστική V-I της συστοιχίας προέρχεται από τις χαρακτηριστικές του καθενός φωτοβολταϊκού πλαισίου με άθροιση των τάσεων για την ίδια τιμή ρεύματος. Έτσι για N όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύει :

$$V_{array} = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_N \quad V_{array} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_N$$

Για την τάση του ανοικτού κυκλώματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας των όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων ισχύει :

$$V_{array,OC} = V_{OC1} + V_{OC2} + V_{OC3} + \dots + V_{OCN}$$

Επίσης η τάση της μέγιστης ισχύος της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων θα είναι :

$$V_{array,mp} = V_{mp1} + V_{mp2} + V_{mp3} + \dots + V_{mpN}$$

Τέλος το ρεύμα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας θα είναι :

$$I_{array} = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_N$$

Αν όμως στην περίπτωση της σύνδεσης σε σειρά κάποιο ή κάποια φωτοβολταϊκά πλαίσια, παρουσιάσουν για κάποιο λόγο μικρότερη απόδοση, δηλαδή παρουσιάσει μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης τότε στο κύκλωμα θα υπερισχύει το ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου με την μικρότερη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Έτσι λοιπόν εάν η αντίσταση του φορτίου R με το οποίο είναι συνδεδεμένη η σειρά αυτή των φωτοβολταϊκών πλαισίων (ή φωτοβολταϊκή συστοιχία) είναι σχετικά μεγάλη, το ρεύμα τόσο των μη όμοιων όσο και των όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι ίδιο με αυτό της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ενώ η τάσεις των μη όμοιων (μικρότερες από ότι των όμοιων) και των όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι θετικές (αφού και τα μη όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν ως γεννήτριες) και προστίθενται για να δώσουν την τάση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Εάν όμως η αντίσταση του φορτίου R με το οποίο είναι συνδεδεμένη η σειρά αυτή των φωτοβολταϊκών πλαισίων (ή φωτοβολταϊκή συστοιχία) είναι σχετικά μικρή, ενώ το ρεύμα τόσο των μη όμοιων όσο και των όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι ξανά ίδιο με αυτό της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, οι τάσεις των μη όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων (μικρότερες από ότι των όμοιων) είναι αρνητικές (αφού τα μη όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν ως καταναλωτές) και προστιθέμενες με τις τάσεις των όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων για να δώσουν την τάση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στην ουσία αφαιρούνται. Όσο περισσότερα γίνουν τα όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σχέση με τα μη όμοια, τόσο πιο μικρή πρέπει να γίνει η R για να λειτουργούν τα μη όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια ως καταναλωτές.

3.7.2 Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων παράλληλα.

Η παράλληλη σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου και απαιτείται ρεύμα μεγαλύτερο από το ρεύμα που παρέχει το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο χωριστά. Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά γίνεται με την σύνδεση του θετικού πόλου του ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου με τον θετικό πόλο του άλλου και ο αρνητικός πόλος με τον αρνητικό πόλο του άλλου πλαισίου, και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να συνδεθούν μεταξύ τους όλα τα πλαίσια. Έτσι τελικά προκύπτει

μια φωτοβολταϊκή συστοιχία από φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα παράλληλα. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που θα συνδεθούν παράλληλα συνήθως είναι όμοια, δηλαδή έχουν την ίδια τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} και την ίδια τάση μέγιστης ισχύος V_{mp} . Το συνολικό ρεύμα μιας τέτοιας συστοιχίας όμοιων Φ/Β πλαισίων είναι το άθροισμα των ρευμάτων του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου, ενώ η τάση κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι και η τάση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Δηλαδή η χαρακτηριστική V-I της συστοιχίας προέρχεται από τις χαρακτηριστικές του καθενός Φ/Β πλαισίου με άθροιση των ρευμάτων για την ίδια τιμή τάσεως. Έτσι για N όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύει :

$$I_{array} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N$$

Το ρεύμα της βραχυκύκλωσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας των όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων θα είναι :

$$I_{array,SC} = I_{SC1} + I_{SC2} + I_{SC3} + \dots + I_{SCN}$$

Το ρεύμα μέγιστης ισχύος της συστοιχίας των όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι:

$$I_{array,mp} = I_{mp1} + I_{mp2} + I_{mp3} + \dots + I_{mpN}$$

Τέλος η τάση της συστοιχίας των όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι:

$$V_{array} = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_N$$

Από τα παραπάνω βλέπουμε ότι οι τάσεις ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} και μέγιστης ισχύος V_{m} της συστοιχίας είναι ίδιες με τις αντίστοιχες τάσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Αν στην περίπτωση της παράλληλης σύνδεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων κάποιο ή κάποια φωτοβολταϊκά πλαίσια, παρουσιάσουν για κάποιο λόγο μικρότερη απόδοση, τότε στην περίπτωση αυτή η αντίσταση του φορτίου R που είναι συνδεδεμένη παράλληλη φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι σχετικά μικρή, η τάση τόσο των μη όμοιων όσο και των όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι ίδια με αυτή της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ενώ τα ρεύματα των μη όμοιων και των όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι θετικά (αφού και τα μη όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν ως γεννήτριες) και προστίθενται για να δώσουν το ρεύμα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Εάν όμως η αντίσταση του φορτίου R με το οποίο είναι συνδεδεμένη η παράλληλη αυτή σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων (ή φωτοβολταϊκή συστοιχία) είναι σχετικά μεγάλη, ενώ η τάση τόσο των μη όμοιων όσο και των όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι πάλι ίδια με αυτή της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, τα ρεύματα των μη όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι αρνητικά (αφού τα μη όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν ως καταναλωτές) και προστιθέμενα με τα ρεύματα των όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων για να δώσουν το ρεύμα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στην ουσία αφαιρούνται. Όσο περισσότερα γίνουν τα όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σχέση με τα μη όμοια, τόσο πιο μεγάλη πρέπει να γίνει η R για να λειτουργούν τα μη όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια ως καταναλωτές.

3.7.3 Η μικτή σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Με την μικτή σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων επιτυγχάνουμε την αύξηση του ρεύματος και της τάσης ταυτόχρονα, σε τιμές που δεν μπορούν να επιτευχθούν από ξεχωριστά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Η μικτή λοιπόν σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων αποτελεί συνδυασμό την σύνδεσης σε σειρά και της παράλληλης σύνδεσης, οπότε και ισχύουν ότι είδαμε πιο πάνω για την κάθε σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων αναλυτικά.

Οπότε λοιπόν βλέπουμε ότι στην μικτή σύνδεση η τάση της συστοιχίας αυτής καθορίζεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που είναι συνδεδεμένα σε σειρά ενώ το συνολικό ρεύμα από τις παράλληλες ομάδες.

3.8 Διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Παράγοντας γήρανσης του πλαισίου) .

Η διάρκεια ζωής, άρα και η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων μειώνεται χρόνο με τον χρόνο και η μείωση της απόδοσης τους εκφράζεται με τον παράγοντα ή συντελεστή γήρανσης του πλαισίου.

Κριτήριο για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής ενός φωτοβολταϊκού θεωρείται από τις εταιρείες παραγωγής, η μείωση της απόδοσής του στο 80% της ονομαστικής του τιμής ισχύος αιχμής λόγω της γήρανσης του.

Η μεγαλύτερη αιτία κατά την οποία και οφείλεται η γήρανση του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι λόγω της υπερθέρμανσης τμημάτων του πλαισίου, που οφείλονται λόγω σκίασης του πλαισίου, είτε λόγω κάποιας τοπικής υπερθέρμανσης.

Σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει για τεχνολογίες των κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών πλαισίων πυριτίου, δείχνουν μια μείωση της απόδοσης του πλαισίου κατά 1% ανά έτος.

Οι εταιρίες παραγωγής φωτοβολταϊκών πλαισίων δίνουν εγγυήσεις της διατήρησης της απόδοσης του πλαισίου άνω του 80% της αρχικής του τιμής ισχύος, για πάνω από 20 χρόνια.

Επιπρόσθετα, ακόμη με αυτή την προβλεπόμενη μείωση της απόδοσής τους με το χρόνο, μπορούν να εξακολουθήσουν να είναι λειτουργικά για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Ηλεκτρονικοί μετατροπείς - αντιστροφείς ισχύος.

4.1 Γενικά για τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.

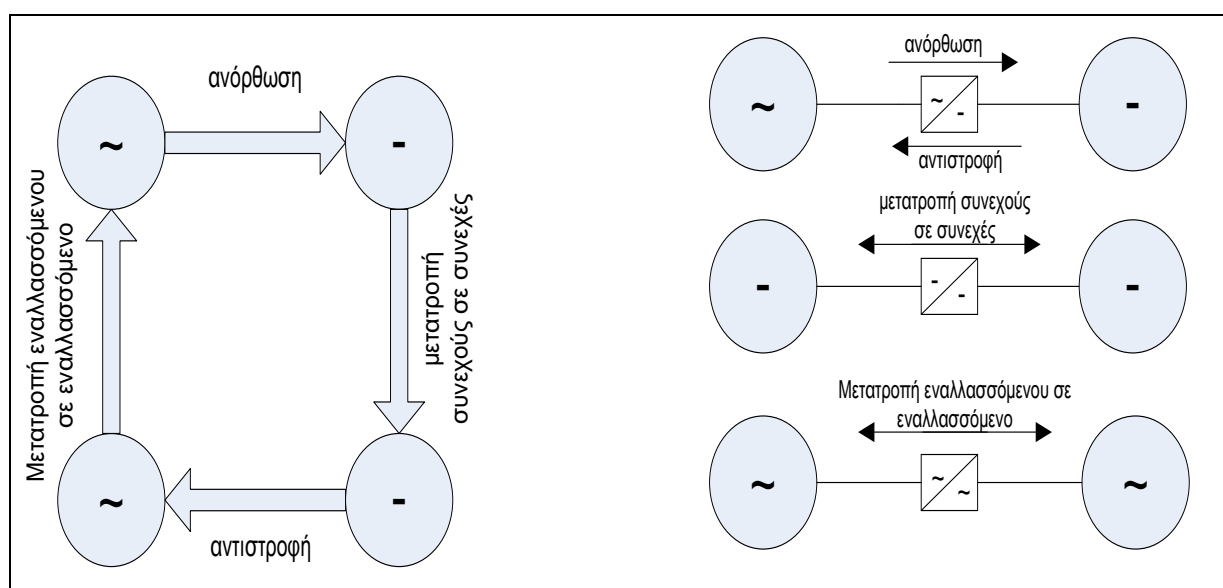
Όπως γνωρίζουμε τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε συνεχές ρεύμα (DC) στην έξοδο τους. Η μετατροπή αυτού του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο είναι απαραίτητη για την τροφοδότηση των διάφορων συσκευών και καταναλώσεων αν πρόκειται για αυτόνομο σύστημα ή για την σύνδεση ενός διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού πάρκου στο δίκτυο. Η μετατροπή λοιπόν αυτή επιτυγχάνεται μέσω ειδικών διατάξεων που ονομάζονται μετατροπείς ισχύος, που μέσω των οποίων η παραγόμενη ηλεκτρική τάση είτε σε συνεχής άλλης στάθμης (μετατροπέας dc – dc) είτε σε εναλλασσόμενη ελεγχόμενου πλάτους και συχνότητας (μετατροπέας dc – ac).

Με τον όρο ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος προσδιορίζουμε τις διατάξεις εκείνες που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος από μία μορφή σε μία άλλη μορφή και ο έλεγχος τους γίνεται με την βοήθεια ηλεκτρονικών ισχύος. Οι μετατροπείς αυτοί μπορούν να ρυθμίσουν και να ελέγξουν την ροή ενέργειας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων.

Όπως είδαμε οι μετατροπείς μπορούν μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και ελέγχουν την ροή ενέργειας. Από αυτή τους την ιδιότητα μπορούμε και να διακρίνουμε τις τέσσερις βασικές τους λειτουργίες :

- **Ανορθωτές:** Μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές, και η ενέργεια τους μεταφέρεται από ένα σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος σε ένα σύστημα συνεχούς ρεύματος.
- **Αντιστροφείς:** Μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο, και η ενέργεια τους μεταφέρεται από ένα σύστημα συνεχούς ρεύματος σε ένα σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος.
- **Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος:** Μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα ορισμένης τάσεως και πολικότητας σε συνεχές άλλης τάσεως και σε κάποιες περιπτώσεις και σε άλλης πολικότητας. Η ενέργεια τους μεταφέρεται από το ένα σύστημα συνεχούς στο άλλο σύστημα.
- **Μετατροπείς εναλλασσόμενου ρεύματος:** Μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ορισμένης τάσεως, συχνότητας και αριθμού φάσεων σε εναλλασσόμενο άλλης τάσεως, άλλης συχνότητας και σε κάποιες περιπτώσεις και άλλου αριθμού φάσεων. Η ενέργεια τους μεταφέρεται από το ένα σύστημα εναλλασσόμενου στο άλλο με άλλα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τα διάφορα είδη μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τα είδη των μετατροπέων με τους οποίους γίνεται η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας :



Σχ.4.1 Είδη μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας και τα αντίστοιχα είδη των μετατροπέων ηλεκτρικής ενέργειας.

Η απόδοση των ηλεκτρονικών μετατροπέων είναι μεγάλη της τάξης του 90% και πάνω. Επίσης οι μετατροπείς αποτελούνται από μια ηλεκτρονική διάταξη ανίχνευσης του μέγιστου σημείου ισχύος (Maximum Power Point Tracker - MPPT). Η διάταξη αυτή επεξεργάζεται ανάλογα το ρεύμα και την τάση εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας έτσι ώστε την κάθε χρονική στιγμή να μπορεί να απορροφά την μέγιστη δυνατή ισχύ από την φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Το σημείο της μέγιστης ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (V_{mp} και I_{mp}) εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, από την θερμοκρασία καθώς και από την χαρακτηριστική του φορτίου.

Σκοπός λοιπόν της διάταξης της ανίχνευσης του μέγιστου σημείου λειτουργίας είναι να διατηρεί το σημείο λειτουργίας του συστήματος στο σημείο της μέγιστης ισχύος, ανεξάρτητα από την μεταβολή των προηγούμενων παραγόντων.

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στους αυτόματους μετατροπείς και στους μετατροπείς γραμμής συγχρονισμού. Οι πρώτοι μετατροπείς μπορούν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα, ενεργοποιημένοι απλώς από την πηγή ισχύος εισόδου. Οι δεύτεροι μετατροπείς ενεργοποιούνται και ελέγχονται από το δίκτυο. Αυτό έχει σκοπό να παρέχει προστασία στο φωτοβολταϊκό σύστημα καθώς και την διατήρηση στο δίκτυο σταθερής ποιότητας του ρεύματος.

Οι κύριες κατηγορίες των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος όπου και χρησιμοποιούνται στις μετατροπές είναι :

- Μετατροπείς AC/DC (ανορθωτές).
- Διακοπτικοί μετατροπείς DC/DC.
- Αντιστροφείς DC/AC.

Οι βασικότερες κατηγορίες των μετατροπέων που χρησιμοποιούνται και θα δούμε πιο κάτω είναι οι διακοπτικοί μετατροπείς DC/DC και οι αντιστροφείς DC/AC.

Το βασικό στοιχείο στην διάταξη του μετατροπέα ή αντιστροφέα ισχύος είναι τα θυρίστορ τα οποία και χρησιμοποιούνται ανάλογα με την χρήση της εκάστοτε εφαρμογής. Η μετατροπή στηρίζεται στις διακοπτικές ικανότητες των θυρίστορ.

4.2 Μετατροπέας DC/DC.

Καταρχήν όταν μιλάμε για μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση (dc-dc), θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι είναι κάποιες διατάξεις στις οποίες περιέχεται πάντα ένα τουλάχιστον ελεγχόμενο ημιαγωγικό διακόπτη και μετατρέπουν την συνεχή τάση εισόδου σε συνεχή τάση διαφορετικής τιμής στην έξοδο τους. Επίσης θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι η είσοδος αυτών των μετατροπέων πολλές φορές είναι μια μη σταθεροποιημένη dc τάση και η οποία λαμβάνεται με ανόρθωση της τάσης του δικτύου η οποία και μπορεί να αυξομειώνεται λόγω των μεταβολών του πλάτους της τάσης του δικτύου.

Τους μετατροπείς συνεχής τάσης σε συνεχή τάση (dc-dc) θα τους ακούσουμε με το όνομα τροφοδοτικά, και αυτό γιατί η πιο συνηθισμένη τους εφαρμογή είναι σε σταθεροποιημένες dc τροφοδοσίες διακοπτικού τύπου και σε εφαρμογές dc κινητήριων συστημάτων, όπως ο έλεγχος μηχανών συνεχούς ρεύματος, η τροφοδοσία αναλογικών και ψηφιακών συστημάτων, σε συστήματα για την διόρθωση του συντελεστή ισχύος και γενικά για τη μετατροπή της μη σταθεροποιημένης dc εισόδου σε μια ελεγχόμενη dc έξοδο.

Οι κατηγορίες των μετατροπέων dc-dc είναι οι εξής :

- Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (BUCK).
- Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (BOOST).
- Μικτός (υποβιβασμού – ανύψωσης) μετατροπέας (BUCK – BOOST).
- Μετατροπέας του C_{uk} .
- Μετατροπέας με πλήρη γέφυρα.

Για την κατασκευή καθώς και για τον έλεγχο των παραπάνω τροφοδοτικών ισχύος που είδαμε χρησιμοποιούνται δύο ειδών τεχνικές που χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες και είναι οι εξής :

- Τεχνική των γραμμικών τροφοδοτικών.
- Τεχνική των διακοπτικών τροφοδοτικών.

Σύμφωνα με την τεχνική των γραμμικών τροφοδοτικών συνιστάτε στο ότι το ημιαγωγικό στοιχείο (transistor) του μετατροπέα λειτουργεί στην ενεργό (ή γραμμική) περιοχή δηλαδή συμπεριφέρεται σαν μια ρυθμιζόμενη αντίσταση όπου η πτώση τάσης που εμφανίζει στα άκρα του καθορίζει την τιμή της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα.

Σύμφωνα με την τεχνική των διακοπτικών τροφοδοτικών συνιστάτε στο ότι το ημιαγωγικό στοιχείο (transistor, MOSFET κ.λπ) του μετατροπέα λειτουργεί σαν διακόπτης, δηλαδή είτε είναι σε κατάσταση αγωγής είτε σε κατάσταση αποκοπής (είτε κλειστό είτε

ανοικτό). Το ποσοστό του χρόνου αγωγής του ημιαγωγικού στοιχείου κατά την διάρκεια μίας περιόδου λειτουργίας καθορίζει την τιμή της τάσης εξόδου του μετατροπέα.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να πούμε ότι τα dc τροφοδοτικά με σταθεροποιημένη τάση χρειάζονται στα περισσότερα αναλογικά και ψηφιακά συστήματα. Έτσι λοιπόν τα περισσότερα τροφοδοτικά έχουν σχεδιαστεί για να μας παρέχουν κάποιες λειτουργίες όπως είναι η σταθεροποιημένη τάση εξόδου η οποία και θα πρέπει να παραμένει σταθερή ως προς τις μεταβολές τις τάσεως εισόδου καθώς και του φορτίου στην έξοδο. Μια άλλη απαίτηση που έχουμε από τα dc τροφοδοτικά είναι η γαλβανική απομόνωση, όπου η έξοδος πρέπει να είναι ηλεκτρικά απομονωμένη από την είσοδο. Επίσης μια άλλη απαίτηση που έχουμε είναι η δυνατότητα να υπάρχουν πολλαπλές εξοδοί (θετικές και αρνητικές) και οι οποίες θα πρέπει να είναι απομονωμένες μεταξύ τους.

Τέλος εκτός των παραπάνω κοινή επιδίωξη και στόχος είναι η μείωση των διαστάσεων καθώς και του βάρους των τροφοδοτικών και εν τέλει την αύξηση της απόδοσης τους.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας των ημιαγωγών οδηγηθήκαμε στην χρήση των διακοπτικών τροφοδοτικών τα οποία και παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα γραμμικά τροφοδοτικά όπως είναι το μικρότερο μέγεθος τους καθώς και η μεγαλύτερη απόδοσή τους. Επίσης θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το κόστος των γραμμικών καθώς και των διακοπτικών τροφοδοτικών εξαρτάται από την ισχύ τους.

4.2.1 Τεχνική της Διαμόρφωσης του Εύρους των Παλμών.

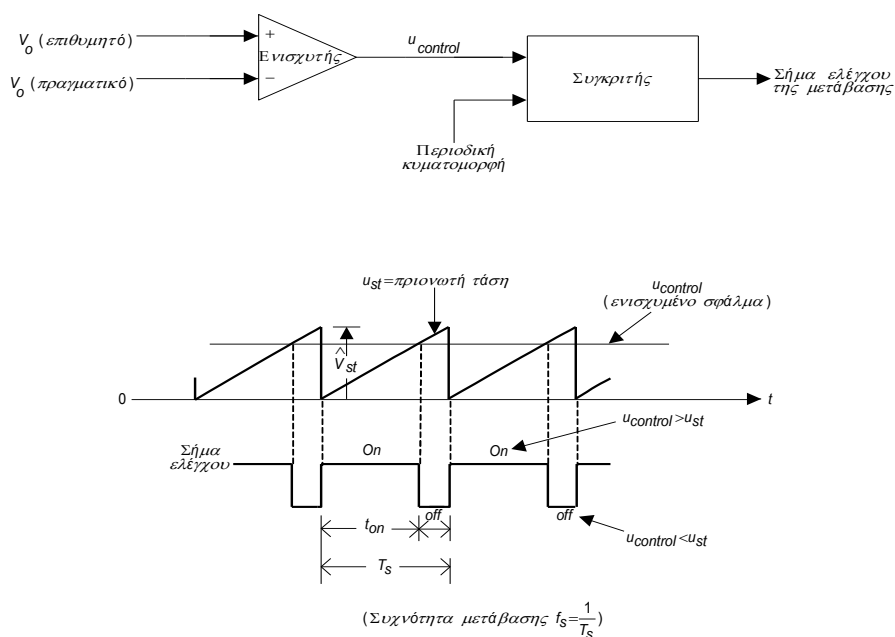
Όπως έχουμε δει και πιο πάνω στην Τεχνική της Διαμόρφωσης του Εύρους των Παλμών (Δ.Ε.Π. ή P.W.M.) θα πρέπει να διατηρούμε σταθερή την συχνότητα του μετατροπέα (μετάβασης) και να μεταβάλουμε τον χρόνο αγωγής του ημιαγωγικού στοιχείου έτσι ώστε να παίρνουμε την επιθυμητή τάση στην έξοδο.

Έτσι λοιπόν με σταθερή συχνότητα μετάβασης το σήμα ελέγχου του ημιαγωγικού στοιχείου το οποίο και ελέγχει την κατάσταση του αν δηλαδή είναι σε αγωγή ή όχι, παράγεται με την σύγκριση του επιπέδου τάσης του σήματος ελέγχου $u_{control}$ με μια περιοδική κυματομορφή σταθερού πλάτους σαν και αυτή που βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα Σχ. 4.2 . Από το παρακάτω λοιπόν σχήμα παρατηρούμε ότι το σήμα της τάσης ελέγχου το παίρνουμε ενισχύοντας το σφάλμα ή την διαφορά της πραγματικής τάσης εισόδου με την επιθυμητή τιμή της τάσης, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Η συχνότητα της περιοδικής κυματομορφής (είναι συνήθως πριονωτή), και καθορίζει την συχνότητα μετάβασης. Όπως ήδη γνωρίζουμε στην Τεχνική της Διατήρησης του Εύρους των Παλμών, η συχνότητα αυτή διατηρείται σταθερή και την επιλέγουμε σε μια περιοχή από μερικά kHz μέχρι μερικές εκατοντάδες kHz.

Όπως διακρίνουμε από το σχήμα Σχ. 4.2 όταν το ενισχυμένο σήμα σφάλματος που μεταβάλλεται πολύ αργά με τον χρόνο σε σχέση με την συχνότητα μετάβασης είναι μεγαλύτερο από την πριονωτή κυματομορφή, το σήμα ελέγχου του ημιαγωγικού στοιχείου φτάνει στο μέγιστο του σημείο (high), με αποτέλεσμα να κλείσει το ημιαγωγικό στοιχείο. Σε άλλη περίπτωση το ημιαγωγικό στοιχείο είναι ανοικτό.

Από το σχήμα βλέπουμε ότι η σχετική διάρκεια αγωγής εκφράζεται σαν μια συνάρτηση της $u_{control}$ και του πλάτους της πριονωτής

κυματομορφής \hat{V}_{st} , με την παρακάτω σχέση: $D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{V_{control}}{\hat{V}_{st}}$



Σχ. 4.2 Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού.

4.2.1.1 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (BUCK).

Ο έλεγχος της τάσης εξόδου δηλαδή η μεταβολή της dc τάσης από μια στάθμη σε μια άλλη επιτυγχάνεται με την χρήση μετατροπέων συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση (dc – dc converters). Τα κυκλώματα αυτά χρησιμοποιούν ένα τουλάχιστον ημιαγωγικό στοιχείο το οποίο και λειτουργεί σαν διακόπτης, δηλαδή είτε είναι σε κατάσταση αγωγής είτε είναι σε κατάσταση αποκοπής (είτε κλειστά, είτε ανοικτά).

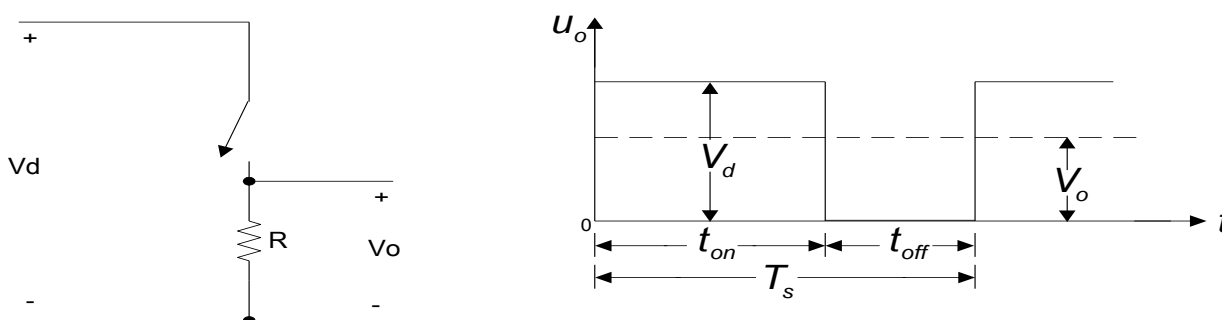
Για τον έλεγχο των μετατροπέων αυτών όπως και αναφέραμε παραπάνω χρησιμοποιούνται δύο κυρίως τεχνικές :

- Τεχνική της Διαμόρφωσης του Εύρους των Παλμών (Δ.Ε.Π. ή Pulse Width Modulation – P.W.M.)
- Τεχνική της Διαμόρφωσης της Συχνότητας των Παλμών (Δ.Σ.Π. ή Pulse Frequency Modulation – P.F.M.)

Σύμφωνα με την τεχνική της Διαμόρφωσης του Εύρους των Παλμών συνιστάται να διατηρούμε σταθερή την συχνότητα έναυσης και σβέσης των ημιαγωγικών στοιχείων (άρα την συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα) και να μεταβάλουμε τον χρόνο αγωγής (άρα και τον χρόνο αποκοπής) των ημιαγωγικών στοιχείων.

Από τα παραπάνω λοιπόν καταλαβαίνουμε ότι για μια δεδομένη τάση που θα έχουμε στην είσοδο, την μέση τάση στην έξοδο την ρυθμίζουμε ελέγχοντας τους χρόνους έναυσης και σβέσης (t_{on} και t_{off}) των ημιαγωγικών στοιχείων.

Για να κατανοήσουμε καλύτερα την παραπάνω λειτουργία ας θεωρήσουμε σαν ένα μετατροπέα dc – dc του παρακάτω σχήματος.



Σχ. 4.3 Διακοπτική dc – dc μετατροπή.

Όπως βλέπουμε και από το Σχ.4.3 , η μέση τιμή V_o της τάσης εξόδου U_o εξαρτάται από τους χρόνους t_{on} και t_{off} .

Στην τεχνική της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών χρησιμοποιούμε σταθερή συχνότητα έναυσης και σβέσης των ημιαγωγικών στοιχείων (άρα και σταθερή περίοδο μετάβασης $T_s = t_{on} + t_{off}$) και ρυθμίζουμε την διάρκεια κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός.

Σύμφωνα λοιπόν με αυτή την μέθοδο που ονομάζεται μετάβαση με την τεχνική της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών μεταβάλλεται η σχετική διάρκεια αγωγής (duty ratio) $D = t_{on} / T_s$ που ορίζεται ως ο λόγος της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός προς την περίοδο μετάβασης.

Στην άλλη μέθοδο δηλαδή αυτή της Διαμόρφωσης της Συχνότητας των Παλμών συνιστάται στο να διατηρούμε σταθερό τον χρόνο αγωγής ή αποκοπής του ημιαγωγικού στοιχείου και να μεταβάλλουμε τον χρόνο αποκοπής ή αγωγής άρα και την συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα έτσι ώστε να παίρνουμε την επιθυμητή έξοδο.

Όπως παρουσιάστηκε και στο Κεφάλαιο 4.2. υπάρχουν διάφορες τοπολογίες μετατροπέων dc – dc. Ένας διαχωρισμός των τοπολογιών αυτών γίνεται με κριτήριο το αν υπάρχει ή όχι γαλβανική απομόνωση μεταξύ εισόδου και εξόδου. Έτσι λοιπόν οι βασικότερες τοπολογίες διακοπτικών μετατροπέων dc – dc χωρίς γαλβανική απομόνωση είναι ο μετατροπέας υποβιβασμού (BUCK), όπου και θα δούμε πιο κάτω αναλυτικότερα την λειτουργία του. Είναι ο μετατροπέας ανύψωσης (BOOST) καθώς και ο μετατροπέας υποβιβασμού – ανύψωσης (BUCK – BOOST) της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου.

Αντίστοιχα λοιπόν οι βασικές τοπολογίες των διακοπτικών τροφοδοτικών dc – dc με γαλβανική απομόνωση είναι ο μετατροπέας υποβιβασμού – ανύψωσης (FLYBACK) και οι μετατροπείς υποβιβασμού (FORWARD ή PUCH-PULL) της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου.

Όπως είδη έχει αναφερθεί και έχουμε δει από τα προηγούμενα κεφάλαια ο μετατροπέας dc – dc υποβιβασμού της τάσης (buck dc – dc converter) παράγει μια μέση τάση εξόδου χαμηλότερη από την dc τάση εισόδου V_d ($V_o < V_d$). Ο συγκεκριμένος μετατροπέας βρίσκει εφαρμογή όπως είδη γνωρίζουμε σε dc διακοπτικά τροφοδοτικά, καθώς επίσης μια άλλη βασική εφαρμογή του είναι ο έλεγχος της ταχύτητας των dc κινητήρων.

Στο βασικό κύκλωμα ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, με καθαρά ωμικό φορτίο και θεωρώντας τον διακόπτη ιδανικό, τότε η στιγμιαία τάση εξόδου εξαρτάται από την κατάσταση του διακόπτη. Στο προηγούμενο σχήμα το οποίο και είχαμε μελετήσει σχήμα Σχ.4.3, βλέπουμε το πώς εξαρτάται η στιγμιαία τάση εξόδου από την κατάσταση του διακόπτη.

Έτσι λοιπόν αν θεωρήσουμε ότι το βασικό κύκλωμα ενός μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης ότι αποτελείται από ένα καθαρά ωμικό φορτίο, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την στιγμιαία τάση εξόδου η οποία και εξαρτάται από την κατάσταση του ημιαγωγικού στοιχείου (όπως είχαμε δει στο κεφάλαιο 1.4. και στο σχήμα 1.3).

Έτσι λοιπόν για να υπολογίσουμε την μέση τάση εξόδου σαν συνάρτηση της σχετικής διάρκειας αγωγής D έχουμε :

$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_o(t) dt = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{t_{on}} V_d dt + \int_{t_{on}}^{T_s} 0 dt \right) = \frac{t_{on}}{T_s} V_d = DV_d$$

Αν αντικαταστήσουμε στην παραπάνω εξίσωση το D από την εξίσωση της σχετικής διάρκειας αγωγής έχουμε :

$$V_o = \frac{V_d}{\hat{V}_{st}} V_{control} = k V_{control}$$

Όπου :

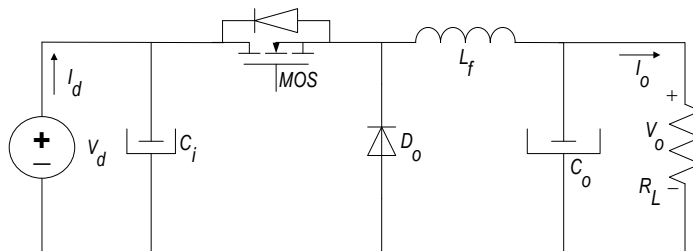
$$k = \frac{V_d}{\hat{V}_{st}} = \text{σταθερά}$$

Από τις παραπάνω λοιπόν σχέσεις παρατηρούμε ότι την μέση τάση εξόδου V_o μπορούμε να την ελέγχουμε μεταβάλλοντας τον λόγο t_{on}/T_s . Επίσης θα πρέπει να πούμε ότι η μέση τάση εξόδου V_o μεταβάλλεται γραμμικά με την τάση ελέγχου.

Παρατηρώντας το προηγούμενο κύκλωμα βλέπουμε ότι παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα σε πραγματικές εφαρμογές. Ένα από αυτά είναι ότι στην πράξη το φορτίο μας θα είναι τις περισσότερες φορές επαγωγικό. Ακόμα όμως και ωμικό να είναι το φορτίο, θα υπάρχει πάντα μια παρασιτική αυτεπαγωγή. Αυτό σημαίνει ότι ο διακόπτης θα πρέπει να απορροφά την ενέργεια η οποία και αποθηκεύεται στην αυτεπαγωγή και αυτός είναι ένας λόγος που μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του διακόπτη.

Ένα άλλο μειονέκτημα που υπάρχει είναι ότι η τάση εξόδου κυμαίνεται μεταξύ 0 και V_d , πράγμα το οποίο και δεν είναι θεμιτό σε πολλές εφαρμογές.

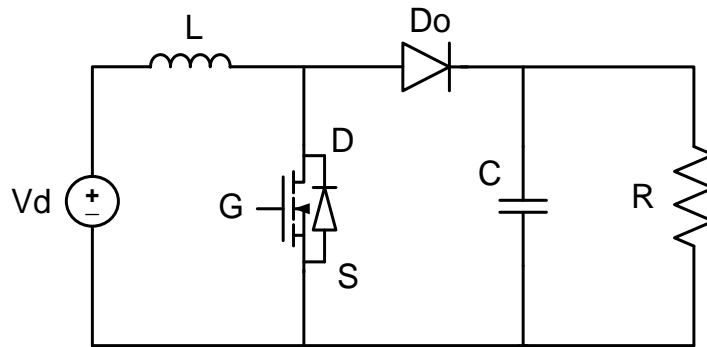
Τα παραπάνω λοιπόν προβλήματα τα οποία και παρουσιάζονται, μπορούν να λυθούν με την χρήση μιας διόδου για το πρόβλημα με την αποθηκευμένη ενέργεια, καθώς και οι διακυμάνσεις που εμφανίζονται στην τάση εξόδου μπορούν να ελαττωθούν με την χρήση ενός χαμηλοπερατού φίλτρου, το οποίο και αποτελείται από ένα πηνίο και έναν πυκνωτή. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το κύκλωμα του διακοπτικού μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης εξόδου, όπως αυτός προκύπτει από τα παραπάνω.



Σχ.4.4 Κυκλωματικό διάγραμμα βασικής τοπολογίας διακοπτικού μετατροπέα υποβιβασμού τάσης εξόδου.

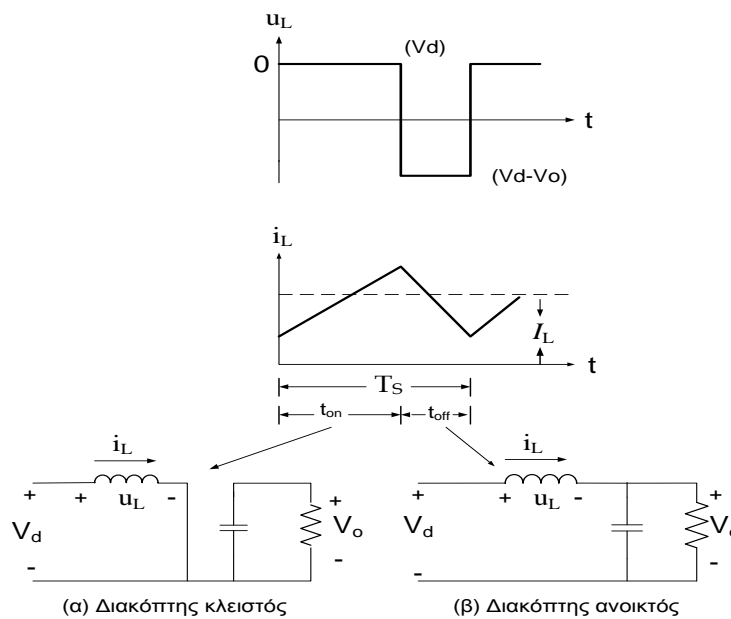
4.2.1.2 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (BOOST).

Ο διακοπτικός μετατροπέας dc-dc μας κάνει ανύψωση στην τάση δηλαδή είναι ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης. Η τάση εξόδου είναι πάντα μεγαλύτερη από την τάση εισόδου. Η κύρια του εφαρμογή είναι στα διακοπτικά τροφοδοτικά συνεχούς τάσης και στην πέδηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος με ανάκτηση ισχύος. Το χαρακτηριστικό του μετατροπέα boost είναι ότι η τάση εξόδου είναι πάντα μεγαλύτερη από την τάση εισόδου.



Σχ.4.5 Κυκλωματικό διάγραμμα βασικής τοπολογίας διακοπτικού μετατροπέα ανύψωσης τάσης boost.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι κυματομορφές της μόνιμης κατάστασης ισορροπίας για το συγκεκριμένο τρόπο αγωγής, όπου σε αυτήν την κατάσταση το ρεύμα του πηνίου ρέει συνεχώς.



Σχ.4.6 Λειτουργία συνεχούς ρεύματος.

Στην μόνιμη κατάσταση ισορροπίας το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου στο διάστημα μιας περιόδου πρέπει να ισούται με μηδέν, οπότε έχουμε:

$$V_d t_{on} + (V_d - V_o) t_{off} = 0$$

Διαιρώντας και τα δυο μέλη δια T_s και αναδιατάσσοντας τους όρους:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D}$$

4.2.1.3 Μικτός (υποβιβασμού – ανύψωσης) μετατροπέας (BUCK – BOOST).

