

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Τμήματος ΑΦΠ&ΓΜ

Ειδίκευση «Ενεργειακά Συστήματα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Θέμα : Πειραματική και θεωρητική αξιολόγηση της επίδοσης ενός συστήματος τύπου μικρο-αμόρφου πυριτίου και σύγκριση του με αντίστοιχο σύστημα τύπου κρυσταλλικού πυριτίου.



ΣΠΥΡΙΔΩΝ Β. ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2014

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Τμήματος ΑΦΠ&ΓΜ

Ειδίκευση «Ενεργειακά Συστήματα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Θέμα : Πειραματική και θεωρητική αξιολόγηση της επίδοσης ενός συστήματος τύπου μικρο-αμόρφου πυριτίου και σύγκριση του με αντίστοιχο σύστημα τύπου κρυσταλλικού πυριτίου.



ΣΠΥΡΙΔΩΝ Β. ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2014

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Θέμα : Πειραματική και θεωρητική αξιολόγηση της επίδοσης ενός συστήματος τύπου μικρο-αμόρφου πυριτίου και σύγκριση του με αντίστοιχο σύστημα τύπου κρυσταλλικού πυριτίου.



ΣΠΥΡΙΔΩΝ Β. ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Μέλοι Εξεταστικής Επιτροπής

Παπαδάκης Γεώργιος

Καθηγητής

Αρβανίτης Κωνσταντίνος

Αναπληρωτής Καθηγητής

Συγριμής Νικόλαος

Καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην μεταπτυχιακή διατριβή αναλύονται και αξιολογούνται τα δεδομένα τριών ετών από το μετρητικό σταθμό του φωτοβολταϊκού συστήματος μικρο-αμόρφου πυριτίου που είναι εγκατεστημένο στη ταράτσα του κτιρίου Ρουσοπούλου του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Στην συνέχεια γίνεται προσομοίωση του παραπάνω συστήματος με το λογισμικό Homer και συγκρίνονται τα πειραματικά δεδομένα με τα υπολογιζόμενα. Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι μέσω του λογισμικού Όμηρος λαμβάνουμε πολύ αξιόπιστα δεδομένα με μηδαμινή απόκλιση από τα πραγματικά

Τέλος ένα αντίστοιχο σύστημα κρυσταλλικού πυριτίου (ίδιας ισχύος με αυτό του μικρο-αμόρφου πυριτίου) προσομοιώνεται με το λογισμικό Homer και γίνεται σύγκριση των προσομοιώσεων των δύο συστημάτων , μικρο-αμόρφου πυριτίου και κρυσταλλικού πυριτίου , με σκοπό την ανέρευση του συμφερότερου συστήματος με κύριο κριτήριο την οικονομική επίδοση. Από την σύγκριση αυτή εξάγεται το συμπέρασμα ότι το σύστημα μικρο-αμόρφου πυριτίου για την Ελλάδα και τις χώρες τις Μεσογείου που έχουν υψηλές θερμοκρασίες και αρκετή ηλιοφάνεια είναι συμφερότερο από οικονομικής επίδοσης από αντίστοιχο σύστημα κρυσταλλικού πυριτίου.

Λέξεις κλειδιά

Φωτοβολταϊκό σύστημα , λογισμικό Όμηρος , μικρο-αμόρφου πυριτίου , προσομοίωση

ABSTRACT

The thesis analyzed and evaluated data of three years from the metering station photovoltaic system micro-amorphous silicon that is installed on the roof of the building Rousopoulou Agricultural University of Athens.

Then simulated the above system software Homer and compares the experimental data with the calculated. The conclusion drawn is that through software Homer take very reliable data with minimal deviation from the actual

Finally a system of corresponding crystalline silicon (same effect as that of the micro-amorphous silicon) is simulated with the software Homer and compare simulations of two systems, micro-amorphous silicon and crystalline silicon, with view to find the most profitable system with the main criterion economic performance. From this comparison it is concluded that the system of micro-amorphous silicon for Greece and the Mediterranean countries ,that have high enough temperatures and sunshine, is advantageous economic performance of the corresponding system of crystalline silicon.

keywords

Photovoltaic systems, micro- amorphous silicon , Homer, simulation

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- 1. Εισαγωγή**
 - 1.1 Ιστορικά**

- 2. Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών στοιχείων**
 - 2.1 Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου**
 - 2.2 Παράγοντες επίδρασης στην επίδοση του φωτοβολταϊκού**
 - 2.3 Παράγοντες επίδρασης στην επίδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου**

- 3. Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών**
 - 3.1 Μονοκρυσταλλικά**
 - 3.2 Πολυκρυσταλλικά**
 - 3.3 Αμόρφου πυριτίου**
 - 3.3.1 Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου αμόρφου πυριτίου**
 - 3.3.2 Φαινόμενο Staebler – Wronski**
 - 3.3.3 Φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου με κρυσταλλικό πυρίτιο**
 - 3.3.4 Φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού κ αμόρφου πυριτίου**
 - 3.3.5 Φωτοβολταϊκά αμόρφου πυριτίου με γυαλί (GSG)**
 - 3.3.6 Φωτοβολταϊκά καδμίου – τελλουρίου (Cd-Te)**
 - 3.3.7 Φωτοβολταϊκά χαλκού- ινδίου/ γαλλίου- δισελληνιούχου**

 - 3.4 Υβριδικά**
 - 3.5 Φωτοβολταϊκά τεχνολογίας III-IV ομάδας του περιοδικού πίνακα**
 - 3.6 Ηλεκτροχημικά φωτοβολταϊκά**
 - 3.7 Οργανικά πολυμερή φωτοβολταϊκά**

- 4. Πειραματικό μέρος**
 - 4.1 πρότυπο IEC 61724**
 - 4.1.1 Εισαγωγή**
 - 4.1.2 Στόχος προτύπου**
 - 4.1.3 Παράμετροι ελέγχου και παραγωγής**
 - 4.1.4 Ενεργειακό ισοζύγιο**
 - 4.1.5 Δείκτες απόδοσης – απωλειών**
 - 4.1.6 Δείκτες αποδοτικότητας**
 - 4.1.7 Επίδραση θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων**

 - 4.2 Πειραματική μονάδα**
 - 4.2.1 Εισαγωγή**
 - 4.2.2 Περιγραφή εγκατάστασης**
 - 4.2.2.1 Φωτοβολταϊκό στοιχείο**
 - 4.2.2.2 Μετατροπέας**

4.3 Αξιολόγηση δεδομένων

4.4 Εντολές excel

4.5 Επεξεργασία δεδομένων

4.6 Υπολογισμός θερμοκρασιακού συντελεστή απωλειών

4.7 Αποτελέσματα

4.8 Συμπεράσματα

5. Λογισμικό Όμηρος

5.1 Εισαγωγή

5.2 Καταχώρηση δεδομένων

5.3 Αποτελέσματα

5.4 Συμπεράσματα

6. Βιβλιογραφία

Κατάλογος συμβόλων

$h \cdot \nu$ ενέργεια φωτονίου

E_g ενεργειακό διάκενο ή ενεργειακό χάσμα

E_{cb} ενέργεια πυθμένα ζώνης αγωγιμότητας

E_{vt} ενέργεια της κορυφής της ζώνης σθένους

V_{oc} τάση ανοιχτοκυκλώματος (V)

I_{sc} ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)

V_{mpp} τιμή τάσης για μέγιστη τιμή ισχύος του ηλιακού κυττάρου (V)

I_{mpp} τιμή έντασης για μέγιστη τιμή ισχύος του ηλιακού κυττάρου (A)

P_{mpp} μέγιστη τιμή ισχύος του ηλιακού κυττάρου (W)

FF παράγων πλήρωσης

A συνολική επιφάνεια συστοιχίας (m²)

P_o ονομαστική ισχύς εγκατάστασης (kW)

E_A ενέργεια που παράγει η φωτοβολταϊκή συστοιχία

$E_{use, PV}$ ωφέλιμη ενέργεια που εξάγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα (kWh/m²)

G_i προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m²)

G_{stc} συνολική ηλιακή ακτινοβολία που πεφτει στο επίπεδο (kWh/m²)

L_c απώλειες σύλληψης (h/day)

L_{CT} θερμικές απώλειες σύλληψης (h/day)

L_{CM} διάφορες απώλειες σύλληψης (h/day)

L_s απώλειες συστήματος (h/day)

PR λόφος απόδοσης %

Y_A απόδοση συστοιχίας (kWh/kWp) ή (h)

Y_f τελική απόδοση (kWh/kWp) ή (h)

Y_r απόδοση αναφοράς (kWh/kWp) ή (h)

K_T παράγοντας θερμοκρασιακής διόρθωσης

K_G παράγοντας διόρθωσης φωτοβολταϊκού πλαισίου

n_{inv} απόδοση του μετατροπέα

n_{pv} απόδοση φωτοβολταϊκής συστοιχίας

n_{tot} απόδοση μετατροπής του φωτοβολταϊκού συστήματος

n_{tem} θερμοκρασιακός συντελεστής απωλειών

T_{amb} θερμοκρασία περιβάλλοντος °C

T_{NOCT} ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας φ/β πλαισίου °C

T_c θερμοκρασία φβ πλαισίου °C

T_{stc} θερμοκρασία υπο κανονικές συνθήκες δοκιμής $T_{stc} = 25$ °C

T_m θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου

Καταλογος εικόνων

Εικόνα 1. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Εικόνα 2. Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Εικόνα 3. Καμπύλες I-V και P-V ενός ηλιακού στοιχείου

Εικόνα 4. Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου

Εικόνα 5. Πλάγια όψη φωτοβολταϊκού πλαισίου

Εικόνα 6. Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας στην καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Εικόνα 7. Επίδραση της θερμοκρασίας στην καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Εικόνα 8. Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων

Εικόνα 9. Η αγορά φωτοβολταϊκών στοιχείων το 2010

Εικόνα 10. Μορφές μονοκρυσταλλικών στοιχείων πυριτίου

Εικόνα 11. Μορφές πολυκρυσταλλικών στοιχείων πυριτίου

Εικόνα 12. Σε σειρά συνδεδεμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου

Εικόνα 13. Σύγκριση κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων με στοιχεία άμορφου πυριτίου

Εικόνα 14. Δομή τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισίου άμορφου πυριτίου

Εικόνα 15. Φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου

Εικόνα 16. Η μείωση της ισχύς εξόδου υπό ακτινοβολία ηλιακού προσομοιωτή ($100\text{mW}/\text{cm}^2$) για ένα στοιχείο μίας επίστρωσης πάχους 260 nm και ενός στοιχείου τριών επιστρώσεων

Εικόνα 17. Μεταβολη της παραγόμενης ισχύος φωτοβολταϊκού πλαισίου σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία για αντιπροσωπευτικές υποσυστοιχίες άμορφου πυριτίου

Εικόνα18. CdTe / Cds φωτοβολταϊκό στοιχείο

Εικόνα19. Multijunction φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Εικόνα 20. Φωτοβολταϊκό πλαίσιο μικροα-μόρφου πυριτίου sharp 121 W

Εικόνα 21. Μετατροπέας SMA sunny boy 2,5 Kw

Εικόνα 22. Όργανα μέτρησης του συστήματος συλλογής δεδομένων

Εικόνα 23. Γράφημα θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_{amb}), θερμοκρασίας φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_{mod}), μέση ημερήσια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (G_i). Για τα τρία χρόνια παρακολούθησης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Εικόνα 24. Λόγος απόδοσης (PR) για τις τρεις χρονιές παρακολούθησης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Εικόνα 25. Μέση ημερήσια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (G_i), θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}), λόγος απόδοσης (PR) ανα εποχή για τα τρία έτη.

Εικόνα 26. Παράμετροι απωλειών σύλληψης L_c και απωλειών συστήματος L_s για τα τρία έτη.

Εικόνα 27. Παράμετροι τελικής απόδοσης Y_f και απόδοσης αναφοράς Y_r για τα τρία έτη.

Εικόνα 28. Απόδοση φωτοβολταϊκής συστοιχίας (η_{pv}), συνολική απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος (η_{tot}), απόδοση μετατροπέα (η_{inv}) για τη πρώτη χρονιά παρακολούθησης του συστήματος.

Εικόνα 29. Απώλειες σύλληψης λόγω θερμοκρασίας (L_{CT}) και διάφορες (L_{CM}) για το πρώτο χρόνο παρακολούθησης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Εικόνα 30. Θερμοκρασιακά διορθωμένη απόδοση αναφοράς (Y_T), απόδοση αναφοράς (Y_r), και συντελεστής θερμοκρασιακών απωλειών (η_{tem}) για το πρώτο χρόνο παρακολούθησης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Εικόνα 31. Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (G_i) , συνολική απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος (η_{tot}) , θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου T_m και θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}) για μια χειμερινή μέρα (29/1/2011).

Εικόνα 32. Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (G_i) , συνολική απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος (η_{tot}) , θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου T_m και θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}) για μια καλοκαιρινή μέρα (6/8/2012).

Εικόνα 33. Εισαγωγή δεδομένων φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Εικόνα 34. Εισαγωγή δεδομένων μετατροπέα.

Εικόνα 35. Εισαγωγή δεδομένων δικτύου.

Εικόνα 36. Εισαγωγή οικονομικών δεδομένων.

Εικόνα 37. Εισαγωγή δεδομένων θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Εικόνα 38. Προεξοφλημένη χρηματική ροή για το φωτοβολταϊκό σύστημα με τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια

Εικόνα 39. Προεξοφλημένη χρηματική ροή για τη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση με μικροαμόρφου πυριτίου πλαίσια

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Συνολική παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος για τις τρεις χρονιές παρακολούθησης του.

Πίνακας 2. Σύγκριση πραγματικής ετήσιας παραγωγής ενέργειας για κάθε ένα από τα τρία έτη σε σχέση με την ετήσια παραγωγή ενέργειας που δίνει το λογισμικό Homer. (για τη φωτοβολταϊκή συστοιχία με πλαίσια μικροαμόρφου πυριτίου).

Πίνακας 3. Αρχικό κόστος, κόστος συντήρησης , εισροές και κέρδος φωτοβολταϊκής εγκατάστασης με πολυκρυσταλλικά πλαίσια.

Πίνακας 4. Αρχικό κόστος, κόστος συντήρησης, εισροές και κέρδος φωτοβολταϊκής εγκατάστασης με μικροαμόρφου πυριτίου πλαίσια.

1. Εισαγωγή

Οι ανάγκες της κοινωνίας μετά την βιομηχανική επανάσταση, άλλαξαν δραματικά, με την εξολοκλήρου πλέον εξάρτησή της από την παραγωγή και χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο βέλτιστος τρόπος παραγωγής, μέχρι και λίγες δεκαετίες πριν, ήταν η καύση του ορυκτού πλούτου του φλοιού του πλανήτη. Αυτή η μέθοδος όμως, εκτός από τις επιπτώσεις στο περιβάλλον, άρα άμεσα και στην ποιότητα ζωής του ανθρώπου, αγνόησε το γεγονός ότι τα αποθέματα ορυκτών έχουν πεπερασμένη ποσότητα. Η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια, πολλαπλασιάστηκε με την πάροδο των χρόνων και μέσα σε 200 χρόνια καταναλώθηκε το μεγαλύτερο ποσοστό των διαθέσιμων πόρων, επιτρέποντας την εκμετάλλευσή τους για 40-50 χρόνια ακόμα έως την εξάντλησή τους.

Η απάντηση στο ενεργειακό πρόβλημα που προκύπτει, δίνεται από νέες μορφές παραγωγής ενέργειας, που δεν στηρίζονται σε ρυπογόνες μεθόδους εκμετάλλευσής πεπερασμένων πόρων, αλλά σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) όπως ο άνεμος, η βιομάζα, το νερό, ο ήλιος και άλλα.