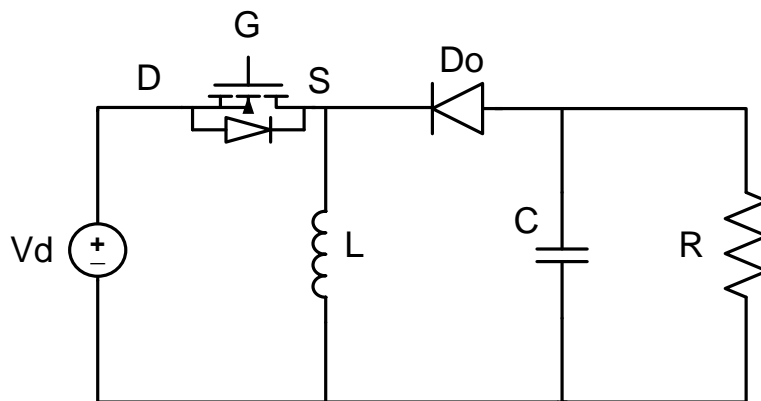
Η κύρια εφαρμογή ενός μετατροπέα υποβιβασμού-ανύψωσης τάσης, είναι στα διακοπτικά τροφοδοτικά συνεχούς τάσης, όπου μπορεί να είναι επιθυμητή μια έξοδος με αρνητική πολικότητα σε σχέση με το κοινό σημείο της τάσης εισόδου εξόδου. Επίσης χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που είναι επιθυμητό η τάση εξόδου να είναι είτε υψηλότερη είτε χαμηλότερη από την τάση εισόδου. Ένας μικτός μετατροπέας μπορεί να σχηματιστεί με την σύνδεση στη σειρά των δυο βασικών μετατροπέων: α) Τον μετατροπέα υποβιβασμού και β) Τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Στην μόνιμη κατάσταση ισοροπίας, ο λόγος μετατροπής της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου, είναι το γινόμενο των λόγων μετατροπής των δυο μετατροπέων που είναι συνδεδεμένοι στη σειρά, θεωρώντας ότι οι διακόπτες και των δυο μετατροπέων έχουν τον ίδιο λόγο D . Στον μικτό μετατροπέα όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, παρέχεται ενέργεια στην αυτεπαγωγή από την είσοδο, και η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη, ενώ όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός, η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στην αυτεπαγωγή μεταφέρεται στην έξοδο. Σε αυτό το διάστημα δεν παρέχεται ενέργεια από την είσοδο. Στην μόνιμη κατάσταση ισοροπίας ο πυκνωτής εξόδου θεωρείται πολύ μεγάλος και επομένως η τάση εξόδου είναι σταθερή. Εξισώνοντας το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου στο διάστημα μιας περιόδου με το μηδέν, έχουμε:

$$\overline{V_L} = 0 \Rightarrow \frac{1}{T_S} \left[\int_0^{t_{on}} V_d dt + \int_{t_{on}}^{T_S} (-V_o) dt \right] = 0$$

$$\Rightarrow V_d t_{on} = V_o (T_S - t_{on}) \Rightarrow V_d D T_S = V_o T_S (1 - D)$$

$$\Rightarrow \frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{1 - D} \quad D \leq 0,5 \quad \frac{V_o}{V_d} \leq 1 \quad (\text{Υποβιβασμού})$$

$$D \geq 0,5 \quad \frac{V_o}{V_d} \geq 1 \quad (\text{Ανύψωσης})$$



Σχ.4.7 Κυκλωματικό διάγραμμα βασικής τοπολογίας μικτού dc-dc μετατροπέας buck-boost.

Εξισώνοντας το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου στο διάστημα μιας περιόδου με το μηδέν, έχουμε:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{1 - D}$$

και

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{1 - D}{D} \quad (\text{θεωρώντας } P_d = P_o)$$

4.2.1.4 Μετατροπείας Cύκ.

Ο μετατροπείας cύκ είναι συνδυασμός δυο μετατροπέων, του μετατροπέα buck και του μετατροπέα boost. Όπως και ο μικτός μετατροπείας buck-boost παρέχει μια σταθεροποιημένη τάση εξόδου με αρνητική πολικότητα σε σχέση με το κοινό της τάσης εισόδου. Όταν έχουμε μόνιμη κατάσταση ισορροπίας οι μέσες τάσεις των αυτεπαγωγών V_{L1} και V_{L2} είναι μηδέν. Από το σχήμα 4.1 του κυκλώματος της βασικής τοπολογίας του μετατροπέα προκύπτει η παρακάτω σχέση :

$$V_{C1} = V_d + V_o$$

Τα χαρακτηριστικά του μετατροπέα cύκ είναι ότι έχει ένα επιπλέον πηνίο και ένα πυκνωτή. Η τάση στην έξοδο μπορεί να είναι είτε μικρότερη είτε μεγαλύτερη από την είσοδο. Προτείνεται για μικρότερες κυματώσεις στην είσοδο και στην έξοδο (πιο εξομαλυμένο ρεύμα ,επειδή έχει επαγωγή στην είσοδο και στην έξοδο δεν τραβάει ποτέ πολύ ρεύμα). Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του μετατροπέα cύκ είναι ότι χρειάζεται ένα πυκνωτή μεγάλης χωρητικότητας .

Τα μειονεκτήματα του ως προς τους άλλους μετατροπείς είναι η απαίτηση ενός πυκνωτή με μεγάλη δυνατότητα αγωγής του ρεύματος κυμάτωσης. Το πλεονέκτημα του είναι ότι γίνεται φόρτιση και του δεύτερου πηνίου.

Τα ρεύματα των αυτεπαγωγών i_{L1} και i_{L2} θεωρούνται συνεχή. Έχουμε δυο τρόπους για να εκφράσουμε τις τάσεις και τα ρεύματα στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας.

Έχοντας σταθερή την τάση του πυκνωτή V_{C1} , και εξισώνοντας τα ολοκληρώματα των τάσεων στα άκρα των L_1 και L_2 στο διάστημα μιας περιόδου με το μηδέν έχουμε:

$$L_1 : \quad V_d D T_s + (V_d - V_{C1})(1-D)T_s = 0$$

$$L_2 : \quad (V_{C1} - V_o) D T_s + (-V_o)(1-D)T_s = 0$$

$$V_{C1} = \frac{1}{D} V_o$$

Από την πρώτη και την τελευταία σχέση που βλέπουμε παραπάνω προκύπτει ότι :

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{1-D}$$

θεωρώντας $P_d = P_o$, προκύπτει:

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{D}{1-D}$$

όπου $I_{L1} = I_d$ και $I_{L2} = I_o$

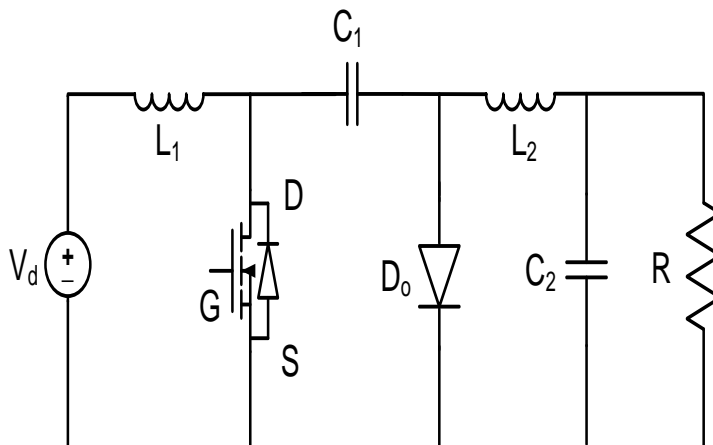
Ο άλλος τρόπος για να βρούμε αυτές τις εκφράσεις, όταν στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας η καθαρή μεταβολή του φορτίου που σχετίζεται με τον C_1 , στο διάστημα μιας περιόδου πρέπει να είναι μηδέν.

$$I_{L1}(1-D)T_s = I_{L2} D T_s$$

$$\frac{I_{L2}}{I_{L1}} = \frac{I_o}{I_d} = \frac{1}{1-D}$$

$$\text{και } \frac{V_o}{V_d} = \frac{1}{1-D} \quad (\text{αφού } P_o = P_d)$$

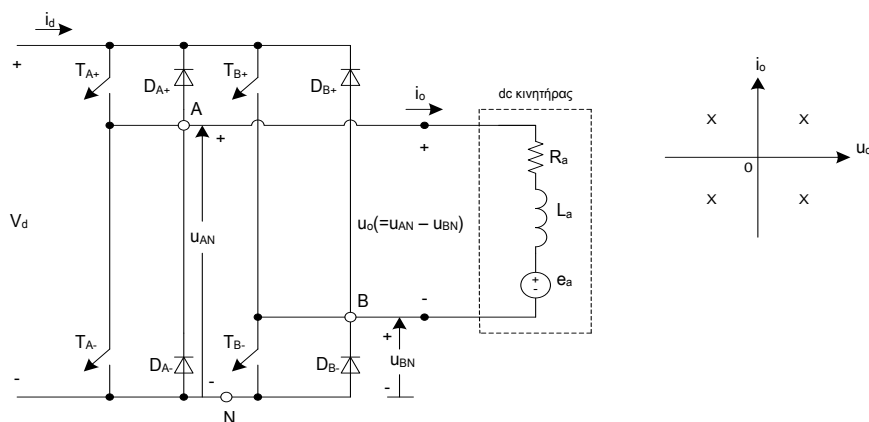
Από τους δυο τρόπους που είδαμε έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα, ενώ οι σχέσεις των μέσων τιμών των εισόδων και των εξόδων είναι ίδιες με αυτές του μικτού μετατροπέα. Ένα πλεονέκτημα του κυκλώματος όπου έχουμε σταθερή τη V_{C1} είναι ότι και το ρεύμα εισόδου και το ρεύμα εξόδου είναι χωρίς κυμάτωση.



Σχ.4.8 Κυκλωματικό διάγραμμα βασικής τοπολογίας dc-dc μετατροπέα τοπολογίας κύκ.

4.2.1.5 Μετατροπέας με πλήρη γέφυρα.

Κατά την λειτουργία του μετατροπέα με πλήρη γέφυρα η είσοδος του είναι μια καθορισμένη συνεχής dc τάση V_d . Η έξοδος του μετατροπέα είναι μια συνεχής dc τάση V_o την οποία και μπορούμε να ελέγχουμε ως προς το πλάτος της και την πολικότητα της.



Σχ.4.9 Κυκλωματικό διάγραμμα βασικής τοπολογίας dc-dc μετατροπέα με πλήρη γέφυρα.

Στην συνδεσμολογία του αυτή οι διόδους συνδέονται αντιπαράλληλα με τους διακόπτες. Έτσι λοιπόν θα πρέπει να γίνει μια διάκριση της κατάστασης στην οποία και ο ένας διακόπτης είναι κλειστός και της κατάστασης αγωγιμότητας του. Επίσης λόγω της αντιπαράλληλης σύνδεσης των διόδων με τους διακόπτες όταν ο ένας διακόπτης κλείνει, μπορεί να άγει ή να μην άγει ρεύμα, ανάλογα με την φορά του ρεύματος εξόδου i_o . Αν ο διακόπτης άγει ρεύμα τότε είναι σε κατάσταση αγωγιμότητας. Η αντίστοιχη διάκριση δεν απαιτείται όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός.

Ο μετατροπέας με πλήρη γέφυρα αποτελείται από δύο σκέλη, το σκέλος A και το σκέλος B. Στην συνέχεια το κάθε σκέλος αποτελείται από δύο διακόπτες καθώς και από τις αντιπαράλληλες διόδους τους. Οι δύο διακόπτες αλλάζουν κατάσταση σε κάθε σκέλος έτσι ώστε όταν ο ένας από τους δύο είναι ανοικτός τότε ο άλλος θα είναι κλειστός. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην βρίσκονται και οι δύο διακόπτες ανοικτοί ταυτόχρονα. Αν δούμε όμως τι πραγματικά γίνεται στην πράξη, θα δούμε ότι και οι δύο διακόπτες είναι ανοικτοί για ένα σύντομο χρονικό διάστημα, το οποίο και ονομάζεται κενός χρόνος (blanking time), έτσι ώστε να αποφευχθεί η βραχυκύκλωση της dc τάσης εισόδου. Στην περίπτωση όπου και οι διακόπτες του μετατροπέα της πλήρους γέφυρας, σε κάθε σκέλος αλλάζουν κατάσταση έτσι ώστε να μην βρίσκονται και οι δύο διακόπτες του ενός σκέλους ταυτόχρονα ανοικτοί, τότε στην περίπτωση αυτή το ρεύμα εξόδου i_o που φαίνεται και σχήμα Σχ.4.9 θα ρέει συνεχώς. Οπότε είναι εύκολο να καταλάβουμε ότι η τάση της εξόδου θα καθορίζεται από την κατάσταση των διακοπών.

Στην περίπτωση του μετατροπέα με πλήρη γέφυρα η τάση εξόδου του έχει αντιστρεπτή πολικότητα και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται και μία τριγωνική κυματομορφή για την διαμόρφωση PWM των διακοπών του μετατροπέα. Παρακάτω θα δούμε αναλυτικά δύο από αυτές τις μεθόδους της μετάβασης με την διαμόρφωση της PWM :

1. Η διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου όπου και οι διακόπτες T_{A+} και T_{A-} , καθώς και οι T_{A-} και T_{A+} αντιμετωπίζονται σαν δύο ζεύγη διακοπών. Οι διακόπτες σε κάθε ζεύγος κλείνουν και ανοίγουν ταυτόχρονα.
2. Η διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου (ονομάζεται και σαν διπλή μετάβαση με διαμόρφωση PWM). Στην περίπτωση αυτήν οι διακόπτες του αντιστροφέα σε κάθε σκέλος ελέγχονται ανεξάρτητα από το άλλο σκέλος.

4.3 Αντιστροφείς DC/AC.

Η χρήση των αντιστροφέων DC/AC είναι στα κινητήρια συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος, σε τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας και στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η λειτουργία τους στα συστήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι για την μετατροπή της συνεχούς τάσεως των συστημάτων σε εναλλασσόμενη (ημιτονοειδή) στην τάση και συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου. Οι αντιστροφείς DC/AC μπορεί να είναι είτε μονοφασικοί είτε τριφασικοί. Όταν η είσοδος είναι μια πηγή τάσης, αυτοί ονομάζονται αντιστροφείς πηγής τάσης (VSI) ενώ όταν ως είσοδος λαμβάνεται μια πηγή έντασης ονομάζονται αντιστροφείς πηγής έντασης (CSI).

Για την παραγωγή της εναλλασσόμενης τάσης υπάρχουν διάφορες τεχνικές ελέγχου οι οποίες και παράγουν διαφορετικές κυματομορφές στην έξοδο.

Δύο από τις μεθόδους αυτές είναι με την διαμόρφωση της PWM όπου και είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται η παραγωγή μιας ημιτονοειδούς κυματομορφής εξόδου η οποία μπορεί να ελεγχθεί τόσο κατά πλάτος όσο και κατά συχνότητα, και είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο στα συστήματα σύνδεσης πηγών Α.Π.Ε. και δικτύου χαμηλής τάσης.

4.4 Η ηλεκτρική απομόνωση των μετατροπέων ισχύος.

Στα παραπάνω κεφάλαια είδαμε τις τοπολογίες βάση των οποίων και μπορεί να γίνει η μετατροπή μιας συνεχούς τάσης την είσοδο τους σε εναλλασσόμενη ημιτονική τάση εξόδου, η οποία και μπορεί να ελέγχεται κατά πλάτος και συχνότητα. Ανάλογα με την εφαρμογή χρησιμοποιούνται είτε μια γέφυρα DC/AC με σκοπό την απ' ευθείας μετατροπή της εισερχόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη, είτε την μετατροπή της (μη σταθερής) DC εισερχόμενης τάσης σε μια στάθμη σταθερής τιμής και στη συνέχεια την μετατροπή αυτής σε εναλλασσόμενη.

Επίσης θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι το κύκλωμα του αντιστροφέα αποτελείται και από μια σειρά διατάξεων οι οποίες και επιτηρούν τον έλεγχο, την προστασία και την βελτίωση της ποιότητας της παραγόμενης τάσης. Ασφάλειες, αυτόματοι διακόπτες, και κυκλώματα εντοπισμού υπερτάσεων αποτελούν διατάξεις προστασίας του αντιστροφέα. Φίλτρα πηνίων και πυκνωτών χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση των ρευμάτων εισόδου και εξόδου.

Ακόμα θα πρέπει να επισημάνουμε ότι είναι σημαντική η παρεμβολή ενός μετασχηματιστή, έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης ηλεκτρική απομόνωση της πλευράς εισόδου από την έξοδο. Ένας μετασχηματιστής απομόνωσης χαμηλής συχνότητας μπορεί να τοποθετείται κατευθείαν στο στάδιο εξόδου, οπότε η παραγόμενη ημιτονική κυματομορφή οδηγείται μέσω αυτού στο κύκλωμα της εναλλασσόμενης τάσης (π.χ. ηλεκτρικό δίκτυο πόλης).

Ένα σημαντικό πρόβλημα προκύπτει στην περίπτωση όπου και δεν υπάρχει μετασχηματιστής απομόνωσης. Ακόμα πιο έντονο γίνεται το πρόβλημα στην περίπτωση όπου και δημιουργηθεί κάποιο σφάλμα. Όταν συμβεί η ανεπιθύμητη αυτή περίπτωση, ο αντιστροφέας να εισάγει μια DC συνιστώσα ρεύματος στην ημιτονική κυματομορφή εξόδου του, κάτι εντελώς ανεπιθύμητο για το ηλεκτρικό δίκτυο και τις συσκευές που βρίσκονται κοντά, προκαλώντας υπερθέρμανση στα τυλίγματα κινητήρων και μετασχηματιστών ή παρεμβολές σε άλλες συσκευές.

Με την χρήση και την παρεμβολή του μετασχηματιστή έχουμε μια προστασία η οποία και οφείλεται στην λειτουργία του, ο οποίος λειτουργεί και συμπεριφέρεται σαν ένα αδιαπέραστο φίλτρο τυχόν DC ρευμάτων. Έτσι με την χρήση και την ύπαρξη του μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας παρουσιάζεται μια άνοδος της απόδοσης του μετατροπέα που μπορεί να φτάσει μέχρι και 92%.

Μια άλλη τοπολογία που σκοπό έχει την γαλβανική απομόνωση της DC πλευράς του συστήματος από την AC πλευρά, είναι με την τοποθέτηση ενός μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας πριν τη γέφυρα παραγωγής της ημιτονοειδούς τάσης. Η λειτουργία της διάταξης αυτής βασίζεται στο ότι η εξερχόμενη συνεχής τάση του συστήματος εισέρχεται σε έναν μετατροπέα DC/DC, ο οποίος και λειτουργεί με υψηλή διακοπτική συχνότητα. Η χρήση λοιπόν του μετατροπέα αυτού είναι να μετατρέψει την συνεχή αυτή τάση σε μία τάση υψηλής συχνότητας και έπειτα να ανορθώνεται, και τελικά να μετατρέπεται σε μια συνεχής τάση ελεγχόμενου πλάτους. Κατά τον διάστημα στα μισά της διαδικασίας της μετατροπής αυτής παρεμβάλουμε τον μετασχηματιστή.

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε την απομόνωση της εισόδου από την έξοδο του αντιστροφέα, αλλά και σε αυτήν την τοπολογία υπάρχει η πιθανότητα να έχουμε την διείσδυση του συνεχούς ρεύματος στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ωστόσο σε σχέση με την προηγούμενη τοπολογία αυτή παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση της τάξης του 94% , λόγω του ότι ο μετασχηματιστής έχει λιγότερες απώλειες λόγω της ισχυρής μαγνητικής του σύζευξης. Τέλος ο όγκος του, το βάρος του, και το κόστος του μετασχηματιστή μειώνονται σημαντικά.

4.5 Αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας (Anti-Islanding detection).

Η εξάπλωση των Α.Π.Ε. τα τελευταία χρόνια οδήγησε στην σύνδεση τους με το δίκτυο στο οποίο και γίνεται η ανταλλαγή ενέργειας με αυτό. Ένα σημαντικό παράδειγμα αποτελεί η σύνδεση των Α.Π.Ε. στην Κρήτη. Επίσης σε πολλές χώρες του κόσμου έχει εφαρμοσθεί το σύστημα με την διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο όπου και διασυνδέονται φωτοβολταϊκές γεννήτριες, ανεμογεννήτριες, μικρά υδροηλεκτρικά κ.α.

Για τον λόγο όμως του ότι η ισχύς αυτή από την παραγωγή των Α.Π.Ε. είναι αποκεντρωμένη οι προστασίες από πλευράς δικτύου είναι αδρανείς. Αυτό διότι όπως προαναφέρθηκε τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι δομημένα κάθετα, από την συγκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προς την διανεμημένη κατανάλωση.

Πλεονέκτημα του συστήματος διανεμημένης παραγωγής αποτελεί η περίπτωση όπου και για κάποιο λόγο υπάρξει η αποσύνδεση ενός μεγάλου εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος. Τότε σε αυτήν την περίπτωση η παραγωγή της ισχύος από τις γεννήτριες της διανεμημένης παραγωγής προς το δίκτυο θα συνεχίσει να παρέχεται. Ακόμα ένα πλεονέκτημα της διανεμημένης παραγωγής αποτελεί το παράδειγμα στο οποίο και στην περίπτωση της διακοπής της τροφοδότησης ενός μέρους του δικτύου σε περιπτώσεις συντήρησης ή και κάποιας βλάβης, χωρίς την ύπαρξη της διανεμημένης παραγωγής με την διακοπή της τροφοδότησης θα τροφοδοτηθούν με την κατάλληλη ποσότητα ισχύς οι καταναλωτές από την παραγωγή των Α.Π.Ε. καθώς και την μεταξύ τους διασύνδεση.

Ο τρόπος με τον οποίο και γίνεται ο έλεγχος στα συστήματα απομονωμένης λειτουργίας είναι η μέτρηση της τάσεως και στις τρεις φάσεις του δικτύου (αλλά στην περίπτωση όπου και γίνει κάποιο σφάλμα στο δίκτυο τότε η τριφασική τάση αλλάζει). Έτσι λοιπόν καταλαβαίνουμε ότι η μορφή της κυματομορφής της τάσης σε ένα μεγάλο ηλεκτρικό δίκτυο δεν είναι η πλέον ιδανική. Ο λόγος είναι οι διάφοροι παράγοντες οι οποίοι και επηρεάζουν την ποιότητα του. Οι πιο συνήθεις λόγοι είναι η διαρκής κυμάτωση της τάσεως, η συνεχής αυξομείωση της συχνότητας καθώς και οι διάφορες αιχμές και οι βυθίσεις οι οποίες και προκαλούνται από την ζεύξη - απόζευξη γεννητριών και κινητήρων ή άλλων φορτίων. Μέσα σ' αυτά περιλαμβάνεται και η υψηλή στάθμη αρμονικών που παρουσιάζεται όταν υπάρχουν πολλά ηλεκτρονικά ισχύος συνδεδεμένα.

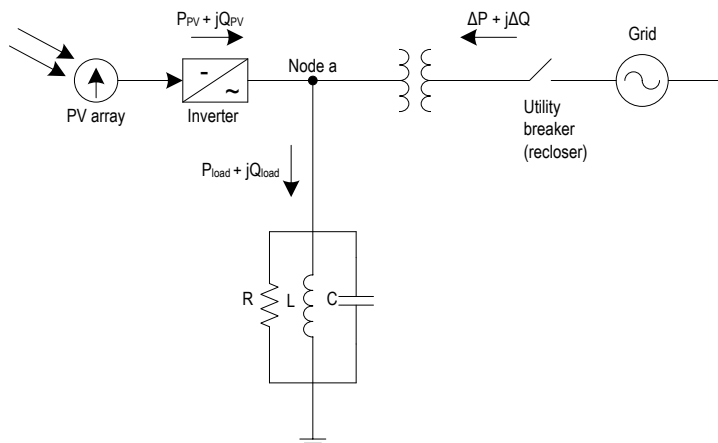
Οπότε λοιπόν ένας μετατροπέας θα πρέπει να είναι ανεκτικός στην παραπάνω ασταθή συμπεριφορά του ηλεκτρικού δικτύου, αφετέρου πρέπει να «καταλαβαίνει» γρήγορα τότε υπάρχει διακοπή στο δίκτυο, οπότε και να διακόψει τη λειτουργία του. Είναι μια περίπτωση που δύο αντιτιθέμενες απαιτήσεις πρέπει να καλυφθούν.

Με την ρύθμιση ανάλογα των ορίων αυτών του μετατροπέα ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες απομονωμένης λειτουργίας του αντιστροφέα, αλλά τον καθιστά παράλληλα περισσότερο ευαίσθητο στις διαταραχές του δικτύου χαμηλής τάσης. Σε αντίθετη περίπτωση δηλαδή σε μια πιο χαλαρή ρύθμιση των ορίων αυτών, τότε θα έχουμε μια αύξηση της πιθανότητας της απομονωμένης λειτουργίας, οπότε και ο μετατροπέας γίνεται πιο ανεκτικός στις διάφορες διαταραχές που μπορεί να παρουσιάσει το δίκτυο.

Για τον εντοπισμό της διακοπής της τάσης του δικτύου, έχουν χρησιμοποιηθεί στους μετατροπέες διάφορες τεχνικές ελέγχου, σύμφωνα με τις οποίες και όταν εντοπίσουν την διακοπή του δικτύου τότε διακόπτουν την λειτουργία των ηλεκτρονικών αντιστροφέων ισχύος. Αυτές μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες, όπου και είναι :

- Τεχνικές παθητικής ανίχνευσης απομονωμένης λειτουργίας (passive methods).
- Τεχνικές ενεργητικής ανίχνευσης απομονωμένης λειτουργίας (active methods).
- Τεχνικές που υλοποιούνται από την πλευρά του κεντρικού δικτύου.
- Τεχνικές που βασίζονται στην επικοινωνία μεταξύ αντιστροφέα και δικτύου.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μια διάταξη διασύνδεσης ενός αντιστροφέα φωτοβολταϊκών με ένα τυπικό φορτίο σύνθετης αντίστασης και της διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο.

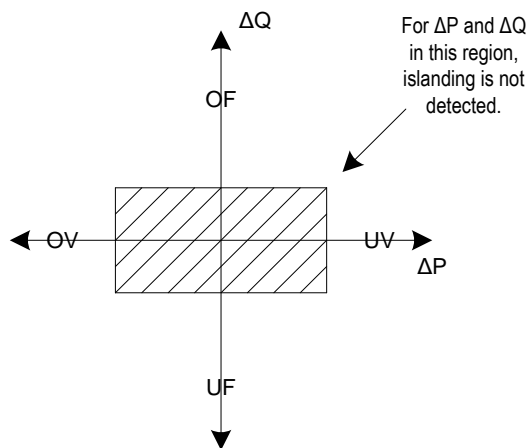


Σχ.4.10 Σύνδεση αντιστροφέα φωτοβολταϊκών στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στο παραπάνω σχέδιο Σχ.4.10 παρατηρούμε την σύνδεση του αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το σημείο της σύνδεσης του ηλεκτρικού δικτύου και του τοπικού φορτίου ονομάζεται Node a. Η ισχύς που παρέχει ο μετατροπέας είναι $P_{PV} + jQ_{PV}$, ενώ το τοπικό φορτίο απορροφάει στο σημείο όπου και είναι εγκατεστημένος ο αντιστροφέας απορροφά φορτίο $P_{load} + jQ_{load}$. Οπότε λοιπόν η ροή της ισχύος από το δίκτυο και προς το δίκτυο θα είναι : $\Delta P = P_{load} - P_{PV}$ και $\Delta Q = Q_{load} - Q_{PV}$. Αλλά συνήθως οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών στοιχείων παρέχουν μόνο ενεργό ισχύς οπότε και ισχύει $\Delta Q = Q_{load}$.

Σαν βασικό κριτήριο στην επιλογή και εξέτασης των αντιστροφέων ισχύος για την ικανότητα τους στην αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας χρησιμοποιείται η ζώνη μη-ανίχνευσης (None Detection Zone, NDZ). Η ζώνη αυτή ορίζεται ως η περιοχή μέσα στην οποία ο αντιστροφέας αποτυγχάνει να εντοπίσει την απομονωμένη λειτουργία. Οι άξονες της περιοχής καθορίζονται με βάση τις τιμές $\Delta P = P_{load} - P_{PV}$ και $\Delta Q = Q_{load} - Q_{PV}$ της ισχύος η οποία ρέει από το ηλεκτρικό δίκτυο προς το σημείο σύνδεσης αντιστροφέα – δικτύου (δηλαδή στο φορτίο).

Για μικρές τιμές εγχεόμενης ισχύος, όπως φαίνεται από το διάγραμμα, ο αντιστροφέας αποτυγχάνει να εντοπίσει την διακοπή με το δίκτυο, εξακολουθώντας να τροφοδοτεί το φορτίο.



Σχ.4.11 Η περιοχή στην οποία και ο αντιστροφέας αποτυγχάνει να εντοπίσει την απομονωμένη λειτουργία (NDZ, none detection zone).

Στο παραπάνω σχήμα Σχ.4.11 παρατηρούμε την περιοχή στην οποία και αντιστροφέας αποτυγχάνει να εντοπίσει την απομονωμένη λειτουργία. Παρατηρούμε στον οριζόντιο άξονα το κατώτερο όριο της επιτρεπτής τάσης (στα αριστερά), και το ανώτερο όριο τάσης (στα δεξιά). Στον κάθετο άξονα παρατηρούμε το κατώτερο όριο της συχνότητας (κάτω), και το ανώτερο όριο της συχνότητας (επάνω).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Οι απώλειες στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

5.1 Γενικά για τις απώλειες στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Για την σωστή επιλογή των φωτοβολταϊκών πλαισίων που θα τοποθετηθούν τελικά στην εγκατάσταση, καθώς και για τον υπολογισμό της επιφάνειας των πλαισίων της εγκατάστασης αλλά και των άλλων μερών (μετατροπείς, καλωδιώσεις, διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου κλπ), που απαιτούνται για την διασύνδεση με το δίκτυο ενός διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού πάρκου, εκτός από τις απώλειες οι οποίες και προέρχονται από την αύξηση της θερμοκρασίας του πλαισίου ή από την ρύπανση του πλαισίου, θα πρέπει να μελετήσουμε και τις ηλεκτρικές απώλειες στους αγωγούς που συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και της φωτοβολταϊκές συστοιχίες, καθώς και τις συνδέσεις με τα άλλα μέρη του φωτοβολταϊκού συστήματος. Πολλές και μεγάλες απώλειες μπορεί και να οφείλονται στην λειτουργία αυτών των μερών του συστήματος ή στην μη σωστή επιλογή τους ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος.

Για τον υπολογισμό των απωλειών του συστήματος χρησιμοποιούμε τον συντελεστή δυναμικού (CF), ο οποίος και εκφράζει την ετήσια απόδοση της ενεργειακής παραγωγής του φωτοβολταϊκού πάρκου. Ο συντελεστής δυναμικού ορίζεται σαν ο λόγος της ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προς την ενέργεια που θα παραγόταν εάν το φωτοβολταϊκό πάρκο λειτουργούσε για κάθε ώρα του έτους σε πλήρη ονομαστική ισχύ. Πολλές φορές όμως συμβαίνει κατά την λειτουργία του συστήματος να παρουσιάζεται κάποια απόκλιση από τις ιδανικές συνθήκες, πράγμα το οποίο και έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Κατά την μελέτη λοιπόν για την σωστή επιλογή της επιφάνειας των πλαισίων του συστήματος θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλες οι απώλειες οι οποίες και μπορεί να είναι της τάξης του 20% ως 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και περισσότερο.

Επίσης, λόγω της φθοράς στα Φ/Β πλαίσια και στα άλλα μέρη του συστήματος, αναμένεται ότι με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται μια μικρή βαθμιαία πώση στην ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, που συνήθως υπολογίζεται στο 1% ως 2% για κάθε έτος.

5.2 Υπολογισμός της απόδοσης διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού πάρκου (park performance).

Για τον υπολογισμό της απόδοσης ενός διασυνδεδεμένου στο δίκτυο φωτοβολταϊκού πάρκου, θα πρέπει αρχικά να έχουμε τα στοιχεία από την εποπτεία και τον έλεγχο του πάρκου για το χρονικό διάστημα τουλάχιστον ενός έτους. Τα στοιχεία τα οποία και θα καταγράφονται από το σύστημα του ελέγχου και εποπτείας (γνωστό ως SCADA) του φωτοβολταϊκού πάρκου, όπως η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάνελ, η έξοδος ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, η είσοδος της ισχύος στους μετατροπείς, η έξοδος της ισχύος από τους μετατροπείς, η τιμή της ισχύος στην έξοδο του μετασχηματιστή και τελικά η ισχύς που καταλήγει στο ηλεκτρικό δίκτυο της Δ.Ε.Η , χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απόδοσης του διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού πάρκου.

Κατά τον υπολογισμό λοιπόν τελικά της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πάρκου, θα πρέπει να υπολογιστούν και η τελική παραγωγή του πάρκου (final yield ή Y_F), η παραγωγή αναφοράς (reference yield ή Y_R), η απόδοση (performance ratio ή PR) και ο συντελεστής δυναμικού (capacity factor ή CF).

5.2.1 Υπολογισμός της τελικής παραγωγής (final yield).

Για τον υπολογισμό της τελικής παραγωγής (final yield ή Y_F), του φωτοβολταϊκού πάρκου θα χρησιμοποιήσουμε την σχέση η οποία και εκφράζει τον λόγο της ισχύος στην έξοδο του συστήματος (E , σε kWh_{AC}), η οποία και μπορεί να είναι καταγεγραμμένη ανά έτος, μήνα, ημέρα, προς την ενέργεια την οποία και θα παραγόταν εάν το φωτοβολταϊκό λειτουργούσε κάθε ώρα του έτους υπό την πλήρη ονομαστική του ισχύς (P_r , σε kW_{DC}), και στην περίπτωση όπου δέχονταν την πυκνότητα της ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας ίδια με την πυκνότητα της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που εκφράζουν οι πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων (Standard Test Conditions, STC), δηλαδή ηλιακή ακτινοβολία ίση με $1000 W/m^2$ και για θερμοκρασία στοιχείων ίση με $25^\circ C$.

Σύμφωνα με τις παραπάνω υποθέσεις καταλήγουμε για τον υπολογισμό της τελικής παραγωγής (final yield ή Y_F), στην παρακάτω σχέση :

$$Y_F = \frac{E[kWh_{AC}]}{P_r[kW_{DC}]}$$

5.2.2 Υπολογισμός της παραγωγής αναφοράς (reference yield).

Ο υπολογισμός της παραγωγής αναφοράς (reference yield ή Y_R), δίνεται από την σχέση που εκφράζει τον λόγο μεταξύ της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας H_i (kWh/m^2), προς την ακτινοβολία αναφοράς των πλαισίων ($1 kWh/m^2$). Επομένως η παραγωγή είναι ο μέγιστος αριθμός ενός ήλιου ανά ώρα. Η σχέση λοιπόν η οποία και μας δίνει την παραγωγή αναφοράς (reference yield ή Y_R), είναι :

$$Y_R = \frac{H_i [kWh / m^2]}{1kWh / m^2}$$

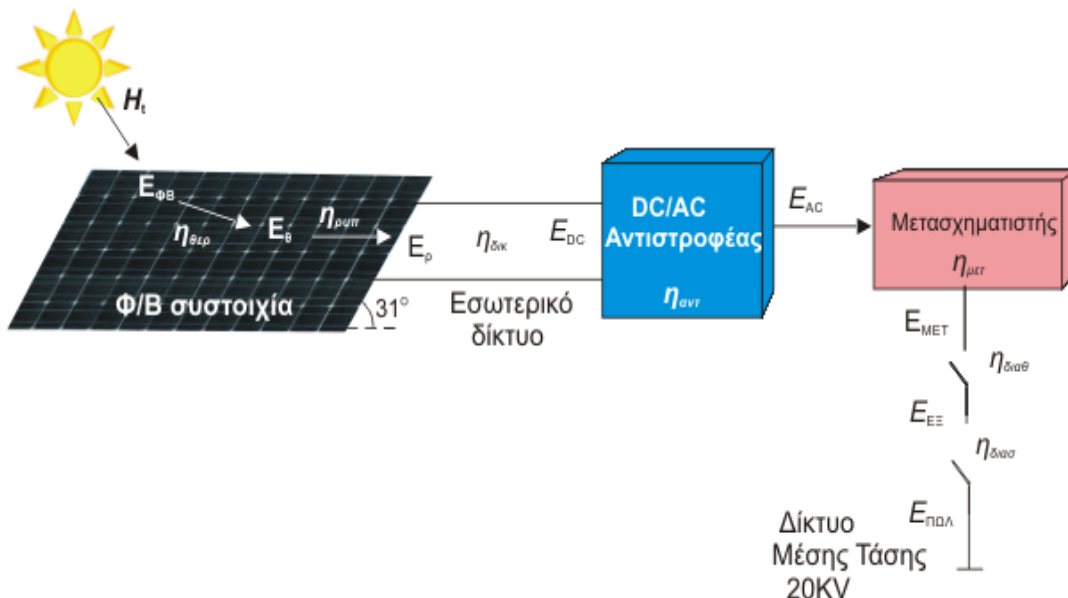
5.2.3 Υπολογισμός του βαθμού απόδοσης (performance ratio).

Ο βαθμός απόδοσης (performance ratio ή PR), είναι ο λόγος της τελικής παραγωγής (final yield ή Y_F), προς την παραγωγή αναφοράς (reference yield ή Y_R), μας δίνει δηλαδή μια σχέση όπου και συνδέει τις συνολικές απώλειες στο σύστημα που προέρχονται κατά την μετατροπή στις ηλεκτρονικές διατάξεις του συστήματος από την συνεχή κατάσταση στην εναλλασσόμενη έξοδο. Οπότε λοιπόν η απόδοση καθορίζει την απόκλιση που μπορεί να έχει η αποδιδόμενη από το φωτοβολταϊκό σύστημα ενέργεια σε σχέση με την ιδανική δυνατότητα παραγωγής του συστήματος.

5.2.3.1 Ο συνολικός συντελεστής απωλειών ($\eta_{\sigma\pi\tau}$).

Οι τυπικές απώλειες στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες περιλαμβάνουν βασικά τις απώλειες οι οποίες και εμφανίζονται λόγω της θερμοκρασίας ($\eta_{\theta\epsilon\rho}$), καθώς και λόγω της ρύπανσης που εμφανίζεται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια ($\eta_{\rho\upsilon\pi\tau}$). Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου εκτός όμως από τις δύο αυτές μορφές απωλειών που εμφανίζονται στο σύστημα και τις οποίες και θα πρέπει να τις ελέγχουμε κατάλληλα, θα πρέπει να συμπεριλάβουμε και της ηλεκτρικές απώλειες οι οποίες και εμφανίζονται στους αγωγούς οι οποίοι και συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες μεταξύ τους, καθώς και τις απώλειες οι οποίες και εμφανίζονται στις συνδέσεις με τα άλλα μέρη του φωτοβολταϊκού συστήματος, οι οποίες και όλες μαζί μας δίνουν τις απώλειες του εσωτερικού δικτύου και των διασυνδέσεων ($\eta_{\delta\iota\kappa}$).

Σημαντικές λοιπόν είναι οι απώλειες οι οποίες και εμφανίζονται λόγω της λειτουργίας των άλλων στοιχείων του συστήματος, και οι οποίες και εμφανίζονται κυρίως στις απώλειες που προέρχονται από τον αντιστροφέα ($\eta_{\sigma\upsilon\tau}$), καθώς και τις απώλειες του μετασχηματιστή ($\eta_{\mu\epsilon\tau}$). Επίσης οι απώλειες οι οποίες και προέρχονται από την διαθεσιμότητα του συστήματος, και οι οποίες προέρχονται από το διάστημα το οποίο το σύστημα βρίσκεται εκτός παραγωγής λόγω του ότι γίνεται κάποια συντήρηση ή και βλάβη στο σύστημα ($\eta_{\delta\iota\sigma\theta}$). Τέλος θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και τις απώλειες οι οποίες και προέρχονται από το δίκτυο διασύνδεσης της Δ.Ε.Η ($\eta_{\delta\iota\alpha\sigma}$).



Σχ.5.1 Σχηματική παράσταση των απωλειών του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Αν συμπεριλάβουμε τις παραπάνω απώλειες οι οποίες φαίνονται στο σχήμα Σχ.5.1 και περιλαμβάνονται σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, τότε βλέπουμε ότι ο συνολικός συντελεστής των απωλειών ($n_{απ}$) του συστήματος θα είναι ίσος με :

$$n_{απ} = n_{θερ} \cdot n_{ρυπ} \cdot n_{δικ} \cdot n_{αντ} \cdot n_{μετ} \cdot n_{διαθ} \cdot n_{διασ}$$

Αν συμπεριλάβουμε και τον βαθμό απόδοσης (performance ratio ή PR), τότε καταλήγουμε ότι :

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} = n_{θερ} \cdot n_{ρυπ} \cdot n_{δικ} \cdot n_{αντ} \cdot n_{μετ} \cdot n_{διαθ} \cdot n_{διασ}$$

5.2.4 Υπολογισμός παραγωγής συστοιχίας (array yield).

Για τον υπολογισμό της παραγωγής συστοιχίας (array yield ή Y_A), εφαρμόζουμε την σχέση που μας δίνει τον λόγο μεταξύ της ενέργειας στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, προς την μέγιστη ισχύ των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών στοιχείων. Εφαρμόζοντας τα παραπάνω προκύπτει η σχέση :

$$Y_A = \frac{E_A}{PR}$$

5.2.5 Υπολογισμός των απωλειών του συστήματος (system losses).

Ο υπολογισμός των απωλειών του συστήματος (system losses ή L_S), περιλαμβάνει τις απώλειες οι οποίες και προέρχονται από την διασύνδεση των μετατροπέων του συστήματος, καθώς και τις απώλειες από την διασύνδεση του μετασχηματιστή. Με την αφαίρεση της συνολικής παραγωγής της συστοιχίας και της τελικής παραγωγής, προκύπτουν οι απώλειες του συστήματος. Έτσι λοιπόν προκύπτει η σχέση που μας δίνει τις απώλειες του συστήματος (system losses) :

$$L_S = Y_A - Y_F$$

5.2.6 Υπολογισμός απωλειών μεταξύ των συστοιχιών (array capture losses).

Για τον υπολογισμό των απωλειών μεταξύ των συστοιχιών (array capture losses ή L_C), θα χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω σχέση την οποία και με την αφαίρεση της παραγωγής αναφοράς (reference yield ή Y_R), και της τελικής παραγωγής (final yield ή Y_F), προκύπτει η παρακάτω σχέση :

$$L_C = Y_R - Y_F$$

5.2.7 Υπολογισμός του συντελεστή δυναμικού (capacity factor).

Ο συντελεστής δυναμικού (capacity factor ή CF), είναι ο λόγος της ετήσιας συνολικής παραγωγής (final yield ή Y_F), προς την ενέργεια που θα παραγόταν εάν το φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργούσε για κάθε ώρα του έτους σε ονομαστική ισχύς (P_r), καθώς δέχεται την ίδια πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας (σύμφωνα με τις πρότυπες συνθήκες STC). Έτσι λοιπόν προκύπτει η σχέση :

$$CF = \frac{Y_F}{8760} = \frac{E}{P_r \cdot 8760} = \frac{H_t \cdot PR}{P_r \cdot 8760}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Φωτοβολταϊκό πάρκο Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ

6.1 Το φωτοβολταϊκό πάρκο Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ .

Γνωρίζοντας ότι η ηλιακή ακτινοβολία και το αξιοποιήσιμο ηλιακό δυναμικό στην χώρα μας είναι αρκετά μεγάλο, για την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας με σκοπό την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη μεγαλύτερη προοπτική επένδυσης στην φωτοβολταϊκή ενέργεια μπορεί να αποτελέσουν οι νησιωτικές περιοχές της χώρας μας όπως η Κρήτη όπου και η τιμή της τοπικά παραγόμενης ενέργειας είναι ήδη τέτοια, που η φωτοβολταϊκή ενέργεια είναι σήμερα πιθανότατα η πλέον συμφέρουσα λύση στις περιπτώσεις που προγραμματίζεται ενίσχυση του τοπικού δικτύου της ΔΕΗ. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί, ότι το κόστος ηλεκτροπαραγωγής κατά τη διάρκεια ωρών αιχμής, για πολλά από τα νησιά που παρουσιάζουν σχετικά χαμηλό μέσο κόστος, είναι δύο και τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό, γεγονός που σημαίνει, ότι και σε αυτά τα νησιά η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων πιθανόν να αποτελέσει μια ανταγωνιστική πρόταση στο μέλλον. Παρά τις μεγάλες προοπτικές της ανάπτυξης της φωτοβολταϊκής ενέργειας οι εγκαταστάσεις των φωτοβολταϊκών πάρκων στην χώρα μας βρίσκονται ακόμα σε εμβρυακό επίπεδο. Την ίδια στιγμή οι εγκαταστάσεις μεγάλων φωτοβολταϊκών πάρκων σε Ευρωπαϊκές χώρες, με σαφώς μικρότερη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και ποσοστού του αξιοποιήσιμου ηλιακού δυναμικού αναπτύσσονται με μεγάλους ρυθμούς.

Μια τέτοια σημαντική επένδυση για τα δεδομένα της χώρας μας καθώς είναι η μεγαλύτερη στην εγκατεστημένη ισχύς και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία, αποτελεί το φωτοβολταϊκό πάρκο της εταιρίας Χ.ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ , το οποίο βρίσκεται στην Κρήτη και μπορεί κάλλιστα να αποτελέσει παράδειγμα προς μίμηση στην χώρα μας για την περαιτέρω ανάπτυξη και εδραίωση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.



Σχ.6.1 Το φωτοβολταϊκό πάρκο της εταιρίας Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ .

6.2 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πάρκου Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ .

Η εταιρία Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ , τώρα και πολλά χρόνια πρωτοπορεί στην χώρα μας στην εγκατάσταση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και ειδικότερα στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Μετά την επιτυχημένη συνεισφοράς της εταιρίας στον τομέα της αιολικής ενέργειας, δείχνει μεγάλο ενδιαφέρον και στην ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας με την κατασκευή και εγκατάσταση του μεγαλύτερου διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού πάρκου στην Ελλάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή Ξηρολίμνη Σητείας. Στο πλαίσιο το Επιχειρησιακού Προγράμματος Ενέργειας, άρχισαν οι εργασίες για την κατασκευή του φωτοβολταϊκού πάρκου της εταιρίας το 1998 και ολοκληρώθηκαν με επιτυχία τον Απρίλιο του 2001. Το εν λόγω φωτοβολταϊκό πάρκο αποτελεί το μεγαλύτερο στην χώρα μας με συνολική εγκατεστημένη ισχύς 171,36 kWp.

Το φωτοβολταϊκό πάρκο λειτουργεί από το 2001 έως και σήμερα με επιτυχία χωρίς σημαντικά προβλήματα, παράγοντας την ισχύς περίπου της τάξης των 230.000 kWh ετησίως, οι οποίες και αντιστοιχούν για την κάλυψη των αναγκών ενέργειας περίπου σε 60 κατοικίες της περιοχής.

6.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πάρκου Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ .

Όπως είδαμε πιο πάνω η περιοχή της εγκατάστασης των φωτοβολταϊκού πάρκου είναι στην Πλακοκερατειά Σητείας, και ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες των αιολικών πάρκων της εταιρίας. Η συνολική έκταση που καταλαμβάνει το φωτοβολταϊκό πάρκο είναι 3784 m² και η ενεργός περιοχή κάλυψης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι 1568 m² , με κλίση του εδάφους 2%.

6.2.2 Οι εργασίες εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Οι εργασίες εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού πάρκου ξεκίνησαν στα μέσα του 2000 και ολοκληρώθηκαν τον Απρίλιο του 2001 . Οι εργασίες για την εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού πάρκου συμπεριελάμβαναν τα παρακάτω στάδια :

- Την σχετική διαμόρφωση του χώρου εγκατάστασης : Η συνολική έκταση όπου και καταλαμβάνει το φωτοβολταϊκό πάρκο είναι 3784 m² , οπότε και θα έπρεπε να γίνει η κατάλληλη διαμόρφωση του χώρου, που περιελάμβανε την αφαίρεση των βράχων και φυτικών εδαφών καθώς και εξομαλύνθηκε με τις κατάλληλες εκσκαφές και επιχωματώσεις παίρνοντας τη μορφή μιας επίπεδης επιφάνειας.
Στη συνέχεια η επιφάνεια επιστρώθηκε με κατάλληλο υλικό και αφού συμπυκνώθηκε, επιστρώθηκε τελικά με σκυρόδεμα, ύστερα και από τη στερέωση επί του εδάφους καναλιών για τη διέλευση των καλωδίων.
- Κατασκευή του οικίσκου ελέγχου : Για τον έλεγχο της εγκατάστασης, καθώς και για την συλλογή των δεδομένων λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάρκου κατασκευάστηκε ένας οικίσκος ελέγχου όπου μέσα στεγάζονται οι πίνακες και τα συστήματα ελέγχου της εγκατάστασης του πάρκου. Επίσης υπάρχει και ένας κεντρικός υπολογιστής ο οποίος και φέρει το κατάλληλο πρόγραμμα συστήματος ελέγχου και εποπτείας (Supervisory control and data acquisition - SCADA), του φωτοβολταϊκού πάρκου, το οποίο και καταγράφει τα δεδομένα της παραγωγής του φωτοβολταϊκού πάρκου.

6.2.3 Ο βασικός εξοπλισμός του φωτοβολταϊκού πάρκου.

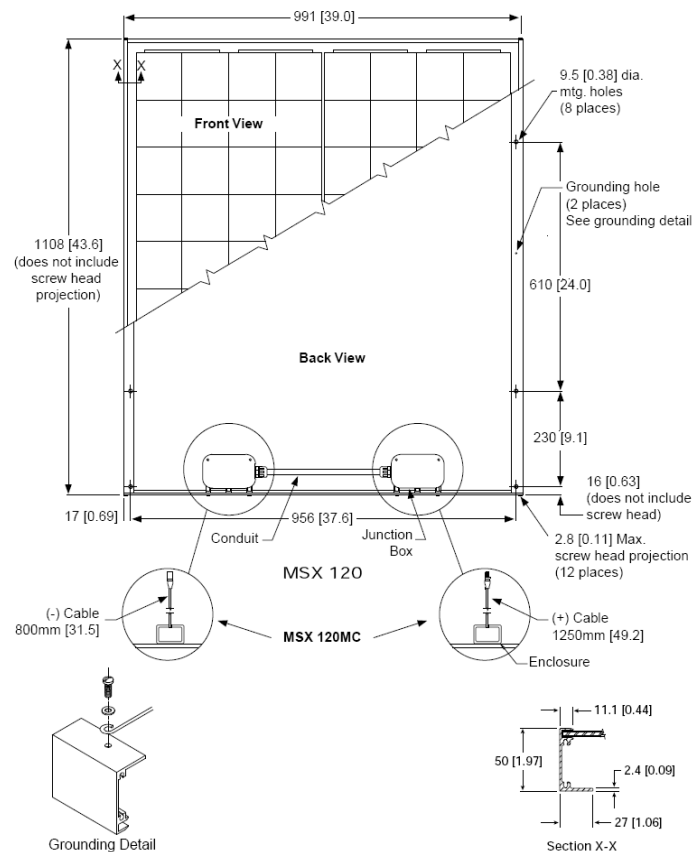
Ο βασικός εξοπλισμός του φωτοβολταϊκού πάρκου αποτελείται από τα παρακάτω μέρη :

- Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια :

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία και αποτελούν την εγκατάσταση του πάρκου είναι τύπου πολυκρυσταλλικού πυριτίου της εταιρίας BP Solar, του τύπου MSX – 120 , το οποίο και έχει διαστάσεις 1108mm x 991mm και με βάρος 14kg.



Σχ.6.2 Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου που αποτελούν το πάρκο.

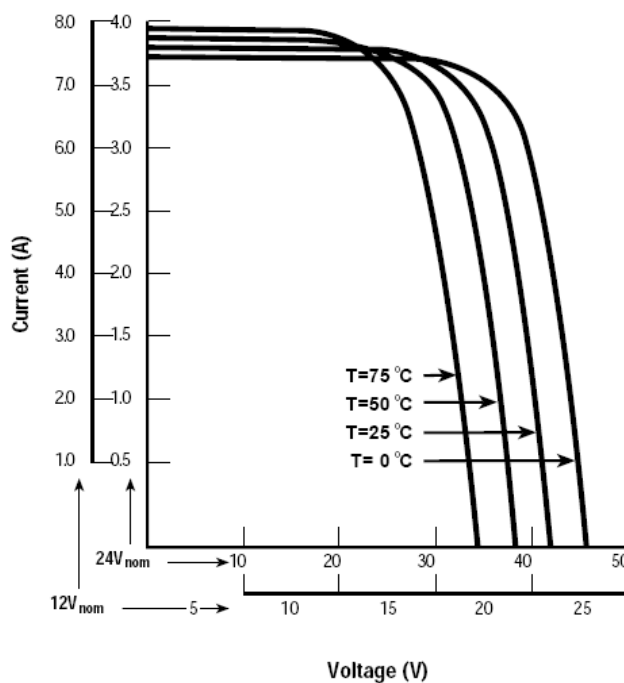


Σχ.6.3 Οι διαστάσεις του φωτοβολταϊκού πλαισίου (BP SOLAR MSX 120).

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου φαίνονται στον πίνακα :

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πλαισίου BP SOLAR MSX 120	
Typical maximum power (P_{max})	120 W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	16,9 V
Current at P_{max} (I_{mp})	6,90 A
Minimum P_{max}	116,8 W
Short - circuit current (I_{sc})	7,68 A
Open - circuit voltage (V_{oc})	21,3 V
Temperature coefficient of I_{sc}	$(0.065 \pm 0.015)\%/^{\circ}C$
Temperature coefficient of V_{oc}	$-(160 \pm 20)mV/^{\circ}C$
Temperature coefficient of power	$-(0.5 \pm 0.05)\%/^{\circ}C$
NOCT ²	$47 \pm 2^{\circ}C$
Max. Sys. Oper. Volt.	600 V
Min. Bypass Diode (I_F)	8 A
Series Fuse	20 A

Η χαρακτηριστικές I – V του πλαισίου φαίνονται σε σχήμα :



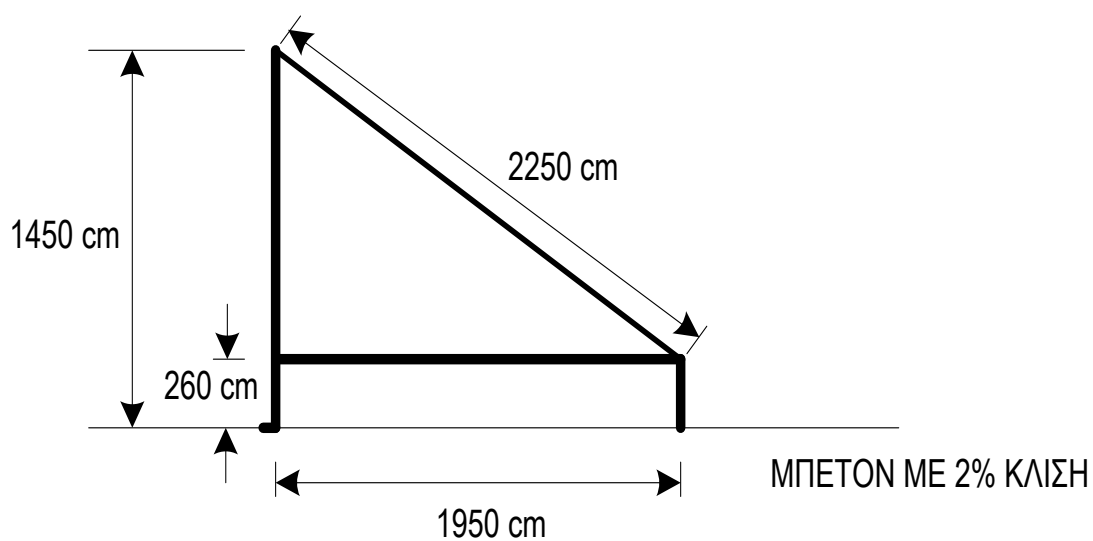
Σχ.6.4 Χαρακτηριστικές I – V φωτοβολταϊκού στοιχείου με την επίδραση της θερμοκρασίας.

Η συνολική εγκατάσταση αποτελείται από 1428 φωτοβολταϊκές μονάδες (modules) της ίδιας εταιρίας. Η ομαδοποίηση των φωτοβολταϊκών μονάδων γίνεται σε συστοιχίες των 24 πλαίσιων, όπου η κάθε συστοιχία περιλαμβάνει 2 σειρές από 12 φωτοβολταϊκά πλαίσια. Συνολικά το φωτοβολταϊκό πάρκο αποτελείται από 59 παράλληλες συστοιχίες και από μία συστοιχία που αποτελείται από 2 σειρές με 6 πλαίσια η κάθε σειρά. Οπότε συνολικά το φωτοβολταϊκό πάρκο αποτελείται από 1428 φωτοβολταϊκές μονάδες.

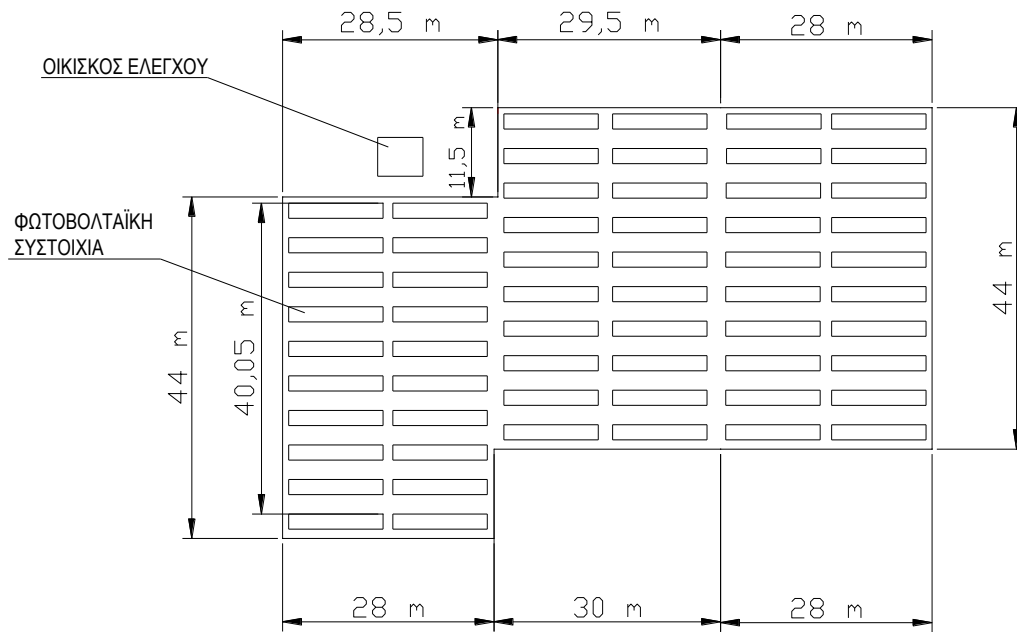


Σχ.6.5 Οι συστοιχίες του φωτοβολταϊκού πάρκου. Αποτελούμενες η κάθε μια από δύο σειρές με δώδεκα φωτοβολταϊκά πλαίσια η κάθε μία (συνολικής ισχύος 2,88 kWp).

Η κάθε συστοιχία που αποτελείται από 24 πλαίσια παράγει συνολικά 2,88 kWp . Οπότε οι συνολικά 59 συστοιχίες παράγουν 169,92 kWp και η συστοιχία που αποτελείται από 12 πλαίσια παράγει 1,44 kWp . Συνολικά λοιπόν όλες οι συστοιχίες του φωτοβολταϊκού πάρκου παράγουν ισχύς ίση με 171,36 kWp , όπου και είναι η συνολική ισχύς της εξόδου του φωτοβολταϊκού πάρκου.

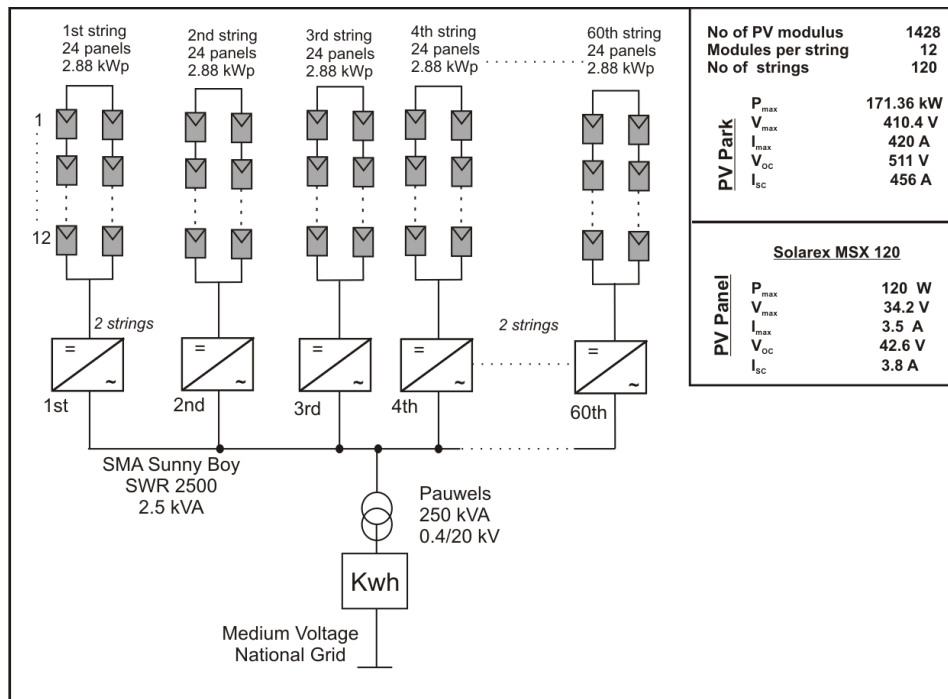


Σχ.6.6 Διαστάσεις φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



ΕΜΒΑΔΟΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ = 3784 m²
ΜΕ ΚΛΙΣΗ 2 %

Σχ.6.7 Κάτοψη φωτοβολταϊκού πάρκου Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ.



Σχ.6.8 Μονογραμμικό σχέδιο φωτοβολταϊκού πάρκου (Schematic block circuit diagram).

- **Οι συστοιχίες στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων :**

Οι συστοιχίες στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων έχουν κατασκευασθεί από την εταιρία ΡΟΚΑΣ, στο εργοστάσιο μεταλλικών κατασκευών της εταιρίας στην Τρίπολη. Η τοποθέτησή τους έχει γίνει έτσι ώστε τα φωτοβολταϊκά πλαίσια να έχουν μια κλίση ίση με 30° μοίρες ως προς το οριζόντιο επίπεδο και να έχουν κατεύθυνση προς τον νότο.



Σχ.6.9 Οι συστοιχίες στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων του πάρκου, κατασκευάστηκαν από την εταιρία ΡΟΚΑΣ στο εργοστάσιο της στην Τρίπολη.

- **Αντιστροφείς (inverters) :**

Για τον λόγο ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παράγουν συνεχές ρεύμα στην έξοδό τους και για τον λόγο ότι για την σύνδεση του φωτοβολταϊκού πάρκου στο δίκτυο της Δ.Ε.Η , θα πρέπει να ισχύουν κάποιες προϋποθέσεις όπως η σταθερή εναλλασσόμενη τάση και η σταθερή συχνότητα του πάρκου έτσι ώστε να μην δημιουργηθούν προβλήματα από πλευράς του δικτύου. Για τους λόγους αυτούς έχουν εγκατασταθεί στο φωτοβολταϊκό πάρκο 60 αντιστροφείς (inverters) της εταιρίας SMA του τύπου Sunny Boy SWR 2500 , για κάθε συστοιχία. Δηλαδή αντιστοιχεί ένας μετατροπέας σε κάθε συστοιχία, όπου και αποτελείται από 24 φωτοβολταϊκά πλαίσια.



Σχ.6.10 Ο αντιστροφέας (inverter) Sunny Boy SWR 2500 όπου αποτελείται η κάθε συστοιχία.

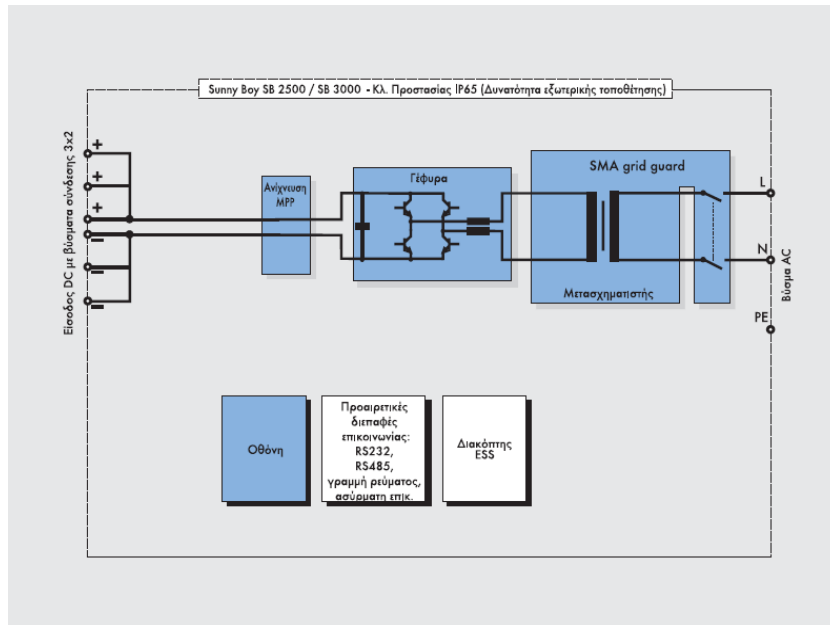
Τα χαρακτηριστικά του αντιστροφέα (inverter) Sunny Boy SWR 2500 , φαίνονται στον πίνακα :

Inverter Sunny Boy SWR 2500	
min τάση DC (U_{pv})	224 – 600 V
min τάση M_{pp}	194 – 253 V
max DC τάση	600 V
max DC ρεύμα εισόδου ($I_{pv\ max}$)	12,0 A
Περιοχή λειτουργίας Φ/Β (M_{ppt}) $P_{dc\ max}$	2.700 W
Max AC power $P_{AC\ max}$	2.500 W
max DC τάση ($U_{dc\ max}$)	600 V
U_{ss}	< 10 %
Προτεινόμενη max ισχύς Φ/Β	3.000 Wp
Αριθμός συλλεκτών σε σειρά	18 – 24
Max αριθμός string	3
DC διακόπτης	DC - Steckverbinder
max ισχύς AC ($P_{AC\ max}$)	2.500 W
AC ονομαστική ισχύς (P_{AC})	2.300 W
Αρμονικές < 2 %	< 4 %
Περιοχή λειτουργίας τάσης δικτύου (U_{AC})	198 – 260 V
Περιοχή ρύθμισης	180 – 265 V
Περιοχή λειτουργίας συχνότητας (F_{AC})	49,8 Hz – 50,2 Hz
Περιοχή ρύθμισης	48 Hz – 52 Hz
Απόκλιση φάσεων	0°
Προστασία βραχυκυκλώματος	Stromregelung
Max βαθμός απόδοσης	94,1 %
Βαθμός απόδοσης EU	93,2 %
Αυτοκατανάλωση σε λειτουργία	< 7 %
Αυτοκατανάλωση σε νυχτερινή λειτουργία	0,25 W
EMC	EN 50081, T.1
Παρακολούθηση διαταραχών	EN 61000-3-2
Κανονισμοί χαμηλών τάσεων	EN 50178
Προστασία κατά DIN 40050/IEC 529	IP 65
Πλάτος	434 mm
Ύψος	295 mm
Βάθος	214 mm
Βάρος	30 kg
Επιτρεπόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος	-25°C bis +60°C
Επιτρεπόμενη σχετική υγρασία	0...100%, Kl.3K6

Ο συγκεκριμένος μετατροπέας, Sunny Boy SWR 2500 είναι ένας μετατροπέας με τις περισσότερες σήμερα πωλήσεις σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις.

Αυτό οφείλεται από τη μία στην ιδιαίτερα αξιόλογη τεχνολογία τους και, από την άλλη, στη δοκιμασμένη συνδεσμολογία τους. Εξοπλισμένοι με την διεπαφή δικτύου „SMA grid guard 2“ και την αυτόματη αναγνώριση συχνότητας δικτύου, αυτοί οι μετατροπείς Sunny Boy είναι συμβατοί με σχεδόν όλα τα δίκτυα παγκοσμίως. Επιπλέον οι μετατροπείς SB 2500, διαθέτουν ευρεία περιοχή τιμών τάσης εισόδου, η οποία σας λύνει τα χέρια στην επιλογή της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Οι ιδιότητες αυτές καθιστούν τους μετατροπείς SB 2500 ως αυτούς με την μεγαλύτερη καταξίωση και με τις μεγαλύτερες πωλήσεις ανάμεσα στους μετατροπείς φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων της SMA.

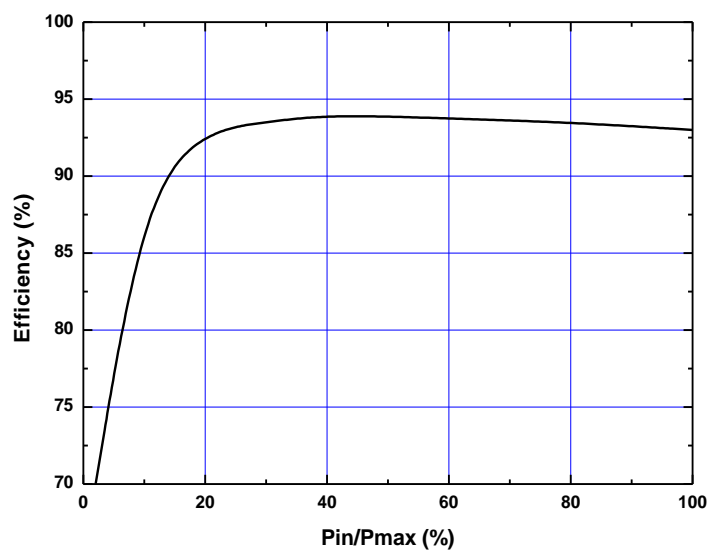
Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε το κύκλωμα προστασίας του μετατροπέα Sunny Boy SWR 2500 .



Σχ.6.11 Το κύκλωμα προστασίας του μετατροπέα Sunny Boy SWR 2500 .

Στην παρακάτω χαρακτηριστική φαίνεται η αποδοτικότητα του μετατροπέα Sunny Boy SWR 2500 . Παρατηρούμε ότι η αποδοτικότητα του μετατροπέα εξαρτάται κυρίως από την τάση της εισόδου του, δηλαδή από την τάση εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Παρατηρούμε επίσης ότι όσο χαμηλότερη είναι η τάση εισόδου του μετατροπέα, τόσο υψηλότερος είναι ο βαθμός απόδοσης του.

Efficiency of the Sunny Boy SB 2500		
Max. Efficiency	η_{max}	94,1 %
European standard efficiency	η_{euro}	93,2 %



Σχ.6.12 Χαρακτηριστική απόδοσης του μετατροπέα Sunny Boy SWR 250 ως συνάρτηση λόγου εισερχόμενης ισχύς προς τη ονομαστική ισχύ λειτουργίας.

- **Ηλεκτρολογικοί πίνακες και συστήματα ελέγχου :**

Στην εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού συστήματος, εγκαταστάθηκαν συνολικά τρεις πίνακες σύνδεσης AC, οι οποίοι και περιέχουν τον ανάλογο εξοπλισμό από ασφάλειες, διακόπτες και καλωδιώσεις, καθώς επίσης και ένας πίνακας όπου και σύνδεε μέχρι πρότινος (τέλι 2006) την παραγωγή του φωτοβολταϊκού πάρκου με εκείνη του αιολικού πάρκου της εταιρίας σε μια κοινή γραμμή, για την εισαγωγή της ηλεκτρικής παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο της Δ.Ε.Η .
Επίσης έχει εγκατασταθεί το σχετικό σύστημα ελέγχου και εποπτείας (Supervisory control and data acquisition - SCADA), του φωτοβολταϊκού πάρκου, με σκοπό τον έλεγχο και την καταγραφή των δεδομένων του φωτοβολταϊκού πάρκου.

- **Περιγραφή συστήματος ελέγχου και εποπτείας (Supervisory control and data acquisition - KILOGraph SCADA), του φωτοβολταϊκού πάρκου :**

Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες που αποτελούν το φωτοβολταϊκό πάρκο συνδέονται με ένα κεντρικό υπολογιστή ελέγχου. Το σύστημα ελέγχου και εποπτείας του φωτοβολταϊκού πάρκου (KILOGraph - SCADA) παρέχει την συλλογή των στοιχείων της συνολικής παραγωγής του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Η συλλογή των μετρήσεων της ισχύος από τους μετατροπείς της κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας, γίνεται με τα καλώδια επικοινωνίας τα οποία και τοποθετούνται κατά μήκος του φωτοβολταϊκού πάρκου υπόγεια, συνδέοντας έτσι τους μετατροπείς με τον κεντρικό υπολογιστή.

Οι μετρήσεις οι οποίες και καταγράφονται από το σύστημα ελέγχου και εποπτείας, γίνονται σε συχνότητα των δέκα λεπτών. Έτσι η βάση δεδομένων που δημιουργείται από το σύστημα ελέγχου και εποπτείας του φωτοβολταϊκού πάρκου περιέχει την συλλογή των στοιχείων και την ώρα που έγινε η συγκεκριμένη μέτρηση.

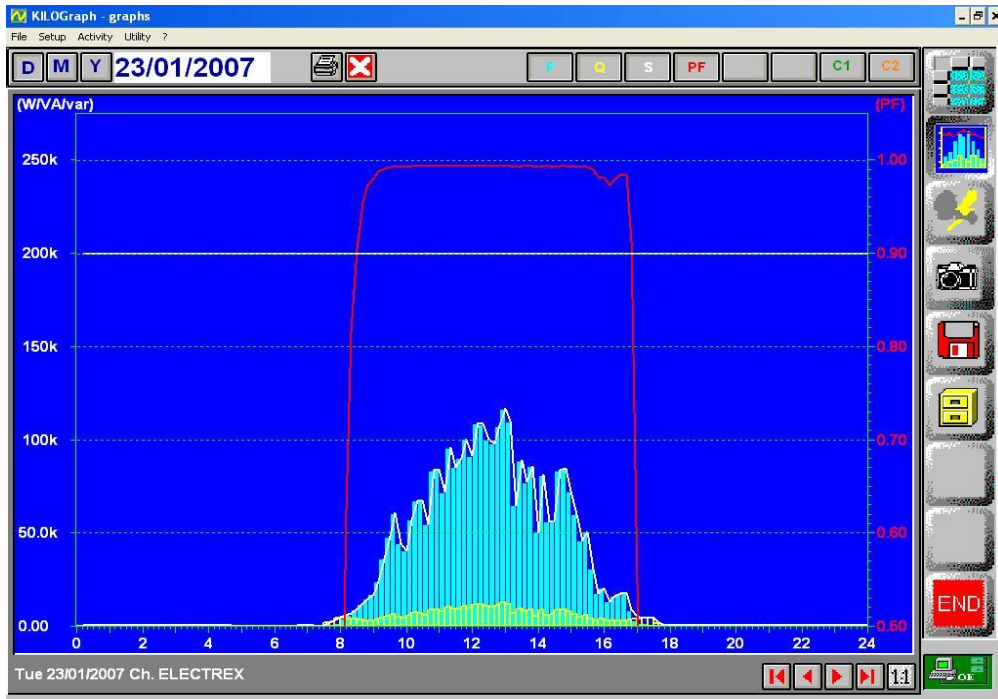
Παρακάτω βλέπουμε τις πληροφορίες που παίρνουμε από το σύστημα ελέγχου και εποπτείας του φωτοβολταϊκού πάρκου :

1. Ώρα και ημερομηνία μέτρησης.
2. Ενεργός ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου (P).
3. Άεργη ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου (Q).
4. Φαινόμενη ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου (S).
5. Συνημίτονο φ εξόδου φωτοβολταϊκού πάρκου (cos φ).

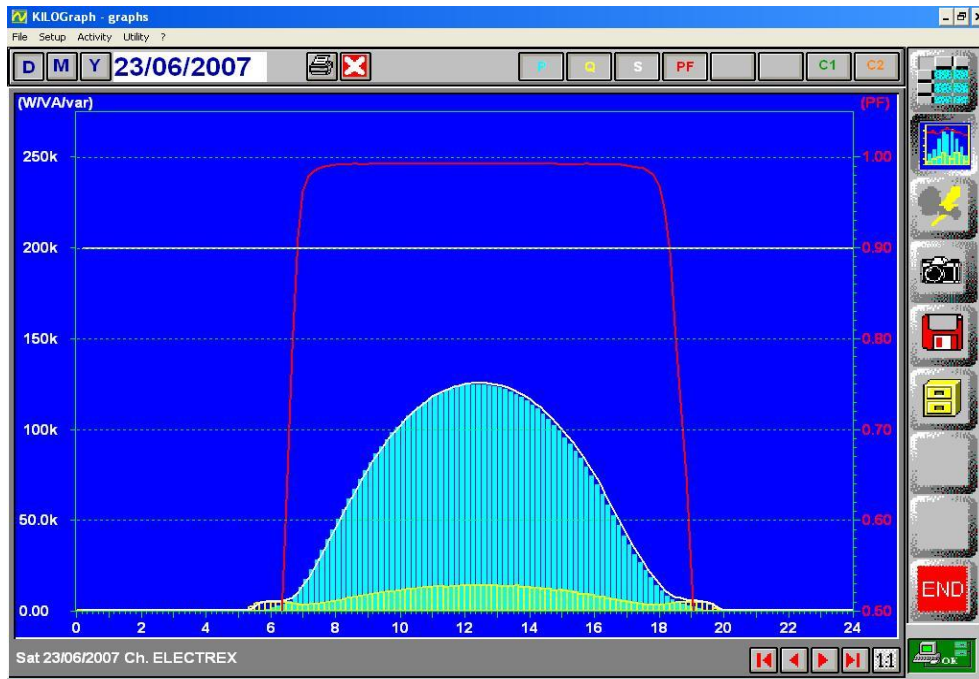
Επίσης χρησιμοποιείται και το πρόγραμμα του σπηλίτη για την συλλογή και την δημιουργία μιας βάσης δεδομένων σχετικά με τις παρακάτω μετρήσεις (η συχνότητα των μετρήσεων είναι της τάξης των δέκα λεπτών) :

1. Ώρα και ημερομηνία μέτρησης.
2. Ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
3. Μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
4. Μέση τιμή θερμοκρασία περιβάλλοντος.
5. Μέση τυπική απόκλιση θερμοκρασία περιβάλλοντος.
6. Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου.
7. Ελάχιστη ηλιακή ακτινοβολία.
8. Μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία.
9. Μέση τιμή ηλιακής ακτινοβολίας.
10. Μέση τυπική απόκλιση ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα παραπάνω στοιχεία καταγράφονται στο κεντρικό υπολογιστή του φωτοβολταϊκού πάρκου και μπορούν να εξαχθούν σε μορφή λογιστικού φύλλου, για την όποια επεξεργασία τους .



Σχ.6.13 Η καταγραφή των ημερήσιων στοιχείων της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από το σύστημα ελέγχου και εποπτείας του φωτοβολταϊκού πάρκου για μια μέρα με μικρή ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. (KILoGraph – SCDADA)



Σχ.6.14 Η αντίστοιχη καταγραφή των ημερήσιων στοιχείων της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από το σύστημα ελέγχου και εποπτείας του φωτοβολταϊκού πάρκου για μια μέρα με μεγάλη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. (KILoGraph – SCDADA)

Στην παραπάνω χαρακτηριστική της καταγραφής των ημερήσιων στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος βλέπουμε με :

- Γαλάζιο χρώμα την ημερήσια παραγωγή ενεργού ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού πάρκου.
- Με κίτρινο χρώμα την άεργη ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού πάρκου.
- Με άσπρο χρώμα την φαινόμενη ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού πάρκου.
- Και με κόκκινο χρώμα τον συντελεστή ισχύος $\cos \phi$.

- **Μετασχηματιστής του φωτοβολταϊκού πάρκου :**

Για την σύνδεση του φωτοβολταϊκού πάρκου με το δίκτυο της Δ.Ε.Η εγκαταστάθηκε ένας μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης από τα 400 V στα 20 kV , της εταιρίας Pauwels INTERNATIONAL N.V. .

Το φωτοβολταϊκό πάρκο από την αρχή της λειτουργίας του έως και μέχρι τα τέλη του 2006 συνδεόταν με το εσωτερικό δίκτυο των αιολικών πάρκων της εταιρίας.

Έτσι η συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μαζί με την παραγόμενη ενέργεια από το αιολικό πάρκο μέσω κοινής γραμμής συνδεόταν στο δίκτυο της Δ.Ε.Η , μέσω του εναέριου δικτύου μέσης τάσης στον υποσταθμό της Σητείας.

Τα χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή του φωτοβολταϊκού πάρκου, φαίνονται πιο κάτω :

Χαρακτηριστικά μετασχηματιστής φωτοβολταϊκού πάρκου (PAUWELS)		
Standards		IEC 60076
Qty	Pcs	1
Type		TSC
Rating	KVA	250
Primary voltage	KV	0,4
Tappings (on secondary)	%	± 2 x 2,5 %
Secondary voltage at no load	KV	20
Impedance	%	4
Frequency	Hz	50
Number of Phases		3
Vector group symbol		Dyn 11
No load losses	W	425
Full load losses at 75 °C	W	3250
Primary test voltage 1 min.	kV	3
Secondary test voltage 1 min.	kV	50
Impulse level	kV	125
Ambient temperature	°C	50
Cooling method		ONAN
Dimensions		
-length	mm	1300
-width	mm	1205
-height	mm	1140

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Ενεργειακή ανάλυση φωτοβολταϊκού πάρκου Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ.

7.1 Εισαγωγή.