Ο ήλιος, εκτός από πηγή φωτός και θερμότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μία ανεξάντλητη μορφή ενέργειας. Έτσι όταν υλοποιηθεί ένα σύστημα εκμετάλλευσής της για την παραγωγή χρήσιμης ενέργειας (ηλεκτρική ή θερμική για παράδειγμα), η πρώτη ύλη-καύσιμο είναι δωρεάν και δεν υποβάλλεται ποτέ στις διακυμάνσεις των αγορών ενέργειας. Επιπλέον, η ηλιακή ενέργεια αντιπροσωπεύει μία «καθαρή» μορφή ενέργειας εν συγκρίσει με την ενέργεια που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, οι ρύποι από τη χρήση της οποίας συμβάλλουν στην ανάπτυξη του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Γενικότερα, η ηλιακή ενέργεια έχει ζωτική σημασία για την διατήρηση της ζωής στη Γη και αποτελεί τη βάση για όλες σχεδόν τις άλλες μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούμε. Για παράδειγμα, η ηλιακή ενέργεια είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη των φυτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βιομάζα. Η θερμότητα του ήλιου δημιουργεί θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ περιοχών και ανάπτυξη ανέμων η ενέργεια των οποίων χρησιμοποιείται στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες.

Η ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης είναι πραγματικά τεράστια όλη η ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στα παγκόσμια κοιτάσματα άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου αντιστοιχεί σε ποσότητα ενέργειας που προκύπτει από μόλις 20 ημέρες ηλιοφάνειας . Πέρα από τη γήινη ατμόσφαιρα, η ενέργεια του ήλιου είναι περίπου $1,3 \text{ kW/m}^2$.Περίπου ένα τρίτο αυτής της ενέργειας ανακλάται πίσω στο διάστημα και μία ποσότητα της απορροφάται από την ατμόσφαιρα. Όταν η ηλιακή ενέργεια φτάσει στην ατμόσφαιρα, η ισχύς της μειώνεται σε περίπου 1 kW/ m^2 κατά τις μεσημβρινές ώρες σε καθαρό ουρανό. Κατά μέσο όρο, λαμβάνοντας υπόψη όλη την επιφάνεια του πλανήτη, κάθε m^2 δέχεται περίπου $4,2 \text{ kWh}$ την ημέρα. Τα ποσοστά ενέργειας είναι υψηλότερα σε επιφάνειες όπως έρημοι όπου μπορούν να ξεπεράσουν τις 6 kWh/ m^2 την ημέρα [1]

1.1 Ιστορικά

Οι πρώτες παρατηρήσεις πάνω στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, έγιναν από τον 19 χρονο τότε Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel το 1839 ο οποίος ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο καθώς πειραματιζόταν με ηλεκτρολυτικό στοιχείο αποτελούμενο από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια σε αγώγιμο υγρό στο οποίο η ροή αυξανόταν με την έκθεση στον ήλιο. Οι σημειώσεις του γύρω από το φαινόμενο, είχαν φανεί πολύ ενδιαφέρουσες στην επιστημονική κοινότητα αλλά χωρίς πρακτική εφαρμογή.

Το 1876 ο Willoughby Smith με τον μαθητή του Williams Adams παρατηρεί ένα ακόμη φαινόμενο, παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, μετά την έκθεση σεληνίου (Se) στον ήλιο. Η ανακάλυψη αυτή ήταν πολύ σημαντική αφού πλέον είχε αποδειχθεί ότι ένα στοιχείο μπορούσε να μετατρέψει το φως σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς θέρμανση και χωρίς κινούμενα μέρη.

Το 1883 ο Αμερικανός εφευρέτης Charles Fritz παράγει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 1-2 % από φύλλα σεληνίου.

Το 1918 Ο Πολωνός Jan Czochralski κατασκευάζει το πρώτο στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου με μία μέθοδο η οποία χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα κ σήμερα.

Το σημαντικότερο βήμα στην εξέλιξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας έγινε την άνοιξη του 1953 όταν οι επιστήμονες της Bell Laboratories Gerald Pearson, Daryl Charin και Calvin Fuller, καθώς ερευνούσαν το στοιχείο πυρίτιο (Si) για πιθανές εφαρμογές στην ηλεκτρονική, εφηύραν το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο ήταν πολύ πιο αποδοτικό από τα παλιότερα στοιχεία φτιαγμένα απο σελήνιο. Η Bell Telephone Laboratories σχεδίασε λίγο αργότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου με απόδοση 4%.

Τα φωτοβολταϊκά ξεκίνησαν να κάνουν την εμφάνιση τους αλλά λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής η εφαρμογή τους ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Η έρευνα όμως προχωρούσε και η απόδοση των φωτοβολταϊκών συνεχώς βελτιωνόταν.

Ενδεικτικά η τιμή των φωτοβολταϊκών ξεκινάει από τα 500\$ ανά εγκατεστημένο Watt το 1956, ενώ μετά από 14 χρόνια, το 1970 αγγίζει τα 100 \$/W. Το 1973 οι βελτιώσεις στις μεθόδους παραγωγής φέρνουν το κόστος των φωτοβολταϊκών στα 50 \$/W.

Σήμερα με οικονομίες μεγάλης κλίμακας έχουν επιτευχθεί μεγάλες αποδόσεις στα κρυσταλλικά κυρίως υλικά και αρκετές χώρες με πρωτοπόρες την Γερμανία και την Ιαπωνία έχουν ήδη επενδύσει τεράστια κονδύλια με σκοπό την ευρύτερη εκμετάλλευση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. [1]

2. Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική στα φωτοβολταϊκά συστήματα πραγματοποιείται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (ή ηλιακά κύτταρα ή κυψέλες). Καθώς προσπίπτει στην επιφάνειά τους ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνουν μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής και την ένταση της ακτινοβολίας, η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι 0,5-1,0 V στην και ροή ρεύματος βραχυκύκλωσης 10-40 mA/cm².

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αποτελεί τη θεμελιώδη φυσική διαδικασία μέσω της οποίας ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα. Ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο (Si), το αρσενιούχο γάλιο (GaAs), το τελουριούχο κάδμιο (CdTe) ή ο δισηληνιούχος ινδιούχος χαλκός (CIS) χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια τα οποία περικλείουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα το μήκος κύματος. Όταν τα φωτόνια προσπίπτουν στη επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορεί να ανακλαστούν, να απορροφηθούν ή απλά να διαπεράσουν το στοιχείο. Τα φωτόνια που απορροφούνται με ενέργεια $h \cdot \nu$ μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό χάσμα E_g του ημιαγώγου έχουν την δυνατότητα να απορροφηθούν σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια.

Στη συνέχεια παρατίθεται μια συνοπτική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων, χρησιμοποιώντας σαν παράδειγμα το στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου (sc-Si / mc-Si). Ωστόσο, και οι υπόλοιπες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων βασίζονται στις ίδιες αρχές λειτουργίας. Τα άτομα πυριτίου σχηματίζουν μια σταθερή τετραεδρική κρυσταλλική δομή, ενώ διαθέτουν τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους στην εξωτερική τους στοιβάδα (τετρασθενές στοιχείο). Καθένα από αυτά σχηματίζει ένα ομοιοπολικό δεσμό με ένα ηλεκτρόνιο

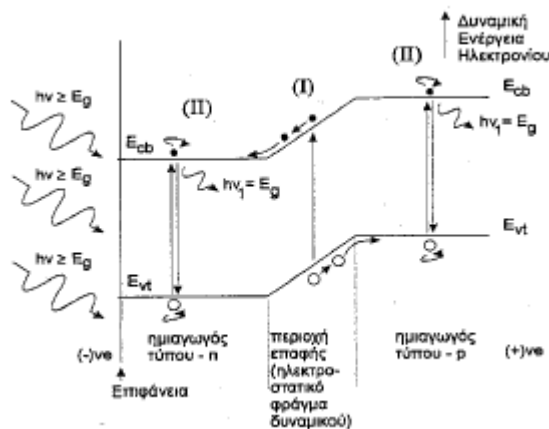
γειτονικού ατόμου στο πλέγμα πυριτίου. Με τον τρόπο αυτό, κάθε άτομο συνδέεται με τέσσερα άτομα πυριτίου στην κρυσταλλική του δομή και “συμπληρώνει” την εξωτερική του στοιβάδα. Ένας ομοιοπολικός δεσμός είναι δυνατόν να σπάσει υπό την επίδραση ακτινοβολίας ή θερμότητας, οπότε το διεγερμένο ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται και αφήνει στη θέση του μια κενή θέση οπή

Το διεγερμένο ηλεκτρόνιο κυκλοφορεί ατάκτως μέσα στον κρύσταλλο για απειροελάχιστο χρονικό διάστημα, έως ότου πλησιάσει μια οπή και επανασυνδεθεί. Η μετακίνηση όμως αυτή δεν είναι η αιτία για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, γίνεται νόθευση του πυριτίου με κατάλληλες προσμίξεις. Τα άτομα που προστίθενται διαθέτουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο (πχ. φώσφορος) ή ένα λιγότερο (πχ. βόριο) στην εξωτερική τους στοιβάδα σε σχέση με το πυρίτιο. Στην περίπτωση της πρόσμιξης με πεντασθενές άτομο, όπως ο φώσφορος (πρόσμιξη τύπου n), παρατηρείται πλεόνασμα ενός ηλεκτρονίου για κάθε άτομο φωσφόρου. Το ηλεκτρόνιο αυτό μπορεί να κινείται ελεύθερα στον κρύσταλλο με πρόσληψη ελάχιστης ενέργειας και να αποτελεί ουσιαστικά ηλεκτρικό φορτίο (φορέας αγωγιμότητας). Αντίστοιχα, με την πρόσμιξη τρισθενούς ατόμου, όπως το βόριο (πρόσμιξη τύπου p), παρατηρείται έλλειμμα ηλεκτρονίου (οπή) για κάθε άτομο βορίου. Τα ηλεκτρόνια των γειτονικών ατόμων με την απορρόφηση μικρής ποσότητας ενέργειας μπορούν να μετακινηθούν προς την κενή θέση και να καλύψουν αυτή την οπή, με αποτέλεσμα τη δημιουργία οπής σε κάποιο άλλο σημείο του κρυστάλλου. Μπορεί να θεωρηθεί δηλαδή ότι σε αυτή την περίπτωση υφίσταται μεταφορά οπών και ως εκ τούτου, οι οπές αποτελούν αυτή τη φορά τους φορείς ηλεκτρικού ρεύματος (φορείς αγωγιμότητας).

Στο υλικό που έχει προκύψει από την πρόσμιξη (είτε p είτε n) τα ελεύθερα φορτία που μόλις περιγράψαμε δεν έχουν κάποια καθορισμένη κατεύθυνση στην κίνησή τους. Εάν οι ημιαγωγοί τύπου p και n έρθουν σε επαφή μεταξύ τους, είναι δυνατόν να οδηγήσουν στο σχηματισμό μιας ένωσης $p-n$. Στην ένωση αυτή, τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού τύπου n διαχέονται προς την περιοχή του ημιαγωγού τύπου p . Δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο μια περιοχή στην οποία υπάρχουν λίγοι φορείς αγωγιμότητας, γνωστή ως ζώνη εξάντλησης φορέων (ή απογύμνωσης). Τα θετικά φορτισμένα ιόντα ωστόσο παραμένουν στην περιοχή n και τα αρνητικά στην p , προκαλώντας ένα εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο το

οποίο αντιτίθεται στη κίνηση των φορέων αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα η παραπάνω διάχυση να μη συνεχίζεται επ' άπειρον.

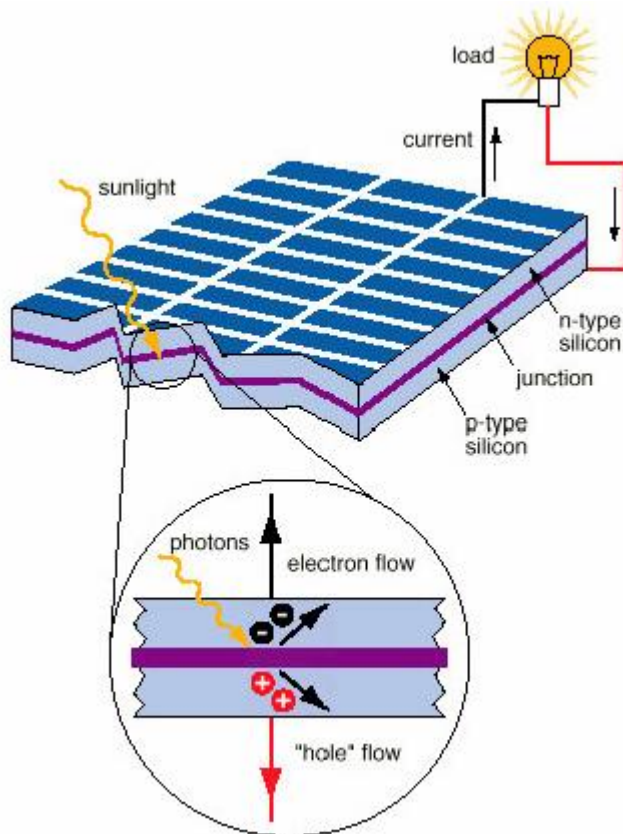
Εάν ο ημιαγωγός p-n (φωτοβολταϊκό στοιχείο) ,που φαίνεται στην εικόνα 2 ,εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία, τα ηλεκτρόνια είναι δυνατόν να απορροφήσουν φωτόνια με επαρκή ποσότητα ενέργειας, με αποτέλεσμα τη διάσπαση των χημικών δεσμών και δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίου-οπής. Καθώς αυτά κινούνται ελεύθερα στον κρύσταλλο όταν πλησιάσουν την περιοχή απογύμνωσης διαχωρίζονται, λόγω του ηλεκτροστατικού της πεδίου. Τα ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται στην περιοχή n και οι οπές στην απέναντι περιοχή p. Έτσι αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού, ενώ τα ηλεκτρόνια μέσω του εξωτερικού κυκλώματος θα ξαναβρούν και θα επανασυνδεθούν με τις οπές στην περιοχή p. Σε αυτή την κίνηση των ηλεκτρονίων οφείλεται η παραγωγή ρεύματος στα φωτοβολταϊκά στοιχεία [5],[2]



Εικόνα 1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο. [2].