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την ενεργειακή ανάλυση του φωτοβολταϊκού πάρκου της εταιρίας Χ. ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Όπως είδαμε είδη στο κεφάλαιο 5, που αναφερθήκαμε στις απώλειες που μπορούν να εμφανιστούν στα φωτοβολταϊκά συστήματα, είδαμε ότι για τον υπολογισμό των απωλειών του συστήματος χρησιμοποιούμε τον συντελεστή δυναμικού (Capacity Factor ή CF), ο οποίος και εκφράζει την ετήσια απόδοση της ενεργειακής παραγωγής του φωτοβολταϊκού πάρκου. Ο συντελεστής δυναμικού ορίζεται σαν ο λόγος της ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προς την ενέργεια που θα παραγόταν εάν το φωτοβολταϊκό λειτουργούσε για κάθε ώρα του έτους σε πλήρη ονομαστική ισχύ. Πολλές φορές όμως συμβαίνει κατά την λειτουργία του συστήματος να παρουσιάζεται κάποια απόκλιση από τις ιδανικές συνθήκες, πράγμα το οποίο και έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε αυτό λοιπόν το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τον υπολογισμό της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πάρκου, που για να καταλήξουμε σε αυτόν τον υπολογισμό θα πρέπει πρώτα να υπολογιστούν η τελική παραγωγή του πάρκου (final yield ή Y_F), η παραγωγή αναφοράς (reference yield ή Y_R), η απόδοση (performance ratio ή PR) και ο συντελεστής δυναμικού (capacity factor ή CF).

Οι παραπάνω συντελεστές προκύπτουν από την μελέτη των απωλειών που παρουσιάζονται στο σύστημα του φωτοβολταϊκού πάρκου και τις οποίες και είδαμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 5. Έτσι με βάση τα στοιχεία του συστήματος ελέγχου και εποπτείας (SCADA) του φωτοβολταϊκού πάρκου που έχουν συλλεχτεί για διάρκεια ενός έτους, θα υπολογιστούν οι διάφορες μορφές απωλειών που εμφανίζονται στο φωτοβολταϊκό πάρκο και τελικά ο βαθμός της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Για να καταλήξουμε στον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή απωλειών ($n_{\text{απ}}$) που όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 5.2.3.1 αποτελείται από το γινόμενο των επιμέρους απωλειών της θερμοκρασίας ($n_{\text{θερ}}$), τις απώλειες ρύπανσης ($n_{\text{ρυσ}}$), τις απώλειες στις του εσωτερικού δικτύου και των διασυνδέσεων ($n_{\text{δικ}}$), τις απώλειες του αντιστροφέα ($n_{\text{αντ}}$), τις απώλειες που εμφανίζει ο μετασχηματιστής ($n_{\text{μετ}}$), επίσης τις απώλειες από πιθανή συντήρηση ή και βλάβη του συστήματος ($n_{\text{διαθ}}$), και τέλος τις απώλειες του δικτύου της Δ.Ε.Η ($n_{\text{διασ}}$). Έτσι λοιπόν ο συνολικός συντελεστής απωλειών του συστήματος ($n_{\text{απ}}$) θα είναι ίσος με :

$$n_{\text{απ}} = n_{\text{θερ}} \cdot n_{\text{ρυσ}} \cdot n_{\text{δικ}} \cdot n_{\text{αντ}} \cdot n_{\text{μετ}} \cdot n_{\text{διαθ}} \cdot n_{\text{διασ}}$$

Η διαδικασία την οποία και θα ακολουθήσουμε για τον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή απωλειών ($n_{\text{απ}}$) είναι η παρακάτω :

- Αρχικά θα χρειαστούμε την καταγραφή των δεδομένων που έχει συλλεχτεί από το σύστημα ελέγχου και εποπτείας για ένα έτος (KILOGraph - SCADA). Η ανάλυση και καταγραφή των μετρήσεων γίνεται ανά δεκάλεπτο της ώρας.
- Στην συνέχεια θα υπολογιστεί το ηλιακό δυναμικό με τον υπολογισμό της μέσης μηνιαίας ενεργειακής απολαβής (kWh/m²).
- Έπειτα θα υπολογιστεί η θεωρητική παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς ανά δεκάλεπτο της ώρας, καθώς και η συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες με την χρήση των δεδομένων του συστήματος ελέγχου και εποπτείας του φωτοβολταϊκού πάρκου (SCADA).
- Τέλος θα υπολογιστεί η παραγόμενη ενέργεια βαθμιαία αθροίζοντας τις διάφορες απώλειες που αναφέρθηκαν παραπάνω και εμφανίζονται στο σύστημα.

Οι συντελεστές των απωλειών του συστήματος εμφανίζονται σαν ετήσιοι ενεργειακοί λόγοι όπως βλέπουμε στον πίνακα :

Συντελεστής	Ενεργειακός λόγος
$\eta_{\text{θερ}}$	$\eta_{\text{θερ}} = E_{\theta} / E_{\text{ΦΒ}}$
$\eta_{\text{ρυσ}}$	$\eta_{\text{ρυσ}} = E_{\rho} / E_{\theta}$
$\eta_{\text{δικ}}$	$\eta_{\text{δικ}} = E_{\text{DC}} / E_{\rho}$
$\eta_{\text{αντ}}$	$\eta_{\text{αντ}} = E_{\text{AC}} / E_{\text{DC}}$
$\eta_{\text{μετ}}$	$\eta_{\text{μετ}} = E_{\text{MET}} / E_{\text{AC}}$
$\eta_{\text{διαθ}}$	$\eta_{\text{διαθ}} = E_{\text{ΕΞ}} / E_{\text{MET}}$
$\eta_{\text{διασ}}$	$\eta_{\text{διασ}} = E_{\text{ΠΩΛ}} / E_{\text{ΕΞ}}$
$\eta_{\text{απ}}$	$\eta_{\text{απ}} = E_{\text{ΠΩΛ}} / E_{\text{ΦΒ}}$

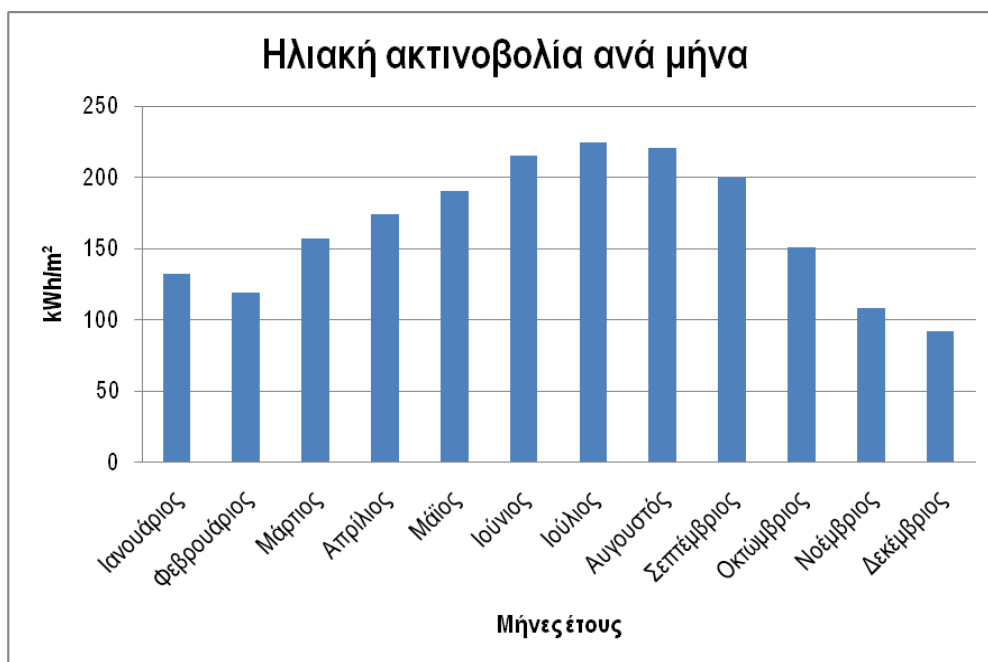
7.2 Υπολογισμός της μέσης μηνιαίας ενεργειακής απολαβής (kWh/m²) .

Σύμφωνα λοιπόν με τις καταγεγραμμένες μετρήσεις που έχουμε από το σύστημα ελέγχου και εποπτείας του φωτοβολταϊκού πάρκου και με την βοήθεια της βάσης δεδομένων της Ispra και με εύρος μετρήσεων τα δέκα λεπτά της ώρας, καταλήγουμε και με την βοήθεια λογιστικού φύλλου στον υπολογισμό με ακρίβεια της μέσης μηνιαίας ενεργειακής απολαβής (kWh/m²) .

Ο υπολογισμός της μέσης μηνιαίας ενεργειακής απολαβής (kWh/m²) είναι το άθροισμα της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας του επιλεγμένου μηνός επί 10/60 (το εύρος των μετρήσεων ανά δέκα λεπτά της ώρας) .

Έτσι η συνολική ετήσια ενεργειακή απολαβή (H_t) δίδεται από το άθροισμα των μηνιαίων τιμών και ισούται με **1984,38 kWh/m²**.

Στην παρακάτω χαρακτηριστική φαίνεται η μέση ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα, όπως αυτή προκύπτει από την συλλογή των στοιχείων του φωτοβολταϊκού πάρκου και μετά από τους ανάλογους υπολογισμούς :



Σχ.7.1 Η ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m²) ανά μήνα.

Από τους υπολογισμούς ο μήνας Ιούλιος παρουσιάζεται με το μεγαλύτερο ποσο της ηλιακής ακτινοβολίας με 224,66 kWh/m² , ενώ ο μήνας Δεκάμβριος παρουσιάζεται ως ο μήνας με το χαμηλότερο ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας ίσο με 92,35 kWh/m² .

7.3 Υπολογισμός της θεωρητικής παραγωγής φωτοβολταϊκών πλαισίων (P_{ΦΒ}) .

Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε την θεωρητική παραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε πρότυπες συνθήκες (με μηδενικές απώλειες) ανά δεκάλεπτο της ώρας όπου και υπολογίζεται από την εξίσωση :

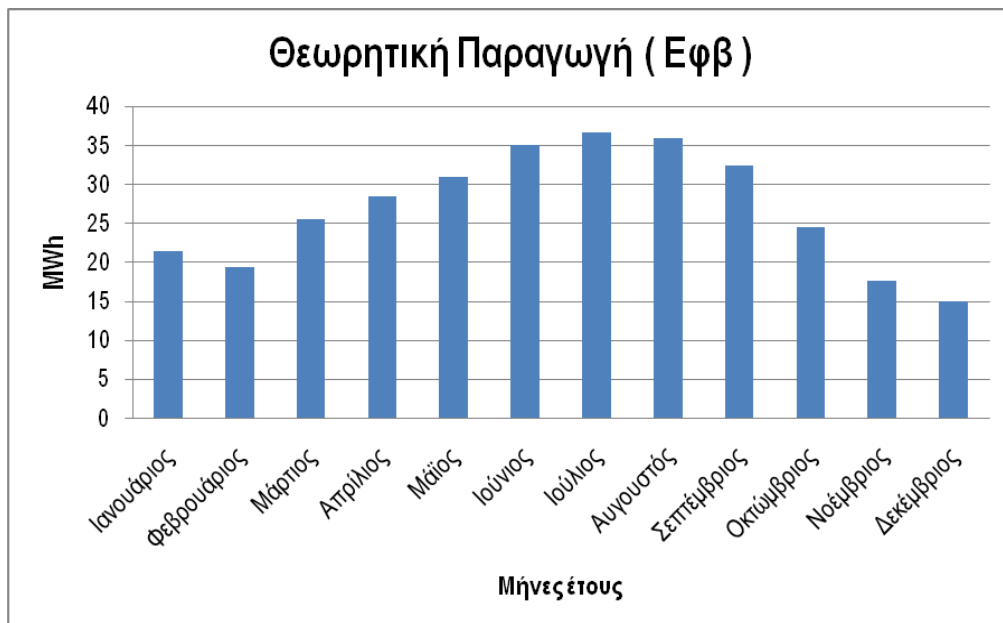
$$P_{\Phi B} [kW] = \frac{P_r [kWp] \cdot G [kW / m^2]}{1 [kW / m^2]}$$

όπου : G είναι η πυκνότητα ισχύος, η οποία και προέρχεται από τον προηγούμενο υπολογισμό της μέσης μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας.

P_r : η ονομαστική ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος (P_r = 1428 x 120 Wp = 171,36 kWp) .

Έτσι και σύμφωνα με τους υπολογισμούς η ετήσια συνολική θεωρητική παραγωγή είναι ίση με **323,04 MWh** .

Στην παρακάτω χαρακτηριστική φαίνεται η θεωρητική παραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά μήνα, όπως αυτή προκύπτει βάση της αντικατάστασης και του υπολογισμού της παραπάνω εξίσωσης :



Σχ.7.2 Η θεωρητική παραγωγή (Εφβ) των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά μήνα (μηδενικές απώλειες).

7.4 Υπολογισμός της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_c) .

Όπως έχει είδη αναφερθεί η θερμοκρασία λειτουργίας και η πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας επηρεάζει την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Με την αύξηση της θερμοκρασίας του πλαισίου παρουσιάζεται γραμμική μείωση της απόδοσης του. Για αυτόν τον λόγο επιβάλλεται και ο καλός αερισμός της πίσω πλευράς του πλαισίου. Η ονομαστική ισχύς αναφέρεται στην απόδοση της σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας STC (1kW/m², AM1,5, 25°C). Σε συνθήκες θερμοκρασίας διαφορετικές από τις ονομαστικές, η τιμή της προσδιορίζεται από την διαφορά T_c-T_{STC}, των θερμοκρασιών του πλαισίου και της θερμοκρασίας T_{STC}=25°C και από την πυκνότητα ισχύος G της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Αρχικά θα υπολογίσουμε την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_c) στις αντίστοιχες τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$T_c = T_a + \frac{G}{G_{NOCT}} (T_{NOCT} - 20) = T_a + \frac{G}{800} (T_{NOCT} - 20)$$

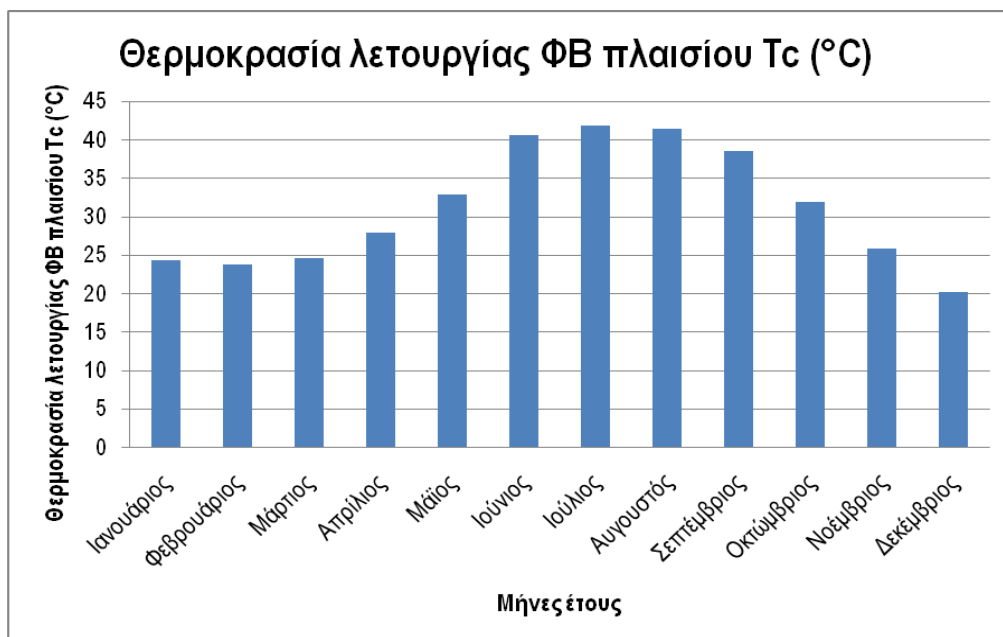
όπου : T_a, είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

T_{NOCT}, είναι η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας της γεννήτριας (όπως δίδεται από τον κατασκευαστή T_{NOCT}=47°C) .

G, είναι η πυκνότητα ισχύος στην συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω εξίσωση και χρησιμοποιώντας τα στοιχεία, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_a), την ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας της γεννήτριας (T_{NOCT}), και την πυκνότητα ισχύος στην συγκεκριμένη χρονική στιγμή (G) των πιο πάνω υπολογισμών καταλήγουμε στον υπολογισμό της θερμοκρασίας του ΦΒ πλαισίου (T_c).

Στην παρακάτω χαρακτηριστική φαίνεται η μέση τιμή της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_c) ανά μήνα, όπως αυτή προκύπτει βάση της αντικατάστασης και του υπολογισμού της παραπάνω εξίσωσης :



Σχ.7.3 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_c).

7.5 Υπολογισμός του θερμικού Συντελεστή N_{temp} (%).

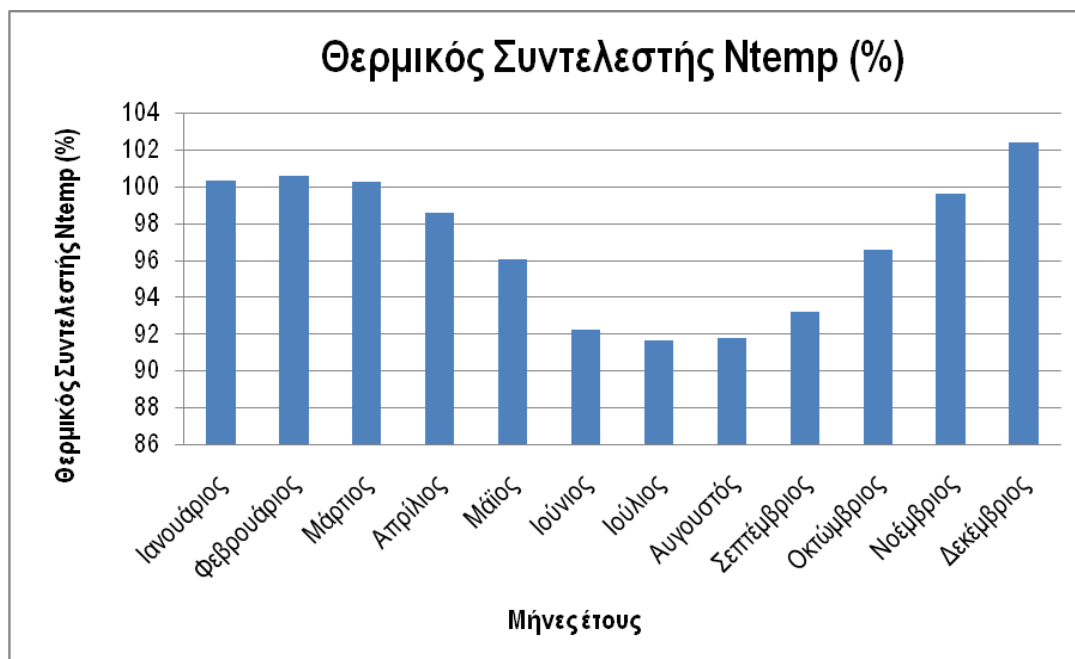
Για τον υπολογισμό του θερμικού συντελεστή απόδοσης θα χρησιμοποιήσουμε την σχέση :

$$n_{temp} = 1 + \beta(T_c - 25)$$

όπου : β , είναι ο θερμικός συντελεστής της απόδοσης (για το BP – Solar MSX 120, όπως δίδεται από τον κατασκευαστή $\beta = -0,5\%/^{\circ}\text{C}$).

T_c , είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω σχέση και αντικαθιστώντας τα ανάλογα μεγέθη παίρνουμε την πιο κάτω χαρακτηριστική, στην οποία και φαίνεται η μέση τιμή του Θερμικού Συντελεστή N_{temp} (%), εκφρασμένο επί τοις εκατό :



Σχ.7.4 Θερμικός Συντελεστής Ntemp (%).

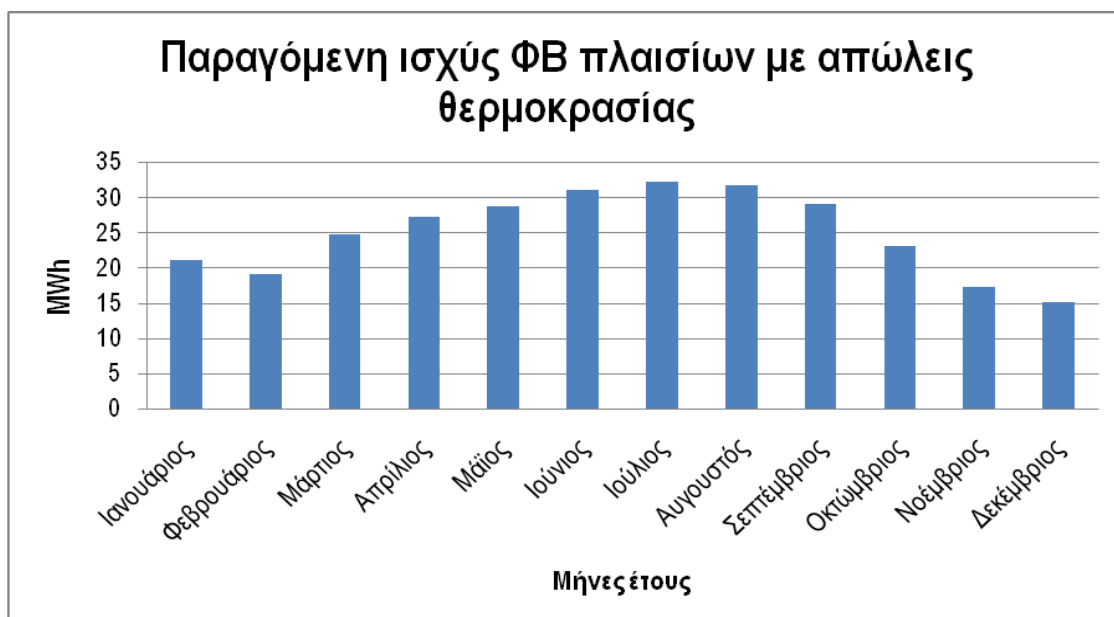
7.6 Υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος με απώλειες θερμοκρασίας (Εθ) .

Στην συνέχεια υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με απώλειες λόγω θερμοκρασίας. Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος με απώλειες λόγω της θερμοκρασίας, πολλαπλασιάζουμε την θεωρητική παραγωγή όπου και υπολογίστηκε πιο πάνω με τον θερμικό συντελεστή Ntemp (%) , που υπολογίστηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Σύμφωνα λοιπόν με τους υπολογισμούς η ετήσια παραγόμενη ενέργεια (Εθ) υπολογίζεται σε **300,02 MWh** . Ο μέσος συντελεστής η_{θερ} υπολογίζεται ενεργειακά ως ο λόγος της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας με απώλειες θερμοκρασίας (Εθ) προς την θεωρητική παραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Ε_{ΦΒ}), δηλαδή προκύπτει :

$$\eta_{\text{θερ}} = E_{\theta} / E_{\text{ΦΒ}} = 300,03 \text{ MWh} / 323,04 = 0,9288 \text{ ή } 92,88 \%$$

Στην παρακάτω χαρακτηριστική φαίνεται η παραγόμενη ισχύς ανά μήνα από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με απώλειες λόγω της θερμοκρασίας :



Σχ.7.5 Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκών πλαισίων με απώλειες λόγω της θερμοκρασίας.

7.7 Η επίδραση της ρύπανσης στις απώλειες (E_p).

Σημαντικό παράγοντα απωλειών αποτελεί η ρύπανση. Η ρύπανση στα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζεται λόγω της έκθεσης τους στα καιρικά φαινόμενα, δημιουργώντας έτσι σημαντικές απώλειες λόγω της ρύπανσης.

Η ρύπανση λοιπόν παρουσιάζεται στα φωτοβολταϊκά συστήματα με τη μορφή σκόνης η οποία και περιέχεται στον αέρα.

Ανάλογα και με την περιοχή όπου είναι εγκατεστημένα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και σε συνδυασμό με την υγρασία η οποία και παρουσιάζεται, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, σχηματίζεται ένα στρώμα λάσπης στην επιφάνεια του συλλέκτη με αποτέλεσμα την απορρόφηση σημαντικής ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας.

Επίσης άλλοι παράγοντες οι οποίοι και προκαλούν απώλειες λόγω της ρύπανσης είναι τα φύλλα των δέντρων, χαρτιά και περιπτώματα πουλιών.

Για τον περιορισμό των απωλειών λόγω της ρύπανσης των πλαισίων, είναι απαραίτητος ο καθαρισμός των πλαισίων, ιδιαίτερα κατά την διάρκεια του θέρους. Επίσης κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών η παρουσία της βροχής παρουσιάζει σημαντικό ρόλο στην μείωση των απωλειών, καθώς απαλλάσσει την επιφάνεια των συλλεκτών από τους ρύπους εύκολα και χωρίς κόστος.

Οι απώλειες που εμφανίζονται λόγω της ρύπανσης αθροίζονται στην παραγωγή ανά μήνα ανάλογα με την συχνότητα βροχόπτωσης του μήνα και με καθαρισμό των συλλεκτών σύμφωνα με τις παρακάτω τιμές :

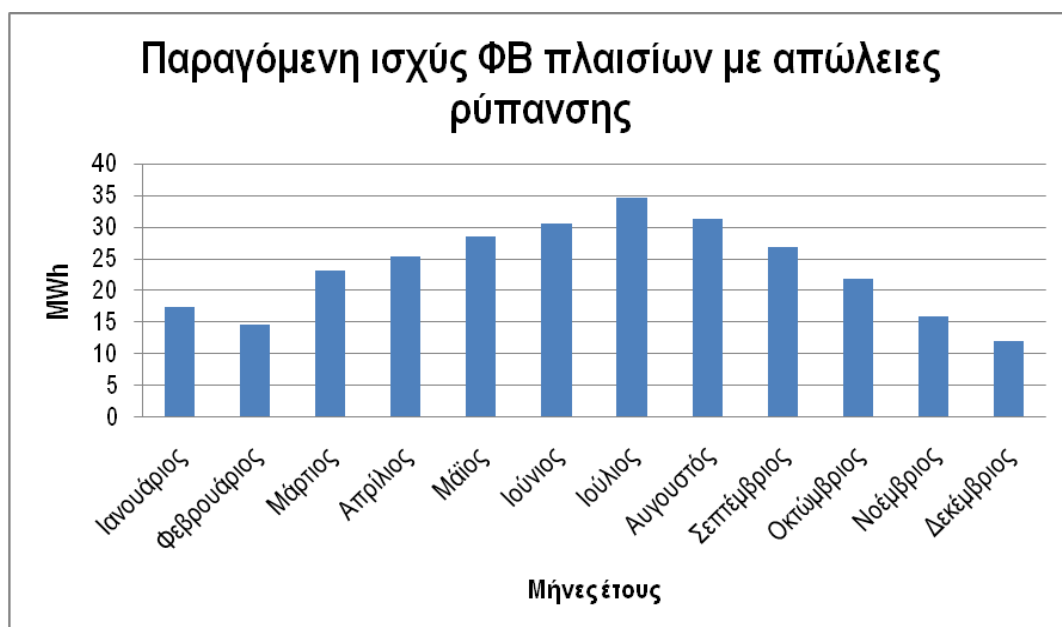
Μηνιαίος συντελεστής ρύπανσης											
Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,95	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,95

Σύμφωνα λοιπόν με τους παραπάνω συντελεστές ρύπανσης για κάθε μήνα, ανάλογα με την συχνότητα της βροχόπτωσης του κάθε μήνα και τον καθαρισμό των συλλεκτών, και σύμφωνα με τους υπολογισμούς καταλήγουμε ότι η ετήσια παραγόμενη ενέργεια (E_p), με απώλειες λόγω της ρύπανσης να υπολογίζεται σε **282,45 MWh**.

Επίσης ο μέσος συντελεστής ρύπανσης $\eta_{\text{ρυπ}}$ υπολογίζεται ενεργειακά ως ο λόγος της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας με απώλειες ρύπανσης (E_p), προς την ετήσια παραγόμενη ενέργεια με απώλειες θερμοκρασίας (E_θ), δηλαδή προκύπτει :

$$\eta_{\text{ρυπ}} = E_p / E_\theta = 282,45 \text{ MWh} / 300,03 \text{ MWh} = 0,9414 \text{ ή } 94,14 \%$$

Στην πιο κάτω χαρακτηριστική φαίνεται η παραγόμενη ισχύς ανά μήνα του έτους, η οποία και προκύπτει σύμφωνα με τον πιο πάνω πίνακα με τους μηνιαίους συντελεστές ρύπανσης :



Σχ.7.6 Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκών πλαισίων με απώλειες λόγω της ρύπανσης.

7.8 Υπολογισμός απωλειών εσωτερικού δικτύου ($E_{εσ}$).

Ακόμα μία σημαντική παράμετρο απωλειών αποτελούν οι απώλειες που προέρχονται από το εσωτερικό δίκτυο του συστήματος. Όπως γνωρίζουμε η σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων γίνεται με αγωγούς κατάλληλης διατομής (στο συγκεκριμένο σύστημα που μελετούμε οι αγωγοί όπου συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι διατομής 4 mm). Στους αγωγούς αυτούς με την έλευση του ηλεκτρικού ρεύματος παρουσιάζονται θερμικές απώλειες.

Σκοπός μας είναι να ελαχιστοποιηθούν οι θερμικές απώλειες. Αυτό επιτυγχάνεται με την μείωση του ρεύματος που διαρρέει τους αγωγούς. Για τον λόγο αυτό συνδέονται τα πλαίσια εν σειρά σχηματίζοντας παράλληλους κλάδους.

Επίσης απώλειες μπορούν να εμφανιστούν και στα σημεία συνδέσεις των αγωγών, λόγω πιθανής κακής επαφής και οξείδωσης του σημείου επαφής.

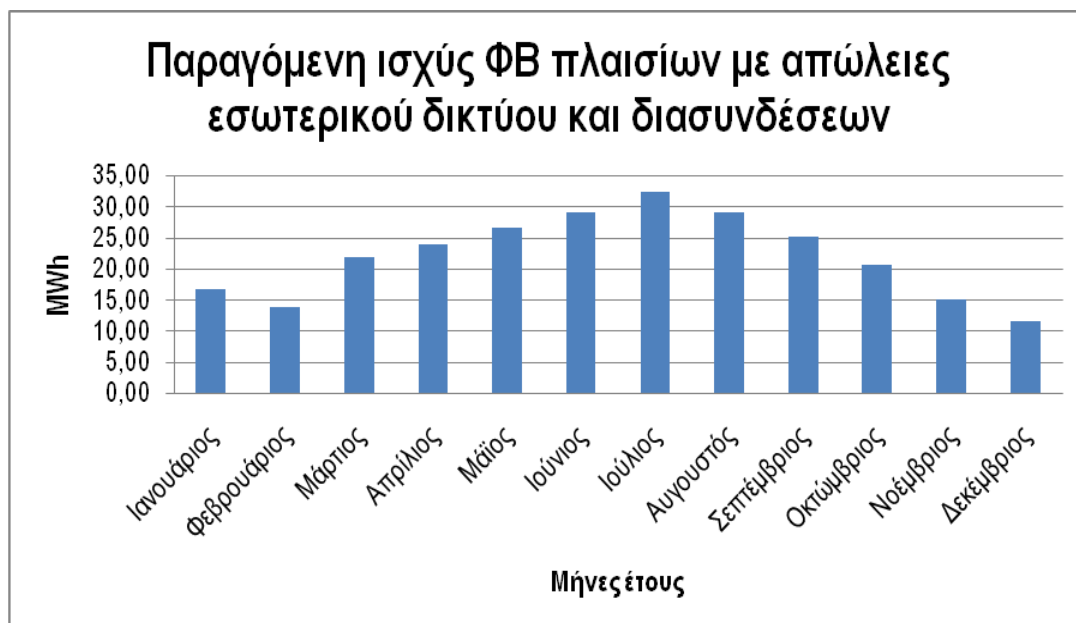
Σύμφωνα λοιπόν και με την βοήθεια του προγράμματος PVSYST 4.1 , και γνωρίζοντας την διατομή των αγωγών διασύνδεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων (4 mm), υπολογίστηκαν οι απώλειες του εσωτερικού δικτύου και των διασυνδέσεων με γνώμονα το 6% ως μέγιστη απώλεια για την μέγιστη ισχύ στην έξοδο των ΦΒ πλαισίων.

Έτσι λοιπόν και σύμφωνα με τους υπολογισμούς η ετήσια παραγόμενη ενέργεια (E_{DC}) υπολογίζεται σε 265,48 MWh .

Επίσης ο μέσος συντελεστής $\eta_{δικ}$ υπολογίζεται ενεργειακά ως ο λόγος της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας με απώλειες εσωτερικού δικτύου (E_{DC}) , προς την παραγόμενη ενέργεια με απώλειες ρύπανσης (E_p), δηλαδή προκύπτει :

$$\eta_{δικ} = E_{DC} / E_p = 265,48 \text{ MWh} / 282,45 \text{ MWh} = 0,9399 \text{ ή } 93,99 \%$$

Στην πιο κάτω χαρακτηριστική φαίνεται η παραγόμενη ισχύς ανά μήνα του έτους από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με απώλειες που προέρχονται από το εσωτερικό δίκτυο του συστήματος :



Σχ.7.7 Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκών πλαισίων με απώλειες εσωτερικού δικτύου και διασυνδέσεων.

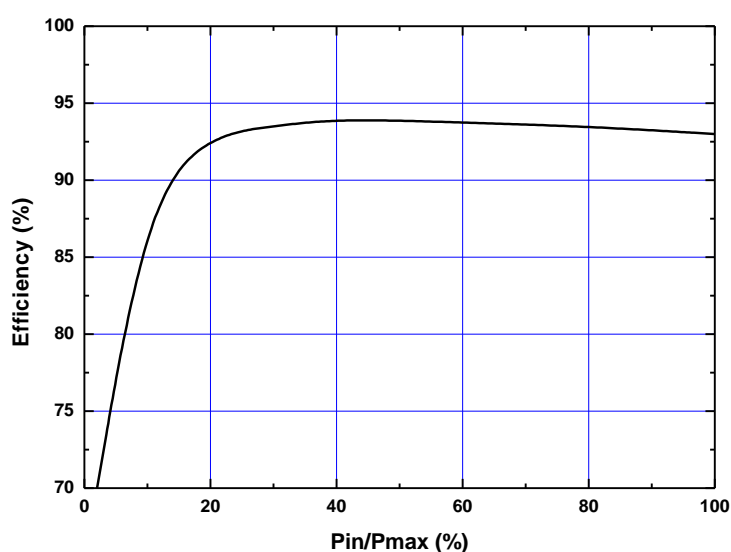
7.9 Υπολογισμός απωλειών αντιστροφέα ($E_{αντ}$).

Όπως είδη έχουμε δει και στους πιο πάνω υπολογισμούς, η ισχύς αιχμής των φωτοβολταϊκών πλαισίων που χρησιμοποιούμε στους υπολογισμούς, αφορά στις συνθήκες τάσης-έντασης που αντιστοιχούν στη μέγιστη δυνατή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 4 , οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς περιλαμβάνουν έναν ρυθμιστή τάσης που ανιχνεύει και εξασφαλίζει την λειτουργία του συστήματος στο σημείο της μέγιστης παραγωγής.

Γνωρίζουμε επίσης ότι η απόδοση σε όλο το φάσμα της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων δεν παραμένει η ίδια. Για τον λόγο λοιπόν αυτό όταν η εισερχόμενη ισχύς στον αντιστροφέα είναι μικρή, τότε η απόδοση του μετατροπέα είναι μικρότερη από την ονομαστική.

Η απόδοση λοιπόν των αντιστροφέων που χρησιμοποιούνται στο σύστημα (Sunny Boy SWR 2500) , δίνεται ως συνάρτηση του λόγου της εισερχόμενης ισχύς προς την ονομαστική ισχύ λειτουργίας ως ακολούθως :



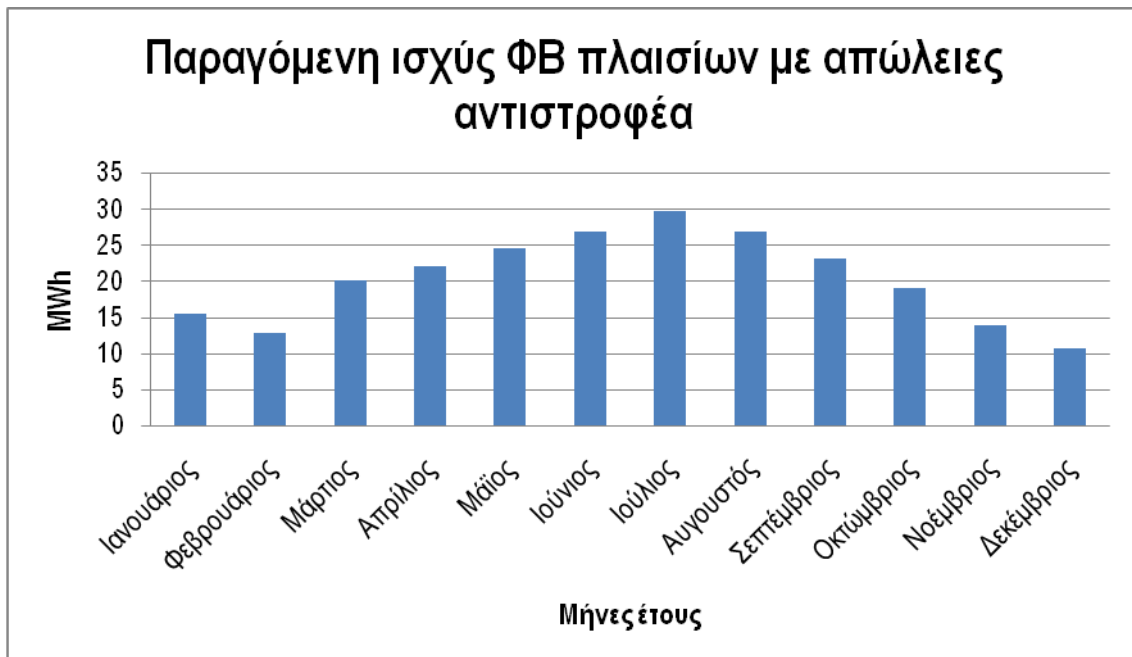
Σχ.7.8 Χαρακτηριστική απόδοσης του αντιστροφέα Sunny Boy SWR 2500 ως συνάρτηση λόγου εισερχόμενης ισχύς προς τη ονομαστική ισχύ λειτουργίας.

Έτσι λοιπόν και σύμφωνα με τα παραπάνω οι απώλειες των αντιστροφέων του συστήματος αθροίζονται στην παραγωγή. Από τους υπολογισμούς καταλήγουμε ότι η ετήσια παραγόμενη ενέργεια (E_{AC}), λόγω των απωλειών των αντιστροφέων υπολογίζεται σε **244,66 MWh** .

Επίσης ο μέσος συντελεστής $\eta_{αντ}$ υπολογίζεται ενεργειακά ως ο λόγος της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας με απώλειες αντιστροφέα (E_{AC}), προς την ετήσια παραγόμενη ενέργεια με απώλειες εσωτερικού δικτύου (E_{DC}), δηλαδή προκύπτει :

$$\eta_{αντ} = E_{AC} / E_{DC} = 244,66 \text{ MWh} / 265,48 \text{ MWh} = 0,9216 \text{ ή } 92,16 \%$$

Στην πιο κάτω χαρακτηριστική φαίνεται η παραγόμενη ισχύς ανά μήνα του έτους από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με απώλειες που προέρχονται από τους αντιστροφέες του συστήματος :



Σχ.7.9 Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκών πλαισίων με απώλειες αντιστροφέα.

7.10 Υπολογισμός απωλειών μετασχηματιστή ($E_{μετ}$).

Οι μετασχηματιστές ισχύος που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα, παρουσιάζουν εσωτερικές απώλειες. Οι εσωτερικές απώλειες αυτές του μετασχηματιστή (χαλκού ή φορτίου), οφείλονται κατά κύριο λόγο στις απώλειες που εμφανίζονται στα τυλίγματα του Μ/Σ και είναι της τάξεως του 0,8-3%.

Επίσης οι απώλειες σιδηρού που παρουσιάζονται στον πυρήνα του μετασχηματιστή είναι μικρότερες από 1%.

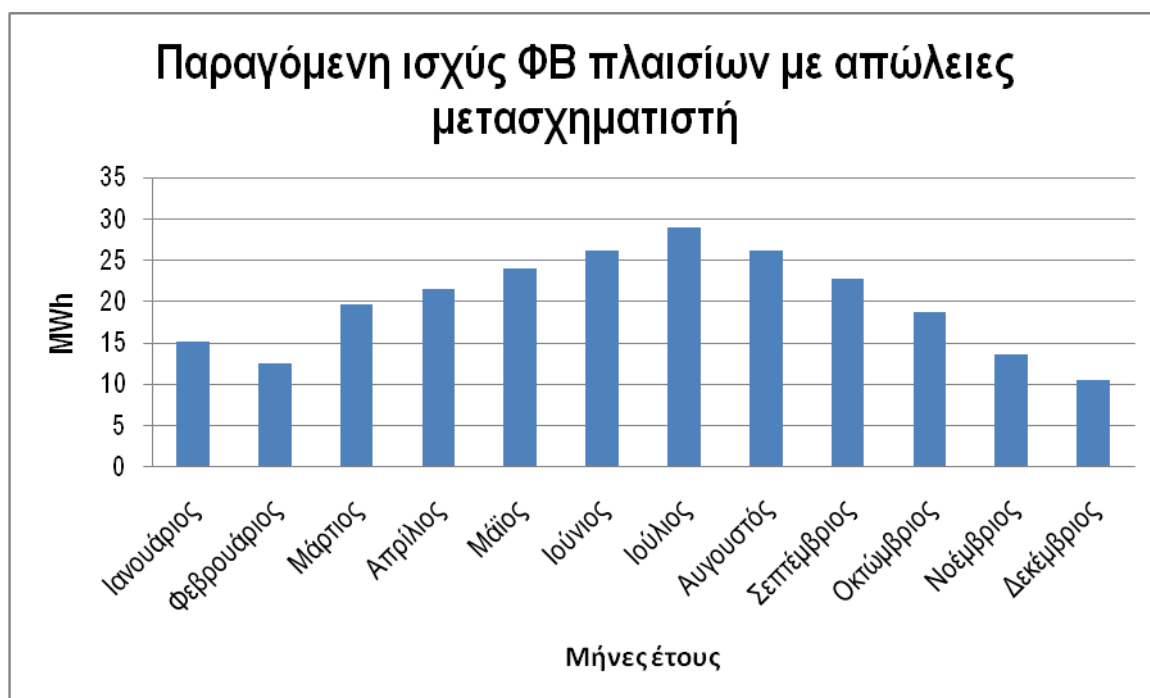
Ο υπολογισμός των απωλειών του μετασχηματιστή υπολογίζονται με γνώμονα το 1% ως μέγιστη απώλεια για την μέγιστη ισχύ στην είσοδο του μετασχηματιστή, βάση του τεχνικού φυλλαδίου του ενσωματωμένου Μ/Σ στο σύστημα του αντιστροφέα.

Έτσι λοιπόν και σύμφωνα με τους υπολογισμούς η ετήσια παραγόμενη ενέργεια ($E_{μετ}$), λόγω των απωλειών που εμφανίζονται στον μετασχηματιστή υπολογίζεται σε **239,94 MWh** .

Επίσης ο μέσος συντελεστής $\eta_{μετ}$ υπολογίζεται ενεργειακά ως ο λόγος της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας ($E_{μετ}$), των απωλειών που εμφανίζονται στον μετασχηματιστή, προς την παραγόμενη ενέργεια με απώλειες αντιστροφέα (E_{AC}), δηλαδή προκύπτει :

$$\eta_{μετ} = E_{μετ} / E_{AC} = 239,94 \text{ MWh} / 244,66 \text{ MWh} = 0,9807 \text{ ή } 98,07 \%$$

Στην πιο κάτω χαρακτηριστική φαίνεται η παραγόμενη ισχύς ανά μήνα του έτους από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με απώλειες που προέρχονται από τον μετασχηματιστή του συστήματος :



Σχ.7.10 Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκών πλαισίων με απώλειες μετασχηματιστή.

7.11 Υπολογισμός απωλειών διαθεσιμότητας και διασύνδεσης($E_{\text{διαθ}}$).

Όπως γνωρίζουμε για την σωστή λειτουργία της εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού πάρκου, θα πρέπει να πραγματοποιείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα κατά την διάρκεια του έτους η απαραίτητη συντήρηση και έλεγχος του εξοπλισμού του συστήματος. Επίσης κάποιες φορές κατά την λειτουργία του φωτοβολταϊκού πάρκου παρουσιάζονται διάφορες βλάβες στον εξοπλισμό του. Αποτέλεσμα των δύο παραπάνω περιπτώσεων είναι να εμφανίζεται μειωμένη η παραγωγή του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Για τον υπολογισμό των απωλειών διαθεσιμότητας θα χρησιμοποιήσουμε τους συντελεστές της μηνιαίας διαθεσιμότητας, οι οποίοι και προκύπτουν βάση του απαιτούμενου χρόνου συντήρησης, τον εκτιμώμενο χρόνο βλαβών και την διαθεσιμότητα του δικτύου της Δ.Ε.Η . Οπότε καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα :

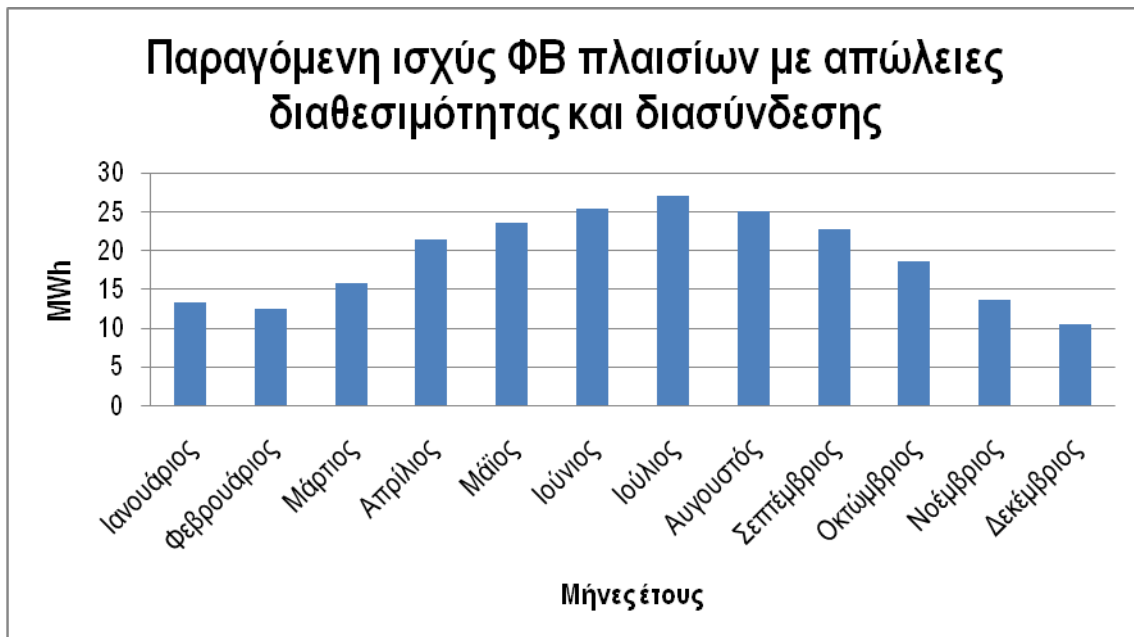
Μηνιαία διαθεσιμότητα πάρκου και δικτύου											
Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
0,870	0,993	0,801	0,990	0,983	0,969	0,929	0,955	0,997	0,997	0,994	0,994

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα της μηνιαίας διαθεσιμότητας του φωτοβολταϊκού πάρκου και του δικτύου της Δ.Ε.Η , για τον κάθε μήνα του έτους καταλήγουμε στο ότι η ετήσια παραγόμενη ενέργεια λόγω απωλειών διαθεσιμότητας ($E_{\text{ΕΞ}}$), υπολογίζεται σε **229,04 MWh** .

Επίσης ο μέσος συντελεστής $\eta_{\text{διαθ}}$ υπολογίζεται ενεργειακά ως ο λόγος της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας απωλειών διαθεσιμότητας ($E_{\text{ΕΞ}}$), προς την παραγόμενη ενέργεια με απώλειες που εμφανίζονται στον μετασχηματιστή ($E_{\text{ΜΕΤ}}$), δηλαδή προκύπτει :

$$\eta_{\text{διαθ}} = E_{\text{ΕΞ}}/E_{\text{ΜΕΤ}} = 229,04 \text{ MWh} / 239,94 \text{ MWh} = 0,9546 \text{ ή } 95,46 \%$$

Στην πιο κάτω χαρακτηριστική φαίνεται η παραγόμενη ισχύς ανά μήνα του έτους από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με απώλειες που προέρχονται από την μηνιαία διαθεσιμότητα του πάρκου και του δικτύου της Δ.Ε.Η :



Σχ.7.11 Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκών πλαισίων με απώλειες διαθεσιμότητας.

7.12 Υπολογισμός συνολικού συντελεστή απωλειών του συστήματος ($n_{απ}$) .

Αφού στα παραπάνω κεφάλαια έχουν υπολογιστεί αναλυτικά όλοι οι συντελεστές των απωλειών του συστήματος, στην συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί ο συνολικός συντελεστής των απωλειών του συστήματος ($n_{απ}$), αφού όπως έχουμε δει στην εισαγωγή του κεφαλαίου ο συνολικός συντελεστής των απωλειών είναι ίσος με το γινόμενο των επιμέρους απωλειών που υπολογίστηκαν πιο πάνω, δηλαδή :

$$n_{απ} = n_{θερ} \cdot n_{ρυπ} \cdot n_{δικ} \cdot n_{αντ} \cdot n_{μετ} \cdot n_{διαθ} \cdot n_{διασ}$$

Αντικαθιστώντας με την τιμή του κάθε συντελεστή απωλειών ώστε να υπολογιστεί ο συνολικός συντελεστής των απωλειών, έχουμε :

$$n_{απ} = 92,88\% \cdot 94,14\% \cdot 93,99\% \cdot 92,16\% \cdot 98,07\% \cdot 95,46\% \cdot 95\% = 67,36\%$$

Από τον παραπάνω υπολογισμό του συνολικού συντελεστή απωλειών του συστήματος καταλήγουμε να είναι ίσος με $n_{απ} = 67,36\%$.

7.13 Υπολογισμός της τελικής παραγωγής (final yield).

Αφού στον προηγούμενο υπολογισμό βρήκαμε ότι η συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια, λόγω των απωλειών διαθεσιμότητας (E_{EE}), του πάρκου η οποία και ισούται με **229,04 MWh** , με την μέγιστη παραγωγή να σημειώνεται τον μήνα Ιούλιο με **26,96 MWh** , ενώ η ελάχιστη παραγωγή να σημειώνεται τον μήνα Δεκέμβριο με **10,40 MWh** . Στην συνέχεια και βάση των όσων έχουν ειπωθεί στο κεφάλαιο 5 , για τον υπολογισμό της τελικής παραγωγής (final yield ή Y_F), θα υπολογίσουμε την τελική παραγωγή (Y_F) του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Για τον υπολογισμό της τελικής παραγωγής (final yield ή Y_F), του φωτοβολταϊκού πάρκου θα χρησιμοποιήσουμε την σχέση η οποία και εκφράζει τον λόγο της ισχύος στην έξοδο του συστήματος (E , σε kWh_{AC}), προς την πλήρη ονομαστική του ισχύς (P_r , σε kW_{DC}) του συστήματος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω καταλήγουμε για τον υπολογισμό της τελικής παραγωγής (final yield ή Y_F), στην παρακάτω σχέση :

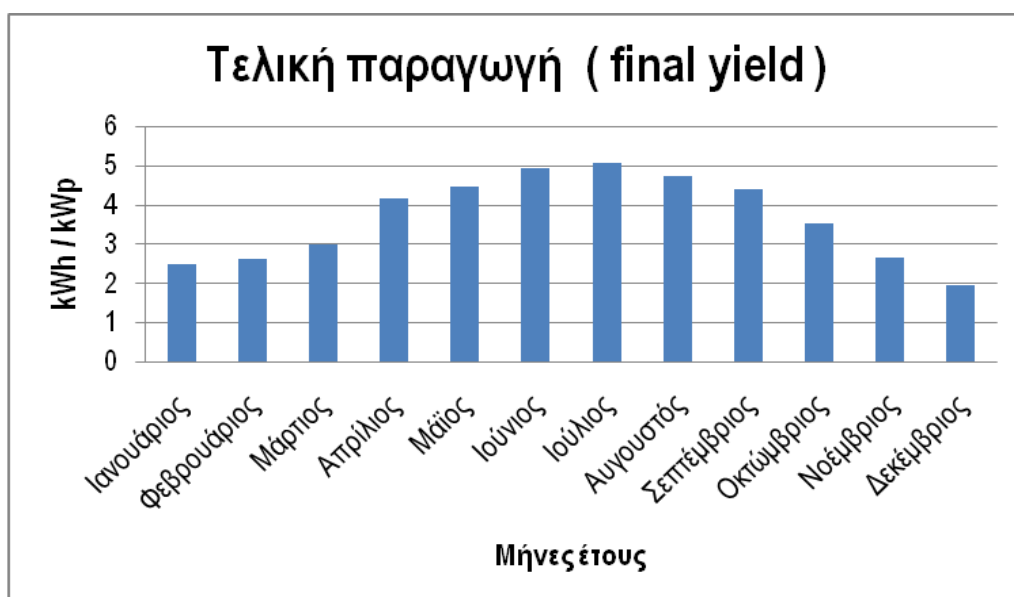
$$Y_F = \frac{E[kWh_{AC}]}{P_r[kW_{DC}]}$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση για τον υπολογισμό της τελικής παραγωγής (final yield ή Y_F), και πραγματοποιώντας τους ανάλογους υπολογισμούς για τον κάθε μήνα του έτους, υπολογίζουμε την τελική παραγωγή (Y_F) .

Οπότε και προκύπτει ο παρακάτω πίνακας, ο οποίος και δίνει την τελική παραγωγή (Y_F) , ανά μήνα του έτους.

Τελική παραγωγή (final yield)											
Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
2,485	2,601	2,967	4,155	4,443	4,933	5,075	4,714	4,404	3,509	2,646	1,958

Όπως παρατηρούμε από τον υπολογισμό της τελικής παραγωγής ανά μήνα του έτους, η μέγιστη παραγωγή σημειώνεται τον μήνα Ιούλιο με **5,075 kWh/kWp** ενώ η ελάχιστη παραγωγή σημειώνεται τον μήνα Δεκέμβριο με **1,958 kWh/kWp** .



Σχ.7.12 Τελικής παραγωγής (final yield) ανά μήνα του έτους.

7.14 Υπολογισμός παραγωγής αναφοράς (reference yield).

Ο υπολογισμός της παραγωγής αναφοράς (reference yield ή Y_R), δίνεται από την σχέση που εκφράζει τον λόγο μεταξύ της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας H_t (kWh/m^2), προς την ακτινοβολία αναφοράς των πλαισίων ($1 kW/m^2$).

Επομένως η παραγωγή είναι ο μέγιστος αριθμός ενός ήλιου ανά ώρα. Η σχέση λοιπόν η οποία και μας δίνει την παραγωγή αναφοράς (reference yield ή Y_R), είναι :

$$Y_R = \frac{H_t [kWh / m^2]}{1kW / m^2}$$

Από τους πιο πάνω υπολογισμούς της ηλιακής ακτινοβολίας H_t (kWh/m^2), έχει υπολογιστεί η ηλιακή ακτινοβολία για τον κάθε μήνα του έτους. Με την αντικατάσταση στην πιο πάνω σχέση που μας δίνει τον υπολογισμό της παραγωγής αναφοράς (Y_R), προκύπτει ο παρακάτω πίνακας ο οποίος και δίνει την παραγωγή αναφοράς (Y_R), ανά μήνα του έτους.

Παραγωγή αναφοράς (reference yield)											
Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
4,265	4,266	5,058	5,817	6,134	7,174	7,247	7,123	6,644	4,857	3,610	2,979

Όπως παρατηρούμε από τον υπολογισμό της παραγωγής αναφοράς (reference yield ή Y_R) ανά μήνα του έτους, η μέγιστη παραγωγή αναφοράς σημειώνεται τον μήνα Ιούλιο με $7,247 kWh/m^2 / 1kWh/m^2$ ενώ η ελάχιστη παραγωγή αναφοράς σημειώνεται τον μήνα Δεκέμβριο με $2,979 kWh/m^2 / 1kWh/m^2$.



Σχ.7.13 Παραγωγή αναφοράς (reference yield) ανά μήνα του έτους.

7.15 Υπολογισμός της παραγωγής συστοιχίας (array yield).

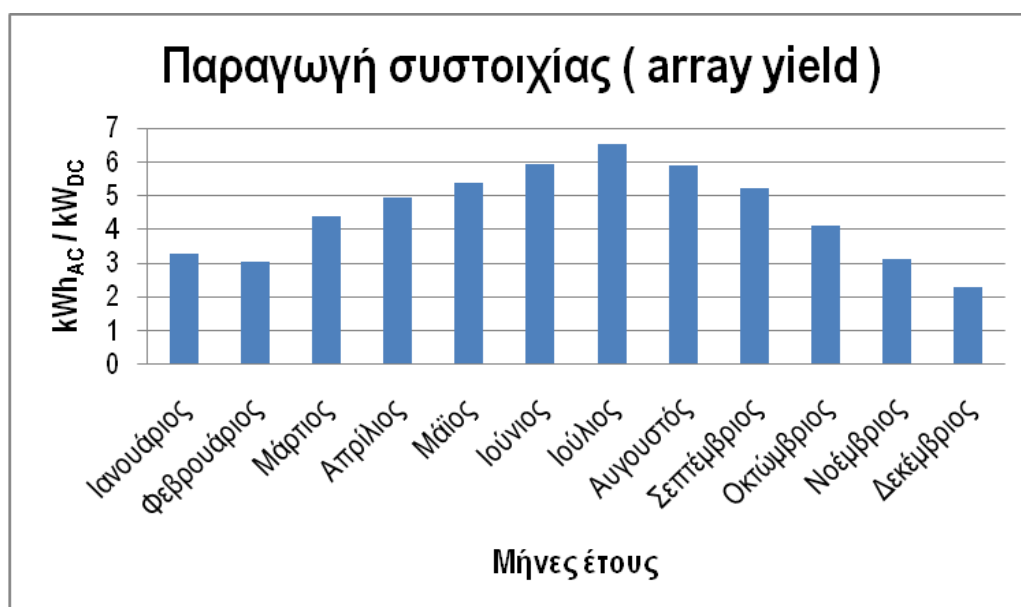
Για τον υπολογισμό της παραγωγής συστοιχίας (array yield ή Y_A), εφαρμόζουμε την σχέση που μας δίνει τον λόγο μεταξύ της ενέργειας στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, προς την μέγιστη ισχύ των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών στοιχείων. Εφαρμόζοντας τα παραπάνω προκύπτει η σχέση :

$$Y_A = \frac{E_A}{P_R}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς της παραγωγής της συστοιχίας (array yield ή Y_A), έχει υπολογιστεί η παραγωγή της συστοιχίας για τον κάθε μήνα του έτους. Έτσι με αντικατάσταση στην παραπάνω σχέση που μας δίνει τον υπολογισμό της παραγωγής συστοιχίας (Y_A), προκύπτει ο παρακάτω πίνακας ο οποίος και δίνει την παραγωγή της συστοιχίας (Y_A), ανά μήνα του έτους.

Παραγωγή συστοιχίας (array yield)											
Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
3,280	3,046	4,404	4,943	5,372	5,950	6,534	5,891	5,211	4,119	3,110	2,278

Όπως παρατηρούμε από τον υπολογισμό της παραγωγής συστοιχίας (array yield ή Y_A), ανά μήνα του έτους, η μέγιστη παραγωγή συστοιχίας σημειώνεται τον μήνα Ιούλιο με **6,534 kWh_{AC} / kWh_{DC}** ενώ η ελάχιστη παραγωγή συστοιχίας σημειώνεται τον μήνα Δεκέμβριο με **2,278 kWh_{AC} / kWh_{DC}** .



Σχ.7.14 Παραγωγή συστοιχίας (array yield) ανά μήνα του έτους.

7.16 Υπολογισμός απωλειών μεταξύ συστοιχιών (array capture losses).

Για τον υπολογισμό των απωλειών μεταξύ των συστοιχιών (array capture losses ή L_C), θα χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω σχέση την οποία και με την αφαίρεση της παραγωγής αναφοράς (reference yield ή Y_R), και της τελικής παραγωγής (final yield ή Y_F), προκύπτει η παρακάτω σχέση :

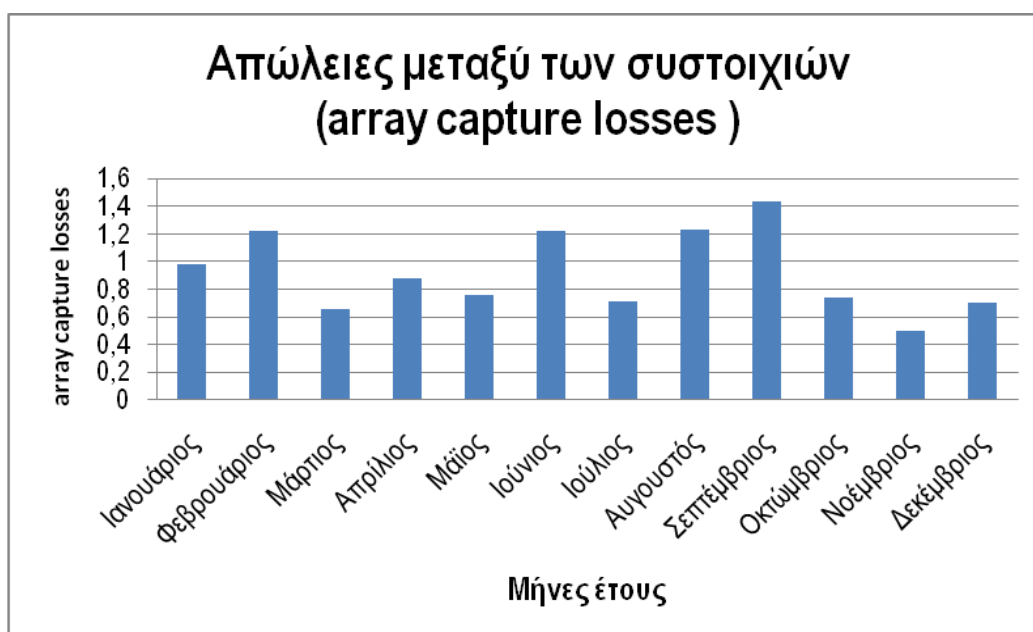
$$L_C = Y_R - Y_A$$

Με την χρήση της παραπάνω σχέση για τον υπολογισμό των απωλειών μεταξύ των συστοιχιών (array capture losses ή L_C), υπολογίζονται οι απώλειες μεταξύ των συστοιχιών για τον κάθε μήνα του έτους.

Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πίνακας ο οποίος και δίνει τις απώλειες μεταξύ των συστοιχιών (L_C), ανά μήνα του έτους.

Απώλειες μεταξύ των συστοιχιών (array capture losses)											
Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
0,985	1,219	0,654	0,874	0,763	1,224	0,713	1,232	1,433	0,738	0,500	0,701

Όπως παρατηρούμε από τον υπολογισμό των απωλειών μεταξύ των συστοιχιών (array capture losses ή L_C), ανά μήνα του έτους, η μέγιστες απώλειες σημειώνονται τον μήνα Σεπτέμβριο με **1,433** ενώ οι ελάχιστες απώλειες σημειώνονται τον μήνα Νοέμβριο με **0,500**.



Σχ.7.15 Απώλειες μεταξύ των συστοιχιών (array capture losses) ανά μήνα του έτους.

7.17 Υπολογισμός απωλειών συστήματος (system losses).

Ο υπολογισμός των απωλειών του συστήματος (system losses ή L_s), περιλαμβάνει τις απώλειες οι οποίες και προέρχονται από την διασύνδεση των μετατροπέων του συστήματος, καθώς και τις απώλειες από την διασύνδεση του μετασχηματιστή. Με την αφαίρεση της συνολικής παραγωγής της συστοιχίας και της τελικής παραγωγής, προκύπτουν οι απώλειες του συστήματος. Έτσι λοιπόν προκύπτει η σχέση που μας δίνει τις απώλειες του συστήματος (system losses) :

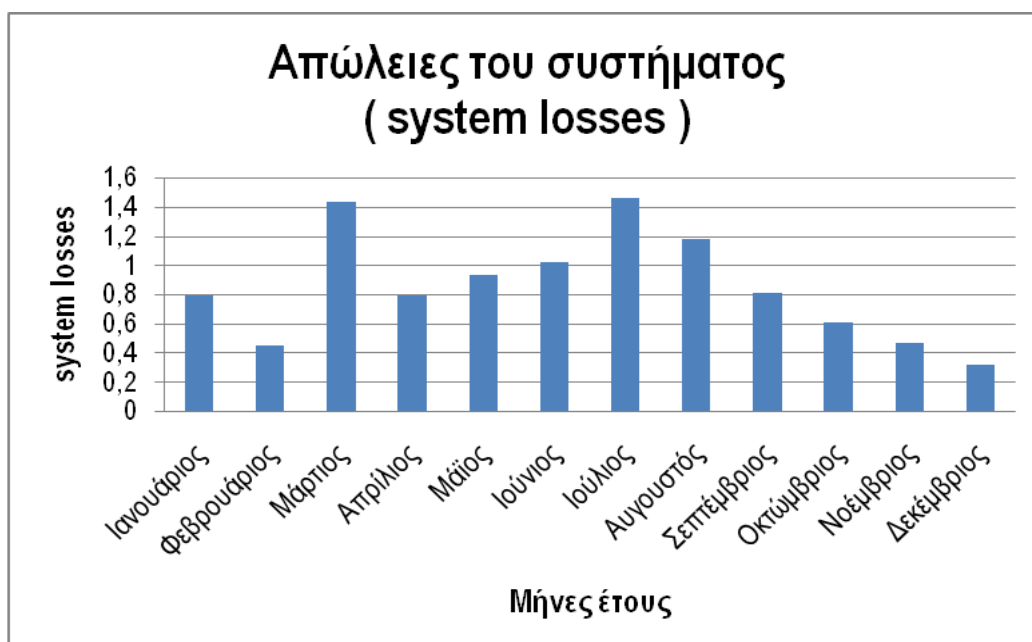
$$L_s = Y_A - Y_F$$

Με την χρήση λοιπόν της παραπάνω σχέσης για τον υπολογισμό των απωλειών του συστήματος (system losses ή L_s), υπολογίζονται οι απώλειες του συστήματος για τον κάθε μήνα του έτους.

Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πίνακας ο οποίος και δίνει τις απώλειες του συστήματος (L_s), ανά μήνα του έτους.

Απώλειες του συστήματος (system losses)											
Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
0,795	0,445	1,437	0,788	0,929	1,017	1,458	1,177	0,807	0,610	0,464	0,320

Όπως παρατηρούμε από τον υπολογισμό των απωλειών του συστήματος (system losses), ανά μήνα του έτους, η μέγιστες απώλειες σημειώνονται τον μήνα Ιούλιο με **1,458** ενώ οι ελάχιστες απώλειες σημειώνονται τον μήνα Δεκέμβριο με **0,320** .



Σχ.7.16 Απώλειες του συστήματος (system losses) ανά μήνα του έτους.

7.18 Υπολογισμός βαθμού απόδοσης (performance ratio).

Ο βαθμός απόδοσης (performance ratio ή PR), είναι ο λόγος της τελικής παραγωγής (final yield ή Y_F), προς την παραγωγή αναφοράς (reference yield ή Y_R), μας δίνει δηλαδή μια σχέση όπου και συνδέει τις συνολικές απώλειες στο σύστημα που προέρχονται κατά την μετατροπή στις ηλεκτρονικές διατάξεις του συστήματος από την συνεχή κατάσταση στην εναλλασσόμενη έξοδο. Οπότε λοιπόν η απόδοση καθορίζει την απόκλιση που μπορεί να έχει η αποδιδόμενη από το φωτοβολταϊκό σύστημα ενέργεια σε σχέση με την ιδανική δυνατότητα παραγωγής του συστήματος.

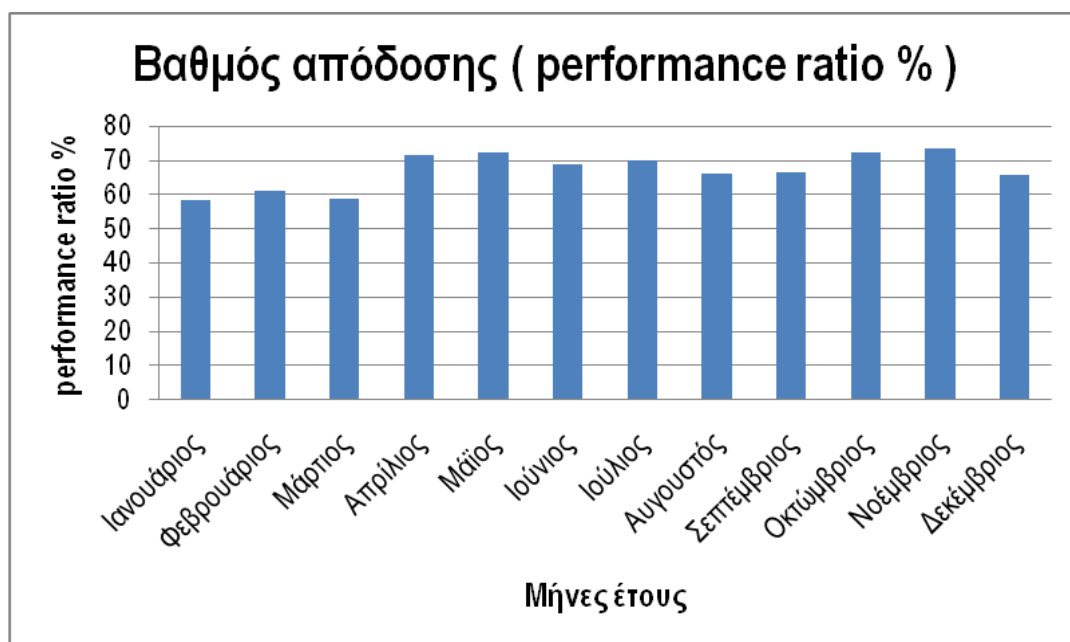
Έτσι λοιπόν προκύπτει η σχέση που μας δίνει τον βαθμό απόδοσης (performance ratio) :

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R}$$

Με την χρήση λοιπόν της παραπάνω σχέσης για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης (performance ratio ή PR), υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης (PR), για τον κάθε μήνα του έτους.

Βαθμός απόδοσης (performance ratio %)											
Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
58,267	60,977	58,657	71,426	72,421	68,760	70,032	66,172	66,285	72,244	73,280	65,716

Όπως παρατηρούμε από τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης (performance ratio ή PR), ανά μήνα του έτους, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης (PR), σημειώνεται τον μήνα Νοέμβριο με **73,280 %** ενώ ο ελάχιστος βαθμός απόδοσης σημειώνεται τον μήνα Ιανουάριο με **58,267 %** .



Σχ.7.17 Βαθμός απόδοσης (performance ratio %) ανά μήνα του έτους.

7.19 Υπολογισμός απόδοσης ανά εγκατεστημένο kW (YIELD), και υπολογισμός του συντελεστή δυναμικού (CAPACITY FACTOR) του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Αφού έχει υπολογιστεί η πωλούμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού πάρκου προς τον υποσταθμό της Δ.Ε.Η (που είναι ίση με **229,04 MWh**), για να υπολογίσουμε την απόδοση (YIELD) ανά εγκατεστημένο kW (KWh/KWp), θα διαιρεθεί η πωλούμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού πάρκου (229,04 MWh) προς την ονομαστική εγκατεστημένη ισχύς (171,36 kWp) του φωτοβολταϊκού πάρκου.

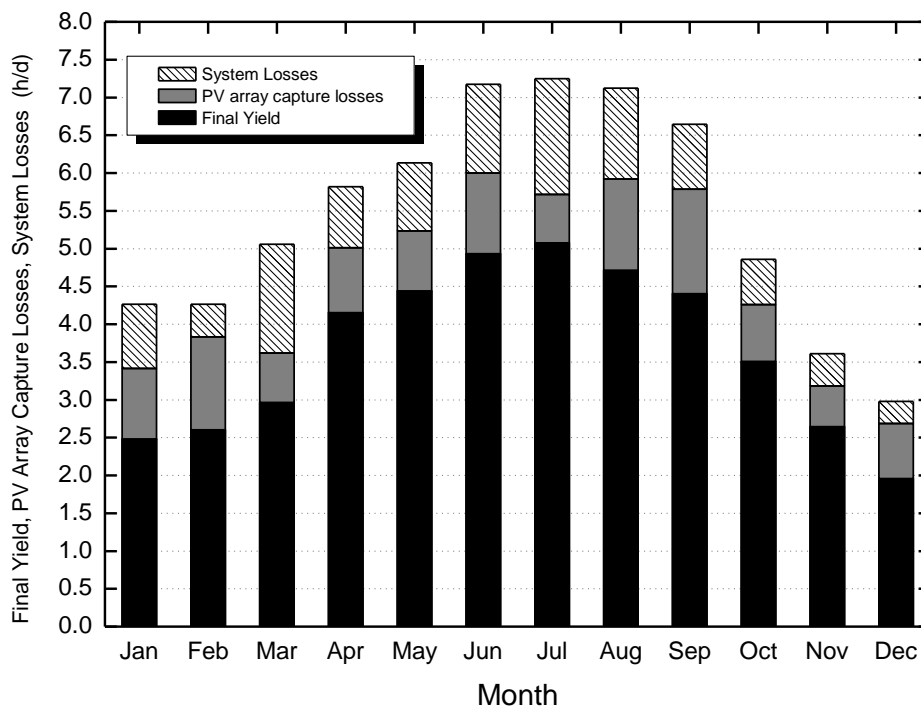
Το αποτέλεσμα της παραπάνω πράξης δίνει την απόδοση ανά εγκατεστημένο kW του φωτοβολταϊκού πάρκου η οποία και σύμφωνα με τον υπολογισμό είναι **1336,60 KWh/KWp** .

Ο συντελεστής δυναμικού (capacity factor ή CF), είναι ο λόγος της ετήσιας συνολικής παραγωγής (final yield ή Y_F), προς την ενέργεια που θα παραγόταν εάν το φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργούσε για κάθε ώρα του έτους σε ονομαστική ισχύς (P_r), καθώς ότι δέχεται την ίδια πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας (σύμφωνα με τις πρότυπες συνθήκες STC). Έτσι λοιπόν προκύπτει η σχέση :

$$CF = \frac{Y_F}{8760} = \frac{E}{P_r \cdot 8760} = \frac{H_t \cdot PR}{P_r \cdot 8760}$$

Με την χρήση της παραπάνω σχέσης για τον υπολογισμό του συντελεστή δυναμικού (CF), του φωτοβολταϊκού πάρκου, και αντικαθιστώντας όπου Y_F την απόδοση ανά εγκατεστημένο kW που υπολογίστηκε πιο πάνω, δηλαδή $Y_F = 1336,60 \text{ KWh/KWp}$, προς **8760** ώρες ανά έτος. Προκύπτει λοιπόν ο συντελεστής δυναμικού να είναι ίσος με **CF = 15,26 %** .

Στην συνέχεια και αφού έχουμε υπολογίσει τον συντελεστή δυναμικού (CF), καθώς και πιο πάνω την ετήσια συνολική παραγωγή ανά εγκατεστημένο kW (final yield ή Y_F), ίση με $Y_F = 1336,60 \text{ KWh/KWp}$, στην παρακάτω χαρακτηριστική φαίνεται και με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς η μηνιαία υπολογισμένη κατά μέσο όρο καθημερινή τελική παραγωγή (final yield), μαζί με τις απώλειες που εμφανίζονται μεταξύ των συστοιχιών (array capture losses), καθώς και με τις απώλειες του συστήματος (system losses), ανά μήνα του έτους.



Σχ.7.18 Μέσες τιμές ανά μήνα και ημέρα των final yield, PV array capture losses and system losses.

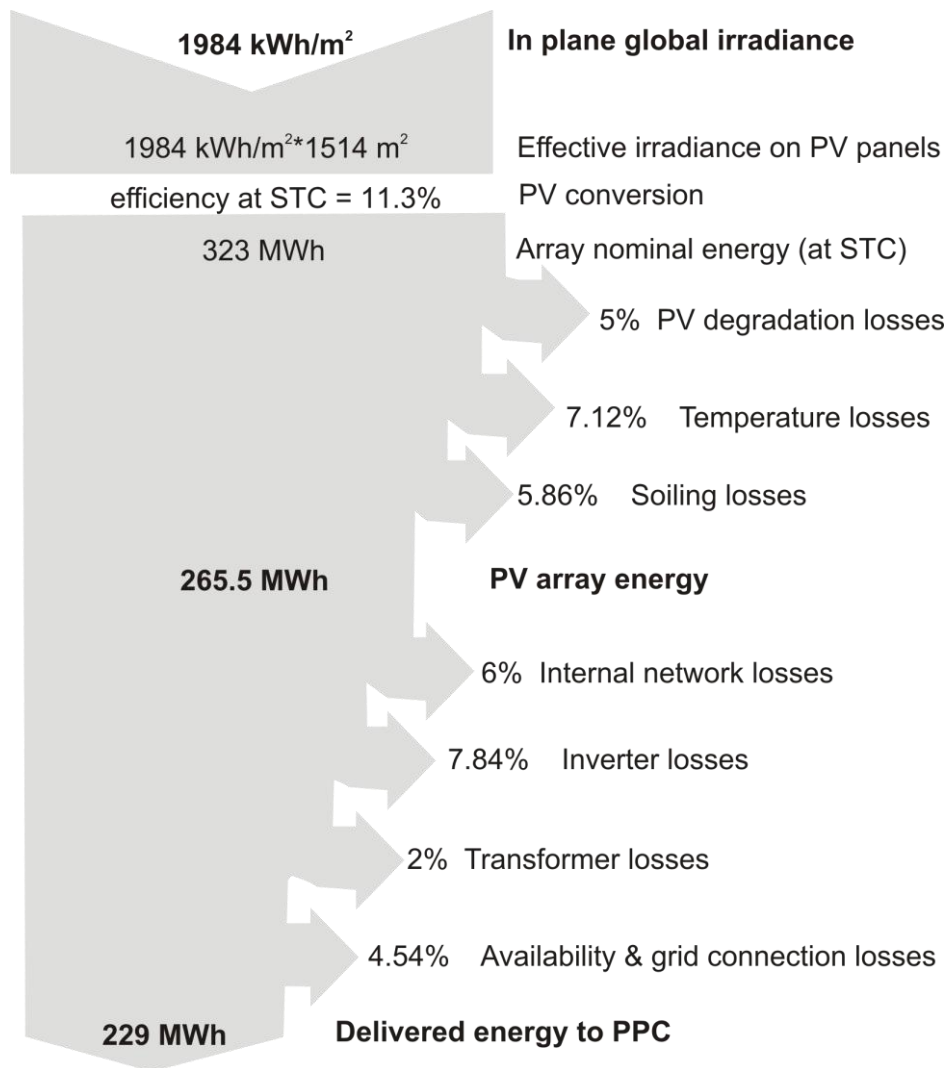
7.20 Αποτελέσματα συντελεστών απωλειών φωτοβολταϊκού πάρκου.

Σύμφωνα με τους πιο πάνω υπολογισμούς των συντελεστών των απωλειών καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα που μας δίνει συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα των υπολογισμών των συντελεστών απωλειών :

Αποτελέσματα συντελεστών απωλειών			
Είδος συντελεστή :	Ενεργειακός λόγος :	Τιμές επί τοις εκατό % :	Τελικές απώλειες %
Θερμοκρασία πάνελ ($\eta_{\theta\epsilon\rho}$)	$\eta_{\theta\epsilon\rho} = E_{\theta} / E_{\Phi B}$	92,88	7,12
Σκόνη και ρύποι ($\eta_{\rho\upsilon\tau\tau}$)	$\eta_{\rho\upsilon\tau\tau} = E_{\rho} / E_{\theta}$	94,14	5,86
Module mismatch, quality loss, ohmic losses ($\eta_{\delta\iota\kappa}$)	$\eta_{\delta\iota\kappa} = E_{DC} / E_{\rho}$	94,00	6,00
Inverters ($\eta_{\alpha\nu\tau}$)	$\eta_{\alpha\nu\tau} = E_{AC} / E_{DC}$	92,16	7,84
Μετασηματιστής ($\eta_{\mu\epsilon\tau}$)	$\eta_{\mu\epsilon\tau} = E_{MET} / E_{AC}$	98,00	2,00
Διαθεσιμότητα πάρκου και Διασύνδεσης ($\eta_{\delta\iota\alpha\theta} + \eta_{\delta\iota\alpha\varsigma}$)	$\eta_{\delta\iota\alpha\theta} = E_{E\Xi} / E_{MET} + \eta_{\delta\iota\alpha\varsigma} = E_{\Pi\Omega\Lambda} / E_{E\Xi}$	95,46	4,54
Degradation Losses		95	5,00

Σχ.7.19 Πίνακας αποτελεσμάτων συντελεστών απωλειών.