Στην εικόνα 1 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από την επαφή ημιαγωγού τύπου-n και τύπου-p. Το σχήμα παρουσιάζει το διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας σε συνάρτηση με το βάθος από την επιφάνεια. Στο φωτοβολταϊκό στοιχείο προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με ενέργεια $E=h \cdot \nu \geq E_g$, όπου $E_g= E_{cb} - E_{vt}$ η τιμή του ενεργειακού διακένου, E_{cb} ο πυθμένας της ζώνης

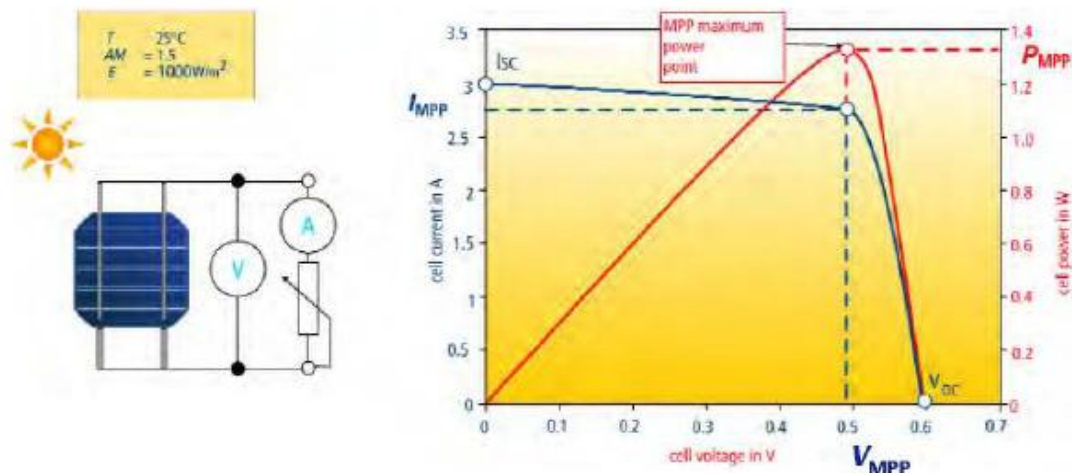
αγωγιμότητας και E_{vt} η κορυφή της ζώνης σθένους



Εικόνα 2 Φωτοβολταϊκό στοιχείο [3]

2.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού στοιχείο

Μακροσκοπικά, ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μοντελοποιείται με την βοήθεια της χαρακτηριστικής του καμπύλης έντασης-τάσης I-V (I-V curve) ή ισχύος- τάσης P-V (P-V curve) όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα 3



Εικόνα 3 Καμπύλες I-V και P-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου [5]

Χαρακτηριστικά μεγέθη αποτελούν:

- Η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} : είναι η τάση που επικρατεί στην έξοδο ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου όταν τα δύο άκρα του είναι ανοικτά
- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης: I_{sc} : είναι το ρεύμα που διαρρέει το φωτοβολταϊκό στοιχείο όταν τα δύο άκρα του βραχυκυκλωθούν.
- Η μέγιστη ισχύς του κελιού P_{mpp} (maximum power point): είναι η μέγιστη ισχύς του φωτοβολταϊκού στοιχείου που αντιστοιχεί σε τάση V_{mpp} και ένταση I_{mpp}
- Ο παράγων πλήρωσης FF (Fill Factor) περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού στοιχείου ως πηγή σταθερού ρεύματος, και οι τιμές του καθορίζονται από το υλικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου και τις συνθήκες. Κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές του FF, τόσο περισσότερο η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος στην περιοχή τάσεων 0 - V_{oc} . Τυπικές τιμές 0,7 έως 0,9 χαρακτηρίζουν φωτοβολταϊκού στοιχεία με αποδεκτή έως πολύ καλή ενεργειακή απόδοση αντίστοιχα. Δίνεται από τη σχέση:

$$FF = I_m \cdot V_m / I_{sc} \cdot V_{oc} \quad (1)$$

Για την πραγματοποίηση αυξημένων αποδόσεων επιδιώκεται οι τιμές των FF, I_{sc} και Voc να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες

Με στόχο τη δυνατότητα σύγκρισης διαφορετικών φωτοβολταϊκών στοιχείων ή και πλαισίων υπό κοινές συνθήκες, έχουν οριστεί οι λεγόμενες Πρότυπες Συνθήκες Ελέγχου, περισσότερο γνωστές ως STC συνθήκες από τα αρχικά των λέξεων Standard Test Conditions. Οι συνθήκες αυτές αντιστοιχούν σε :

- Ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ίσης προς 1000 W/m².
- Θερμοκρασία στοιχείου ίση προς 25 °C.
- Μάζα αέρα (air mass) ίση προς 1.5 Η μάζα αέρα είναι μία παράμετρος που πρακτικά σχετίζεται με τη διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας διαμέσου της ατμόσφαιρας. Έτσι όταν ο ήλιος βρίσκεται κάθετα στην επιφάνεια της γης, η ηλιακή ακτινοβολία περνάει μόνο μία φορά διαμέσου του ατμοσφαιρικού αέρα, γεγονός που δηλώνεται ως AM=1. Ο παράγων AM=1.5, που χρησιμοποιείται ως πρότυπη συνθήκη για τον χαρακτηρισμό των ηλιακών στοιχείων αντιστοιχεί σε γωνία του ήλιου ίση προς 41.8°C ως προς τον ορίζοντα.

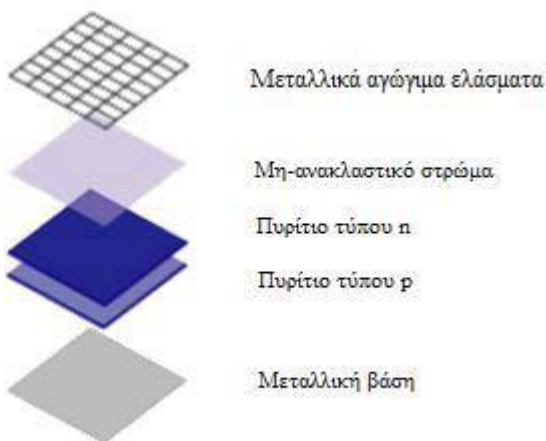
Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στον παράγοντα της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, η οποία είναι συνήθως κατά 25-30°C υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι συνήθως οι κατασκευαστές παρέχουν και τα δεδομένα ισχύος στις λεγόμενες NOCT συνθήκες (Normal Operating Cell Temperature), οι οποίες αντιστοιχούν σε θερμοκρασία στοιχείου περί τους 45-48°C για θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C, ένταση ακτινοβολίας 800 W/m² AM=1.5 και ταχύτητα ανέμου 1 m/sec. Τα δεδομένα αυτά παρέχουν μία περισσότερο ρεαλιστική εικόνα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, αναφορικά με τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες.[5]

2.2 Δομή φωτοβολταϊκού πλαισιου

Κατασκευαστικά για λόγους μηχανικής αντοχής και ευχρηστίας, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν ενσωματωμένα στο περίγραμμά τους μεταλλικά ελάσματα ανοδιωμένου αλουμινίου, και για λόγους προστασίας είναι αεροστεγώς και υδατοστεγές κλεισμένα μέσα σε ειδικό γυαλί και ειδικό μονωτικό πλαστικό. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται όπως φαίνονται και στην εικόνα 4 από :

Μεταλλική βάση

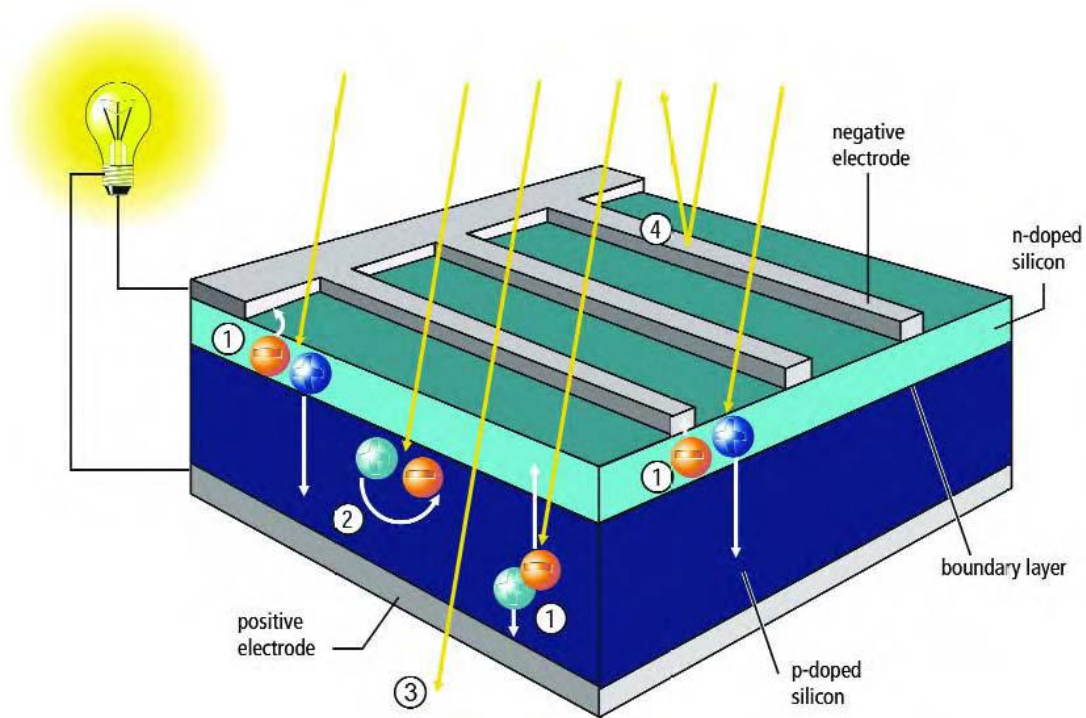
- Πυρίτιο τύπου P
- Πυρίτιο τύπου N
- Μη ανακλαστικό στρώμα επικάλυψης
- Μεταλλικά αγωγήμα ελάσματα



Εικόνα 4 Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου [6]

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από πολλά λεπτά οριζόντια ελάσματα, και είναι περισσότερα σε σχέση με τα κάθετα και είναι αυτά τα στοιχεία που μαζεύουν τα ηλεκτρόνια που διεγείρονται και αποτελούν το ρεύμα. Στη συνέχεια τα ηλεκτρόνια διοχετεύονται στα κάθετα παχιά ελάσματα, που ονομάζονται “busbars” ή διαφορετικά ζυγοί . Οι ζυγοί των στοιχείων ενώνονται μεταξύ τους και έτσι έχουμε πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους τα οποία και

αποτελούν το πλαίσιο. Κάθε πλαίσιο έχει δύο ακροδέκτες τον θετικό και τον αρνητικό πόλο.



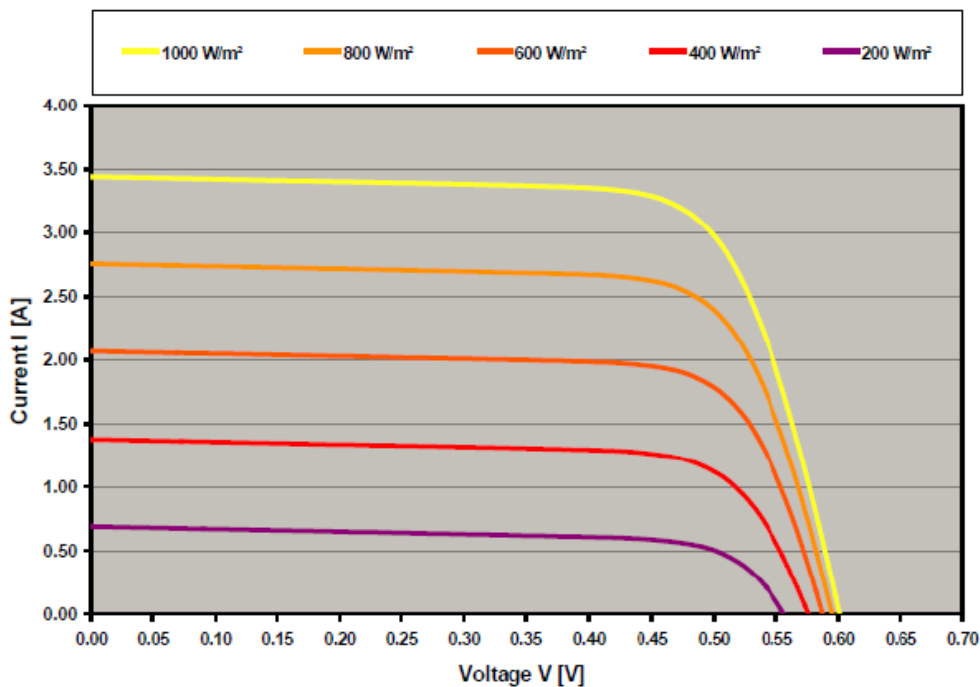
Εικόνα 5 Πλάγια όψη φωτοβολταϊκού παλίσιου [6]

Στην εικόνα 5 έχουμε μια όψη ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου όπου βλέπουμε στο (1) διαχωρισμό φορτίου στο (2) επανασύνδεση (3) αχρησιμοποίητη φωτεινή ενέργεια (4) αγωγή ελάσματα

2.3 Παράγοντες επίδρασης στην επίδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία αποτελούν τους δύο κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Η εικόνα 6 παρουσιάζει τη μεταβολή της I-V χαρακτηριστικής ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με μεταβολή της έντασης ακτινοβολίας:

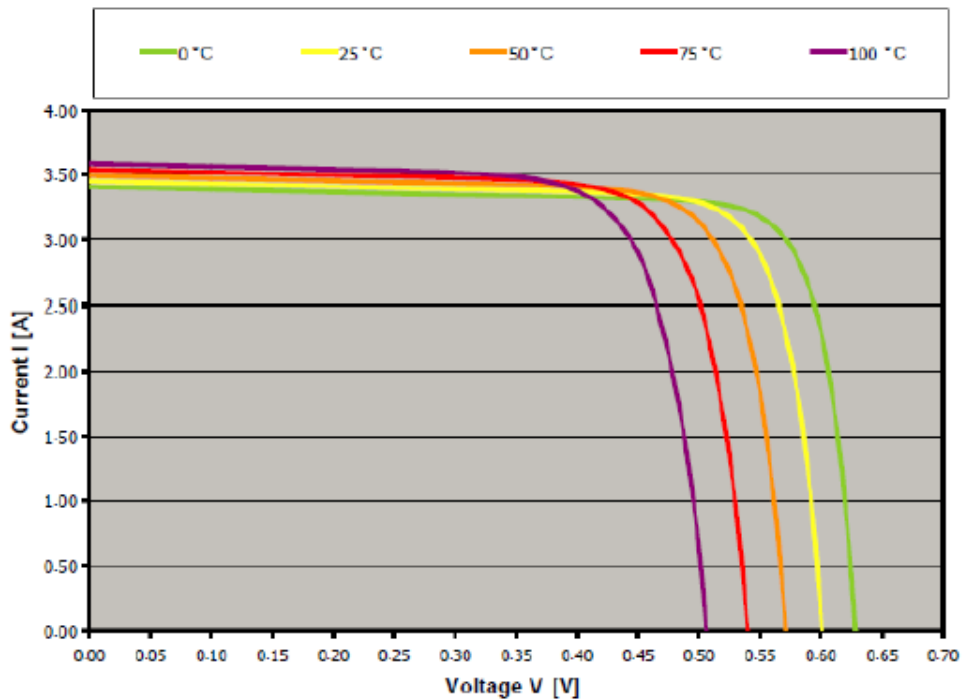


Εικόνα 6 Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας στην καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου [5]

Όπως προκύπτει από την Εικόνα 6, η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας επιδρά (σχεδόν ανάλογα) στο ρεύμα βραχυκύκλωσης του στοιχείου ενώ η τάση ανοικτού κυκλώματος αυξάνεται ελαφρά με την αύξηση της έντασης.

Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η σχεδόν αναλογική σχέση ανάμεσα στην ισχύ του στοιχείου και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, για σταθερές φυσικά θερμοκρασίες στοιχείου.

Στην εικόνα 7 παρουσιάζει την επίδραση της θερμοκρασίας στοιχείου στην I-V χαρακτηριστική του στοιχείου:



Εικόνα 7.Επίδραση της θερμοκρασίας στην καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.[5]

Όπως προκύπτει από την εικόνα 7 η θερμοκρασία επιδρά κυρίως στην τάση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ειδικότερα, η τάση ανοικτού κυκλώματος αυξάνεται σημαντικά με μείωση της θερμοκρασίας, γεγονός που πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται ελαφρά. Συνολικά, η ισχύς του φωτοβολταϊκού στοιχείου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Συνήθως οι κατασκευαστές των φωτοβολταϊκών στοιχείων αναφέρουν ενδεικτικούς συντελεστές μεταβολής των παρακάτω μεγεθών με τη θερμοκρασία:

Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , με τυπικές τιμές της τάξης του 0,04- 0,07% ανά βαθμό Kelvin (ή °C)

Τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} με τυπικές τιμές της τάξης του -0,3 έως -0,4% ανά βαθμό Kelvin (ή °C).