Από τα αποτελέσματα των συντελεστών των απωλειών του παραπάνω πίνακα, μπορούν να συνοψιστούν οι τιμές των συντελεστών των απωλειών σε ένα διάγραμμα Sankey , όπως φαίνεται παρακάτω :



Σχ.7.20 Διάγραμμα Sankey. Φαίνονται τα ποσοστά των απωλειών που χάνονται στα διάφορα μέρη του συστήματος μέχρι να καταλήξει η παραγόμενη ενέργεια στο δίκτυο.

Όπως φαίνεται και στο πιο πάνω διάγραμμα (Sankey), παρατηρούμε τα ποσοστά των απωλειών τα οποία και εμφανίζονται κατά την πορεία της παραγόμενης ενέργειας από τις συστοιχίες των φωτοβολταϊκών πάνελ έως το δίκτυο διασύνδεσης. Γνωρίζοντας από τα στοιχεία καταγραφής του συστήματος εποπτείας και ελέγχου (SCADA) του φωτοβολταϊκού πάρκου, την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας για διάστημα ενός έτους, ίση με **1984 kWh/m²**, καθώς και την συνολική έκταση που καταλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ίση με **1514 m²**, σύμφωνα με τους πιο πάνω υπολογισμούς η θεωρητική παραγωγή του φωτοβολταϊκού πάρκου ανέρχεται στις **323 MWh**, στην συνέχεια και με βάση του πίνακα του σχήματος Σχ.7.19 φαίνονται οι απώλειες οι οποίες και έχουν υπολογιστεί στα πιο πάνω κεφάλαια.

Σύμφωνα και με το παραπάνω διάγραμμα καταλήγουμε ότι η τελική ενέργεια που προσφέρεται στο δίκτυο διασύνδεσης είναι ίση με **229 MWh**.

Κεφάλαιο 8 – Συμπεράσματα και προτάσεις.

Σύμφωνα με το προηγούμενο κεφάλαιο και βάση των τιμών του πίνακα Σχ.7.19 όπου παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών των απωλειών οι οποίοι και έχουν υπολογιστή καταλήγουμε στον συνολικό συντελεστή των απωλειών $n_{\text{απ}}$ ο οποίος και είναι ίσος με το γινόμενο των επιμέρους απωλειών του συστήματος δηλαδή με :

$$n_{\text{απ}} = n_{\text{θερ}} \cdot n_{\text{ρ\upsilon\pi}} \cdot n_{\text{δικ}} \cdot n_{\text{αντ}} \cdot n_{\text{μετ}} \cdot n_{\text{διαθ}} \cdot n_{\text{διασ}} = 67,36\%$$

Όπως φαίνεται και στο σχήμα Σχ.7.20 του διαγράμματος Sankey και καθώς η μέση ηλιακή απολαβή είναι ίση με **1984 kWh/m²** , καθώς επίσης υπολογίζοντας την θεωρητική παραγωγή χωρίς τις απώλειες του συστήματος παρατηρούμε ότι είναι ίση με **323 MWh**. Βάση λοιπών των συντελεστών των απωλειών που έχουν υπολογιστή για τα διάφορα μέρη του συστήματος όπου και εμφανίζονται, και καταλήγοντας στο γινόμενο των επιμέρους απωλειών υπολογίζουμε τον συνολικό συντελεστή των απωλειών.

Αν συμπεριλάβουμε την τιμή των απωλειών του συστήματος δηλαδή τον συνολικό συντελεστή των απωλειών ($n_{\text{απ}} = 67,36\%$) , εμφανίζεται με αισθητή μείωση της τιμής της παραγόμενης ισχύος του συστήματος ίση με **265,5 MWh** .

Επίσης εάν στην τιμή αυτή της ισχύος του συστήματος συμπεριλάβουμε και τις απώλειες που προέρχονται από την διασύνδεση με το δίκτυο της ΔΕΗ , τότε παρατηρείται ακόμη μεγαλύτερη μείωση της τελικής πωλούμενης ενέργειας η οποία είναι ίση με **229 MWh** .

Για να μπορέσουμε να μειώσουμε όσο το δυνατόν την τιμή του συνολικού συντελεστή των απωλειών που παρουσιάζονται στο σύστημα, θα πρέπει να μειωθούν οι τιμές των επιμέρους συντελεστών των απωλειών οι οποίοι και παρουσιάζονται στα διάφορα μέρη του συστήματος.

Αρχικά ένας από τους σημαντικότερους και μεγαλύτερους, καθώς είναι ίσος με 7,12 % του συνολικού συντελεστή των απωλειών είναι ο συντελεστής της θερμοκρασίας των πάνελ, ο οποίος και επηρεάζει την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Γνωρίζοντας ότι η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων εξαρτάται από την θερμοκρασία λειτουργίας τους καθώς και από την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας , με την αύξηση της θερμοκρασίας του πλαισίου παρουσιάζεται γραμμική μείωση της απόδοσης του. Για την μείωση λοιπόν του συντελεστή λόγω απωλειών θερμοκρασίας απαιτείται και επιβάλλεται ο καλός αερισμός της πίσω πλευράς του πλαισίου.

Στην συνέχεια ένας άλλος συντελεστής ο οποίος και επηρεάζει την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι ο συντελεστής ο οποίος και οφείλεται στην ρύπανση των πλαισίων. Λόγω της έκθεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε καιρικά φαινόμενα παρουσιάζονται σημαντικές απώλειες από ρύπανση. Η ρύπανση οφείλεται κατά κύριο λόγο στην σκόνη που βρίσκεται στον αέρα, η οποία αν συνδυαστεί και με την υγρασία η οποία και παρουσιάζεται, δημιουργεί ένα στρώμα λάσπης στην επιφάνεια του συλλέκτη με αποτέλεσμα την απορρόφηση σημαντικής ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας. Άλλοι παράγοντες ρύπανσης είναι φύλλα δέντρων, χαρτιά και περιπτώματα πουλιών.

Για να μειωθούν λοιπόν οι απώλειες που προέρχονται από την ρύπανση των πλαισίων είναι απαραίτητος ο καθαρισμός των πλαισίων, ιδιαίτερος κατά την διάρκεια των μηνών του θέρους, όπου και οι τιμές του συντελεστή ρύπανσης είναι μεγάλες. Έτσι με τον καθαρισμό των πλαισίων ανά τακτά χρονικά διαστήματα κατά την διάρκεια του μήνα θα παρατηρηθεί μια αισθητή μείωση των μηνιαίων συντελεστών ρύπανσης. Οπότε και με την παρουσία των βροχοπτώσεων κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών θα μειωθεί ο λόγος του συντελεστή ρύπανσης των πλαισίων.

Επίσης ο συντελεστής των απωλειών που σχετίζεται με τις απώλειες οι οποίες και προέρχονται λόγω του εσωτερικού δικτύου του συστήματος αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα απωλειών. Κυρίως οι απώλειες του εσωτερικού δικτύου οφείλονται στην σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων που γίνεται με αγωγούς κατάλληλης διατομής. Στους αγωγούς όμως παρουσιάζονται θερμικές απώλειες από το διερχόμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Για να ελαχιστοποιηθούν οι θερμικές απώλειες πρέπει να μειωθεί το ρεύμα που διαρρέει τους αγωγούς. Έτσι συνδέονται τα πλαίσια εν σειρά σχηματίζοντας παράλληλους κλάδους. Απώλειες παρουσιάζονται και στα σημεία συνδέσεων των αγωγών, λόγω πιθανής κακής επαφής και οξειδωσης του σημείου επαφής. Για τον περιορισμό αυτών των απωλειών θα πρέπει να γίνεται περιοδικός έλεγχος των αγωγών που συνδέουν τα πλαίσια και να ελέγχεται η μόνωση τους, καθώς και τυχόν αλλοιώσεις των αγωγών. Επίσης θα πρέπει να ελέγχονται τα σημεία σύνδεσης των αγωγών, ώστε να μην υπάρχουν σημεία οξειδωσης ή σημεία κακή σύνδεση των αγωγών, τα οποία και προκαλούν πρόσθετες απώλειες λόγω διασύνδεσης.

Ο συντελεστής με τις μεγαλύτερες απώλειες που εμφανίζονται στο σύστημα είναι ο συντελεστής απωλειών αντιστροφής. Σημαντικό παράγοντα των απωλειών αυτών αποτελεί η επιλογή του συγκεκριμένου αντιστροφέα (Sunny Boy SWR 2500) . Ο συγκεκριμένος αντιστροφέας μπορεί να αποδώσει μέγιστη ισχύ AC , ίση με **P_{AC max} = 2500 W** . Γνωρίζοντας ότι η κάθε συστοιχία αποτελείται από έναν τέτοιο αντιστροφέα, καθώς και ότι η μέγιστη θεωρητική ισχύς της μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι ίση με **2880 W** , παρατηρείται μια διαφορά στην τιμή εισόδου του μετατροπέα με την τιμή εξόδου του.

Η χρήση λοιπόν ενός αντιστροφέα ο οποίος και θα συγχωνεύει έναν ρυθμιστή τάσης που ανιχνεύει και εξασφαλίζει την λειτουργία του συστήματος στο σημείο της μέγιστης παραγωγής θα αποτελούσε ιδανική λύση για τον περιορισμό των απωλειών που προέρχονται από τον αντιστροφέα. Επίσης η επιλογή ενός αντιστροφέα του οποίου η απόδοση του θα είναι ακόμη μεγαλύτερη, γνωρίζοντας ότι η απόδοση δίνεται ως συνάρτηση του λόγου της εισερχόμενης ισχύς προς την ονομαστική ισχύ λειτουργίας, θα μειώσει κατά πολύ τις απώλειες του αντιστροφέα, από την υπάρχουσα τιμή του συντελεστή απωλειών.

Η τιμή του συντελεστή των απωλειών που προέρχονται από τον μετασχηματιστή, είναι οι μικρότερες σε σχέση με τις άλλες απώλειες του συστήματος. Γνωρίζοντας ότι οι μετασχηματιστές ισχύος παρουσιάζουν εσωτερικές απώλειες, τις απώλειες χαλκού ή φορτίου που οφείλονται στις απώλειες που παρουσιάζονται στα τυλίγματα του Μ/Σ και είναι της τάξεως του 0,8-3%. Οι απώλειες σιδηρού παρουσιάζονται στον πυρήνα του Μ/Σ και είναι μικρότερες από 1%. Ενώ ο συνολικός συντελεστής απωλειών του Μ/Σ είναι ίσος με **1,93 %** .

Επίσης ο συντελεστής των απωλειών λόγω της διαθεσιμότητας και της διασύνδεσης του συστήματος αποτελεί σημαντικό παράγοντα απωλειών του συστήματος.

Γνωρίζοντας ότι κατά την λειτουργία του Φωτοβολταϊκού Πάρκου παρουσιάζονται βλάβες στον εξοπλισμό με αποτέλεσμα να υπάρχει μειωμένη παραγωγή, καθώς επίσης κάποιες ημέρες του έτους πρέπει να γίνεται η απαραίτητη συντήρηση και έλεγχος του εξοπλισμού είναι κάτι που δημιουργεί πρόβλημα στην παραγωγή.

Οι απώλειες διαθεσιμότητας υπολογίζονται με βάση τον απαιτούμενο χρόνο συντήρησης, τον εκτιμώμενο χρόνο βλαβών και την διαθεσιμότητα του δικτύου της ΔΕΗ , για κάθε μήνα του έτους ξεχωριστά.

Σύμφωνα με τις παραπάνω υποθέσει και προτάσεις μπορούν να μειωθούν οι επιμέρους απώλειες του συστήματος, καθώς και ο συνολικός συντελεστής των απωλειών του συστήματος, οπότε και η τελική ενέργεια από την παραγωγή του συστήματος θα κυμαίνεται σε μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από την είδη υπολογισμένη ενέργεια του συστήματος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Πίνακες υπολογισμών.

Σε αυτό το μέρος θα δούμε τους πίνακες που χρησιμοποιήθηκαν για τους παραπάνω υπολογισμούς. Τα στοιχεία των πινάκων προέρχονται μετά από επεξεργασία των δεδομένων του συστήματος ελέγχου και εποπτείας (SCADA) του φωτοβολταϊκού πάρκου, καθώς επίσης και ορισμένοι πίνακες αποτελούν αποτέλεσμα των πιο πάνω υπολογισμών που αναφέρθηκαν κατά την μελέτη των απωλειών του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Χρόνος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
5:23					15,10	19,79	21,62					
5:33					15,13	19,89	21,64					
5:43					15,24	19,01	21,69	20,96				
5:53					15,44	20,21	21,84	20,99				
6:03					15,63	20,35	22,02	21,05	18,07			
6:13				9,83	15,85	20,56	22,19	21,20	18,09			
6:23			7,81	9,89	16,14	20,77	21,42	21,43	18,12	14,75		
6:33			7,79	10,02	16,44	20,99	22,61	21,69	18,23	14,80		
6:43			7,86	10,19	16,70	21,17	22,78	21,95	18,42	14,89		
6:53			7,90	10,41	16,95	21,33	23,01	22,06	18,61	15,05	12,43	
7:03			7,99	10,58	17,14	21,55	23,20	22,22	18,86	15,26	12,44	
7:13			8,11	10,73	17,31	21,76	23,34	22,38	19,11	15,48	12,45	
7:23			8,22	10,89	17,51	21,96	23,46	22,61	19,36	15,72	12,49	8,43
7:33	7,97	8,87	8,50	11,03	17,77	22,21	23,61	22,80	19,57	15,93	12,70	8,44
7:43	8,05	8,92	8,79	11,15	18,00	22,36	23,74	22,99	19,68	16,15	12,86	8,48
7:53	8,12	8,96	9,00	11,35	18,07	22,44	23,83	23,14	19,84	16,37	12,99	8,56
8:03	8,29	9,05	9,19	11,52	18,14	22,56	23,93	23,29	20,06	16,54	13,13	8,72
8:13	8,45	9,16	9,41	11,63	18,26	22,65	24,02	23,45	19,20	16,73	13,22	8,88
8:23	8,63	9,32	9,60	11,79	18,35	22,80	24,08	23,61	20,30	16,88	13,34	9,00
8:33	8,81	9,42	9,73	11,97	18,53	22,98	24,13	23,72	20,47	17,07	13,45	9,16
8:43	9,02	9,56	9,82	12,10	18,65	23,13	24,24	23,87	20,63	17,24	13,58	9,35
8:53	9,23	9,72	9,94	12,25	18,73	23,25	24,32	24,01	20,80	17,42	13,74	9,50
9:03	9,42	9,89	10,05	12,41	18,76	23,36	24,41	24,09	20,86	17,55	13,91	9,59
9:13	9,65	9,99	10,20	12,46	18,86	23,43	24,51	24,19	20,95	17,63	13,99	9,69
9:23	9,85	10,09	10,29	12,55	18,99	23,56	24,57	24,27	21,07	17,73	14,03	9,84
9:33	10,07	10,22	10,45	12,70	18,98	23,65	24,69	24,36	21,25	17,87	14,11	9,94
9:43	10,17	10,25	10,55	12,84	19,09	23,72	24,80	24,43	21,37	18,01	14,24	10,02
9:53	10,29	10,32	10,69	12,91	19,10	23,81	24,94	24,50	21,49	18,10	14,26	10,05
10:03	10,42	10,41	10,79	12,96	19,07	23,81	25,01	24,54	21,67	18,23	14,37	10,17
10:13	10,48	10,49	10,88	13,16	19,15	23,96	25,09	24,60	21,67	18,28	14,43	10,25
10:23	10,53	10,16	11,01	13,16	19,18	24,04	25,20	24,69	21,81	18,32	14,53	10,34
10:33	10,59	10,21	11,04	13,20	19,33	24,11	25,26	24,80	21,86	18,41	14,67	10,44
10:43	10,70	10,22	11,15	13,15	19,39	24,18	25,33	24,90	21,92	18,42	14,83	10,46
10:53	10,85	10,23	11,29	13,17	19,38	24,21	25,39	24,94	21,98	18,52	14,98	10,56
11:03	10,91	10,21	11,34	13,19	19,39	24,29	25,43	24,99	22,06	18,56	14,98	10,55
11:13	10,98	10,23	11,78	13,21	19,43	24,42	25,44	24,97	22,11	18,61	15,04	10,62
11:23	11,09	10,29	11,79	13,31	19,49	24,50	25,50	25,02	22,20	18,71	15,03	10,67
11:33	11,15	10,30	11,84	13,37	19,40	24,60	25,57	25,07	22,23	18,79	15,15	10,72
11:43	11,23	10,36	11,86	13,41	19,46	24,66	25,60	25,14	22,28	18,79	15,21	10,76
11:53	11,28	10,41	11,87	13,41	19,53	24,73	25,63	25,14	22,37	18,83	15,15	10,77
12:03	11,33	10,44	11,89	13,42	19,57	24,79	25,67	25,12	22,38	18,84	15,18	10,77
12:13	11,39	10,45	11,97	13,48	19,59	24,89	25,74	25,16	22,42	18,84	15,14	10,74
12:23	11,44	10,44	12,04	13,59	19,60	24,87	25,76	25,17	22,51	18,85	15,14	10,63
12:33	11,48	10,42	12,08	13,69	19,60	24,96	25,74	25,32	22,43	18,81	15,11	10,72
12:43	11,42	10,41	12,02	13,74	19,56	24,98	25,75	25,31	22,46	18,81	15,10	10,67
12:53	11,42	10,45	12,09	13,73	19,54	25,00	25,71	24,40	22,54	18,87	15,05	10,65
13:03	11,41	10,48	12,08	13,65	19,54	25,13	25,70	25,39	22,43	19,01	15,05	10,67
13:13	11,37	10,55	12,05	13,66	19,49	24,20	25,76	25,36	22,48	18,98	15,11	10,67
13:23	11,41	10,54	12,04	13,77	19,42	25,18	25,82	25,37	22,43	19,01	15,05	10,65
13:33	11,43	10,54	12,07	13,83	19,36	25,27	25,86	25,45	22,40	18,95	14,94	10,57
13:43	11,39	10,51	12,10	13,85	19,35	25,18	25,83	25,42	21,37	18,98	14,97	10,57
13:53	11,41	10,51	12,05	13,81	19,30	25,18	25,86	25,42	22,39	19,01	14,86	10,59
14:03	11,45	10,50	12,00	13,79	19,27	25,18	25,88	25,43	22,33	19,08	14,94	10,64
14:13	11,39	10,45	11,98	13,89	19,26	25,09	25,87	25,36	22,23	19,06	15,00	10,62
14:23	11,35	10,43	11,96	13,88	19,21	25,11	25,83	25,34	22,24	18,96	14,95	10,58
14:33	11,27	10,38	11,90	13,69	19,13	25,05	24,80	25,35	22,22	18,89	14,90	10,47
14:43	11,17	10,48	11,83	13,63	19,18	25,12	25,82	25,35	22,19	18,82	14,82	10,42
14:53	11,05	10,46	11,88	13,60	19,20	24,94	25,82	25,30	22,14	18,77	14,72	10,39
15:03	10,99	10,44	11,80	13,63	19,20	24,90	25,74	25,31	22,08	18,65	14,67	10,32
15:13	10,91	10,36	11,73	13,64	19,18	24,83	25,68	25,24	22,03	18,68	14,55	10,25
15:23	10,77	10,31	11,72	13,55	19,10	24,71	25,62	25,24	22,01	18,64	14,47	10,22
15:33	10,71	10,25	11,67	13,47	19,08	24,62	25,59	24,18	21,96	18,47	14,41	10,20
15:43	10,67	10,24	11,63	13,50	19,00	24,61	25,49	25,13	21,95	18,36	14,35	10,11
15:53	10,62	10,19	11,53	13,39	18,94	24,66	25,46	25,01	21,77	18,28	14,31	10,06
16:03	10,52	10,16	11,42	13,33	18,95	24,60	25,40	24,97	21,70	18,21	14,21	10,01
16:13	10,46	10,10	11,35	13,29	18,93	24,52	25,29	24,87	21,68	18,18	14,09	9,92
16:23	10,40	10,09	11,30	13,20	18,82	24,41	25,20	24,81	21,56	18,07	13,99	9,75
16:33	10,30	10,07	11,13	13,11	18,69	24,31	24,15	24,69	21,51	17,95	13,85	9,64
16:43	10,15	10,02	11,06	13,00	18,57	24,26	25,02	24,56	21,35	17,81	13,69	9,55
16:53	10,01	9,92	10,97	12,87	18,33	24,14	24,96	24,45	21,20	17,73	13,60	9,39
17:03	9,91	9,84	10,84	12,76	18,19	24,08	24,93	24,35	21,08	17,60	13,48	9,29
17:13	9,76	9,81	10,70	12,66	18,09	23,99	24,74	24,23	20,93	17,41	13,37	
17:23	9,58	9,77	10,55	12,58	18,02	23,88	24,63	24,09	20,81	17,28		
17:33	9,41	9,71	10,40	12,55	17,98	23,82	24,47	23,96	20,69	17,14		
17:43	9,27	9,58	10,24	12,47	17,92	23,65	24,40	23,82	20,49	16,98		
17:53		9,50	10,14	12,28	17,81	23,55	24,25	23,71	20,34	16,86		
18:03			10,03	12,09	17,72	23,42	24,12	23,58	20,19			
18:13			9,87	11,91	17,69	23,26	23,96	23,43	20,03			
18:23			9,74	11,72	17,39	23,10	23,84	23,24	19,87			
18:33			9,57	11,57	17,19	22,93	23,68	23,05	19,70			
18:43				11,43	16,89	22,81	23,52	22,90	19,57			
18:53				11,25	16,64	22,65	23,35	22,71				
19:03					16,45	22,39	23,16	22,54				
19:13					16,27	22,12	22,98	22,39				
19:23					16,13	21,82	22,80	22,21				
19:33						21,62	22,65					

Πίνακας 1 : Θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a (°C) .

Χρόνος	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
5:23	0	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0
5:33	0	0	0	0	4	10	3	0	0	0	0	0
5:43	0	0	0	0	10	18	8	1	0	0	0	0
5:53	0	0	0	0	18	26	15	3	0	0	0	0
6:03	0	0	0	0	29	34	22	9	1	0	0	0
6:13	0	0	0	12	46	50	33	20	4	0	0	0
6:23	0	0	1	27	71	74	55	39	18	1	0	0
6:33	0	0	4	53	103	112	89	72	45	4	0	0
6:43	0	0	11	80	131	143	129	108	79	23	0	0
6:53	0	0	24	100	160	170	160	138	110	53	1	0
7:03	0	0	44	121	195	202	193	172	146	86	7	0
7:13	0	0	65	155	223	236	225	210	186	122	21	0
7:23	0	0	94	181	257	269	260	246	223	149	52	2
7:33	4	4	123	204	295	303	297	281	259	186	84	14
7:43	27	27	152	231	322	334	333	319	293	229	113	40
7:53	59	59	181	273	344	368	368	353	323	257	136	63
8:03	88	88	223	292	364	409	400	389	354	299	166	118
8:13	122	122	241	326	409	445	440	429	399	312	203	147
8:23	159	159	286	366	440	477	474	450	439	358	247	175
8:33	200	200	315	403	475	507	508	501	479	393	271	191
8:43	242	241	363	427	505	539	544	540	528	399	305	232
8:53	277	277	390	470	517	574	575	578	556	439	330	256
9:03	310	310	417	498	552	603	606	615	609	454	349	265
9:13	351	351	451	535	574	629	625	643	613	464	398	271
9:23	381	381	478	545	625	646	655	673	636	515	432	316
9:33	428	429	510	615	644	680	680	703	656	541	446	320
9:43	442	442	540	659	688	701	708	729	680	561	473	330
9:53	486	487	560	670	668	719	736	748	744	573	464	349
10:03	511	510	550	724	678	751	757	785	745	591	468	394
10:13	471	471	566	765	716	779	780	798	782	632	476	418
10:23	483	484	614	725	713	775	801	823	797	643	491	458
10:33	503	503	617	722	758	795	821	853	828	665	528	452
10:43	568	568	649	731	773	817	841	870	854	645	548	452
10:53	581	581	685	705	777	827	860	889	819	674	554	451
11:03	582	582	691	710	771	852	876	881	857	663	578	451
11:13	614	614	718	744	802	894	875	879	853	678	605	446
11:23	630	630	728	787	815	885	860	853	883	705	601	486
11:33	676	676	745	751	785	896	910	879	880	688	618	448
11:43	693	693	747	689	773	871	910	888	901	695	560	488
11:53	678	678	757	690	799	913	916	908	919	658	525	520
12:03	684	684	747	726	801	930	890	901	870	703	547	477
12:13	680	681	740	724	780	895	931	906	903	693	520	461
12:23	739	739	796	765	783	899	893	907	919	691	525	520
12:33	757	757	767	815	770	939	924	912	890	647	515	570
12:43	709	709	694	779	734	912	922	876	894	645	502	475
12:53	729	729	695	759	713	886	885	899	898	691	483	470
13:03	686	687	685	730	701	867	885	900	877	718	512	462
13:13	634	636	659	732	695	898	905	885	883	671	517	455
13:23	700	700	674	731	706	900	904	901	889	650	470	419
13:33	681	681	669	729	696	897	885	894	848	646	447	381
13:43	653	653	682	723	704	872	871	880	835	622	489	429
13:53	645	645	658	684	665	845	857	878	832	643	493	422
14:03	644	644	629	705	644	828	845	843	817	611	491	411
14:13	612	612	643	670	637	814	825	814	796	581	460	390
14:23	621	621	622	680	629	788	802	805	761	553	410	331
14:33	575	575	603	645	622	775	783	789	728	560	414	305
14:43	528	528	575	620	619	747	756	753	709	524	366	286
14:53	481	481	549	602	604	712	737	724	680	474	331	276
15:03	433	434	508	593	586	687	715	704	651	439	332	265
15:13	379	378	479	531	537	664	681	681	620	427	279	239
15:23	345	345	463	496	485	640	653	654	587	394	274	245
15:33	321	321	409	500	473	615	621	625	553	329	261	217
15:43	292	293	389	474	469	578	599	591	501	286	229	194
15:53	275	275	366	458	441	558	574	557	447	238	207	189
16:03	240	239	335	423	420	517	541	528	441	229	151	145
16:13	229	230	276	397	378	487	508	468	409	217	124	112
16:23	187	187	213	335	360	450	479	461	359	206	103	72
16:33	164	165	217	334	337	413	449	417	339	184	69	53
16:43	128	128	219	282	299	391	415	377	298	152	47	32
16:53	111	111	188	255	274	351	381	347	251	126	25	14
17:03	89	89	161	220	251	325	346	311	223	98	11	6
17:13	45	45	141	197	228	291	313	273	181	68	4	0
17:23	17	17	118	163	201	259	276	235	152	43	0	0
17:33	6	6	85	134	181	226	244	202	119	21	0	0
17:43	1	1	65	102	146	199	212	168	89	8	0	0
17:53	0	0	42	76	123	187	180	139	61	2	0	0
18:03	0	0	27	51	93	131	143	101	32	0	0	0
18:13	0	0	12	35	62	94	99	66	15	0	0	0
18:23	0	0	4	21	42	66	63	36	8	0	0	0
18:33	0	0	1	12	32	47	37	23	3	0	0	0
18:43	0	0	0	5	23	41	31	17	1	0	0	0
18:53	0	0	0	1	17	34	26	11	0	0	0	0
19:03	0	0	0	0	10	26	20	6	0	0	0	0
19:13	0	0	0	0	5	18	15	2	0	0	0	0
19:23	0	0	0	0	2	10	8	1	0	0	0	0
19:33	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0
Συνολική:	4264,61	4265,62	5057,82	5817,23	6134,48	7174,32	7246,95	7123,38	6644,06	4857,08	3610,11	2979,14
Μέρες:	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
kWh/m²	132,20	119,44	156,79	174,52	190,17	215,23	224,66	220,82	199,32	150,57	108,30	92,35
Ετήσια kWh/m²	1984,38											

Πίνακας 2 : Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (G) σε κλίση 30° (W/m²) .

Χρόνος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
5:23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,49	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	1,64	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:43	0,00	0,00	0,00	0,00	1,64	2,96	1,31	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
5:53	0,00	0,00	0,00	0,00	2,96	4,27	2,46	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00
6:03	0,00	0,00	0,00	0,00	4,76	5,58	3,61	1,48	0,16	0,00	0,00	0,00
6:13	0,00	0,00	0,00	1,97	7,55	8,21	5,42	3,28	0,66	0,00	0,00	0,00
6:23	0,00	0,00	0,16	4,43	11,50	11,99	9,03	6,40	2,96	0,16	0,00	0,00
6:33	0,00	0,00	0,66	8,70	16,75	18,23	14,45	11,66	7,39	0,66	0,00	0,00
6:43	0,00	0,00	1,81	12,97	21,35	23,32	21,02	17,57	12,81	3,78	0,00	0,00
6:53	0,00	0,00	3,94	16,26	26,11	27,75	26,11	22,50	17,90	8,70	0,16	0,00
7:03	0,00	0,00	7,23	19,71	31,69	32,84	31,36	28,08	23,81	13,96	1,15	0,00
7:13	0,00	0,00	10,51	25,29	36,29	38,43	36,62	34,16	30,22	19,87	3,45	0,00
7:23	0,00	0,00	15,27	29,39	41,87	43,85	42,37	40,07	36,29	24,30	8,54	0,33
7:33	0,66	0,66	20,03	33,17	47,95	49,26	48,28	45,82	42,20	30,22	13,63	2,30
7:43	4,43	4,43	24,80	37,61	52,38	54,36	54,19	51,89	47,62	37,28	18,39	6,57
7:53	9,52	9,52	29,39	44,50	56,00	59,94	59,94	57,48	52,55	41,87	22,17	10,18
8:03	14,29	14,29	36,29	47,46	59,28	66,51	65,19	63,39	57,64	48,61	27,10	19,21
8:13	19,87	19,87	39,25	53,04	66,51	72,42	71,60	69,79	65,03	50,74	33,01	23,98
8:23	25,95	25,95	46,64	59,61	71,60	77,67	77,18	73,24	71,43	58,30	40,23	28,41
8:33	32,51	32,51	51,23	65,69	77,35	82,60	82,76	81,61	78,00	64,04	44,17	31,04
8:43	39,41	39,25	59,12	69,46	82,27	87,69	88,51	87,85	85,88	65,03	49,59	37,77
8:53	45,16	45,16	63,55	76,52	84,24	93,44	93,60	94,09	90,48	71,43	53,70	41,71
9:03	50,41	50,41	67,82	81,12	89,83	98,20	98,69	100,17	99,19	73,90	56,82	43,19
9:13	57,15	57,15	73,40	87,03	93,44	102,47	101,81	104,60	99,84	75,54	64,86	44,17
9:23	62,07	62,07	77,84	88,68	101,81	105,10	106,58	109,53	103,46	83,91	70,28	51,40
9:33	69,63	69,79	83,09	100,17	104,77	110,68	110,68	114,46	106,74	88,02	72,58	52,06
9:43	71,93	71,93	87,85	107,23	111,99	114,13	115,28	118,73	110,68	91,30	77,02	53,70
9:53	79,15	79,32	91,14	109,04	108,71	117,09	119,88	121,85	121,19	93,27	75,54	56,82
10:03	83,26	83,09	89,50	117,91	110,35	122,18	123,16	127,76	121,35	96,23	76,20	64,21
10:13	76,69	76,69	92,12	124,47	116,59	126,77	126,94	129,89	127,27	102,96	77,51	67,98
10:23	78,66	78,82	100,01	118,07	116,10	126,12	130,39	134,00	129,73	104,60	79,97	74,55
10:33	81,94	81,94	100,50	117,58	123,33	129,40	133,67	138,93	134,82	108,22	85,88	73,57
10:43	92,45	92,45	105,59	119,06	125,79	133,01	136,96	141,55	139,09	104,93	89,17	73,57
10:53	94,59	94,59	111,50	114,79	126,45	134,66	140,08	144,67	133,34	109,70	90,15	73,40
11:03	94,75	94,75	112,49	115,61	125,46	138,76	142,54	143,36	139,58	107,89	94,09	73,40
11:13	100,01	100,01	116,92	121,19	130,55	145,49	142,37	143,03	138,93	110,35	98,53	72,58
11:23	102,63	102,63	118,56	128,09	132,69	144,02	140,08	138,93	143,69	114,79	97,87	79,15
11:33	110,02	110,02	121,35	122,18	127,76	145,82	148,12	143,03	143,20	111,99	100,66	72,91
11:43	112,82	112,82	121,68	112,16	125,79	141,72	148,12	144,51	146,64	113,14	91,14	79,48
11:53	110,35	110,35	123,16	112,32	130,06	148,61	149,11	147,79	149,60	107,07	85,39	84,57
12:03	111,34	111,34	121,68	118,23	130,39	151,41	144,84	146,64	141,55	114,46	89,00	77,67
12:13	110,68	110,84	120,53	117,91	126,94	145,66	151,57	147,46	146,97	112,82	84,57	75,05
12:23	120,37	120,37	129,57	124,47	127,43	146,32	145,33	147,63	149,60	112,49	85,39	84,57
12:33	123,16	123,16	124,80	132,69	125,30	152,88	150,42	148,45	144,84	105,26	83,91	92,78
12:43	115,44	115,44	112,98	126,77	119,55	148,45	150,09	142,54	145,49	104,93	81,78	77,35
12:53	118,73	118,73	113,14	123,49	116,10	144,18	144,02	146,32	146,15	112,49	78,66	76,52
13:03	111,67	111,83	111,50	118,89	114,13	141,06	144,02	146,48	142,70	116,92	83,42	75,21
13:13	103,29	103,46	107,23	119,22	113,14	146,15	147,30	144,02	143,69	109,20	84,24	74,06
13:23	113,96	113,96	109,70	119,06	114,95	146,48	147,14	146,64	144,67	105,75	76,52	68,15
13:33	110,84	110,84	108,87	118,73	113,31	145,99	144,02	145,49	138,10	105,10	72,75	62,07
13:43	106,25	106,25	111,01	117,74	114,62	141,88	141,72	143,20	135,97	101,32	79,64	69,79
13:53	104,93	104,93	107,07	111,34	108,22	137,61	139,58	142,87	135,48	104,60	80,30	68,64
14:03	104,77	104,77	102,47	114,79	104,77	134,82	137,61	137,28	133,01	99,51	79,97	66,84
14:13	99,68	99,68	104,60	109,04	103,62	132,52	134,33	132,52	129,57	94,59	74,88	63,55
14:23	101,16	101,16	101,32	110,68	102,47	128,25	130,55	131,04	123,82	89,99	66,67	53,86
14:33	93,60	93,60	98,20	104,93	101,32	126,12	127,43	128,42	118,56	91,14	67,33	49,59
14:43	85,88	85,88	93,60	100,99	100,83	121,68	123,00	122,50	115,44	85,23	59,61	46,64
14:53	78,33	78,33	89,33	98,04	98,36	115,94	120,04	117,91	110,68	77,18	53,86	44,99
15:03	70,45	70,61	82,76	96,56	95,41	111,83	116,43	114,62	105,92	71,43	54,03	43,19
15:13	61,74	61,58	78,00	86,38	87,36	108,05	110,84	110,84	100,99	69,46	45,49	38,92
15:23	56,16	56,16	75,37	80,79	78,99	104,11	106,25	106,41	95,57	64,21	44,67	39,90
15:33	52,22	52,22	66,51	81,45	77,02	100,17	101,16	101,81	89,99	53,53	42,53	35,31
15:43	47,46	47,62	63,39	77,18	76,36	94,09	97,54	96,23	81,61	46,64	37,28	31,53
15:53	44,83	44,83	59,61	74,55	71,76	90,81	93,44	90,65	72,75	38,75	33,66	30,71
16:03	39,08	38,92	54,52	68,81	68,31	84,24	88,02	85,88	71,76	37,28	24,63	23,65
16:13	37,28	37,44	44,99	64,70	61,58	79,32	82,76	76,20	66,51	35,31	20,20	18,23
16:23	30,38	30,38	34,65	54,52	58,62	73,24	78,00	75,05	58,46	33,50	16,75	11,66
16:33	26,77	26,93	35,31	54,36	54,85	67,16	73,08	67,82	55,18	29,89	11,17	8,70
16:43	20,86	20,86	35,63	45,98	48,61	63,72	67,49	61,42	48,44	24,80	7,72	5,25
16:53	18,06	18,06	30,54	41,55	44,67	57,15	62,07	56,49	40,89	20,53	4,11	2,30
17:03	14,45	14,45	26,27	35,80	40,89	52,88	56,33	50,58	36,29	15,93	1,81	0,99
17:13	7,39	7,39	22,99	32,02	37,11	47,29	50,91	44,50	29,39	11,00	0,66	0,00
17:23	2,79	2,79	19,21	26,60	32,68	42,20	44,99	38,26	24,80	7,06	0,00	0,00
17:33	0,99	0,99	13,79	21,84	29,39	36,78	39,74	32,84	19,38	3,45	0,00	0,00
17:43	0,16	0,16	10,51	16,59	23,81	32,35	34,49	27,42	14,45	1,31	0,00	0,00
17:53	0,00	0,00	6,90	12,32	20,03	30,38	29,23	22,66	9,85	0,33	0,00	0,00
18:03	0,00	0,00	4,43	8,37	15,11	21,35	23,32	16,42	5,25	0,00	0,00	0,00
18:13	0,00	0,00	1,97	5,75	10,02	15,27	16,09	10,67	2,46	0,00	0,00	0,00
18:23	0,00	0,00	0,66	3,45	6,90	10,67	10,18	5,91	1,31	0,00	0,00	0,00
18:33	0,00	0,00	0,16	1,97	5,25	7,72	6,08	3,78	0,49	0,00	0,00	0,00
18:43	0,00	0,00	0,00	0,82	3,78	6,73	5,09	2,79	0,16	0,00	0,00	0,00
18:53	0,00	0,00	0,00	0,16	2,79	5,58	4,27	1,81	0,00	0,00	0,00	0,00
19:03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,64	4,27	3,28	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00
19:13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,82	2,96	2,46	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
19:23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	1,64	1,31	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
19:33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Συνολική:	694,24	694,41	823,37	947,00	998,64	1167,92	1179,75	1159,63	1081,60	790,69	587,70	484,98
Μέρες:	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
MWh	21,52	19,44	25,52	28,41	30,96	35,04	36,57	35,95	32,45	24,51	17,63	15,03
Ετήσια GWh (Εφθ)	0,32											