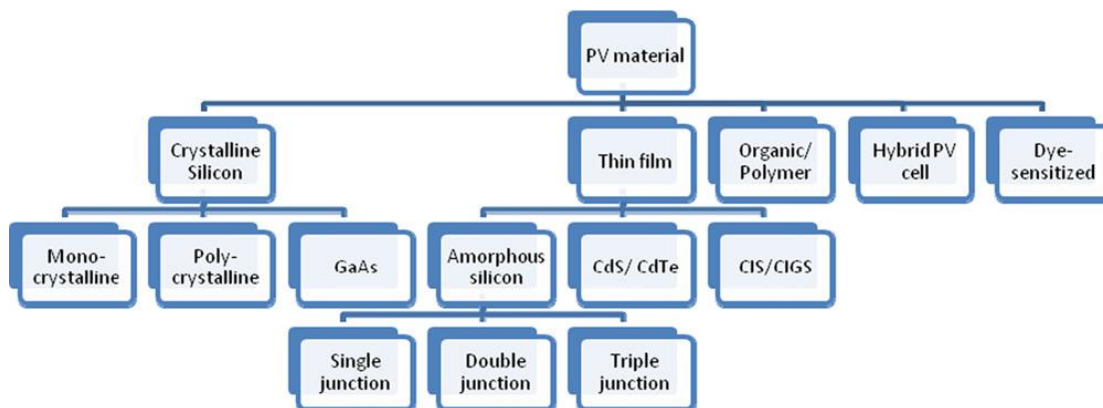
Μέγιστη ισχύς P_{mpp} με τυπικές τιμές της τάξης του -0,4 έως -0,5% ανά βαθμό Kelvin (ή °C).

Οι παραπάνω τιμές είναι ενδεικτικές για στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου. Για στοιχεία άμορφου πυριτίου, η μείωση στις τιμές της τάσης και κυρίως της ισχύος (που είναι και το μέγεθος με το άμεσο ενδιαφέρον) είναι μικρότερη με ενδεικτικές τιμές της τάξης του -0.3% ανά βαθμό Kelvin για την τάση του ανοικτού κυκλώματος και -0.3 έως -0.4% ανά βαθμό Kelvin για την ισχύ του στοιχείου.

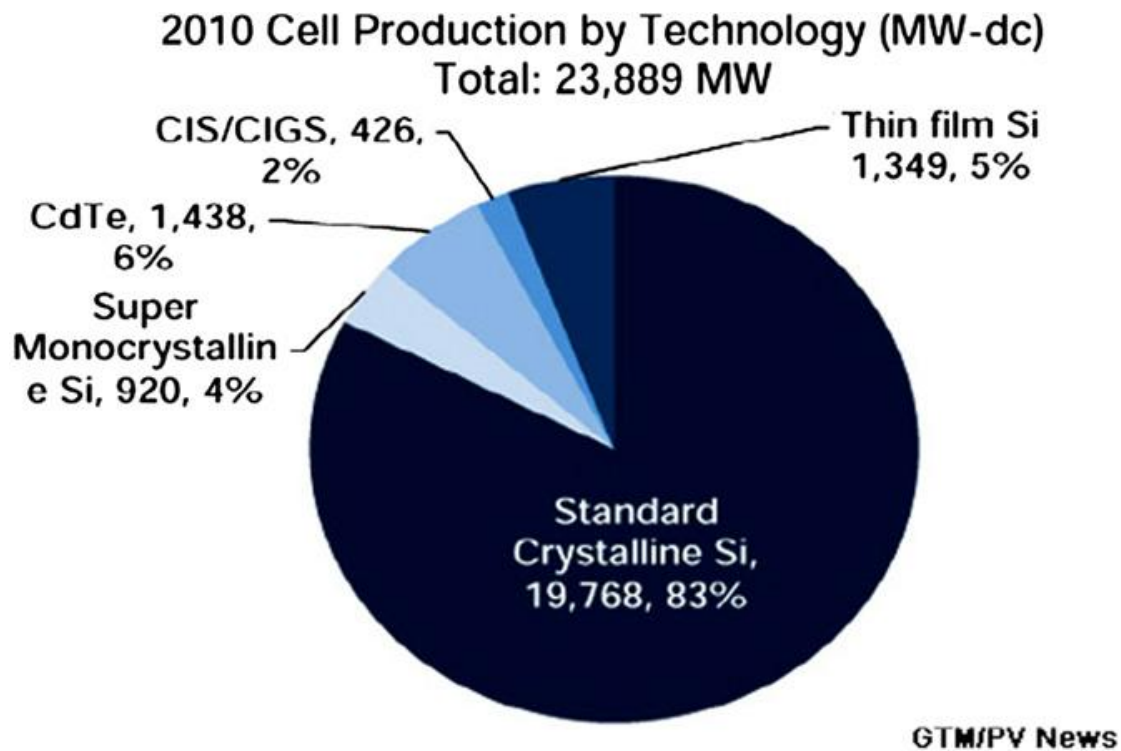
Το γεγονός αυτό φανερώνει ένα σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας του άμορφου πυριτίου που είναι η μικρότερη μείωση ισχύος σε υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος και την επιλογή τεχνολογιών θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο σημαντικά μικρότερος βαθμός απόδοσης (δηλαδή ποσοστού της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρικής ενέργεια, 6-8% έναντι 15-17% για κρυσταλλικά στοιχεία) γεγονός που αυξάνει τις απαιτήσεις χώρου και συναφών εγκαταστάσεων σταθμών με φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου έναντι αντίστοιχων σταθμών με κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά. [5]

3.Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών

Οι κατηγορίες φωτοβολταϊκών ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους ποικίλουν όπως βλέπουμε και στη παρακάτω εικόνα 8. Τα κρυσταλλικά του πυριτίου είναι αυτά που έχουν το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς (εικόνα 9) αλλά και άλλα υλικά και τεχνολογίες έχουν πλέον κάνει την εμφάνιση τους όπου με συνεχής βελτιώσεις γίνονται αρκετά ανταγωνιστικά.



Εικόνα 8 Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων [7]



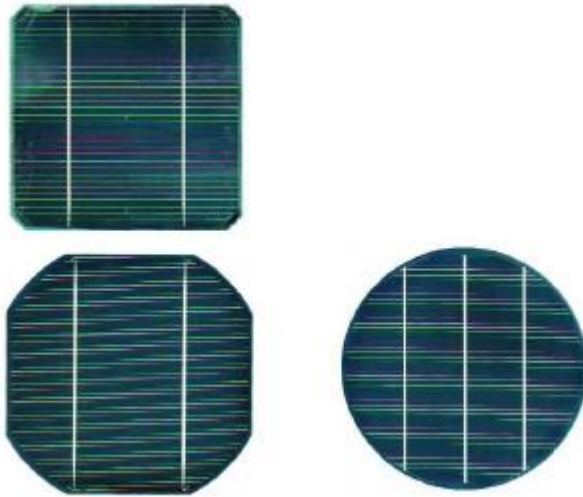
Εικόνα 9 Η αγορά φωτοβολταϊκών στοιχείων το 2010 [7]

3.1 Μονοκρυσταλλικά

Τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από έναν μεγάλο κρυσταλλικό δίσκο (wafer) πυριτίου. Τα στοιχεία αυτά κατασκευάζονται με μία διαδικασία γνωστή ως διαδικασία “Czochralski”. Χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση, της τάξης του 15-18% αλλά και υψηλότερο κόστος. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται σε σχήμα κύκλου, ή σχεδόν κύκλου καθώς και τετράγωνα. Τα κυκλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι φθηνότερα από τα υπόλοιπα επειδή είναι λιγότερα τα υπολείμματα κατά την κατασκευή τους. Ωστόσο δε χρησιμοποιούνται συχνά στην κατασκευή φωτοβολταϊκών πλαισίων επειδή δεν χρησιμοποιείται αποδοτικά μία επιφάνεια, λόγω των κενών μεταξύ τους όταν τοποθετούνται δίπλα το ένα στο άλλο.. Το χρώμα τους είναι συνήθως βαθύ μπλε

έως μαύρο όταν διαθέτουν αντί-ανακλαστική (AR) επίστρωση ή γκρι (χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση).

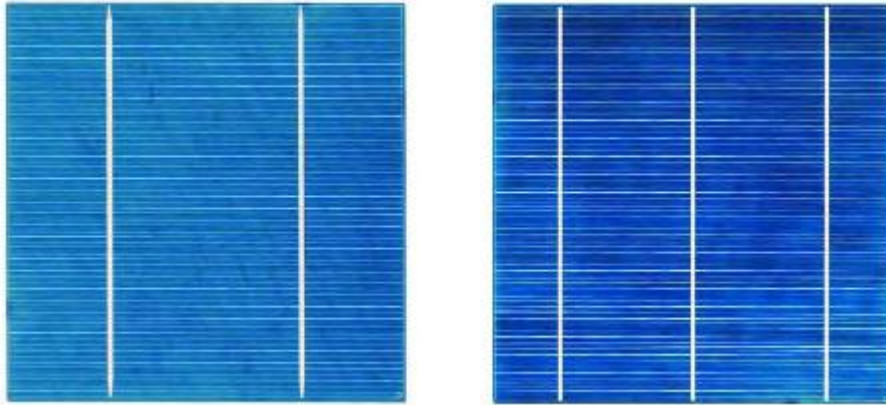
Στην εικόνα 10 βλέπουμε διάφορους τύπους στοιχείων μονοκρυσταλλικού πυριτίου



Εικόνα 10 Μορφές μονοκρυσταλλικών στοιχείων πυριτίου [5]

3.2 Πολυκρυσταλλικά

Τα στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι φθηνότερα από αυτά του μονοκρυσταλλικού πυριτίου αλλά και λιγότερο αποδοτικά. Όπως προκύπτει και από τον όρο, κατασκευάζονται από δίσκους (wafers) πυριτίου που κόβονται από τετραγωνισμένους ράβδους πυριτίου. Η μέθοδος κατασκευής ενός πολυκρυσταλλικού στοιχείου απαιτεί πολύ μικρότερη ακρίβεια και κόστος σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία. Η απόδοση τους κυμαίνεται από 13% έως 16% και κατασκευάζονται συνήθως σε τετράγωνο σχήμα. Το χρώμα τους είναι συνήθως μπλε (με αντί-ανακλαστική επίστρωση) ή γκρι-ασημί (χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση) όπως φαίνονται στην εικόνα 11. [5]



Εικόνα 11 Μορφές πολυκρυσταλλικών στοιχείων πυριτίου [5]

3.3 Αμόρφου πυριτίου

Αρκετή έρευνα έχει διεξαχθεί τα τελευταία χρόνια για την τελειοποίηση μεθόδων κατασκευής ηλιακών στοιχείων με ημιαγωγούς πάχους μόλις μερικών μικρομέτρων, με στόχο την επίτευξη μίας εύλογης απόδοσης με τη χρήση μικρής ποσότητας πυριτίου. Τα στοιχεία αυτά έχουν μικρότερη απόδοση από τα στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου (της τάξης του 5-7%) αλλά με αρκετά χαμηλότερο κόστος, ώστε να τα καθιστά ανταγωνιστικά.

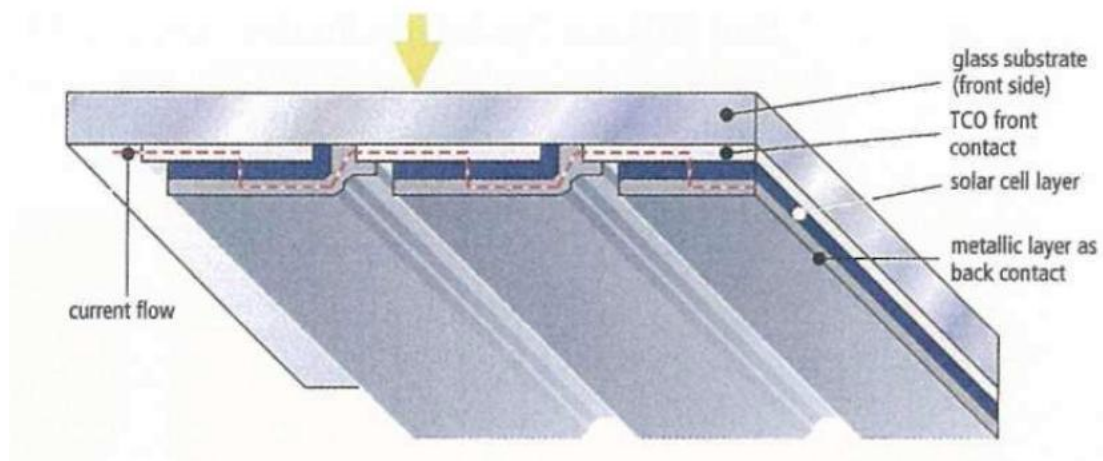
Τα στοιχεία αμόρφου πυριτίου διαφέρουν σημαντικά από τα κρυσταλλικά, από την αρχική φάση κατασκευής τους. Αντί τα ημιαγωγικά υλικά να χυτευθούν και στη συνέχεια να κατατμηθούν σε στοιχεία, στα αμόρφου πυριτίου εναποτίθενται σαν μια λεπτή ημιαγωγική μεμβράνη πάνω σε ένα χαμηλού κόστους υπόστρωμα, συνήθως γυαλί.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι: εναπόθεση ατμών (vapour deposition), διαδικασίες ψεκασμού (sputter processes) και ηλεκτρολυτικά λουτρά (electrolytic

baths). Τα ημιαγώγιμα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι άμορφο πυρίτιο (a-Si), δισεληνιούχος χαλκός με ίνδιο (CIS) και τελουριούχο κάδμιο (CdTe) [5].

Λόγω της υψηλής απορροφητικότητας της ακτινοβολίας αυτών των υλικών, στρώματα με πάχη μικρότερα από 0,001 mm είναι θεωρητικώς ικανοποιητικά για τη μετατροπή του ηλιακού φωτός. Κατά την παραγωγή των αμόρφου πυριτίου στοιχείων οι θερμοκρασίες που απαιτούνται είναι 2000 °C-6000 °C μόνο, έναντι των θερμοκρασιών των κρυσταλλικών που κυμαίνονται περί τους 15000 °C. Η χαμηλότερη κατανάλωση υλικού και ενέργειας, καθώς και η ικανότητα για μια ιδιαίτερα αυτοματοποιημένη παραγωγή καθιστούν την τεχνολογία στοιχείων αμόρφου πυριτίου πιο συμφέρουσα από άποψη κόστους σε σύγκριση με τη συμβατική τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου [8].

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αμόρφου πυριτίου δεν έχουν καθορισμένο σχήμα όπως τα κρυσταλλικά που κατασκευάζονται σε τυποποιημένα μεγέθη (wafers). Θεωρητικά, το υπόστρωμα τους μπορεί να κοπεί σε οποιοδήποτε μέγεθος. Εντούτοις, επειδή μόνο στοιχεία του ίδιου σχήματος μπορούν να συνδεθούν σε σειρά, χρησιμοποιούνται μόνο ορθογώνια σχήματα για πρακτικούς λόγους όπως φαίνεται κ στην εικόνα 12



Εικόνα 12 Σε σειρά συνδεδεμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου.