Χρόνος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
5:23	0	0	0	0	15,14	19,89	21,65	0	0	0	0	0
5:33	0	0	0	0	15,27	20,23	21,74	0	0	0	0	0
5:43	0	0	0	0	15,59	19,63	21,96	20,99	0	0	0	0
5:53	0	0	0	0	16,05	21,09	22,35	21,09	0	0	0	0
6:03	0	0	0	0	16,62	21,51	22,77	21,35	18,11	0	0	0
6:13	0	0	0	10,24	17,41	22,26	23,31	21,89	18,23	0	0	0
6:23	0	0	7,84	10,81	18,52	23,25	23,29	22,76	18,73	14,79	0	0
6:33	0	0	7,93	11,82	19,91	24,77	25,60	24,11	19,76	14,94	0	0
6:43	0	0	8,23	12,88	21,13	26,00	27,14	25,59	21,08	15,67	0,00	0
6:53	0	0	8,72	13,78	22,37	27,08	28,42	26,72	22,32	16,86	12,47	0
7:03	0	0	9,48	14,66	23,71	28,36	29,71	28,04	23,80	18,15	12,68	0
7:13	0	0	10,29	15,98	24,83	29,73	30,93	29,46	25,37	19,60	13,17	0
7:23	0	0	11,38	16,98	26,19	31,05	32,24	30,92	26,89	20,76	14,26	8,49
7:33	8,10	9,00	12,65	17,91	27,71	32,42	33,62	32,29	28,32	22,19	15,53	8,91
7:43	8,97	9,83	13,93	18,95	28,86	33,63	34,98	33,75	29,56	23,87	16,68	9,84
7:53	10,10	10,93	15,09	20,58	29,68	34,86	36,26	35,06	30,74	25,05	17,59	10,67
8:03	11,25	12,01	16,71	21,36	30,43	36,34	37,45	36,44	32,01	26,62	18,75	12,71
8:13	12,57	13,28	17,55	22,63	32,04	37,67	38,86	37,92	32,68	27,25	20,07	13,85
8:23	14,01	14,70	19,27	24,15	33,19	38,90	40,08	38,79	35,11	28,96	21,68	14,89
8:33	15,55	16,16	20,35	25,59	34,57	40,10	41,29	40,64	36,64	30,34	22,60	15,60
8:43	17,19	17,69	22,08	26,50	35,70	41,31	42,59	42,09	38,43	30,72	23,87	17,18
8:53	18,59	19,08	23,12	28,12	36,20	42,63	43,73	43,52	39,56	32,23	24,87	18,15
9:03	19,87	20,34	24,11	29,23	37,39	43,72	44,88	44,85	41,43	32,87	25,68	18,55
9:13	21,50	21,84	25,42	30,51	38,23	44,68	45,62	45,87	41,64	33,29	27,44	18,85
9:23	22,72	22,96	26,43	30,93	40,10	45,35	46,67	46,98	42,52	35,13	28,60	20,49
9:33	24,50	24,69	27,67	33,46	40,70	46,60	47,64	48,09	43,38	36,12	29,16	20,73
9:43	25,08	25,16	28,77	35,07	42,31	47,39	48,69	49,05	44,31	36,94	30,21	21,15
9:53	26,70	26,76	29,58	35,52	41,64	48,08	49,79	49,77	46,62	37,44	29,92	21,83
10:03	27,69	27,63	29,35	37,40	41,95	49,14	50,54	51,02	46,83	38,18	30,16	23,48
10:13	26,37	26,39	29,98	38,97	43,32	50,24	51,41	51,53	48,05	39,63	30,49	24,35
10:23	26,84	26,50	31,74	37,64	43,25	50,18	52,23	52,47	48,71	40,00	31,11	25,79
10:33	27,58	27,19	31,88	37,58	44,89	50,94	52,97	53,61	49,81	40,84	32,47	25,69
10:43	29,87	29,39	33,04	37,83	45,47	51,76	53,72	54,24	50,75	40,17	33,31	25,72
10:53	30,46	29,84	34,41	36,97	45,59	52,12	54,43	54,93	49,62	41,26	33,67	25,78
11:03	30,55	29,85	34,66	37,16	45,40	53,06	54,98	54,71	50,99	40,93	34,49	25,76
11:13	31,71	30,97	36,02	38,33	46,50	54,58	54,96	54,62	50,91	41,48	35,47	25,67
11:23	32,36	31,57	36,37	39,86	47,00	54,36	54,54	53,82	51,99	42,51	35,32	27,08
11:33	33,96	33,11	37,00	38,70	45,89	54,83	56,27	54,72	51,91	42,01	36,02	25,83
11:43	34,62	33,75	37,08	36,67	45,54	54,04	56,31	55,10	52,68	42,25	34,10	27,24
11:53	34,16	33,29	37,40	36,70	46,49	55,54	56,54	55,78	53,38	41,02	32,85	28,30
12:03	34,41	33,52	37,11	37,93	46,61	56,18	56,70	55,52	51,73	42,57	33,63	26,87
12:13	34,33	33,43	36,96	37,92	45,91	55,09	57,16	55,73	52,89	42,22	32,67	26,30
12:23	36,40	35,40	38,90	39,40	46,02	55,20	55,89	55,78	53,53	42,17	32,84	28,16
12:33	37,01	35,96	37,96	41,19	45,57	56,65	56,93	56,10	52,46	40,63	32,51	29,96
12:43	35,35	34,34	35,44	40,03	44,34	55,76	56,86	54,86	52,62	40,57	32,06	26,71
12:53	36,03	35,07	35,55	39,34	43,61	54,89	55,56	54,73	52,84	42,19	31,36	26,52
13:03	34,56	33,66	35,20	38,30	43,20	54,38	55,56	55,76	52,01	43,25	32,34	26,27
13:13	32,78	32,00	34,29	38,38	42,94	54,50	56,30	55,22	52,27	41,62	32,57	26,03
13:23	35,04	34,16	34,78	38,45	43,25	55,55	56,32	55,77	52,42	40,93	30,91	24,78
13:33	34,41	33,52	34,65	38,45	42,85	55,54	55,72	55,61	51,03	40,74	30,02	23,44
13:43	33,42	32,54	35,11	38,26	43,12	54,60	55,21	55,11	49,56	39,98	31,48	25,04
13:53	33,16	32,26	34,25	36,89	41,74	53,71	54,79	55,04	50,48	40,69	31,51	24,82
14:03	33,17	32,22	33,24	37,58	40,99	53,13	54,41	53,89	49,91	39,71	31,52	24,50
14:13	32,05	31,11	33,66	36,29	40,74	52,56	53,72	52,84	49,09	38,67	30,52	23,79
14:23	32,32	31,40	32,97	36,62	40,45	51,70	52,90	52,51	47,91	37,62	28,77	21,74
14:33	30,68	29,78	32,26	35,44	40,13	51,20	51,22	51,97	46,80	37,79	28,86	20,75
14:43	28,97	28,29	31,24	34,57	40,09	50,35	51,32	50,75	46,12	36,49	27,18	20,09
14:53	27,29	26,70	30,40	33,92	39,60	48,97	50,70	49,75	45,08	34,77	25,88	19,72
15:03	25,59	25,08	28,96	33,65	38,98	48,08	49,88	49,07	44,04	33,46	25,87	19,27
15:13	23,71	23,13	27,90	31,55	37,30	47,23	48,66	48,22	42,97	33,08	23,98	18,32
15:23	22,41	21,95	27,35	30,30	35,48	46,30	47,65	47,30	41,82	31,95	23,74	18,49
15:33	21,53	21,07	25,45	30,36	35,04	45,39	46,56	45,29	40,62	29,57	23,22	17,51
15:43	20,50	20,11	24,77	29,50	34,83	44,12	45,71	45,08	38,87	28,03	22,07	16,64
15:53	19,91	19,49	23,88	28,85	33,82	43,48	44,83	43,80	36,85	26,32	21,29	16,42
16:03	18,62	18,23	22,73	27,59	33,12	42,07	43,65	42,78	36,58	25,94	19,32	14,91
16:13	18,19	17,86	20,68	26,70	31,70	40,96	42,45	40,67	35,46	25,50	18,27	13,69
16:23	16,70	16,39	18,48	24,50	30,98	39,60	41,37	40,36	33,68	25,01	17,47	12,17
16:33	15,85	15,65	18,45	24,38	30,06	38,23	39,30	38,75	32,95	24,15	16,17	11,44
16:43	14,48	14,34	18,45	22,53	28,64	37,47	39,01	37,29	31,39	22,95	15,29	10,64
16:53	13,75	13,67	17,30	21,49	27,59	35,99	37,83	36,17	29,68	21,98	14,45	9,87
17:03	12,90	12,83	16,28	20,18	26,67	35,05	36,60	34,83	28,60	20,90	13,85	9,49
17:13	11,29	11,35	15,47	19,29	25,78	33,80	35,29	33,45	27,02	19,69	13,51	0
17:23	10,16	10,35	14,54	18,10	24,79	32,63	33,96	32,02	25,96	18,74	0	0
17:33	9,61	9,91	13,26	17,07	24,07	31,44	32,71	30,77	24,71	17,85	0	0
17:43	9,31	9,61	12,42	15,91	22,86	30,36	31,55	29,50	23,49	17,26	0	0
17:53	0	9,50	11,57	14,84	21,96	29,85	30,31	28,41	22,38	16,93	0	0
18:03	0	0	10,95	13,82	20,85	27,84	28,96	26,99	21,28	0	0	0
18:13	0	0	10,28	13,10	19,66	26,43	27,30	25,65	20,55	0	0	0
18:23	0	0	9,87	12,43	18,82	25,31	25,95	24,46	20,15	0	0	0
18:33	0	0	9,61	11,98	18,28	24,53	24,94	23,83	19,80	0	0	0
18:43	0	0	0	11,60	17,67	24,20	24,58	23,48	19,60	0	0	0
18:53	0	0	0	11,28	17,22	23,81	24,24	23,08	0	0	0	0
19:03	0	0	0	0	16,79	23,28	23,84	22,74	0	0	0	0
19:13	0	0	0	0	16,44	22,73	23,49	22,46	0	0	0	0
19:23	0	0	0	0	16,20	22,16	23,07	22,24	0	0	0	0
19:33	0	0	0	0	0	21,72	22,75	0	0	0	0	0

Πίνακας 4 : Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου T_c (°C) .

Χρόνος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
5:23	112,50	112,50	112,50	112,50	104,93	102,55	101,67	112,50	112,50	112,50	112,50	112,50
5:33	112,50	112,50	112,50	112,50	104,87	102,39	101,63	112,50	112,50	112,50	112,50	112,50
5:43	112,50	112,50	112,50	112,50	104,71	102,69	101,52	102,00	112,50	112,50	112,50	112,50
5:53	112,50	112,50	112,50	112,50	104,47	101,95	101,33	101,95	112,50	112,50	112,50	112,50
6:03	112,50	112,50	112,50	112,50	104,19	101,75	101,12	101,82	103,45	112,50	112,50	112,50
6:13	112,50	112,50	112,50	107,38	103,79	101,37	100,84	101,56	103,39	112,50	112,50	112,50
6:23	112,50	112,50	108,58	107,09	103,24	100,87	100,85	101,12	103,13	105,11	112,50	112,50
6:33	112,50	112,50	108,54	106,59	102,54	100,12	99,70	100,44	102,62	105,03	112,50	112,50
6:43	112,50	112,50	108,38	106,06	101,94	99,50	98,93	99,71	101,96	104,67	112,50	112,50
6:53	112,50	112,50	108,14	105,61	101,32	98,96	98,29	99,14	101,34	104,07	106,27	112,50
7:03	112,50	112,50	107,76	105,17	100,64	98,32	97,65	98,48	100,60	103,42	106,16	112,50
7:13	112,50	112,50	107,36	104,51	100,08	97,64	97,03	97,77	99,81	102,70	105,92	112,50
7:23	112,50	112,50	106,81	104,01	99,41	96,97	96,38	97,04	99,06	102,12	105,37	108,25
7:33	108,45	108,00	106,17	103,54	98,65	96,29	95,69	96,35	98,34	101,40	104,74	108,04
7:43	108,01	107,58	105,54	103,03	98,07	95,69	95,01	95,63	97,72	100,56	104,16	107,58
7:53	107,45	107,03	104,95	102,21	97,66	95,07	94,37	94,97	97,13	99,97	103,71	107,16
8:03	106,87	106,49	104,14	101,82	97,29	94,33	93,78	94,28	96,50	99,19	103,13	106,15
8:13	106,22	105,86	103,73	101,19	96,48	93,67	93,07	93,54	96,16	98,88	102,47	105,57
8:23	105,49	105,15	102,87	100,43	95,90	93,05	92,46	93,10	94,94	98,02	101,66	105,05
8:33	104,73	104,42	102,33	99,70	95,22	92,45	91,86	92,18	94,18	97,33	101,20	104,70
8:43	103,90	103,65	101,46	99,25	94,65	91,85	91,20	91,46	93,28	97,14	100,57	103,91
8:53	103,20	102,96	100,94	98,44	94,40	91,19	90,64	90,74	92,72	96,38	100,07	103,43
9:03	102,56	102,33	100,44	97,89	93,81	90,64	90,06	90,07	91,79	96,07	99,66	103,23
9:13	101,75	101,58	99,79	97,25	93,38	90,16	89,69	89,56	91,68	95,85	98,78	103,08
9:23	101,14	101,02	99,29	97,03	92,45	89,82	89,17	89,01	91,24	94,94	98,20	102,25
9:33	100,25	100,16	98,66	95,77	92,15	89,20	88,68	88,45	90,81	94,44	97,92	102,14
9:43	99,96	99,92	98,12	94,97	91,35	88,81	88,15	87,98	90,34	94,03	97,40	101,92
9:53	99,15	99,12	97,71	94,74	91,68	88,46	87,60	87,62	89,19	93,78	97,54	101,58
10:03	98,66	98,68	97,83	93,80	91,53	87,93	87,23	86,99	89,09	93,41	97,42	100,76
10:13	99,31	99,31	97,51	93,02	90,84	87,38	86,80	86,73	88,47	92,68	97,25	100,33
10:23	99,08	99,25	96,63	93,68	90,87	87,41	86,38	86,27	88,15	92,50	96,95	99,60
10:33	98,71	98,90	96,56	93,71	90,05	87,03	86,01	85,70	87,60	92,08	96,26	99,65
10:43	97,57	97,80	95,98	93,59	89,77	86,62	85,64	85,38	87,12	92,42	95,84	99,64
10:53	97,27	97,58	95,30	94,02	89,70	86,44	85,29	85,03	87,69	91,87	95,66	99,61
11:03	97,22	97,57	95,17	93,92	89,80	85,97	85,01	85,14	87,00	92,04	95,26	99,62
11:13	96,64	97,02	94,49	93,33	89,25	85,21	85,02	85,19	87,05	91,76	94,77	99,67
11:23	96,32	96,72	94,31	92,57	89,00	85,32	85,23	85,59	86,51	91,25	94,84	98,96
11:33	95,52	95,94	94,00	93,15	89,55	85,08	84,36	85,14	86,54	91,50	94,49	99,58
11:43	95,19	95,62	93,96	94,17	89,73	85,48	84,35	84,95	86,16	91,38	95,45	98,88
11:53	95,42	95,85	93,80	94,15	89,25	84,73	84,23	84,61	85,81	91,99	96,08	98,35
12:03	95,29	95,74	93,94	93,53	89,20	84,41	84,65	84,74	86,64	91,22	95,68	99,06
12:13	95,33	95,79	94,02	93,54	89,55	84,96	83,92	84,63	86,05	91,39	96,17	99,35
12:23	94,30	94,80	93,05	92,80	89,49	84,90	84,55	84,61	85,74	91,42	96,08	98,42
12:33	93,99	94,52	93,52	91,90	89,71	84,17	84,03	84,45	86,27	92,19	96,24	97,52
12:43	94,82	95,33	94,78	92,49	90,33	84,62	84,07	85,07	86,19	92,22	96,47	99,15
12:53	94,48	94,97	94,73	92,83	90,69	85,06	84,72	85,13	86,08	91,41	96,82	99,24
13:03	95,22	95,67	94,90	93,35	90,90	85,31	84,72	84,62	86,49	90,87	96,33	99,37
13:13	96,11	96,50	95,36	93,31	91,03	85,25	84,35	84,89	86,37	91,69	96,21	99,49
13:23	94,98	95,42	95,11	93,27	90,87	84,72	84,34	84,61	86,29	92,03	97,04	100,11
13:33	95,30	95,74	95,18	93,28	91,07	84,73	84,64	84,69	86,99	92,13	97,49	100,78
13:43	95,79	96,23	94,94	93,37	90,94	85,20	84,89	84,94	87,72	92,51	96,76	99,98
13:53	95,92	96,37	95,38	94,05	91,63	85,64	85,10	84,98	87,26	92,15	96,75	100,09
14:03	95,92	96,39	95,88	93,71	92,01	85,94	85,29	85,55	87,55	92,64	96,74	100,25
14:13	96,47	96,94	95,67	94,35	92,13	86,22	85,64	86,08	87,95	93,16	97,24	100,60
14:23	96,34	96,80	96,01	94,19	92,28	86,65	86,05	86,25	88,55	93,69	98,12	101,63
14:33	97,16	97,61	96,37	94,78	92,43	86,90	86,89	86,51	89,10	93,61	98,07	102,12
14:43	98,01	98,36	96,88	95,21	92,46	87,32	86,84	87,13	89,44	94,25	98,91	102,46
14:53	98,85	99,15	97,30	95,54	92,70	88,01	87,15	87,63	89,96	95,11	99,56	102,64
15:03	99,70	99,96	98,02	95,68	93,01	88,46	87,56	87,96	90,48	95,77	99,56	102,86
15:13	100,64	100,93	98,55	96,73	93,85	88,88	88,17	88,39	91,02	95,96	100,51	103,34
15:23	101,29	101,52	98,83	97,35	94,76	89,35	88,68	88,85	91,59	96,53	100,63	103,25
15:33	101,73	101,96	99,77	97,32	94,98	89,80	89,22	89,85	92,19	97,71	100,89	103,74
15:43	102,25	102,44	100,11	97,75	95,09	90,44	89,64	89,96	93,07	98,49	101,46	104,18
15:53	102,55	102,76	100,56	98,07	95,59	90,76	90,09	90,60	94,07	99,34	101,86	104,29
16:03	103,19	103,39	101,14	98,70	95,94	91,47	90,68	91,11	94,21	99,53	102,84	105,04
16:13	103,41	103,57	102,16	99,15	96,65	92,02	91,27	92,17	94,77	99,75	103,36	105,65
16:23	104,15	104,30	103,26	100,25	97,01	92,70	91,81	92,32	95,66	99,99	103,77	106,41
16:33	104,58	104,67	103,28	100,31	97,47	93,39	92,85	93,12	96,03	100,43	104,42	106,78
16:43	105,26	105,33	103,28	101,23	98,18	93,76	92,99	93,85	96,81	101,02	104,85	107,18
16:53	105,62	105,67	103,85	101,76	98,70	94,50	93,58	94,42	97,66	101,51	105,28	107,57
17:03	106,05	106,08	104,36	102,41	99,17	94,98	94,20	95,08	98,20	102,05	105,57	107,76
17:13	106,85	106,83	104,77	102,85	99,61	95,60	94,85	95,77	98,99	102,65	105,74	112,50
17:23	107,42	107,32	105,23	103,45	100,10	96,18	95,52	96,49	99,52	103,13	112,50	112,50
17:33	107,69	107,54	105,87	103,96	100,46	96,78	96,14	97,12	100,15	103,57	112,50	112,50
17:43	107,85	107,69	106,29	104,54	101,07	97,32	96,73	97,75	100,76	103,87	112,50	112,50
17:53	112,50	107,75	106,72	105,08	101,52	97,58	97,35	98,29	101,31	104,04	112,50	112,50
18:03	112,50	112,50	107,03	105,59	102,07	98,58	98,02	99,01	101,86	112,50	112,50	112,50
18:13	112,50	112,50	107,36	105,95	102,67	99,29	98,85	99,68	102,23	112,50	112,50	112,50
18:23	112,50	112,50	107,56	106,28	103,09	99,85	99,52	100,27	102,43	112,50	112,50	112,50
18:33	112,50	112,50	107,70	106,51	103,36	100,24	100,03	100,58	102,60	112,50	112,50	112,50
18:43	112,50	112,50	112,50	106,70	103,67	100,40	100,21	100,76	102,70	112,50	112,50	112,50
18:53	112,50	112,50	112,50	106,86	103,89	100,59	100,38	100,96	112,50	112,50	112,50	112,50
19:03	112,50	112,50	112,50	112,50	104,11	100,86	100,58	101,13	112,50	112,50	112,50	112,50
19:13	112,50	112,50	112,50	112,50	104,28	101,13	100,76	101,27	112,50	112,50	112,50	112,50
19:23	112,50	112,50	112,50	112,50	104,40	101,42	100,96	101,38	112,50	112,50	112,50	112,50
19:33	112,50	112,50	112,50	112,50	112,50	101,64	101,12	112,50	112,50	112,50	112,50	112,50

Πίνακας 5 : Θερμικός συντελεστής ηθερ.

Χρόνος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
5:23	0	0	0	0	0,17	0,51	0,17	0	0	0	0	0
5:33	0	0	0	0	0,69	1,68	0,80	0	0	0	0	0
5:43	0	0	0	0	1,72	3,04	1,33	0,17	0	0	0	0
5:53	0	0	0	0	3,09	4,35	2,50	0,50	0	0	0	0
6:03	0	0	0	0	4,96	5,68	3,65	1,50	0,17	0	0	0
6:13	0	0	0	2,12	7,84	8,32	5,46	3,34	0,68	0	0	0
6:23	0	0	0,18	4,75	11,87	12,09	9,11	6,48	3,05	0,17	0	0
6:33	0	0	0,71	9,28	17,18	18,25	14,41	11,71	7,58	0,69	0	0
6:43	0	0	1,96	13,76	21,76	23,20	20,79	17,52	13,06	3,95	0	0
6:53	0	0	4,26	17,17	26,45	27,46	25,66	22,30	18,14	9,06	0,17	0
7:03	0	0	7,79	20,72	31,90	32,29	30,63	27,65	23,95	14,44	1,22	0
7:13	0	0	11,28	26,43	36,32	37,52	35,53	33,40	30,16	20,41	3,65	0
7:23	0	0	16,31	30,57	41,63	42,52	40,83	38,88	35,95	24,82	9,00	0,36
7:33	0,71	0,71	21,27	34,35	47,30	47,44	46,20	44,14	41,50	30,64	14,28	2,48
7:43	4,79	4,77	26,17	38,74	51,37	52,01	51,49	49,62	46,54	37,49	19,16	7,07
7:53	10,23	10,19	30,85	45,49	54,69	56,98	56,56	54,58	51,04	41,86	22,99	10,91
8:03	15,27	15,21	37,80	48,32	57,67	62,73	61,14	59,76	55,62	48,21	27,94	20,39
8:13	21,11	21,03	40,71	53,67	64,16	67,83	66,63	65,28	62,53	50,17	33,82	25,31
8:23	27,37	27,28	47,97	59,86	68,67	72,28	71,36	68,19	67,82	57,14	40,90	29,85
8:33	34,05	33,95	52,43	65,49	73,65	76,36	76,02	75,23	73,46	62,33	44,70	32,50
8:43	40,95	40,68	59,98	68,94	77,87	80,54	80,73	80,35	80,12	63,17	49,87	39,25
8:53	46,61	46,49	64,15	75,33	79,53	85,20	84,84	85,38	83,90	68,85	53,73	43,14
9:03	51,71	51,59	68,12	79,41	84,26	89,01	88,89	90,23	91,04	70,99	56,62	44,58
9:13	58,15	58,05	73,25	84,64	87,26	92,39	91,32	93,69	91,53	72,41	64,07	45,53
9:23	62,78	62,71	77,28	86,05	94,13	94,40	95,03	97,49	94,39	79,66	69,02	52,56
9:33	69,80	69,90	81,98	95,93	96,55	98,73	98,15	101,24	96,93	83,12	71,07	53,17
9:43	71,90	71,87	86,20	101,83	102,30	101,35	101,62	104,45	99,99	85,85	75,01	54,73
9:53	78,48	78,62	89,05	103,30	99,67	103,57	105,02	106,76	108,09	87,47	73,68	57,72
10:03	82,14	82,00	87,55	110,59	101,00	107,43	107,43	111,13	108,11	89,89	74,23	64,70
10:13	76,16	76,16	89,83	115,78	105,91	110,77	110,18	112,66	112,60	95,43	75,38	68,21
10:23	77,93	78,23	96,64	110,61	105,51	110,24	112,63	115,60	114,35	96,76	77,53	74,26
10:33	80,89	81,04	97,04	110,18	111,06	112,62	114,98	119,05	118,10	99,65	82,67	73,31
10:43	90,20	90,42	101,35	111,42	112,91	115,22	117,29	120,85	121,18	96,97	85,46	73,30
10:53	92,01	92,30	106,26	107,92	113,42	116,39	119,47	123,02	116,93	100,78	86,24	73,12
11:03	92,12	92,45	107,05	108,58	112,66	119,29	121,17	122,06	121,44	99,30	89,63	73,12
11:13	96,65	97,02	110,48	113,11	116,52	123,97	121,05	121,85	120,93	101,26	93,37	72,34
11:23	98,86	99,26	111,82	118,57	118,09	122,87	119,39	118,91	124,30	104,74	92,82	78,33
11:33	105,10	105,56	114,07	113,81	114,41	124,07	124,96	121,77	123,92	102,47	95,12	72,61
11:43	107,39	107,88	114,33	105,62	112,87	121,14	124,94	122,76	126,35	103,39	86,99	78,59
11:53	105,30	105,78	115,52	105,75	116,08	125,92	125,59	125,05	128,37	98,49	82,04	83,18
12:03	106,10	106,60	114,31	110,59	116,30	127,80	122,60	124,26	122,64	104,40	85,16	76,95
12:13	105,52	106,17	113,33	110,29	113,67	123,75	127,19	124,80	126,48	103,10	81,33	74,56
12:23	113,51	114,11	120,56	115,51	114,04	124,22	122,88	124,91	128,26	102,83	82,04	83,23
12:33	115,76	116,41	116,72	121,94	112,41	128,69	126,41	125,37	124,95	97,04	80,76	90,48
12:43	109,47	110,05	107,08	117,25	107,99	125,62	126,18	121,26	125,40	96,77	78,89	76,69
12:53	112,18	112,75	107,18	114,64	105,29	122,63	122,01	124,56	125,80	102,82	76,16	75,94
13:03	106,33	106,99	105,82	110,99	103,75	120,34	122,01	123,95	123,43	106,25	80,36	74,73
13:13	99,27	99,84	102,25	111,24	102,99	124,60	124,25	122,25	124,10	100,13	81,05	73,68
13:23	108,25	108,74	104,33	111,05	104,46	124,10	124,09	124,08	124,84	97,33	74,26	68,22
13:33	105,63	106,12	103,62	110,74	103,19	123,70	121,90	123,22	120,13	96,83	70,92	62,56
13:43	101,77	102,24	105,40	109,94	104,24	120,88	120,31	121,64	119,27	93,73	77,06	69,78
13:53	100,65	101,12	102,12	104,72	99,16	117,86	118,79	121,41	118,22	96,40	77,69	68,70
14:03	100,49	100,99	98,25	107,56	96,39	115,86	117,38	117,45	116,45	92,19	77,37	67,00
14:13	96,16	96,63	100,07	102,88	95,46	114,26	115,04	114,08	113,96	88,12	72,81	63,93
14:23	97,46	97,92	97,28	104,25	94,55	111,13	112,34	113,02	109,64	84,31	65,42	54,74
14:33	90,95	91,36	94,64	99,46	93,65	109,60	110,73	111,10	105,64	85,31	66,03	50,65
14:43	84,18	84,47	90,68	96,16	93,22	106,26	106,81	106,73	103,25	80,33	58,96	47,78
14:53	77,43	77,67	86,92	93,66	91,19	102,04	104,61	103,32	99,57	73,41	53,62	46,18
15:03	70,24	70,58	81,13	92,38	88,74	98,92	101,95	100,83	95,84	68,41	53,79	44,43
15:13	62,14	62,16	76,87	83,55	81,99	96,04	97,73	97,97	91,92	66,66	45,72	40,22
15:23	56,89	57,02	74,49	78,65	74,85	93,03	94,22	94,55	87,53	61,98	44,95	41,20
15:33	53,13	53,25	66,36	79,27	73,15	89,96	90,25	91,48	82,96	52,31	42,91	36,63
15:43	48,52	48,79	63,46	75,44	72,61	85,10	87,44	86,57	75,96	45,93	37,82	32,85
15:53	45,97	46,07	59,94	73,12	68,60	82,42	84,17	82,12	68,44	38,50	34,29	32,03
16:03	40,33	40,24	55,14	67,91	65,54	77,05	79,81	78,25	67,61	37,10	25,33	24,84
16:13	38,55	38,78	45,97	64,15	59,52	72,99	75,54	70,23	63,03	35,22	20,88	19,26
16:23	31,64	31,69	35,78	54,65	56,87	67,89	71,62	69,28	55,92	33,50	17,38	12,41
16:33	27,99	28,19	36,46	54,52	53,46	62,72	67,85	63,16	52,98	30,01	11,66	9,29
16:43	21,95	21,97	36,80	46,55	47,72	59,74	62,76	57,64	46,90	25,05	8,09	5,63
16:53	19,08	19,09	31,72	42,28	44,09	54,01	58,09	53,34	39,93	20,84	4,32	2,47
17:03	15,33	15,33	27,42	36,66	40,55	50,22	53,06	48,09	35,64	16,26	1,91	1,06
17:13	7,90	7,89	24,09	32,94	36,97	45,21	48,29	42,62	29,10	11,29	0,69	0
17:23	3,00	3,00	20,22	27,52	32,71	40,59	42,98	36,92	24,68	7,28	0	0
17:33	1,06	1,06	14,60	22,71	29,53	35,60	38,21	31,90	19,41	3,57	0	0
17:43	0,18	0,18	11,17	17,34	24,07	31,48	33,36	26,81	14,56	1,36	0	0
17:53	0	0,00	7,36	12,94	20,34	29,64	28,45	22,28	9,98	0,34	0	0
18:03	0	0	4,75	8,84	15,42	21,04	22,86	16,26	5,35	0	0	0
18:13	0	0	2,12	6,09	10,28	15,16	15,91	10,64	2,52	0	0	0
18:23	0	0	0,71	3,67	7,11	10,66	10,13	5,93	1,35	0	0	0
18:33	0	0	0,18	2,10	5,43	7,74	6,08	3,80	0,51	0	0	0
18:43	0	0	0	0,88	3,92	6,76	5,10	2,81	0,17	0	0	0
18:53	0	0	0	0,18	2,90	5,62	4,29	1,82	0	0	0	0
19:03	0	0	0	0	1,71	4,31	3,30	1,00	0	0	0	0
19:13	0	0	0	0	0,86	2,99	2,48	0,33	0	0	0	0
19:23	0	0	0	0	0,34	1,67	1,33	0,17	0	0	0	0
19:33	0	0	0	0	0	0,50	0,50	0	0	0	0	0

Συνολική	678,94	681,10	799,82	905,88	926,05	1033,35	1036,32	1019,80	969,68	743,16	573,68	488,79
Μέρες:	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
MWh	21,05	19,07	24,79	27,18	28,71	31,00	32,13	31,61	29,09	23,04	17,21	15,15

Ετήσια GWh (Εθ)	0,30
------------------------	------

Πίνακας 6 : Παραγωγή φωτοβολταϊκών πάλει με απώλειες θερμοκρασίας.

Χρόνος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαί	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
5:23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,15	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,22	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,79	0,69	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
5:53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,95	1,64	1,46	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00
6:03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,97	2,71	2,45	0,59	0,07	0,00	0,00	0,00
6:13	0,00	0,00	0,00	0,59	3,22	3,66	3,46	1,27	0,16	0,00	0,00	0,00
6:23	0,00	0,00	0,06	1,38	5,38	5,27	4,67	2,91	0,81	0,08	0,00	0,00
6:33	0,00	0,00	0,12	3,29	7,59	7,24	6,64	5,42	2,47	0,22	0,00	0,00
6:43	0,00	0,00	0,45	5,42	11,16	11,26	10,65	8,28	5,05	1,00	0,00	0,00
6:53	0,00	0,00	1,34	8,25	15,17	14,34	15,39	12,57	9,12	3,13	0,14	0,00
7:03	0,00	0,00	2,73	11,44	20,38	18,55	19,87	17,21	14,44	6,32	0,55	0,00
7:13	0,00	0,00	5,07	15,30	25,97	24,10	25,51	22,80	19,32	11,03	1,54	0,00
7:23	0,00	0,00	8,19	19,38	31,61	29,09	31,54	28,30	25,41	16,38	3,38	0,11
7:33	0,19	0,49	13,22	23,18	38,08	34,95	38,20	34,60	30,99	21,23	5,18	0,39
7:43	0,30	1,39	17,63	27,37	44,50	40,73	44,62	40,49	36,23	28,92	7,49	1,18
7:53	0,76	3,10	22,93	33,29	48,83	46,58	51,11	46,62	41,63	33,65	9,94	3,31
8:03	1,96	5,40	28,46	38,83	55,55	53,04	56,82	53,63	46,17	40,89	12,44	5,25
8:13	4,01	8,39	35,67	42,26	59,71	58,99	64,20	60,21	54,39	42,77	20,09	7,05
8:23	6,01	12,09	40,24	48,20	66,12	64,92	70,72	65,16	59,96	49,60	27,68	8,91
8:33	8,66	15,81	45,74	54,66	72,54	70,13	77,08	70,12	66,17	55,14	34,51	10,27
8:43	11,84	19,13	52,73	58,64	76,79	75,50	82,94	76,84	71,39	56,73	43,64	12,95
8:53	15,87	25,29	58,08	65,46	81,13	77,68	88,59	82,60	76,33	64,58	48,77	17,10
9:03	21,73	34,24	62,24	71,27	85,29	83,09	94,60	88,13	81,83	67,34	55,34	22,55
9:13	29,12	42,45	68,45	75,42	87,96	87,33	99,51	93,33	82,98	69,79	63,05	26,55
9:23	38,72	45,69	72,57	78,50	98,28	90,44	104,34	97,36	86,01	76,13	67,16	38,36
9:33	49,85	49,79	76,86	80,84	97,74	98,28	109,19	102,51	86,89	80,94	71,02	41,16
9:43	57,37	54,70	81,98	89,25	108,24	103,00	113,89	105,96	93,75	82,52	71,24	42,34
9:53	61,25	53,34	84,78	93,08	106,01	105,72	118,22	111,44	101,45	85,06	71,14	48,34
10:03	66,26	59,06	86,80	98,60	105,80	109,76	122,61	114,71	101,58	86,44	71,78	52,17
10:13	68,70	62,15	84,50	104,49	111,27	116,07	127,79	117,80	106,84	90,26	73,43	57,96
10:23	65,48	68,61	92,96	105,46	110,37	117,42	131,13	121,67	107,97	92,92	78,02	62,71
10:33	66,34	70,81	94,49	107,37	115,78	118,03	132,97	125,54	112,77	96,06	83,07	64,00
10:43	71,94	72,79	99,05	105,78	120,89	121,03	134,95	128,52	115,61	96,16	84,53	66,02
10:53	79,30	74,74	106,04	111,18	119,98	122,99	136,23	129,42	116,78	96,75	85,82	64,28
11:03	79,80	73,28	107,03	110,12	120,62	125,58	139,23	128,20	116,36	93,07	92,54	64,00
11:13	81,90	72,68	104,60	111,09	123,75	131,19	142,44	126,93	117,71	97,86	93,33	61,66
11:23	87,91	74,20	108,77	116,50	128,70	134,64	144,50	129,33	123,08	102,26	95,65	64,50
11:33	88,36	84,44	110,98	116,88	120,03	132,05	146,52	129,10	122,75	101,94	93,07	61,28
11:43	96,49	77,36	109,39	114,74	120,21	135,63	148,07	135,09	126,73	103,22	84,85	68,18
11:53	96,55	82,37	111,12	110,26	121,53	135,77	148,61	136,62	126,75	97,99	81,90	72,57
12:03	97,03	86,45	111,25	112,72	124,55	135,81	148,03	136,47	125,83	103,91	82,78	65,16
12:13	93,33	80,81	109,24	113,84	121,21	139,25	150,04	138,73	128,70	105,19	81,80	63,61
12:23	96,07	82,39	114,25	116,19	123,31	136,77	149,24	136,82	127,35	103,11	78,23	75,22
12:33	104,34	79,06	116,20	116,70	122,26	140,16	149,88	137,64	125,74	98,04	79,07	79,29
12:43	103,87	81,31	108,03	115,64	117,69	138,61	148,91	136,50	125,53	95,56	76,43	65,80
12:53	99,93	79,17	105,06	111,47	111,63	132,55	147,85	136,03	124,34	108,52	73,14	65,54
13:03	103,01	80,42	102,90	109,83	111,12	132,56	145,42	135,21	123,58	108,86	84,71	65,15
13:13	95,46	80,68	97,48	109,60	107,73	134,78	145,19	134,18	124,88	105,78	78,99	62,38
13:23	93,86	87,45	98,94	112,60	106,83	132,28	144,92	137,32	122,66	95,47	69,91	57,40
13:33	98,55	83,84	98,53	111,95	106,52	133,86	142,38	132,84	118,88	98,67	67,55	55,43
13:43	94,93	80,22	98,41	108,93	109,13	131,62	140,26	132,74	118,10	94,30	75,94	65,58
13:53	90,51	78,32	97,86	108,40	103,19	128,24	138,87	130,21	115,96	93,68	77,32	63,40
14:03	88,61	73,43	93,70	105,94	98,15	124,73	136,10	125,00	114,35	88,75	73,52	59,04
14:13	87,07	73,11	94,07	102,80	97,10	121,69	131,77	120,65	111,84	82,17	67,98	55,28
14:23	84,49	62,16	92,89	98,27	95,80	119,50	129,65	119,04	106,08	79,79	62,74	47,05
14:33	86,51	61,38	90,92	99,71	95,33	114,87	124,98	115,98	100,11	79,44	61,17	44,88
14:43	78,77	61,97	84,44	96,40	94,38	111,57	119,89	109,67	97,97	74,79	52,80	41,58
14:53	70,68	68,21	83,08	91,14	93,43	106,64	115,91	105,84	92,66	66,27	49,45	40,32
15:03	65,27	56,77	76,74	90,92	89,26	102,11	113,55	101,55	90,31	63,46	46,72	38,60
15:13	58,64	60,79	70,53	86,41	84,49	97,12	108,20	98,64	82,94	60,79	41,05	34,96
15:23	49,89	53,64	68,41	78,94	76,07	93,91	102,16	93,01	80,10	56,99	39,70	34,04
15:33	46,28	47,31	62,03	74,78	70,39	88,28	97,41	88,01	74,80	50,28	36,56	29,71
15:43	42,38	42,11	56,64	71,50	68,67	81,80	92,29	81,55	65,10	45,75	31,43	27,41
15:53	38,31	46,62	53,83	66,07	67,87	77,56	88,09	75,94	60,77	44,74	26,95	21,29
16:03	34,96	41,76	52,05	64,21	61,13	71,53	82,54	68,36	57,02	40,98	17,68	12,31
16:13	29,81	33,39	44,51	56,32	55,96	65,90	75,64	61,90	48,90	35,44	13,12	8,95
16:23	25,63	23,93	37,59	51,76	50,46	59,71	69,31	56,72	41,12	29,48	7,96	6,85
16:33	19,33	22,42	30,84	45,05	45,62	52,98	62,66	48,34	35,92	22,71	5,34	4,54
16:43	15,25	20,24	28,25	38,44	40,39	49,20	55,87	42,37	31,31	18,28	3,26	2,80
16:53	8,96	19,30	24,31	32,54	35,72	44,38	49,56	37,37	24,99	14,17	1,46	1,93
17:03	6,39	14,17	20,08	28,58	32,25	38,96	43,27	31,12	20,63	9,91	0,41	1,15
17:13	4,12	9,71	17,01	24,07	28,46	33,94	37,50	25,83	15,75	6,31	0,15	0,00
17:23	2,09	7,21	13,97	19,52	24,30	29,00	31,36	20,87	12,81	3,28	0,00	0,00
17:33	1,03	4,82	9,32	15,78	20,51	24,03	26,14	16,46	8,82	1,31	0,00	0,00
17:43	0,41	2,76	7,25	11,83	16,70	19,60	20,99	12,27	5,92	0,43	0,00	0,00
17:53	0,00	1,21	4,22	8,60	12,98	15,72	16,15	9,03	4,25	0,14	0,00	0,00
18:03	0,00	0,00	2,50	6,63	9,96	12,19	12,28	5,87	2,04	0,00	0,00	0,00
18:13	0,00	0,00	1,04	4,73	8,02	9,02	8,54	3,87	0,82	0,00	0,00	0,00
18:23	0,00	0,00	0,33	2,67	5,22	7,31	6,40	2,22	0,33	0,00	0,00	0,00
18:33	0,00	0,00	0,12	1,65	3,95	5,64	4,74	1,58	0,18	0,00	0,00	0,00
18:43	0,00	0,00	0,00	0,75	2,67	4,52	3,92	0,91	0,10	0,00	0,00	0,00
18:53	0,00	0,00	0,00	0,31	1,62	3,73	3,23	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00
19:03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,82	2,67	2,38	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
19:13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	1,47	1,47	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
19:23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,50	0,66	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
19:33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Συνολική	562,07	522,05	745,68	846,99	920,50	1019,67	1119,59	1009,51	892,91	705,87	532,93	390,38
Μέρες:	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
MWh	17,42	14,62	23,12	25,41	28,54	30,59	34,71	31,29	26,79	21,88	15,99	12,10
Ετήσια GWh	0,28											

Πίνακας 7 : Παραγωγή φωτοβολταϊκών πάνελ με απώλειες ρύπανσης.