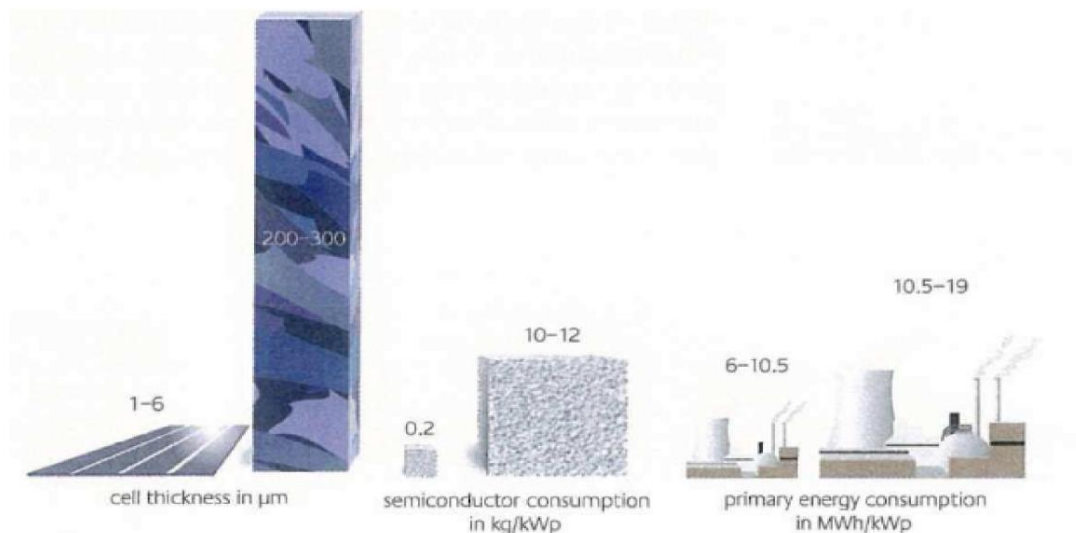
[8]

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που τα διαφοροποιεί από τα κρυσταλλικά είναι ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται μεταξύ τους. Ενώ τα κρυσταλλικά συνδέονται στοιχείο με στοιχείο με εξωτερικούς ακροδέκτες, η ηλεκτρική σύνδεση των στοιχείων αμόρφου πυριτίου είναι αναπόσπαστο κομμάτι της κατασκευής τους, και γίνεται μονολιθικά κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης τους στο υπόστρωμα. Τα στοιχεία κόβονται σε λωρίδες πλάτους 0,5 cm έως 2 cm και μεγάλου μήκους, που μπορεί να ξεπερνά το 1 m.

Η ηλεκτρική επαφή του στοιχείου επιτυγχάνεται στο πίσω μέρος με ένα αδιαφανές επίστρωμα μετάλλων. Στην πρόσθια πλευρά όπου προσπίπτει η ακτινοβολία τοποθετείται ένα ιδιαίτερα διαφανές αγώγιμο στρώμα οξειδίων (transparent conductive oxide, TCO). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο αγώγιμο στρώμα οξειδίων είναι το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO), οξείδιο του κασσιτέρου (SnO_2) και το οξείδιο του κασσιτέρου-ινδίου (ITO). Το τελικό προϊόν προστατεύεται από ατμοσφαιρικούς παράγοντες (σκόνη, ρύποι, νερό) με ενθυλάκωση των στοιχείων με χρήση πολυμερούς EVA (ethylene vinyl acetate) πάνω στο οποίο τοποθετείται τμήμα γυαλιού

Παρά τη σχετικά χαμηλή απόδοση, η ενεργειακή παραγωγή τους μπορεί υπό ορισμένες συνθήκες να είναι αρκετά σημαντική. Η αξιοποίηση της διάχυτης και χαμηλής ακτινοβολίας είναι καλύτερη με τα στοιχεία αμόρφου πυριτίου και έχουν και πιο ευνοϊκό συντελεστή θερμοκρασίας, η μείωση δηλαδή της απόδοσης σε υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας είναι μικρότερη σε σχέση με άλλες τεχνολογίες. Επιπλέον, λόγω της μορφής των στοιχείων τους, οι μακριές στενές λωρίδες είναι λιγότερο ευαίσθητες στη σκίαση [8].

Στην εικόνα 13 βλέπουμε μια σύγκριση μεταξύ πολυκρυσταλλικών και αμόρφου πυριτίου στοιχείων



Εικόνα 13 Σύγκριση κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων (δεξιά) με στοιχεία αμόρφου πυριτίου (αριστερά) [8]

3.3.1 Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου άμορφου πυριτίου

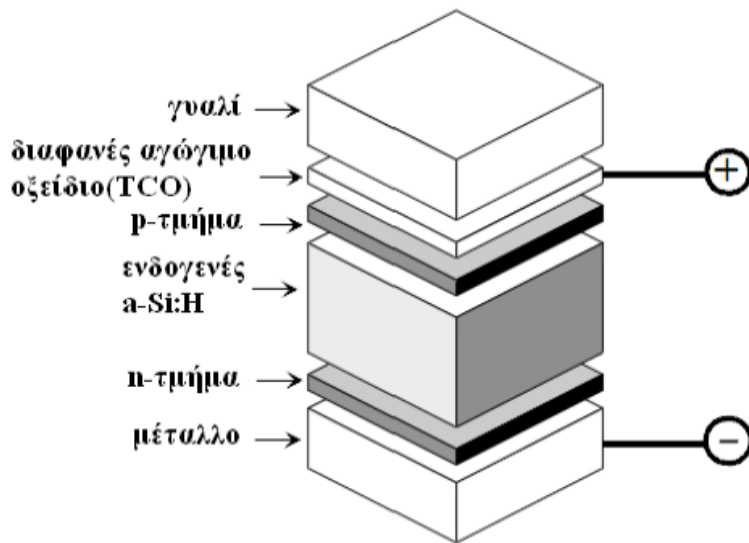
Μεταξύ των φωτοβολταϊκών στοιχείων c-Si και a-Si:H υπάρχει μία βασική διαφορά. Ένα συνηθισμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου αποτελείται από ένα τμήμα p πάχους 300 μm έως 500 μm πάνω στο οποίο τοποθετείται ένα τμήμα n για να σχηματιστεί η διόδος p-n. Η διέγερση των φορέων γίνεται στον όγκο του ηλεκτρικά ουδέτερου τμήματος p (σε απόσταση ίση περίπου με το μήκος διάχυσης από την περιοχή της διόδου) από όπου τα φωτοδιεγερμένα ηλεκτρόνια διαχέονται προς τη ζώνη εξάντλησης της διόδου και ολισθαίνουν προς το n τμήμα μέσω της επίδρασης του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Στο a-Si:H τα μήκη διάχυσης των φορέων είναι πολύ μικρότερα. Σε ένα ενδογενές τμήμα υδρογονωμένου άμορφου πυριτίου το μήκος διάχυσης είναι 0.1 μm έως 0.3 μm . Στα νοθευμένα τμήματα όπου η συγκέντρωση των ατελειών είναι πολύ μεγαλύτερη, το μήκος διάχυσης μειώνεται αισθητά.

Μία δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου βασισμένη στην διάχυση των φορέων μειονότητας στις ηλεκτρικά ουδέτερες νοθευμένες περιοχές, όπως στο κρυσταλλικό πυρίτιο, δεν θα ήταν αποδοτική. Όλοι οι φωτοδιεγερμένοι φορείς θα

επανασυνδέονταν στους μετέωρους δεσμούς προτού φτάσουν στη ζώνη εξάντλησης της διόδου p-n λόγω του πολύ μικρού μήκους διάχυσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η δομή p-i-n που αποτελείται από τρία τμήματα: ένα τμήμα p a-SiC:H, ένα ενδογενές τμήμα a-Si:H (i-layer) και ένα τμήμα n a-Si:H. Το τμήμα p a-SiC:H έχει συνήθως πάχος 10 nm, το ενδογενές τμήμα a-Si:H 300-500 nm και το τμήμα n a-Si:H 20 nm. Το ενδογενές τμήμα τοποθετείται ανάμεσα στα νοθευμένα τμήματα έτσι ώστε να παρουσιάζεται ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που δημιουργούνται εντός του i τμήματος, υπό την επίδραση του πεδίου διαχωρίζονται και τα μεν ηλεκτρόνια ολισθαίνουν προς το n τμήμα ενώ οι οπές προς το p τμήμα όπου συλλέγονται από τους εξωτερικούς ακροδέκτες. Έτσι, η βέλτιστη δομή ενός a-Si:H είναι η ένωση p-i-n.

Τέλος, στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου η επιφάνεια ακτινοβολίας είναι το τμήμα n. Στα στοιχεία άμορφου πυριτίου η ακτινοβολήση μέσω του τμήματος αυτού, θα ανάγκαζε τις δημιουργούμενες οπές να ταξιδέψουν μέχρι τον ακροδέκτη του p τμήματος διαμέσου του ενδογενούς τμήματος. Οι οπές όμως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχουν πολύ μικρότερη κινητικότητα σε σχέση με τα ηλεκτρόνια και σε συνδυασμό με τις ατέλειες του υλικού δεν θα μπορούσαν να συλληχθούν αποτελεσματικά. Για αυτό το λόγο έχει επικρατήσει τα στοιχεία αυτά να ακτινοβολούνται πάντα από την p περιοχή [6].

Στις εικόνες 14 και 15 βλέπουμε την δομή ενός πλαισίου αμόρφου πυριτίου και φωτογραφίες από διάφορα πλαίσια αμόρφου πυριτίου



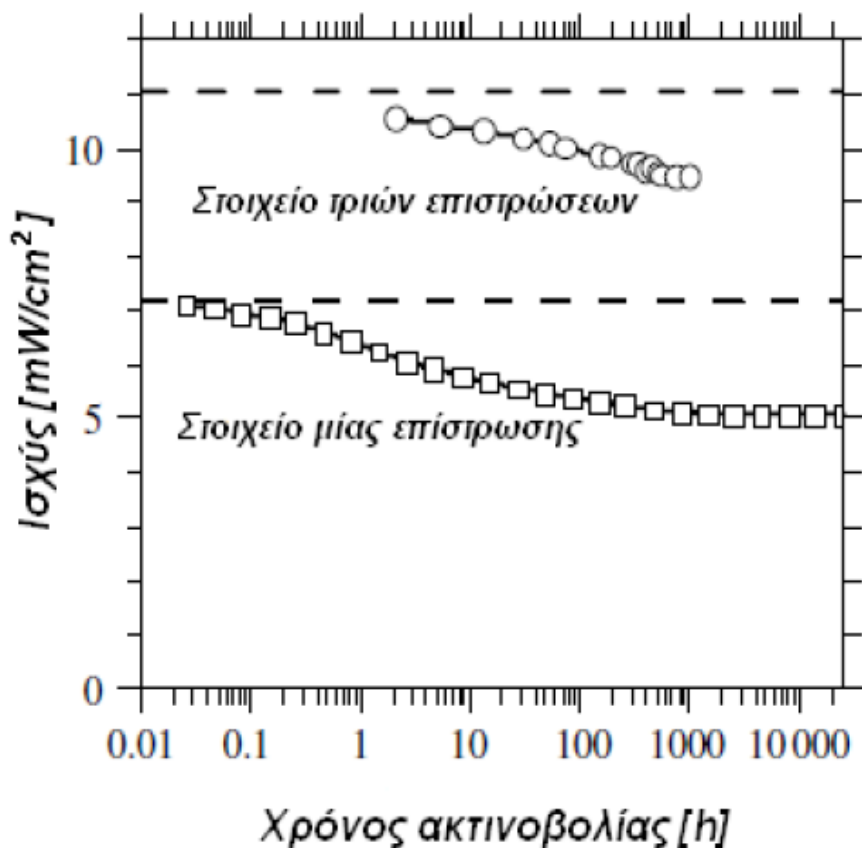
Εικόνα 14 Δομή τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισιου άμορφου πυριτίου [8]



Εικόνα 15 Φωτοβολταϊκά πλαίσια από άμορφο πυρίτιου [5]

3.3.2 Το φαινόμενο Staebler-Wronski

Το φαινόμενο Staebler-Wronski αφορά τις αλλαγές που προκαλούνται στο υλικό λόγω της ακτινοβολίας. Η πυκνότητα των ατελειών του υδρογονωμένου άμορφου πυριτίου αυξάνεται, διότι η ακτινοβολία παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για την απομάκρυνση του υδρογόνου από τους δεσμούς. Άμεση συνέπεια είναι η αύξηση του ρεύματος επανασύνδεσης που οδηγεί σε μείωση της απόδοσης των στοιχείων άμορφου πυριτίου κατά τη διάρκεια των πρώτων 6 έως 12 μηνών, πριν σταθεροποιηθεί στην τελική της τιμή.



Εικόνα 16 Η μείωση της ισχύς εξόδου υπό ακτινοβολία ηλιακού προσομοιωτή (100 mW/cm^2) για ένα στοιχείο μίας επίστρωσης πάχους 260 nm και ενός στοιχείου τριών επιστρώσεων. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι οι αρχικές τιμές της ισχύος εξόδου . [3]

Από την εικόνα 16 είναι εμφανές πως κατά τις πρώτες 1000 ώρες ακτινοβολίας ένα στοιχείο μίας επίστρωσης (single junction) a-Si χάνει περίπου το 30% της αρχικής του απόδοσης, ενώ ένα στοιχείο τριών επιστρώσεων (triple junction), με 3 στρώματα διαφορετικού φωτοβολταϊκού υλικού, το 15%.

Επιπρόσθετα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου παρουσιάζουν μια ακόμη ιδιαιτερότητα αναφορικά με την απόδοσή τους. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα εμφανίζουν μείωση στην απόδοσής η οποία επανέρχεται τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως θερμική αναγέννηση.

Συχνά στα στοιχεία άμορφου πυριτίου εναποτίθενται πολλαπλές δομές p-i-n η μια πάνω στην άλλη, σχηματίζονται έτσι πολυστρωματικά ηλιακά στοιχεία. Τα *tandem*

στοιχεία αποτελούνται από δύο τέτοιες επιστρώσεις και τα *triple* από τρεις. Η εν λόγω δομή επιτρέπει να επιτυγχάνονται υψηλότερες αποδόσεις, δεδομένου ότι κάθε τμήμα του στοιχείου μπορεί να βελτιστοποιηθεί για διαφορετική ζώνη μήκους κύματος του ηλιακού φάσματος. Επιπλέον, στα πολυστρωματικά στοιχεία το φαινόμενο της γήρανσης μειώνεται δεδομένου πως το κάθε i-στρώμα είναι λεπτότερο και συνεπώς λιγότερο ευαίσθητο στην υποβάθμιση λόγω της έκθεσης στο φως (light degradation).

Απόδοση: 5% έως 7% απόδοση πλαισίου στη σταθεροποιημένη κατάσταση.

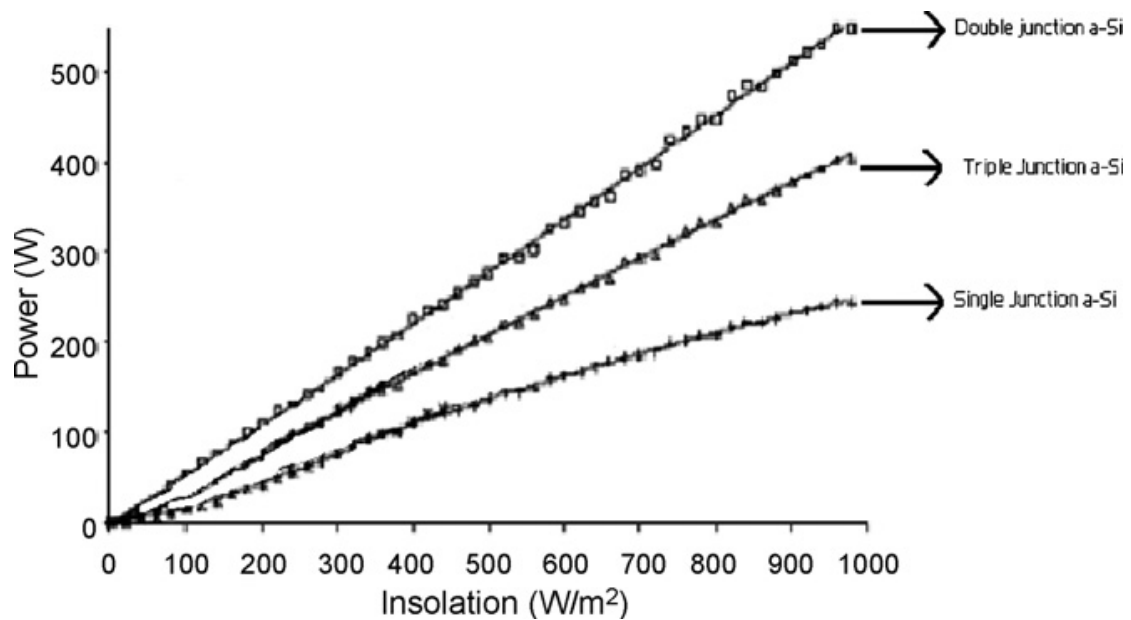
Μέγεθος: τυπικά πλαίσια, μέγιστες διαστάσεις 0,79 m x 2,44 m, ειδικά πλαίσια, μέγιστες διαστάσεις 2 m x 3 m.

Πάχος: 1 mm έως 3 mm υλικού υποστρώματος (γυαλί, μέταλλο, περιστασιακά 0,05 mm πλαστικό), με περίπου 0,001 mm (1nm) πάχος στρώματος, από το οποίο περίπου 0,3 nm είναι άμορφο πυρίτιο.

Εμφάνιση: ομοιογενής.

Χρώμα: κοκκινωπό καφέ με μπλε ή μπλε-ιώδες.

Συνοψίζοντας, τα πλαίσια αμόρφου πυριτίου και τα κρυσταλλικά πλαίσια διαφέρουν ως προς την απόδοση, την εξάρτηση από τη θερμοκρασία, τη φασματική απορρόφηση και την ανοχή στη σκίαση. Η χαμηλότερη απόδοση των πρώτων ουσιαστικά σημαίνει ότι για να επιτευχθεί η επιθυμητή παραγωγή ενέργειας απαιτείται μεγαλύτερη επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά. Πέραν αυτών, αξιοσημείωτη είναι η εμφάνιση πιο επίπεδων χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης ($I-V$) στα πλαίσια αμόρφου πυριτίου, που οδηγεί σε μικρότερους συντελεστές πλήρωσης (FF). Η περιορισμένη επίδραση της θερμοκρασίας οφείλεται στις υψηλότερες στάθμες των ενεργειακών διάκενων συμβάλλοντας καθοριστικά σε αποδοτικότερη λειτουργία. Στην εικόνα 17 βλέπουμε πως μεταβάλλεται η παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού πλαισίου σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία για αντιπροσωπευτικές υποσυστοιχίες αμόρφου πυριτίου [8], [9]



Εικόνα 17 Μεταβολή της παραγόμενης ισχύος φωτοβολταϊκού πλαισίου σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία για αντιπροσωπευτικές υποσυστοιχίες αμόρφου πυριτίου [10]

3.3.3 Φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων με κρυσταλλικό πυρίτιο

Τα αμόρφου πυριτίου ηλιακά στοιχεία από κρυσταλλικό πυρίτιο είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για το μέλλον. Δεν επωφελούνται μόνο από τα πλεονεκτήματα του κρυσταλλικού πυριτίου, αλλά και από τα πλεονεκτήματα

κατασκευής της τεχνολογίας αμόρφου πυριτίου φθηνή αυτοματοποιημένη μαζική παραγωγή με ελάχιστη κατανάλωση υλικού. Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά δυο τύποι στοιχείων της εν λόγω τεχνολογίας.

3.3.4 Φωτοβολταϊκά μικροκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου

Η κατασκευή των μικροκρυσταλλικών και μικροάμορφων στοιχείων πραγματοποιείται αντίστοιχα με την τεχνολογία λεπτών υμενίων, με εναπόθεση υλικού όπως στο άμορφο πυρίτιο. Η εναπόθεση γίνεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 200 °C και 600 °C και παράγονται ταινίες πυριτίου με μικροκρυσταλλικές δομές. Οι χαμηλές θερμοκρασίες επιτρέπουν τη χρήση φθηνών υποστρωμάτων κατασκευασμένα από γυαλί, μέταλλο ή πλαστικό. Προκειμένου να δημιουργηθούν στρώματα κρυσταλλικού πυριτίου πάχους μικρότερου των 10 nm, που παρά τη χαμηλή ικανότητα απορρόφησής τους να είναι αποδοτικά, η επιφάνεια του διαφανούς αγώγιμου υλικού (transparent conductive oxide, TCO) διαμορφώνεται ανάγλυφα, ώστε να βελτιστοποιηθεί η δέσμευση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τα μικροκρυσταλλικά στοιχεία έχουν παρόμοιες οπτικές ιδιότητες με τα κρυσταλλικά και οι αποδόσεις τους ξεπερνούν το 8.5%.

Καλύτερα αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν με συνδυασμό άμορφου πυριτίου σε στοιχεία δύο στρωμάτων (tandem). Αυτά τα στοιχεία ονομάζονται μικροάμορφα, όρος προερχόμενος από τις λέξεις μικροκρυσταλλικό και άμορφο. Όταν συνδυάζονται, αξιοποιούν αποδοτικότερα το ηλιακό φάσμα από ό,τι μπορούν μεμονωμένα, καθώς απορροφούν ακτινοβολία ευρύτερου φάσματος, ενώ παράλληλα υφίστανται ηπιότερη υποβάθμιση από ακτινοβολία, σε αντίθεση με τα καθαρά άμορφα στοιχεία. Η απόδοση εμπορικών πλαισίων αγγίζει το 9%, ενώ η μέγιστη απόδοση που έχει επιτευχθεί είναι 12%. [8].

3.3.5 Φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου σε γυαλί (CSG)

Τα αμόρφου πυριτίου στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου σε γυαλί (CSG) δημιουργήθηκαν με σκοπό να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα των δισκίων (wafers) πυριτίου, δηλαδή ανθεκτικότητα και αντοχή των καλών ηλεκτρικών ιδιοτήτων τους, με τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αμόρφου πυριτίου, μικρή ποσότητα υλικού, μεγάλη μονολιθική δομή και υπόστρωμα φθηνού υλικού, γυαλί. Η πρόκληση της τεχνολογίας CGS είναι να ταιριάζουν οι διαφορετικές θερμοκρασίες επεξεργασίας πυριτίου και γυαλιού, και ταυτόχρονα να υπάρξει ικανοποιητική εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στο μειωμένης απορροφητικότητας μικρού πάχους στρώμα πυριτίου (1,4 nm).

Τα πρώτα πλαίσια μαζικής παραγωγής έχουν αποδόσεις της τάξεως του 9%, ενώ οι προβλέψεις για τα επόμενα χρόνια αναφέρουν αύξηση στο 12% με 13%. Η εκτίμηση αυτή για tandem κύτταρα είναι στο 16% με 17% ενώ για triple αγγίζει το 18% με 19% [11]

3.3.6 Φωτοβολταϊκά καδμίου-τελλουρίου (CdTe)

Το τελλουριούχο κάδμιο είναι ένα ημιαγώγιμο υλικό που αποτελείται από κάδμιο και τελλούριο, το οποίο διακρίνεται για τον υψηλό βαθμό απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και το ενεργειακό του διάκενο ($\sim 1\text{eV}$) που είναι πολύ κοντά στο ιδανικό. Αρκεί πάχος 1 μm ώστε να απορροφηθεί το 90% του ηλιακού φάσματος.

Υπάρχουν τεχνικές χαμηλού κόστους, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόθεση του CdTe, και αφού υποστεί μια επεξεργασία, να παραχθεί υλικό υψηλής ποιότητας και αποδοτικά ηλιακά στοιχεία. Τα πλαίσια CdTe έχουν το χαμηλότερο κόστος παραγωγής σε σχέση με τα άλλα αμόρφου πυριτίου πλαίσια.

Μειονέκτημα όμως της συγκεκριμένης τεχνολογίας αποτελεί το γεγονός πως το κάδμιο είναι τοξικό υλικό απαιτώντας τη λήψη αυξημένων μέτρων προστασίας κατά την παραγωγή του. Το κάδμιο (βαρύ μέταλλο), σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του, το οποίο βέβαια θα οδηγούσε σε μείωση του κόστους παραγωγής. Βέβαια, δεδομένου ότι το κάδμιο που χρησιμοποιείται λαμβάνεται από την εξόρυξη ψευδαργύρου ως απόβλητο προϊόν, η μεταποίησή του σε αβλαβές CdTe στα ηλιακά πλαίσια μπορεί να θεωρηθεί ως οικολογικά επωφελής διαδικασία. Επίσης μειονέκτημα είναι το γεγονός της χρήσης του σπάνιου μετάλλου τελλουρίου.

Το CdTe είναι μη τοξική και πολύ σταθερή ένωση, διασπάται σε θερμοκρασίες άνω των 1000° C και δεν υπάρχει φόβος για το περιβάλλον και την υγεία, καθώς ακόμη και στο ενδεχόμενο πυρκαγιάς το βαρύ μέταλλο θα παραμείνει εγκλωβισμένο στο γυαλί του πλαισίου, το οποίο τήκεται σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία [12]. Οι κατασκευαστές ανακυκλώνουν τα πλαίσια που έχουν φθάσει στο τέλος ζωής τους με μια φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία.

Απόδοση: 8,5% απόδοση πλαισίου.

Πάχος: 3mm υλικό υποστρώματος (γυαλί) με 0,005mm στρώμα CdTe.

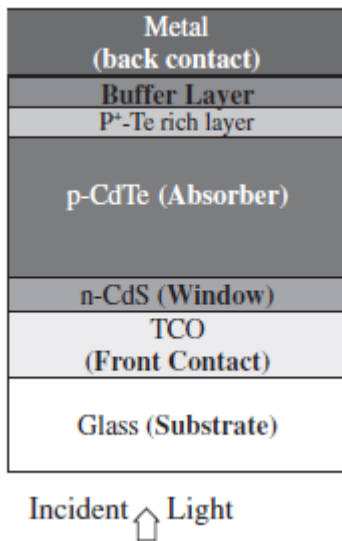
Μέγεθος: τυπικά πλαίσια 1,2 x 0,6 m.

Εμφάνιση: ομοιογενής.

Χρώμα: αντανάκλαστικό σκούρο πράσινο σε μαύρο.

[3], [5]

Στην παρακάτω εικόνα 18 βλέπουμε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο CdTe



Εικόνα 18 CdTe / Cds φωτοβολταϊκό στοιχείο [12]

3.3.7 Φωτοβολταϊκά χαλκού-ινδίου / Γαλλίου – δισεληνιούχου

Αποτελεί μια από τις περισσότερες υποσχόμενες τεχνολογίες, όπου στοιχεία λεπτού υμενίου κατασκευάζονται από έναν συνδυασμό χαλκού-ινδίου-δισεληνιούχου που ονομάζονται κύτταρα CIS και χαλκού-γαλλίου-δισεληνιούχου που ονομάζονται κύτταρα CIGS.

Ο δισεληνιούχος ινδιούχος χαλκός είναι ημιαγωγικό υλικό, τύπου-n ή τύπου-p, με τον υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης που έχει μετρηθεί μέχρι σήμερα. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των CIS εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον λόγο χαλκού/ινδίου. Πλεονεκτούν σε σχέση με τα στοιχεία άμορφου πυριτίου, καθώς δεν εμφανίζουν μείωση στην απόδοσή τους λόγω της ακτινοβολίας (light degradation), και προσφέρουν επίσης μεγάλη οικονομία στα ημιαγωγικά υλικά. Μειονέκτημα της τεχνολογίας είναι οι περιορισμένες ποσότητες ινδίου που είναι διαθέσιμες στη φύση, καθώς επίσης και τα αυξημένα μέτρα ασφαλείας που λαμβάνονται κατά την κατασκευή, εξαιτίας και της παραγωγής σεληνιούχου

υδρογόνου, ενός εξαιρετικά τοξικού αερίου. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), χύτευση πυριτίου και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.

Απόδοση: 9% έως 11 % απόδοση πλαισίου.

Μέγεθος: τυπικά πλαίσια, μέγιστες διαστάσεις 1,2 m x 0,6 m.

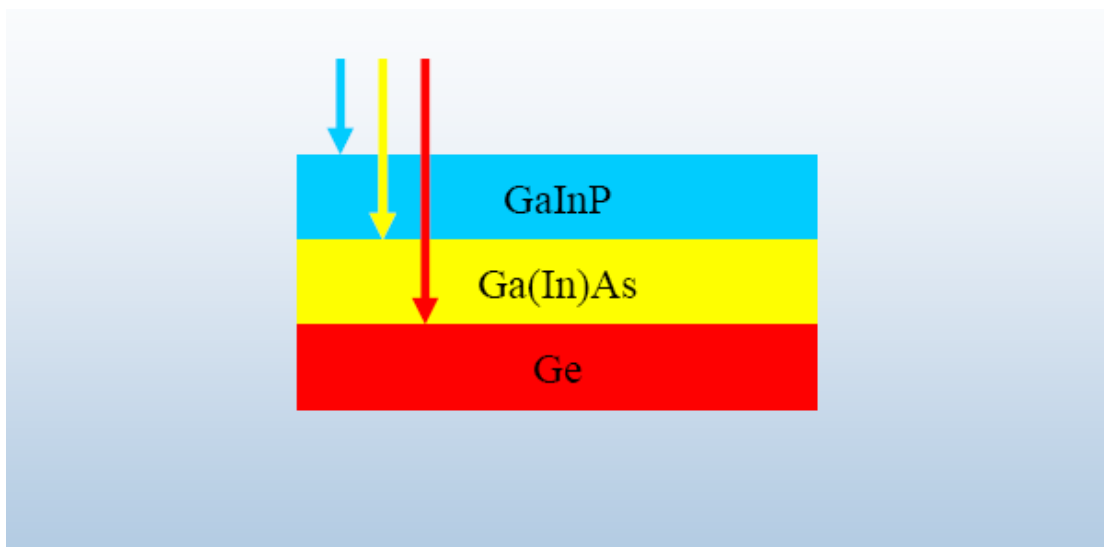
Πάχος: 2 mm έως 4 mm υλικό υποστρώματος (γυαλί) με 3 nm έως 4 nm πάχος στρώματος, εκ των οποίων περίπου 1 nm έως 2 nm CIS.

Εμφάνιση: ομοιογενής.

Χρώμα: σκούρο γκρι, μαύρο. [3]

Εκτός των παραπάνω συναντά κανείς και τους παρακάτω τύπους κυττάρων σε μικρό βαθμό ή σε εργαστηριακό επίπεδο:

.



Εικόνα 19 Multijunction φωτοβολταϊκο πλαίσιο [10]

3.4 Υβριδικά

Τα υβριδικά ηλιακά στοιχεία (HIT) είναι συνδυασμός ενός κρυσταλλικού και ενός άμορφου πυριτίου κυττάρου που είναι συνδεδεμένα με ένα επιπλέον μη-νοθευμένο άμορφου πυριτίου (i-στρώμα). Το μονοκρυσταλλικό κύτταρο (wafer) συνιστά τον πυρήνα του HIT κυττάρου και επικαλύπτεται και από τις δύο πλευρές του με ένα λεπτό στρώμα από άμορφο πυρίτιο (a-Si). Ως ενδιάμεσο τμήμα χρησιμοποιείται, μια εξαιρετικά λεπτή μη νοθευμένη μεμβράνη άμορφου πυριτίου που ενώνει το κρυσταλλικό με τα άλλα στρώματα άμορφου πυριτίου.

Η διαφορά με τα συμβατικά ηλιακά στοιχεία πυριτίου, έγκειται στο γεγονός πως στα συμβατικά το ίδιο ημιαγώγιμο υλικό νοθεύεται με διαφορετικό τρόπο ώστε να δημιουργηθεί μια p-n ένωση, ενώ στα HIT αυτό συμβαίνει μεταξύ των δύο διαφορετικών υλικών (heterojunction). Έτσι το άμορφο p/i τμήμα και το n τμήμα του κρυσταλλικού στοιχείου δημιουργούν μια δομή p-i-n όπως τα κύτταρα άμορφου πυριτίου. Επιπλέον, δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο της υποβάθμισης από την ακτινοβολία όπως τα άμορφου πυριτίου, ενώ εν συγκρίσει με τα κρυσταλλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποδόσεις σε υψηλές θερμοκρασίες και αποδοτικότερη αξιοποίηση του ηλιακού φάσματος.