Χρόνος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαί	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
5:23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,14	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,21	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,75	0,64	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
5:53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,88	1,56	1,35	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00
6:03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,83	2,58	2,28	0,54	0,07	0,00	0,00	0,00
6:13	0,00	0,00	0,00	0,55	3,00	3,47	3,22	1,19	0,15	0,00	0,00	0,00
6:23	0,00	0,00	0,05	1,30	5,01	5,00	4,34	2,71	0,76	0,08	0,00	0,00
6:33	0,00	0,00	0,11	3,10	7,06	6,88	6,17	5,04	2,32	0,21	0,00	0,00
6:43	0,00	0,00	0,43	5,10	10,38	10,70	9,90	7,70	4,75	0,94	0,00	0,00
6:53	0,00	0,00	1,26	7,76	14,11	13,62	14,31	11,69	8,57	2,95	0,13	0,00
7:03	0,00	0,00	2,56	10,75	18,96	17,62	18,47	16,01	13,57	5,94	0,51	0,00
7:13	0,00	0,00	4,76	14,38	24,15	22,90	23,72	21,20	18,16	10,37	1,45	0,00
7:23	0,00	0,00	7,70	18,21	29,40	27,64	29,33	26,32	23,89	15,40	3,18	0,11
7:33	0,19	0,46	12,42	21,79	35,41	33,20	35,53	32,17	29,13	19,95	4,87	0,37
7:43	0,28	1,32	16,57	25,73	41,39	38,70	41,50	37,66	34,06	27,19	7,04	1,12
7:53	0,73	2,95	21,56	31,29	45,41	44,25	47,53	43,35	39,13	31,63	9,34	3,14
8:03	1,88	5,13	26,76	36,50	51,66	50,39	52,85	49,88	43,40	38,44	11,70	4,99
8:13	3,85	7,97	33,53	39,72	55,53	56,04	59,71	55,99	51,13	40,20	18,88	6,70
8:23	5,77	11,48	37,82	45,31	61,50	61,67	65,77	60,59	56,36	46,63	26,02	8,47
8:33	8,31	15,02	43,00	51,38	67,46	66,63	71,68	65,21	62,20	51,83	32,44	9,76
8:43	11,36	18,17	49,57	55,12	71,42	71,73	77,14	71,46	67,11	53,33	41,02	12,30
8:53	15,24	24,02	54,59	61,53	75,45	73,80	82,39	76,82	71,75	60,71	45,84	16,24
9:03	20,86	32,52	58,51	67,00	79,32	78,94	87,98	81,97	76,92	63,30	52,02	21,42
9:13	27,96	40,33	64,34	70,90	81,80	82,96	92,55	86,79	78,01	65,60	59,26	25,22
9:23	37,17	43,40	68,22	73,79	91,40	85,91	97,04	90,54	80,85	71,56	63,13	36,44
9:33	47,85	47,30	72,25	75,99	90,90	93,36	101,55	95,33	81,68	76,09	66,76	39,10
9:43	55,08	51,96	77,06	83,90	100,66	97,85	105,92	98,54	88,12	77,57	66,97	40,22
9:53	58,80	50,67	79,69	87,49	98,59	100,43	109,95	103,64	95,37	79,96	66,87	45,92
10:03	63,61	56,11	81,60	92,69	98,40	104,27	114,03	106,68	95,48	81,26	67,47	49,56
10:13	65,96	59,04	79,43	98,22	103,48	110,26	118,84	109,55	100,43	84,85	69,02	55,06
10:23	62,86	65,18	87,39	99,14	102,64	111,55	121,95	113,15	101,49	87,34	73,34	59,57
10:33	63,69	67,27	88,82	100,93	107,68	112,12	123,67	116,75	106,00	90,29	78,08	60,80
10:43	69,06	69,15	93,10	99,43	112,43	114,98	125,50	119,52	108,68	90,39	79,46	62,72
10:53	76,13	71,01	99,68	104,50	111,58	116,84	126,69	120,36	109,77	90,94	80,68	61,06
11:03	76,61	69,61	100,61	103,51	112,18	119,30	129,49	119,23	109,38	87,49	86,99	60,80
11:13	78,62	69,04	98,32	104,43	115,09	124,63	132,47	118,04	110,65	91,99	87,73	58,57
11:23	84,40	70,49	102,24	109,51	119,69	127,91	134,38	120,28	115,69	96,12	89,91	61,28
11:33	84,83	80,22	104,32	109,87	111,63	125,45	136,27	120,06	115,39	95,82	87,49	58,22
11:43	92,63	73,50	102,83	107,85	111,80	128,85	137,70	125,63	119,13	97,02	79,76	64,77
11:53	92,69	78,25	104,45	103,64	113,02	128,98	138,21	127,06	119,14	92,11	76,99	68,94
12:03	93,15	82,12	104,58	105,96	115,83	129,02	137,67	126,92	118,28	97,68	77,82	61,90
12:13	89,60	76,77	102,69	107,01	112,72	132,29	139,54	129,02	120,98	98,88	76,89	60,43
12:23	92,23	78,27	107,40	109,22	114,68	129,93	138,79	127,24	119,71	96,92	73,53	71,46
12:33	100,16	75,10	109,22	109,70	113,71	133,15	139,39	128,00	118,19	92,16	74,33	75,33
12:43	99,71	77,24	101,55	108,70	109,45	131,68	138,49	126,94	118,00	89,82	71,84	62,51
12:53	95,94	75,22	98,76	104,78	103,82	125,92	137,50	126,51	116,88	102,01	68,75	62,27
13:03	98,89	76,40	96,72	103,24	103,34	125,93	135,24	125,75	116,16	102,33	79,63	61,89
13:13	91,64	76,65	91,63	103,03	100,19	128,04	135,02	124,78	117,39	99,43	74,25	59,26
13:23	90,10	83,08	93,01	105,84	99,35	125,67	134,77	127,71	115,30	89,74	65,71	54,53
13:33	94,61	79,65	92,62	105,23	99,06	127,17	132,42	123,54	111,74	92,75	63,50	52,66
13:43	91,13	76,21	92,50	102,39	101,49	125,04	130,44	123,45	111,01	88,65	71,39	62,30
13:53	86,89	74,40	91,99	101,90	95,97	121,83	129,15	121,10	109,01	88,06	72,68	60,23
14:03	85,06	69,76	88,07	99,58	91,28	118,50	126,57	116,25	107,49	83,43	69,11	56,08
14:13	83,59	69,46	88,43	96,63	90,30	115,61	122,55	112,21	105,13	77,24	63,90	52,51
14:23	81,11	59,05	87,32	92,37	89,09	113,52	120,57	110,71	99,72	75,01	58,97	44,70
14:33	83,05	58,31	85,46	93,73	88,66	109,12	116,23	107,86	94,11	74,67	57,50	42,64
14:43	75,62	58,87	79,37	90,61	87,77	105,99	111,49	101,99	92,09	70,31	49,63	39,50
14:53	67,85	64,80	78,09	85,67	86,89	101,31	107,80	98,44	87,10	62,30	46,48	38,31
15:03	62,66	53,93	72,13	85,47	83,01	97,00	105,60	94,44	84,89	59,65	43,91	36,67
15:13	56,29	57,75	66,29	81,23	78,58	92,26	100,62	91,74	77,96	57,14	38,59	33,21
15:23	47,90	50,96	64,31	74,20	70,75	89,21	95,01	86,50	75,30	53,57	37,32	32,34
15:33	44,43	44,94	58,31	70,29	65,47	83,86	90,59	81,85	70,31	47,27	34,36	28,23
15:43	40,68	40,01	53,24	67,21	63,86	77,71	85,83	75,84	61,20	43,00	29,54	26,32
15:53	36,78	44,29	50,60	62,11	63,12	73,68	81,92	70,63	57,12	42,05	25,33	20,41
16:03	33,56	39,67	48,92	60,36	56,85	67,95	76,76	63,58	53,60	38,52	16,62	11,69
16:13	28,62	31,72	41,84	52,94	52,05	62,60	70,35	57,57	45,97	33,32	12,33	8,50
16:23	24,60	22,73	35,33	48,66	46,93	56,72	64,46	52,75	38,65	27,71	7,48	6,50
16:33	18,56	21,30	28,99	42,35	42,42	50,33	58,28	44,96	33,76	21,35	5,02	4,31
16:43	14,64	19,23	26,55	36,13	37,56	46,74	51,96	39,41	29,43	17,18	3,06	2,66
16:53	8,60	18,33	22,85	30,59	33,22	42,16	46,09	34,76	23,49	13,32	1,37	1,84
17:03	6,14	13,47	18,88	26,86	29,99	37,01	40,24	28,94	19,39	9,32	0,38	1,10
17:13	3,96	9,22	15,99	22,62	26,47	32,24	34,88	24,02	14,80	5,94	0,15	0,00
17:23	2,00	6,85	13,13	18,34	22,60	27,55	29,17	19,41	12,04	3,09	0,00	0,00
17:33	0,99	4,58	8,76	14,84	19,08	22,83	24,31	15,31	8,29	1,23	0,00	0,00
17:43	0,40	2,63	6,82	11,12	15,53	18,82	19,52	11,41	5,57	0,41	0,00	0,00
17:53	0,00	1,15	3,97	8,08	12,07	14,93	15,02	8,39	4,00	0,13	0,00	0,00
18:03	0,00	0,00	2,35	6,24	9,26	11,58	11,42	5,46	1,92	0,00	0,00	0,00
18:13	0,00	0,00	0,98	4,45	7,46	8,57	7,94	3,60	0,77	0,00	0,00	0,00
18:23	0,00	0,00	0,31	2,51	4,85	6,94	5,95	2,07	0,31	0,00	0,00	0,00
18:33	0,00	0,00	0,11	1,55	3,67	5,36	4,41	1,47	0,17	0,00	0,00	0,00
18:43	0,00	0,00	0,00	0,71	2,48	4,29	3,65	0,85	0,09	0,00	0,00	0,00
18:53	0,00	0,00	0,00	0,29	1,50	3,55	3,01	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00
19:03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77	2,53	2,22	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
19:13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	1,39	1,37	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
19:23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,48	0,62	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
19:33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Συνολική	539,59	495,95	700,94	796,17	856,06	968,68	1041,22	938,84	839,34	663,51	500,95	370,86
Μέρες:	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
MWh	16,73	13,89	21,73	23,89	26,54	29,06	32,28	29,10	25,18	20,57	15,03	11,50

Ετήσια GWh 0,27

Πίνακας 8 : Παραγωγή φωτοβολταϊκών πάνελ με απώλειες εσωτερικού δικτύου & διασυνδέσεων.

Χρόνος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
5:23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,11	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,16	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,57	0,49	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
5:53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	1,18	1,03	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
6:03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,39	1,95	1,73	0,41	0,05	0,00	0,00	0,00
6:13	0,00	0,00	0,00	0,42	2,36	2,74	2,44	0,90	0,11	0,00	0,00	0,00
6:23	0,00	0,00	0,04	0,99	3,94	3,94	3,42	2,05	0,57	0,06	0,00	0,00
6:33	0,00	0,00	0,08	2,44	6,26	6,10	5,47	3,97	1,83	0,16	0,00	0,00
6:43	0,00	0,00	0,32	4,52	9,20	9,48	8,78	6,83	4,21	0,71	0,00	0,00
6:53	0,00	0,00	0,96	6,87	12,99	12,54	12,68	10,36	7,60	2,32	0,10	0,00
7:03	0,00	0,00	2,02	9,53	17,46	16,22	17,01	14,74	12,03	5,27	0,39	0,00
7:13	0,00	0,00	3,75	13,24	22,24	21,08	21,84	19,52	16,72	9,19	1,10	0,00
7:23	0,00	0,00	6,82	16,77	27,07	25,45	27,01	24,23	21,99	13,65	2,50	0,08
7:33	0,14	0,35	11,01	20,06	32,61	30,57	32,72	29,63	26,83	18,37	4,31	0,28
7:43	0,22	1,04	15,26	23,69	38,12	35,64	38,22	34,68	31,36	25,03	6,24	0,88
7:53	0,57	2,32	19,85	28,81	41,98	40,91	43,94	40,08	36,04	29,13	8,28	2,47
8:03	1,66	4,55	24,64	33,61	47,76	46,58	48,85	46,11	40,12	35,40	10,77	4,41
8:13	3,41	7,06	30,88	36,72	51,34	51,81	55,20	51,76	47,26	37,03	17,38	5,93
8:23	5,31	10,18	34,83	41,88	56,85	57,01	60,81	56,02	52,10	43,10	23,96	7,79
8:33	7,85	13,31	39,75	47,50	62,37	61,60	66,28	60,29	57,51	47,92	29,87	8,97
8:43	10,46	16,10	45,82	50,96	66,03	66,50	71,51	66,25	62,21	49,30	37,78	11,31
8:53	14,03	22,12	50,47	56,89	69,76	68,41	76,39	71,22	66,51	56,12	42,38	14,94
9:03	19,28	29,95	54,09	62,11	73,54	73,18	81,57	75,99	71,31	58,52	48,09	19,70
9:13	25,84	37,14	59,49	65,72	75,84	76,92	85,81	80,47	72,32	60,65	54,79	23,19
9:23	34,36	39,97	63,07	68,41	84,75	79,66	89,97	83,95	74,96	66,34	58,37	33,64
9:33	44,24	43,56	66,98	70,45	84,28	86,56	94,16	88,39	75,73	70,54	61,72	36,09
9:43	50,92	47,86	71,45	77,78	93,34	90,72	98,21	91,37	81,70	71,91	61,92	37,13
9:53	54,50	46,67	73,88	81,12	91,41	93,12	101,95	96,10	87,62	74,13	61,82	42,39
10:03	58,96	51,87	75,65	85,16	91,24	96,69	105,74	98,03	87,73	75,33	62,38	45,75
10:13	60,98	54,58	73,64	90,25	95,95	101,32	109,21	100,67	92,28	78,66	63,81	50,83
10:23	58,27	60,26	81,02	91,09	95,18	102,51	112,07	103,98	93,26	80,98	67,81	54,99
10:33	59,04	62,20	82,35	92,74	98,95	103,03	113,65	107,29	97,40	83,72	72,39	56,12
10:43	64,02	63,94	86,32	91,36	103,31	105,66	115,34	109,84	99,86	83,81	73,66	57,90
10:53	70,58	65,65	91,59	96,03	102,53	107,37	116,43	110,61	100,87	84,32	74,79	56,37
11:03	71,02	64,36	92,44	95,11	103,08	109,63	119,00	109,57	100,51	81,12	80,65	56,12
11:13	72,89	63,83	90,34	95,95	105,76	114,53	121,74	108,48	101,67	85,29	81,34	54,07
11:23	78,25	65,18	93,95	100,63	109,99	117,55	123,51	110,53	106,32	89,13	83,36	56,57
11:33	77,94	74,17	95,86	100,96	102,58	115,29	125,24	110,33	106,03	88,84	81,12	53,74
11:43	85,11	67,95	94,48	100,01	102,73	118,42	126,56	115,46	109,47	89,96	73,94	59,95
11:53	85,16	72,35	95,98	96,10	103,86	118,54	127,02	116,77	109,49	85,40	71,38	63,81
12:03	85,59	75,94	96,09	97,36	106,44	118,57	126,53	116,64	108,70	90,57	72,14	57,14
12:13	82,32	70,98	94,36	98,33	103,58	121,58	128,25	118,58	111,18	91,68	71,28	55,78
12:23	84,74	72,37	98,69	100,36	105,38	119,41	127,56	116,94	110,01	89,87	68,17	66,15
12:33	92,03	69,44	100,37	100,81	104,49	122,37	128,11	117,64	108,61	85,45	68,90	69,73
12:43	91,62	71,42	93,31	99,89	100,57	121,02	127,28	116,66	108,44	83,28	66,60	57,71
12:53	88,15	69,55	90,74	96,28	96,26	115,72	126,37	116,26	107,41	94,59	63,57	57,48
13:03	90,86	70,64	88,87	94,87	95,83	115,73	124,30	115,56	106,75	94,88	73,82	57,13
13:13	84,97	70,87	84,96	94,67	92,90	117,67	124,10	114,68	107,88	92,20	68,83	54,71
13:23	82,79	76,82	86,24	97,26	92,12	115,49	123,86	117,37	105,95	83,21	60,75	50,34
13:33	86,93	73,64	85,87	96,69	91,85	116,87	121,70	113,53	102,68	86,00	58,70	48,60
13:43	84,50	70,47	85,77	94,09	94,11	114,91	119,88	113,45	102,01	82,19	66,00	57,51
13:53	80,56	68,79	85,29	94,48	88,98	111,96	118,69	111,29	100,17	81,65	67,20	55,60
14:03	78,86	64,49	81,66	91,50	84,63	108,89	116,32	106,82	98,77	77,35	63,90	51,77
14:13	77,50	64,22	81,99	89,60	83,73	106,24	112,62	103,11	96,60	71,60	59,08	48,47
14:23	75,20	54,39	80,96	85,65	82,60	104,32	110,80	101,73	91,63	69,53	54,52	41,26
14:33	76,99	53,71	79,24	86,91	82,20	100,27	106,81	99,11	87,26	69,22	53,16	39,21
14:43	70,10	54,43	73,59	84,01	81,38	98,28	103,39	94,57	85,39	65,18	45,88	36,32
14:53	62,90	59,68	72,40	79,43	80,56	93,94	99,96	91,27	80,75	57,59	42,97	35,22
15:03	57,93	49,67	66,87	79,24	76,96	89,94	97,92	87,56	78,70	55,15	40,59	33,72
15:13	52,04	53,19	61,29	75,31	72,85	85,54	93,30	85,06	72,28	52,83	35,54	30,54
15:23	44,28	46,94	59,45	68,61	65,41	82,71	88,09	80,19	69,81	49,53	34,37	29,74
15:33	41,07	41,39	53,91	65,16	60,53	77,75	83,99	75,88	65,18	43,53	31,65	25,96
15:43	37,47	36,84	49,22	62,14	59,04	72,04	79,57	70,31	56,58	39,60	27,20	24,20
15:53	33,87	40,79	46,78	57,42	58,35	68,30	75,95	65,47	52,81	38,73	23,32	18,77
16:03	30,90	35,16	45,23	55,80	52,56	62,83	70,98	58,78	49,55	35,48	14,73	10,35
16:13	26,36	28,11	38,53	48,94	48,11	57,88	65,04	53,22	42,50	30,68	10,93	7,52
16:23	22,66	20,15	32,54	44,98	43,38	52,44	59,60	48,76	35,73	25,52	6,63	5,12
16:33	17,09	18,88	26,70	39,15	39,22	46,53	53,88	41,56	31,21	19,66	3,95	3,39
16:43	12,97	17,04	24,45	33,28	34,59	43,21	48,03	36,43	27,10	15,23	2,41	2,01
16:53	7,63	14,44	21,04	28,17	30,59	38,97	42,61	32,13	21,63	11,80	1,04	1,39
17:03	5,44	10,61	17,38	24,74	27,62	34,08	37,20	26,65	17,86	8,26	0,29	0,83
17:13	3,12	7,26	14,17	20,83	24,38	29,69	32,12	22,12	13,63	4,68	0,11	0,00
17:23	1,52	5,20	11,63	16,89	20,81	25,37	26,86	17,87	10,67	2,43	0,00	0,00
17:33	0,75	3,47	7,76	13,15	17,57	21,02	22,38	14,10	7,35	0,93	0,00	0,00
17:43	0,30	1,99	5,37	9,86	13,77	17,14	17,97	10,50	4,93	0,31	0,00	0,00
17:53	0,00	0,87	3,12	7,16	10,70	13,75	13,83	7,44	3,15	0,10	0,00	0,00
18:03	0,00	0,00	1,78	4,91	8,21	10,26	10,13	4,84	1,45	0,00	0,00	0,00
18:13	0,00	0,00	0,74	3,37	5,88	7,59	7,04	2,84	0,58	0,00	0,00	0,00
18:23	0,00	0,00	0,24	1,90	3,82	5,47	4,69	1,57	0,23	0,00	0,00	0,00
18:33	0,00	0,00	0,08	1,17	2,78	4,22	3,34	1,11	0,13	0,00	0,00	0,00
18:43	0,00	0,00	0,00	0,54	1,88	3,38	2,77	0,64	0,07	0,00	0,00	0,00
18:53	0,00	0,00	0,00	0,22	1,14	2,69	2,28	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
19:03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	1,92	1,68	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
19:13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	1,06	1,04	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
19:23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,36	0,47	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
19:33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Συνολική	497,80	455,40	646,29	733,50	789,62	891,80	958,78	864,65	772,82	613,65	462,78	341,51
Μέρες:	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
MWh	15,43	12,75	20,04	22,00	24,48	26,75	29,72	26,80	23,18	19,02	13,88	10,59
Ετήσια GWh	0,24											

Πίνακας 9 : Παραγωγή φωτοβολταϊκών πánελ με απώλειες αντιστροφά.

Χρόνος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
5:23					0,04	0,11	0,09					
5:33					0,10	0,16	0,15					
5:43					0,24	0,57	0,49	0,07				
5:53					0,67	1,18	1,03	0,18				
6:03					1,39	1,95	1,73	0,41	0,05			
6:13				0,42	2,36	2,73	2,44	0,90	0,11			
6:23			0,04	0,99	3,94	3,94	3,42	2,05	0,57	0,06		
6:33			0,08	2,44	6,25	6,09	5,46	3,97	1,83	0,16		
6:43			0,32	4,51	9,18	9,46	8,76	6,82	4,21	0,71		
6:53			0,96	6,86	12,95	12,50	12,64	10,33	7,59	2,32	0,10	
7:03			2,02	9,51	17,38	16,16	16,94	14,68	12,00	5,26	0,39	
7:13			3,75	13,19	22,12	20,97	21,73	19,43	16,65	9,17	1,10	
7:23			6,81	16,70	26,89	25,29	26,83	24,09	21,88	13,60	2,50	0,08
7:33	0,14	0,35	10,98	19,96	32,35	30,34	32,45	29,41	26,65	18,29	4,31	0,28
7:43	0,22	1,04	15,20	23,56	37,76	35,33	37,86	34,39	31,12	24,88	6,23	0,88
7:53	0,57	2,32	19,75	28,61	41,55	40,50	43,47	39,68	35,72	28,92	8,26	2,47
8:03	1,66	4,54	24,49	33,34	47,20	46,05	48,27	45,59	39,73	35,09	10,74	4,41
8:13	3,41	7,05	30,64	36,39	50,70	51,16	54,46	51,11	46,72	36,69	17,31	5,92
8:23	5,30	10,15	34,53	41,45	56,07	56,23	59,92	55,26	51,44	42,65	23,82	7,77
8:33	7,64	13,27	39,36	46,95	61,43	60,68	65,22	59,41	56,71	47,36	29,65	8,95
8:43	10,44	16,04	45,31	50,33	64,98	65,43	70,28	65,19	61,27	48,71	37,43	11,28
8:53	13,98	22,00	49,85	56,10	68,59	67,28	74,99	70,00	65,45	55,36	41,94	14,88
9:03	19,19	29,73	53,38	61,18	72,24	71,89	79,98	74,60	70,09	57,69	47,53	19,60
9:13	25,68	36,80	58,63	64,68	74,46	75,50	84,05	78,92	71,06	59,76	54,06	23,06
9:23	34,07	39,58	62,11	67,28	83,03	78,13	88,04	82,26	73,61	65,28	57,54	33,36
9:33	43,76	43,10	65,89	69,25	82,58	84,77	92,05	86,52	74,35	69,34	60,80	35,77
9:43	50,29	47,30	70,22	76,33	91,26	88,76	95,92	89,38	80,10	70,67	60,99	36,79
9:53	53,78	46,14	72,57	79,54	89,42	91,06	99,49	93,90	85,79	72,81	60,90	41,95
10:03	58,12	51,22	74,27	83,43	89,25	94,46	103,09	95,74	85,89	73,97	61,44	45,24
10:13	60,08	53,86	72,34	88,30	93,76	98,88	106,39	98,26	90,25	77,18	62,83	50,20
10:23	57,45	59,38	79,45	89,11	93,02	100,01	109,10	101,41	91,18	79,41	66,70	54,26
10:33	58,19	61,26	80,73	90,69	96,62	100,52	110,60	104,56	95,15	82,04	71,13	55,36
10:43	63,03	62,95	84,54	89,37	100,78	103,01	112,20	106,98	97,49	82,13	72,36	57,09
10:53	69,38	64,61	89,59	93,83	100,04	104,64	113,24	107,72	98,45	82,62	73,45	55,60
11:03	69,80	63,36	90,40	92,96	100,56	106,79	115,67	106,73	98,11	79,54	79,09	55,36
11:13	71,61	62,85	88,39	93,76	103,11	111,44	118,26	105,69	99,22	83,55	79,75	53,36
11:23	76,78	64,15	91,84	98,22	107,13	114,30	119,92	107,64	103,64	87,23	81,70	55,79
11:33	76,48	72,85	93,67	98,54	100,08	112,15	121,56	107,46	103,37	86,96	79,54	53,04
11:43	83,38	66,84	92,36	97,63	100,23	115,11	122,80	112,31	106,64	88,03	72,63	59,08
11:53	83,43	71,09	93,79	93,90	101,30	115,23	123,24	113,55	106,66	83,66	70,15	62,83
12:03	83,84	74,55	93,90	95,11	103,76	115,26	122,77	113,43	105,90	88,61	70,89	56,35
12:13	80,70	69,77	92,24	96,03	101,04	118,10	124,39	115,26	108,26	89,68	70,06	55,03
12:23	83,02	71,11	96,37	97,97	102,75	116,05	123,74	113,72	107,15	87,94	67,05	65,09
12:33	90,02	68,28	97,97	98,39	101,90	118,85	124,26	114,38	105,82	83,70	67,76	68,56
12:43	89,62	70,19	91,24	97,52	98,17	117,57	123,48	113,45	105,66	81,62	65,53	56,90
12:53	86,29	68,38	88,78	94,08	94,06	112,57	122,62	113,08	104,68	92,46	62,59	56,68
13:03	88,89	69,44	86,99	92,72	93,64	112,57	120,67	112,41	104,05	92,74	72,51	56,34
13:13	83,24	69,66	83,23	92,53	90,84	114,41	120,48	111,57	105,12	90,17	67,69	53,98
13:23	81,15	75,40	84,46	95,01	90,10	112,34	120,26	114,12	103,29	81,55	59,86	49,72
13:33	85,12	72,34	84,11	94,47	89,84	113,65	118,21	110,49	100,18	84,23	57,87	48,03
13:43	82,79	69,27	84,01	91,98	92,00	111,80	116,50	110,41	99,54	80,57	64,95	56,71
13:53	79,00	67,65	83,55	92,36	87,09	109,00	115,38	108,36	97,78	80,05	66,11	54,85
14:03	77,37	63,49	80,06	89,51	82,92	106,09	113,13	104,12	96,45	75,91	62,91	51,12
14:13	76,06	63,22	80,38	87,68	82,05	103,56	109,63	100,59	94,38	70,37	58,23	47,90
14:23	73,84	53,67	79,39	83,89	80,97	101,74	107,90	99,27	89,63	68,37	53,80	40,84
14:33	75,57	53,01	77,73	85,10	80,58	97,89	104,11	96,78	85,44	68,07	52,47	38,83
14:43	68,92	53,71	72,29	82,33	79,79	95,99	100,85	92,44	83,64	64,15	45,37	36,00
14:53	61,94	58,82	71,14	77,92	79,00	91,84	89,28	79,19	56,79	42,52	34,92	
15:03	57,12	49,07	65,79	77,73	75,54	88,01	95,64	85,73	77,22	54,41	40,19	33,44
15:13	51,39	52,50	60,38	73,95	71,57	83,79	91,23	83,32	71,02	52,15	35,23	30,31
15:23	43,80	46,40	58,60	67,47	64,38	81,08	86,24	78,65	68,63	48,93	34,08	29,52
15:33	40,66	40,97	53,20	64,14	59,64	76,30	82,30	74,50	64,15	43,07	31,40	25,79
15:43	37,12	36,51	48,63	61,20	58,20	70,79	78,05	69,12	55,80	39,22	27,02	24,06
15:53	33,59	40,38	46,25	56,62	57,53	67,18	74,56	64,44	52,13	38,36	23,19	18,68
16:03	30,67	34,86	44,73	55,05	51,89	61,87	69,76	57,94	48,95	35,17	14,68	10,32
16:13	26,19	27,92	38,16	48,36	47,55	57,07	64,02	52,54	42,06	30,45	10,90	7,51
16:23	22,53	20,05	32,28	44,49	42,92	51,77	58,74	48,18	35,42	25,36	6,62	5,11
16:33	17,02	18,79	26,52	38,77	38,84	46,00	53,17	41,14	30,97	19,56	3,95	3,39
16:43	12,93	16,97	24,30	33,00	34,30	42,76	47,47	36,10	26,92	15,17	2,41	2,01
16:53	7,61	14,39	20,93	27,98	30,36	38,60	42,17	31,87	21,52	11,77	1,04	1,39
17:03	5,43	10,58	17,31	24,59	27,43	33,80	36,86	26,48	17,78	8,24	0,29	0,83
17:13	3,12	7,25	14,12	20,72	24,23	29,47	31,87	22,00	13,59	4,67	0,11	
17:23	1,52	5,19	11,60	16,82	20,70	25,21	26,68	17,79	10,64	2,43		
17:33	0,75	3,47	7,75	13,11	17,49	20,91	22,26	14,05	7,34	0,93		
17:43	0,30	1,99	5,36	9,83	13,72	17,07	17,89	10,48	4,93	0,31		
17:53		0,87	3,12	7,15	10,67	13,70	13,78	7,43	3,15	0,10		
18:03			1,78	4,91	8,19	10,24	10,10	4,83	1,45			
18:13			0,74	3,37	5,87	7,58	7,02	2,83	0,58			
18:23			0,24	1,90	3,82	5,46	4,69	1,57	0,23			
18:33			0,08	1,17	2,78	4,22	3,34	1,11	0,13			
18:43				0,54	1,88	3,38	2,77	0,64	0,07			
18:53				0,22	1,14	2,69	2,28	0,30				
19:03					0,58	1,92	1,68	0,12				
19:13					0,20	1,06	1,04	0,08				
19:23					0,11	0,36	0,47	0,04				
19:33						0,16	0,13					
Συνολική	489,49	448,99	634,66	719,50	774,17	872,08	936,06	845,51	756,93	603,06	455,94	337,48
Μέρες:	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
MWh	15,17	12,57	19,67	21,58	24,00	26,16	29,02	26,21	22,71	18,69	13,68	10,46
Ετήσια GWh	0,24											

Πίνακας 10 : Παραγωγή φωτοβολταϊκών πάνελ με απώλειες μετασχηματιστή.

Χρόνος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
5:23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,10	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,16	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,55	0,45	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
5:53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	1,14	0,95	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
6:03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,37	1,89	1,61	0,39	0,05	0,00	0,00	0,00
6:13	0,00	0,00	0,00	0,41	2,32	2,65	2,26	0,86	0,11	0,00	0,00	0,00
6:23	0,00	0,00	0,03	0,97	3,87	3,82	3,18	1,96	0,57	0,06	0,00	0,00
6:33	0,00	0,00	0,07	2,41	6,15	5,90	5,08	3,79	1,82	0,16	0,00	0,00
6:43	0,00	0,00	0,26	4,46	9,03	9,17	8,13	6,51	4,19	0,71	0,00	0,00
6:53	0,00	0,00	0,77	6,79	12,73	12,12	11,75	9,87	7,56	2,31	0,10	0,00
7:03	0,00	0,00	1,62	9,41	17,09	15,66	15,74	14,03	11,96	5,24	0,39	0,00
7:13	0,00	0,00	3,00	13,06	21,75	20,33	20,18	18,56	16,61	9,14	1,09	0,00
7:23	0,00	0,00	5,45	16,53	26,44	24,51	24,93	23,01	21,81	13,56	2,49	0,08
7:33	0,12	0,35	8,80	19,75	31,81	29,41	30,15	28,10	26,57	18,24	4,29	0,28
7:43	0,19	1,03	12,18	23,31	37,13	34,24	35,18	32,85	31,03	24,81	6,19	0,87
7:53	0,50	2,30	15,82	28,31	40,86	39,26	40,39	37,91	35,61	28,83	8,21	2,46
8:03	1,45	4,51	19,62	32,99	46,41	44,64	44,85	43,55	39,61	34,99	10,68	4,38
8:13	2,97	7,00	24,54	36,01	49,86	49,59	50,60	48,83	46,58	36,58	17,21	5,89
8:23	4,61	10,08	27,66	41,02	55,14	54,50	55,67	52,79	51,29	42,52	23,68	7,72
8:33	6,64	13,17	31,53	46,46	60,41	58,82	60,59	56,76	56,54	47,22	29,48	8,90
8:43	9,08	15,92	36,29	49,80	63,90	63,42	65,30	62,28	61,09	48,57	37,22	11,21
8:53	12,16	21,84	39,93	55,52	67,45	65,22	69,67	66,87	65,25	55,20	41,70	14,79
9:03	16,69	29,51	42,76	60,54	71,04	69,69	74,30	71,27	69,88	57,52	47,26	19,48
9:13	22,34	36,53	46,96	64,01	73,22	73,18	78,09	75,39	70,85	59,58	53,75	22,92
9:23	29,64	39,29	49,75	66,58	81,65	75,74	81,80	78,59	73,39	65,09	57,21	33,16
9:33	38,07	42,79	52,78	68,53	81,21	82,17	85,52	82,66	74,13	69,14	60,45	35,56
9:43	43,74	46,95	56,25	75,54	89,74	86,04	89,12	85,39	79,87	70,46	60,64	36,57
9:53	46,78	45,80	58,13	78,71	87,93	88,26	92,43	89,70	85,53	72,60	60,55	41,70
10:03	50,56	50,85	59,50	82,56	87,76	91,56	95,78	91,47	85,63	73,75	61,09	44,97
10:13	52,26	53,47	57,95	87,38	92,20	95,85	98,84	93,87	89,98	76,95	62,47	49,90
10:23	49,97	58,95	63,64	88,18	91,47	96,95	101,37	96,88	90,91	79,18	66,32	53,94
10:33	50,62	60,81	64,67	89,74	95,01	97,43	102,76	99,89	94,86	81,80	70,72	55,03
10:43	54,83	62,49	67,72	88,44	99,10	99,85	104,24	102,21	97,20	81,89	71,95	56,75
10:53	60,35	64,14	71,76	92,85	98,38	101,43	105,21	102,90	98,16	82,38	73,03	55,27
11:03	60,72	62,90	72,42	91,99	98,89	103,51	107,46	101,96	97,81	79,31	78,64	55,03
11:13	62,29	62,39	70,81	92,79	101,39	108,02	109,87	100,97	98,92	83,30	79,29	53,04
11:23	66,79	63,68	73,57	97,20	105,35	110,79	111,42	102,84	103,33	86,97	81,23	55,46
11:33	66,53	72,32	75,03	97,51	98,41	108,71	112,94	102,66	103,06	86,70	79,08	52,73
11:43	72,53	66,35	73,98	96,61	98,56	111,58	114,09	107,29	106,32	87,77	72,21	58,73
11:53	72,57	70,57	75,13	92,93	99,61	111,69	114,50	108,48	106,34	83,41	69,75	62,46
12:03	72,93	74,01	75,21	94,12	102,03	111,73	114,06	108,36	105,58	88,35	70,48	56,02
12:13	70,20	69,26	73,88	95,03	99,36	114,48	115,57	110,12	107,93	89,42	69,66	54,70
12:23	72,22	70,59	77,20	96,95	101,04	112,49	114,97	108,64	106,83	87,68	66,67	64,71
12:33	78,30	67,78	78,48	97,37	100,20	115,20	115,45	109,27	105,51	83,45	67,37	68,15
12:43	77,96	69,68	73,08	96,50	96,54	113,96	114,73	108,39	105,34	81,38	65,16	56,56
12:53	75,07	67,88	71,11	93,10	92,49	109,11	113,93	108,03	104,36	92,19	62,23	56,35
13:03	77,33	68,93	69,68	91,76	92,08	109,12	112,11	107,39	103,74	92,47	72,10	56,01
13:13	72,41	69,15	66,67	91,57	89,33	110,90	111,93	106,59	104,81	89,90	67,30	53,66
13:23	70,59	74,85	67,65	94,02	88,60	108,90	111,73	109,02	102,98	81,31	59,52	49,43
13:33	74,05	71,81	67,37	93,49	88,34	110,16	109,83	105,55	99,88	83,98	57,54	47,75
13:43	72,02	68,76	67,29	91,02	90,47	108,37	108,24	105,48	99,24	80,33	64,58	56,37
13:53	68,72	67,16	66,92	91,40	85,64	105,65	107,19	103,52	97,49	79,81	65,73	54,53
14:03	67,31	63,03	64,13	88,57	81,54	102,83	105,11	99,47	96,17	75,69	62,55	50,82
14:13	66,16	62,76	64,38	86,77	80,68	100,39	101,85	96,09	94,10	70,16	57,90	47,62
14:23	64,23	53,28	63,59	83,02	79,62	98,62	100,25	94,84	89,36	68,17	53,49	40,60
14:33	65,74	52,62	62,27	84,21	79,24	94,88	96,72	92,45	85,18	67,87	52,17	38,60
14:43	59,95	53,32	57,90	81,47	78,46	93,04	93,70	88,31	83,39	63,96	45,11	35,79
14:53	53,88	58,39	56,98	77,11	77,69	89,02	90,66	85,30	78,95	56,62	42,28	34,71
15:03	49,69	48,71	52,70	76,92	74,28	85,31	88,86	81,90	76,99	54,25	39,96	33,24
15:13	44,70	52,12	48,37	73,17	70,38	81,22	84,76	79,60	70,81	52,00	35,03	30,13
15:23	38,10	46,06	46,94	66,77	63,31	78,59	80,12	75,14	68,43	48,79	33,89	29,35
15:33	35,37	40,67	42,62	63,47	58,65	73,96	76,46	71,17	63,96	42,94	31,22	25,64
15:43	32,29	36,24	38,96	60,57	57,23	68,62	72,52	66,03	55,64	39,10	26,87	23,92
15:53	29,22	40,09	37,04	56,03	56,57	65,12	69,28	61,56	51,97	38,25	23,06	18,57
16:03	26,68	34,61	35,83	54,47	51,03	59,98	64,81	55,35	48,81	35,07	14,60	10,26
16:13	22,78	27,72	30,57	47,85	46,76	55,32	59,48	50,19	41,93	30,36	10,84	7,47
16:23	19,60	19,90	25,86	44,02	42,21	50,18	54,57	46,03	35,31	25,29	6,58	5,08
16:33	14,80	18,65	21,24	38,37	38,19	44,59	49,40	39,30	30,88	19,50	3,93	3,37
16:43	11,25	16,85	19,47	32,66	33,73	41,44	44,11	34,49	26,84	15,13	2,40	2,00
16:53	6,62	14,28	16,77	27,68	29,85	37,42	39,18	30,45	21,45	11,74	1,03	1,38
17:03	4,73	10,50	13,86	24,33	26,97	32,76	34,25	25,29	17,72	8,22	0,29	0,83
17:13	2,71	7,20	11,31	20,51	23,83	28,57	29,61	21,02	13,54	4,66	0,11	0,00
17:23	1,32	5,15	9,29	16,65	20,36	24,43	24,79	17,00	10,61	2,42	0,00	0,00
17:33	0,65	3,44	6,21	12,97	17,20	20,27	20,68	13,42	7,32	0,93	0,00	0,00
17:43	0,26	1,98	4,30	9,73	13,49	16,55	16,62	10,01	4,91	0,31	0,00	0,00
17:53	0,00	0,86	2,50	7,07	10,49	13,28	12,81	7,09	3,14	0,10	0,00	0,00
18:03	0,00	0,00	1,42	4,86	8,05	9,92	9,38	4,62	1,45	0,00	0,00	0,00
18:13	0,00	0,00	0,60	3,33	5,77	7,34	6,53	2,71	0,58	0,00	0,00	0,00
18:23	0,00	0,00	0,19	1,88	3,76	5,29	4,35	1,50	0,23	0,00	0,00	0,00
18:33	0,00	0,00	0,07	1,16	2,73	4,09	3,10	1,06	0,13	0,00	0,00	0,00
18:43	0,00	0,00	0,00	0,53	1,85	3,28	2,57	0,61	0,07	0,00	0,00	0,00
18:53	0,00	0,00	0,00	0,22	1,12	2,61	2,12	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00
19:03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	1,86	1,56	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
19:13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	1,02	0,97	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
19:23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,35	0,43	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
19:33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Συνολική	425,81	445,71	508,39	712,00	761,29	845,33	869,68	807,74	754,67	601,29	453,33	335,48
Μέρες:	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
MWh	13,20	12,48	15,76	21,36	23,60	25,36	26,96	25,04	22,64	18,64	13,60	10,40
Ετήσια GWh	0,23											

Πίνακας 11 : Παραγωγή φωτοβολταϊκών πάνελ με απώλειες διαθεσιμότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Σημειώσεις μαθήματος Εφαρμογές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε) (Δρ. Κυμάκη Εμμανουήλ) .
- [2] Φωτοβολταϊκά συστήματα 2^η Έκδοση (Ι.Ε. Φραγκιαδάκης) .
- [3] Ηλεκτρονικά ισχύος Β' Έκδοση (MOHAN / UNDELAND / ROBBINS) .
- [4] Emmanuel Kymakis, Sofoklis Kalykakis and Thales M. Papazoglou, Performance analysis of a photovoltaic park on the island of Crete.
- [5] Κατάλογος προϊόντων SMA Sunny Family 2007/2008 , Τεχνολογία φωτοβολταϊκών συστημάτων .
- [6] “Φωτοβολταϊκά”, Πρακτικός οδηγός για φωτοβολταϊκά συστήματα. (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών , ΣΕΦ) .
- [7] Ηλεκτρονική διεύθυνση www.rokasgroup.gr
- [8] Ηλεκτρονική διεύθυνση www.SMA-Hellas.com
- [9] Ηλεκτρονική διεύθυνση www.bpsolar.com
- [10] Ηλεκτρονική διεύθυνση www.cres.gr
- [11] Ηλεκτρονική διεύθυνση www.ecotec.gr
- [12] Ηλεκτρονική διεύθυνση www.helapco.gr