Για κάθε βαθμό κελσίου αύξηση της θερμοκρασίας, η απόδοση μειώνεται τυπικά μόνο κατά 0,33% σε σύγκριση με το 0,45% του κρυσταλλικού πυριτίου. Επίσης, κατά την κατασκευή των HIT απαιτούνται μικρότερα ποσά ενέργειας και υλικού, ενώ η απαιτούμενη θερμοκρασία εναπόθεσης είναι μόλις 200 C [13].

Απόδοση: 18,5%.

3.5 Φωτοβολταϊκά τεχνολογίας III-IV ομάδας του περιοδικού πίνακα

Το όνομα των τεχνολογιών αυτών έχει προκύψει από το βασικό υλικό κατασκευής τους, το οποίο κατατάσσεται στην τρίτη ή τέταρτη ομάδα του περιοδικού πίνακα.

Οι τεχνολογίες αυτές έχουν μεν υψηλή ικανότητα μετατροπής αλλά συγχρόνως παρουσιάζουν και υψηλό κόστος. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται έχουν ικανότητα μετατροπής γύρω στο 25%, όπως το αρσενιούχο γάλιο, το οποίο συνδυάζεται με άλλες ουσίες για τη δημιουργία ημιαγωγών που αποκρίνονται σε διαφορετικούς τύπους ηλιακής ενέργειας.

Ωστόσο, η χρήση τους περιορίζεται μόνο σε αεροδιαστημικές εφαρμογές εξαιτίας του υψηλού κόστους όπως προαναφέρθηκε [19].

3.6 Ηλεκτροχημικά φωτοβολταϊκά

Σε αντίθεση με τα ημιαγωγικά στοιχεία που προαναφέρθηκαν τα οποία ακολουθούν τις αρχές λειτουργίας που συναντούμε στις ημιαγωγικές διατάξεις p-n, η λειτουργία των ηλεκτροχημικών (ή φωτοηλεκτροχημικών) φωτοβολταϊκών στηρίζεται σε οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις και φαινόμενα διάχυσης. Τα φωτοηλεκτροχημικά στοιχεία μειονεκτούν έναντι των ημιαγωγικών σε αποδόσεις, υπερτερούν όμως σε θέματα χαμηλού κόστους, ευκολίας κατασκευής και χρήσης τους σε ειδικές εφαρμογές. Τα πρώτα ηλιακά στοιχεία αυτής της τεχνολογίας αποτελούνταν από ένα μεμονωμένο στρώμα οξειδίου του τιτανίου και δεν παρουσίαζαν υψηλές αποδόσεις επειδή το TiO_2 απορροφά μόνο την υπεριώδη ακτινοβολία. Με την κατασκευή των ευαισθητοποιημένων ηλιακών κυττάρων (Dye-sensitized solar cells, DSSCs) η απόδοση αυξήθηκε καθώς η χρωστική ουσία που χρησιμοποιείται απορροφά στο ορατό φάσμα και έτσι σε συνδυασμό με τον ημιαγωγό, το φάσμα απορρόφησης του κυττάρου διευρύνεται. [3]

3.7 Οργανικά/πολυμερή φωτοβολταϊκά

Αποτελούν μία σχετικά νέα τεχνολογία. Τα οργανικά στοιχεία λειτουργούν με έναν λίγο διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες: αντί για ημιαγωγικές p-n επαφές, τα οργανικά στοιχεία χρησιμοποιούν οργανικά υλικά που λειτουργούν ως δότες και δέκτες ηλεκτρονίων. Το μεγάλο πλεονέκτημα χρήσης οργανικών

υλικών είναι ότι επιτρέπουν την μεγάλης-κλίμακας, χαμηλής-θερμοκρασίας κατασκευή εύκαμπτων ηλιακών στοιχείων σε υποστρώματα πλαστικών. Η απόδοση των οργανικών κελιών είναι σήμερα της τάξης του 5-6%, ωστόσο η αύξηση της πρόκειται να μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής ηλιακών στοιχείων.[5]

4.Πειραματικό μέρος

4.1 Πρότυπο IEC 61724

4.1.1 Εισαγωγή

Αυτό το πρότυπο περιγράφει τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση και τη παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη παρακολούθηση της λειτουργίας μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται στο πρότυπο έχουν αναπτυχθεί ειδικά για το πρόγραμμα επίδειξης φωτοβολταϊκών που διαχειρίζεται η Ευρωπαϊκή Επιτροπή και συγκεκριμένα η Γενική Διεύθυνση Ενέργειας.

Η σύνταξη του προτύπου έχει γίνει από το κέντρο ερευνών της ευρωπαϊκής κοινότητας, το ινστιτούτο μηχανικής και πληροφορικής στην Ιταλία με την τεχνική υποστήριξη από την ευρωπαϊκή ομάδα εργασίας για την επιτήρηση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

4.1.2 Στόχος του προτύπου

Τα δεδομένα που συλλέγουμε από τα όργανα μέτρησης της εγκατάστασης αξιολογούνται βάσει μεθόδου που περιγράφεται παρακάτω. Συλλέγουμε και αξιολογούμε ανά λεπτό μέτρησης των βασικών παραμέτρων.

Στόχοι της παρακολούθησης της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι :

- Ο προσδιορισμός της απόδοσης της εγκατάστασης, της αξιοπιστίας της και της αντοχής των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένη.
- Η αξιολόγηση της ποιότητας σχεδίασης της εγκατάστασης και της επιλογής του κατάλληλου μετατροπέα (inverter).
- Να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις από τη κακή χρήση του φωτοβολταϊκού συστήματος ξεχωριστά απ τις επιπτώσεις της απόδοσης και των απωλειών.
- Παρέχει στους χρήστες πληροφορίες για την απόδοση και τη λειτουργία της εγκατάστασης.
- Τα δεδομένα μετά την ανάλυση τους με την παρακάτω μέθοδο παρουσιάζονται με μια μορφή ώστε α) να είναι εύκολα κατανοητά από τους χρήστες και β) να είναι κατάλληλα για να μπορούν να συγκριθούν φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις διαφορετικού μεγέθους και εφαρμογής , που λειτουργούν σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες.
- Παρέχει δεδομένα για μια γενική εκτίμηση της αξιολόγησης της υπό μελέτη φωτοβολταϊκής εγκατάστασης και βελτίωσης της εγκατάστασης όσο αναφορά το σχεδιασμό και τη λειτουργία της.

4.1.3 Παράμετροι έλεγχου και παραγωγής

Είναι οι ωριαίες μέσες τιμές των στιγμιαίων μετρήσεων από τα οποίες μπορούν να υπολογισθούν αθροίσματα ή μέσοι όροι μεγαλύτερων διαστημάτων όπως ημέρας, μήνα, έτους.

Όλα τα αρχικά δεδομένα υποβάλλονται σε αρχικό έλεγχο για συνοχή και κενά προκειμένου να διαπιστωθούν ανωμαλίες πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση τους. Το κάθε δεδομένο καταγράφεται με μια λογική σειρά, μπορεί να διαπιστωθούν λάθη που δε ήταν τόσο προφανή , αυτά εντοπίζονται καθώς και οι

λόγοι που τα προκάλεσαν και επισημαίνονται ώστε να ληφθούν μέτρα αποφυγής παρόμοιων λαθών στο μέλλον.

Επίσης προσδιορίζουμε τον συνολικό χρόνο της παρακολούθησης της δραστηριότητας t_m στην περίοδο αναφοράς r , δηλαδή ο αριθμός των ωρών στην περίοδο αναφοράς για τη οποία έχουμε καταγραφεί δεδομένων.

4.1.4 Ενεργειακό ισοζύγιο

Στο πρώτο στάδιο της λεπτομερούς ανάλυσης οι ωριαίες καταγραφές δεδομένων υποβάλλονται σε επεξεργασία για το προσδιορισμό των συνολικών ενεργειακών ισοζυγίων για το σύστημα. Αυτά τα ισοζύγια περιλαμβάνουν εισερχόμενες και εξερχόμενες ενέργειες.

Η συνολική ημερήσια ενέργεια εναλλασσομένου ρεύματος $E_{use, PV, d}$, μηνιαία $E_{use, PV, m}$ και η μέση τιμή της μηνιαίας ημερήσιας ενέργειας $E_{use, PV, av}$ που παράγεται λαμβάνεται από τους παρακάτω τύπους

$$E_{use, PV, d} = \sum_{\substack{t=1 \\ \text{έως} \\ t=24}}^{t=1} E_{use, PV, t} \quad E_{use, PV, m} = \sum_{d=1}^N E_{use, PV, d} \quad \text{όπου } N \text{ οι μέρες του αντίστοιχου}$$

$$\text{μήνα και } E_{use, PV, av} = \frac{1}{N} \sum_{d=1}^N E_{use, PV, d} \quad \text{όπου } N \text{ οι μέρες του αντίστοιχου μήνα (2)}$$

Αντίστοιχοι τύποι ισχύουν και για την ημερήσια ενέργεια συνεχούς ρεύματος $E_{A, d}$ που παράγει η συστοιχία καθώς και την αντίστοιχη μηνιαία $E_{A, m}$ και μέση μηνιαία ημερήσια ενέργεια

$$E_{A, d} = \sum_{\substack{t=1 \\ \text{έως} \\ t=24}}^{t=1} E_{A, t} \quad E_{A, m} = \sum_{d=1}^N E_{A, d} \quad \text{όπου } N \text{ οι μέρες του αντίστοιχου μήνα και}$$

$$E_{A, av} = \frac{1}{N} \sum_{d=1}^N E_{A, d} \quad \text{όπου } N \text{ οι μέρες του αντίστοιχου μήνα (3)}$$

4.1.5 Δείκτες απόδοσης – απωλειών

Προκειμένου να συγκριθούν διαφορετικά φωτοβολταϊκά συστήματα είναι σημαντικό να παραχθούν κανονικοποιημένοι δείκτες απόδοσης που αναλύονται παρακάτω. Αυτοί βγαίνουν είτε με διαίρεση της ωφέλιμης ενέργειας με την ονομαστική ισχύ του συστήματος ή από τη συνολική επιφάνεια της συστοιχίας και την ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο της συστοιχίας. Το πρώτο οδηγεί σε τελικές αποδόσεις ενώ το δεύτερο σε συνολικές αποδόσεις.

Οι ακόλουθοι δείκτες απόδοσης λαμβάνονται συσχετίζοντας την παραγόμενη ενέργεια καθώς και την ωφέλιμη ενέργεια της συστοιχίας με την ονομαστική ισχύ P_o της συστοιχίας.

P_o είναι η τιμή της ισχύος κατά το σχεδιασμό της συστοιχίας, ισχύς εξόδου στο σημείο μέγιστης ισχύος μετρημένης υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας (STC)

Η απόδοση αναφοράς Y_r είναι το σύνολο της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του φωτοβολταϊκού συστήματος G_i διαιρούμενο με την τιμή αναφοράς ακτινοβολίας ($G_{stc} = 1 \text{ kW/ m}^2$). Είναι ένας λόγος που εξαρτάται από τη τοποθεσία, προσανατολισμό, κλίση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας καθώς και από τον χρόνο και την αστάθεια των καιρικών συνθηκών. Δίδεται από το τύπο

$$Y_r = G_i / G_{stc} \quad (4)$$

Η ημερήσια απόδοση αναφοράς $Y_{r,d}$ και η μηνιαία μέση ημερήσια απόδοση αναφοράς $Y_{r,m}$ δίνονται από τους τύπους: $Y_{r,d} = G_i / G_{stc}$, $Y_{r,m} = \sum_{d=1}^N Y_{r,d}$. Όπου N οι μέρες του αντίστοιχου μήνα.

Η ετήσια μέση ημερήσια απόδοση αναφοράς $Y_{r,y}$ δίνεται από το τύπο

$$Y_{r,y} = \frac{1}{N} \sum_{d=1}^N Y_{r,m} \quad \text{Όπου } N \text{ οι μήνες του χρόνου.}$$

Αυτή η απόδοση αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ωρών ανά ημέρα κατά τη διάρκεια των οποίων η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας θα πρέπει να είναι στα επίπεδα αναφοράς (σε STC 1 kW/m^2) προκειμένου να συμβάλει την ίδια ενέργεια με αυτή που καταγράφηκε.

Η απόδοση της συστοιχίας (Y_A) ορίζεται ως η παραγωγή ενέργειας από μια συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων σε καθορισμένο χρονικό διάστημα (ημέρα , μήνας , χρόνος) , διαιρούμενο με την ονομαστική ισχύ της συστοιχίας και δίνεται ως

$$Y_A = E_A / P_o. (5)$$

Η ημερήσια απόδοση συστοιχίας ($Y_{A,d}$) και η μηνιαία μέση ημερήσια απόδοση συστοιχίας ($Y_{A,m}$) δίνεται από τους τύπους $Y_{A,d} = E_{A,d} / P_o$ και

$$Y_{A,m} = \frac{1}{N} \sum_{d=1}^N Y_{A,d} . \text{Όπου } N \text{ οι μέρες του αντίστοιχου μήνα. Η ετήσια μέση}$$

ημερήσια απόδοση συστοιχίας $Y_{A,y}$ δίνεται από το τύπο $Y_{A,y} = \frac{1}{N} \sum_{d=1}^N Y_{A,m}$ όπου N οι μήνες του έτους.

Αυτή η απόδοση αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ωρών ανά ημέρα όπου η συστοιχία θα πρέπει να λειτουργεί με ονομαστική ισχύ P_o ώστε να παράγει την ίδια ενέργεια με αυτή που καταγράφηκε.

Η τελική απόδοση Y_f ορίζεται ως η ετήσια , μηνιαία ή ημερήσια παραγόμενη ενέργεια εξόδου εναλλασσομένου ρεύματος διαιρούμενη με τη μέγιστη ισχύ του εγκατεστημένου φωτοβολταϊκού συστήματος σε κανονικές συνθήκες (STC).

$$Y_f = E_{\text{use,PV}} / P_o (6)$$

Η ημερήσια τελική απόδοση $Y_{f,d}$ και η μηνιαία μέση ημερήσια τελική απόδοση $Y_{f,m}$ δίνεται από τους τύπους : $Y_{f,d} = E_{\text{use,PV,d}} / P_o$ και

$Y_{f,m} = \sum_{d=1}^N Y_{f,d}$ όπου N οι ημέρες του συγκεκριμένου μήνα. Η ετήσια μέση ημερήσια τελική απόδοση $Y_{f,y}$ δίνεται από το τύπο $Y_{f,y} = \frac{1}{N} \sum_{d=1}^N Y_{f,m}$ όπου N οι μήνες του έτους.

Η τελική απόδοση αντιπροσωπεύει των αριθμό ωρών ανα ημέρα που το φωτοβολταϊκό σύστημα χρειάζεται να λειτουργεί με την ονομαστική του ισχύ P_o ώστε να δοθεί στο δίκτυο καθαρή ενέργεια ίση με αυτή που καταγράφουμε.

Η διορθωμένη θερμοκρασιακά απόδοση αναφοράς Y_T η οποία δίνεται από το τύπο

$$Y_T = n_{tem} \cdot Y_r \quad (7)$$

Ο θερμοκρασιακός συντελεστής απωλειών περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.1.7.

Τέλος υπολογίζουμε δυο όρους , τον K_T παράγοντας θερμοκρασιακής διόρθωσης που δίνεται από το τύπο

$$K_T = Y_T / Y_r \quad (8)$$

Τον χειμώνα ο συντελεστής αυτός έχει μεγαλύτερες τιμές απ ότι τους καλοκαιρινούς μήνες.

Τον K_G παράγοντας διόρθωσης φωτοβολταϊκού πλαισίου που δίνεται από το τύπο

$$K_G = Y_A / Y_T \quad (9)$$

και έχει μεγαλύτερες τιμές το χειμώνα και μικρότερες το καλοκαίρι.

Οι απώλειες σύλληψης L_C είναι απώλειες που προκαλούνται από διάφορους παράγοντες που οφείλονται στην λειτουργία της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, όπως απώλειες λόγω θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων πάνω από 25°C , απώλειες λόγω σκιάσεων, απώλειες λόγω σκόνης στο πλαίσιο. Δίνονται από το τύπο

$$L_C = Y_r - Y_A \quad (10)$$

Οι απώλειες σύλληψης (L_C) είναι άθροισμα δύο συνιστωσών, των απωλειών σύλληψης λόγω θερμοκρασίας (L_{CT}) και των διαφόρων απωλειών σύλληψης (L_{CM}).

- Θερμικές απώλειες σύλληψης L_{CT} Οι απώλειες σύλληψης λόγω θερμοκρασίας οφείλονται στις απώλειες όταν η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι μεγαλύτερη από 25°C .
- Διάφορες απώλειες σύλληψης L_{CM} που οφείλονται σε παράγοντες όπως χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία, σφάλμα στις μετρήσεις έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, ανομοιογενής ηλιακή ακτινοβολία, συσσώρευση σκόνης στα πλαίσια, κάλυψη των φωτοβολταϊκών πλαισίων με χιόνι, προβλήματα στη καλωδίωση και στην ηλεκτρική συνδεσμολογία, μερικώς σκιασμός και όταν η μέτρηση της εντάσεως ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται με πυρανόμετρο και έχουμε απώλειες φάσματος ή αντανάκλασης του γυαλιού.

Σε διασυνδεδεμένα συστήματα μια δυσλειτουργία προκαλεί αξιοσημείωτη αύξηση των απωλειών αυτών, αυτοί οι παράγοντες είναι πολύ καλοί δείκτες για διάγνωση προβλημάτων του συστήματος. Σωστές εγκαταστάσεις έχουν πολύ μικρές τιμές της ποσότητας L_{CT} .

Οι απώλειες συστήματος L_S είναι κυρίως οι απώλειες κατά τη μετατροπή στον μετατροπέα του συνεχούς ρεύματος που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία σε εναλλασσόμενο ρεύμα για να διοχετευτεί στο δίκτυο.

$$L_s = Y_A - Y_f \quad (11)$$

Και οι δυο παράμετροι απωλειών είναι κανονικοποιημένες απώλειες που μετριοούνται σε ώρες ανά ημέρα και αναφέρεται στο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου η συστοιχία πρέπει να λειτουργεί στην ονομαστική της ισχύ για να καλύψει τις απώλειες.

4.1.6 Δείκτες αποδοτικότητας

Η απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (η_{pv}) ορίζεται ως η ενέργεια που εξάγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία μέσα σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα (ημέρα , μήνας , έτος) διαιρούμενη με τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει σε όλη την επίπεδη επιφάνεια της συστοιχίας (A) και δίνεται από το παρακάτω τύπο :

$$\eta_{pv} = E_A / (G_{stc} \cdot A) \% \quad (12)$$

Η απόδοση μετατροπής του φωτοβολταϊκού συστήματος (η_{tot}) ορίζεται ως η ενέργεια που εξάγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα μέσα σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα (ημέρα , μήνας , έτος) διαιρούμενη με τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει σε όλη την επίπεδη επιφάνεια της συστοιχίας (A) και δίνεται από το παρακάτω τύπο :

$$\eta_{tot} = E_{use, PV} / (G_{stc} \cdot A) \% \quad (13)$$

Η απόδοση του μετατροπέα (η_{inv}) ορίζεται ως ο λόγος της τελικής απόδοσης Y_f προς την απόδοση συστοιχίας Y_A και δίνεται από το τύπο

$$\eta_{inv} = Y_f / Y_A \% \quad (14)$$

Ο λόγος απόδοσης PR είναι αδιάστατη ποσότητα και υποδεικνύει την συνολική επίδραση των απωλειών (λόγω του μετατροπέα , της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων , απώλειες στη καλωδίωση και τη προστασία των διόδων , μερική σκίαση , αναντιστοιχία μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων στην ονομαστική ισχύ).

Ορίζεται ως λόγος της ενέργειας εναλλασσομένου ρεύματος που παράγεται από ένα ιδανικό φωτοβολταϊκό σύστημα και τροφοδοτεί το δίκτυο , χωρίς απώλειες με θερμοκρασία φωτοβολταϊκών κυττάρων 25 °C. Δηλαδή αντιστοιχεί στον λόγο της ωφέλιμης ενέργειας που παράγεται προς την ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί ιδανικά αν δεν υπήρχαν απώλειες. Δίδεται από την εξίσωση

$$PR = Y_f / Y_r \text{ (15)}$$

Αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ωρών ανα ημέρα κατά την διάρκεια των οποίων η ηλιακή ακτινοβολία είναι στα επίπεδα της ακτινοβολίας αναφοράς υπό κανονικές συνθήκες δοκιμής (STC) 1 kW/m² και παράγεται ενέργεια ίση με αυτή που καταγράφουμε από το φωτοβολταϊκό σύστημα. [13] , [14]

4.1.7 Επίδραση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η αποτελεσματικότητα μιας φωτοβολταϊκής μονάδας εξαρτάται από τη θερμοκρασία λειτουργίας και τη πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Καθώς η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκού πλαισίου αυξάνει η απόδοση του μειώνεται γραμμικά δεδομένου ότι η μέγιστη ισχύς αναφέρεται σε κανονικές συνθήκες δοκιμής (STC) , σε διαφορετικές συνθήκες η ισχύς εξόδου των φωτοβολταϊκών πλαισίων εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας ($T_c - T_{stc}$) όπου $T_{stc} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ και την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία G.

Η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου T_c δίνεται από το τύπο

$$T_c = T_{amb} + G / 800 \cdot (T_{NOCT} - 20) \text{ (16)}$$

όπου T_{amb} = θερμοκρασία

περιβάλλοντος, T_{NOCT} ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Οι συνθήκες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου κάτω από τις οποίες η θερμοκρασία της ισούται με την ονομαστική τιμή της T_{NOCT} είναι:

- Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος.
- Πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας $G_{NOCT} = 800 \text{ W/m}^2$.
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα $T_{amb} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Μέση ταχύτητα ανέμου 1 m/sec .

Η σημασία της T_{NOCT} έγκειται στο ότι χαμηλή T_{NOCT} για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο σημαίνει ότι αποβάλλει ταχύτερα στο περιβάλλον το μέρος εκείνο της ηλιακής ακτινοβολίας που συμβάλλει ουσιαστικά στην αύξηση της θερμοκρασίας του. Άρα όσο μικρότερη είναι η T_{NOCT} για ένα πλαίσιο τόσο μικρότερη είναι η μείωση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε απώλειες σε σχέση με άλλο πλαίσιο ίδιας ισχύος αιχμής το οποίο όμως έχει μεγαλύτερη T_{NOCT} . Η T_{NOCT} για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο που θα εξετάσουμε είναι $T_{NOCT} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Για το παραπάνω λόγο εισάγουμε ένα σημαντικό μέγεθος, το θερμοκρασιακό συντελεστή απωλειών που δίνεται από το τύπο

$$\eta_{tem} = 1 - c_t (T_c - T_{stc}) \quad (17)$$

όπου το c_t είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής και εξαρτάται από το είδος του φωτοβολταϊκού πλαισίου (για τη δική μας περίπτωση του μικροαμόρφου πυριτίου έχει τιμή 0.0024 /K που μας δίνεται στο data sheet του κατασκευαστή του φωτοβολταϊκού πλαισίου). Όπου $T_{stc} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. [13]

4.2 Πειραματική μονάδα

4.2.1 Εισαγωγή

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών μονάδων συνήθως καθορίζεται από τις κανονικές συνθήκες δοκιμής (STC) ωστόσο η απόδοση τους κάτω από πραγματικές συνθήκες διαφέρει από τα παραπάνω δεδομένα λόγω της ποικιλίας των διαρκώς μεταβαλλόμενων συνθηκών. Ως εκ τούτου είναι σημαντικό να παρακολουθήσουμε την συμπεριφορά της φωτοβολταϊκής μονάδας υπό πραγματικές συνθήκες χρησιμοποιώντας αυτοματοποιημένα (ελεγχόμενα από υπολογιστή) συστήματα παρακολούθησης για τη μέτρηση των παραμέτρων : ηλιακή ακτινοβολία , θερμοκρασία φωτοβολταϊκών πλαισίων και άλλων μετεωρολογικών δεδομένων.

Υπάρχουν πολλές παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας όπως οι περίοδοι σκιάσεις , λανθασμένη εγκατάσταση , ελαττωματικά η ακατάλληλα κατασκευαστικά στοιχεία , καιρικές συνθήκες .

Στο μέρος αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη λειτουργία μιας μονάδας ισχύος 2.18 kWp εγκατεστημένα σε οροφή κτιρίου στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν αφορούν την χρονική περίοδο από Μάρτιο του 2010 μέχρι Μάρτιο του 2013.

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται δίνουν μια ένδειξη της απόδοσης του συστήματος.

4.2.2 Περιγραφή εγκατεστημένου συστήματος

Η εγκατάσταση αποτελείται από 2 σειρές με εννέα φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτού υμενίου σε συνδυασμό αμόρφου πυριτίου και μικροκρυσταλλικού πυριτίου που ονομάζεται μικροαμόρφου πυριτίου. Καλύπτουν συνολική επιφάνεια 26 m² και έχουν εγκατεστημένη ονομαστική ισχύς 2.18 kWp. Το κάθε πλαίσιο είναι παραγωγικής ικανότητας 121 Wp και απόδοσης 8.5% υπο κανονικές συνθήκες δοκιμών (STC).

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι τοποθετημένα υπό κεκλιμένη γωνία 30° με νότιο προσανατολισμό και αζιμούθιο 0°. Το δώμα που είναι τοποθετημένα βρίσκεται στο κτίριο Ρουσσόπουλου του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών το οποίο έχει ύψος

10 m και τα πλαίσια είναι τοποθετημένα σε μεταλλικό σκελετό ύψους 1 m. Η εγκατάσταση δε έχει καθαριστεί για όλο το χρονικό διάστημα με σκοπό να μιμηθεί τη λειτουργία ενός οικιακού φωτοβολταϊκού συστήματος.

4.2.2.1 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο



Εικόνα 20 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο μικρο-αμόρφου πυριτίου Sharp ισχύος 121 W [15]

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από επικάλυψη 4 mm πάχους γυαλιού , στρώση TCO (αγώγιμο διαφανές φίλμ είναι οπτικά διαφανές και ηλεκτρικά αγώγιμο σε λεπτές στρώσεις κατασκευάζεται από οργανικά και ανόργανα υλικά) ,στρώση άμορφου κύτταρου στην επάνω στρώση , στρώση μικροκρυσταλλικού κύτταρου στη κάτω στρώση , επικάλυψη EVA ,το οποίο είναι ένα συμπολυμερές του αιθυλενίου και του οξικού βινυλίου με αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία) και πλαστικό φύλλο πίσω. Κάθε μονάδα έχει by bass δίοδο.

Αυτή η δίδυμη δομή (tandem) που ονομάζεται μικρο-άμορφο πυρίτιο, που προκύπτει από τις λέξεις μικροκρυσταλλικό και άμορφο πυρίτιο, απορροφά μεγαλύτερο εύρος του ηλιακού φάσματος με αποτέλεσμα να υπάρχει καλύτερη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας. [15]

4.2.2.2 Μετατροπείας

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία συνδέεται με μετατροπέα προκειμένου να μετατρέψει το συνεχές ρεύμα που παράγει η φωτοβολταϊκή συστοιχία σε εναλλασσόμενο για να τροφοδοτήσει απευθείας το δίκτυο της πόλης.

Ο μετατροπέας είναι της εταιρείας SMA τύπος SMA sunny Boy 2500 . Έχει ονομαστική απόδοση 94.1% και μέγιστη απόδοση 2,5 kW.



Εικόνα 21 Μετατροπέας SMA sunny boy 2,5 kW

Έχει προσαρμοστεί για να καταγράφει δεδομένα σε διάστημα ανά λεπτό , η σχεδίαση και η υλοποίηση του έργου έχει γίνει από την εταιρεία Parendorf Software Engineering GrmbH.

4.2.3 Σύστημα συλλογής δεδομένων

Ένας πλήρης εξοπλισμένος μετρητικός σταθμός καταγράφει ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο της ηλιακής συστοιχίας , θερμοκρασία ξηρού βολβού , ταχύτητα ανέμου , κατεύθυνση ανέμου , ύψος βροχόπτωσης , ύψος χαλαζιού , σχετική υγρασία και βαρομετρική πίεση. Σχεδιάστηκε επίσης από την εταιρεία Parendorf Software Engineering GrmbH και τα δεδομένα συλλέγονται και παρουσιάζονται online στο διαδίκτυο σε συγκεκριμένο ιστότοπο.

Το σύστημα συλλογής δεδομένων αποτελείται από τον μετατροπέα της SMA Sunny Boy 2500 , ένα ηλιακό πυρανόμετρο Kipp και Zonencomp11 και ένα μετεωρολογικό σταθμό WTX250 Weatherstation (Vaisalacorp), όπως φαίνονται

και στην εικόνα 22. Το πυρανόμετρο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Ο μετατροπέας καταγράφει ηλεκτρικά δεδομένα ανά ένα λεπτό της ώρας.

Ο μετεωρολογικός σταθμός WTX250 χρησιμοποιείται για τη καταγραφή των μετεωρολογικών παραμέτρων. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας περιβάλλοντος έχει ακρίβεια $\pm 0.3\%$ ανά $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού καταγράφονται ανά χρονικό διάστημα ενός λεπτού. Επιπλέον υπάρχουν 5 αισθητήρες για μέτρηση θερμοκρασίας στο πίσω μέρος των φωτοβολταϊκών πλαισίων (σε διάφορα σημεία) και αυτά τα δεδομένα καταγράφονται ανά λεπτό. [14] , [16]



Εικόνα 22. Όργανα μέτρησης του συστήματος συλλογής δεδομένων

4.3 Αξιολόγηση δεδομένων

Τα δεδομένα από το μετρητικό σύστημα και τον μετατροπέα τα λαμβάνουμε σε ιστοχώρο στο διαδίκτυο και μετά τα ομαδοποιούμε σε αρχεία excel προς επεξεργασία.

Τα δεδομένα που έχουμε είναι ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας , θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου , τάση και ένταση παραγόμενου εναλλασσομένου καθώς και συνεχούς ρεύματος , θερμοκρασία περιβάλλοντος . όλα τα δεδομένα έχουν ληφθεί ανα λεπτό

4.4 Επεξεργασία δεδομένων

Θα ομαδοποιήσουμε τα δεδομένα σε τρεις χρονικές περιόδους Απρίλιος 2010 – Μάρτιος 2011 , Απρίλιος 2011 – Μάρτιος 2012 , Απρίλιος 2012 – Μάρτιος 2013 έτσι έχουμε δεδομένα για τρία πλήρη χρόνια που θα μελετήσουμε.

Χρησιμοποιούμε τις εντολές του excel συγκεντρωτικός πίνακας και vlookup στα αρχεία με τα δεδομένα και εξάγουμε τα εξής μεγέθη. $G_{i,d,av}$ μηνιαία μέση ημερήσια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας , $E_{A,av}$ μηνιαία μέση ημερήσια ενέργεια συνεχούς ρεύματος που παράγει η φωτοβολταϊκή συστοιχία , T_{amb} μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος και T_m μηνιαία μέση τιμή θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου. Επίσης έχουμε τις τιμές $E_{use ,PV,av}$ μηνιαία μέση ημερήσια παραγόμενη ενέργεια που δίνει η φωτοβολταϊκή συστοιχία στο δίκτυο.

Εφαρμόζοντας τους τύπους από (3) έως και (11) που έχουμε ανάλυση παραπάνω υπολογίζουμε τα μεγέθη της απόδοσης ,απωλειών και αποδοτικότητας .

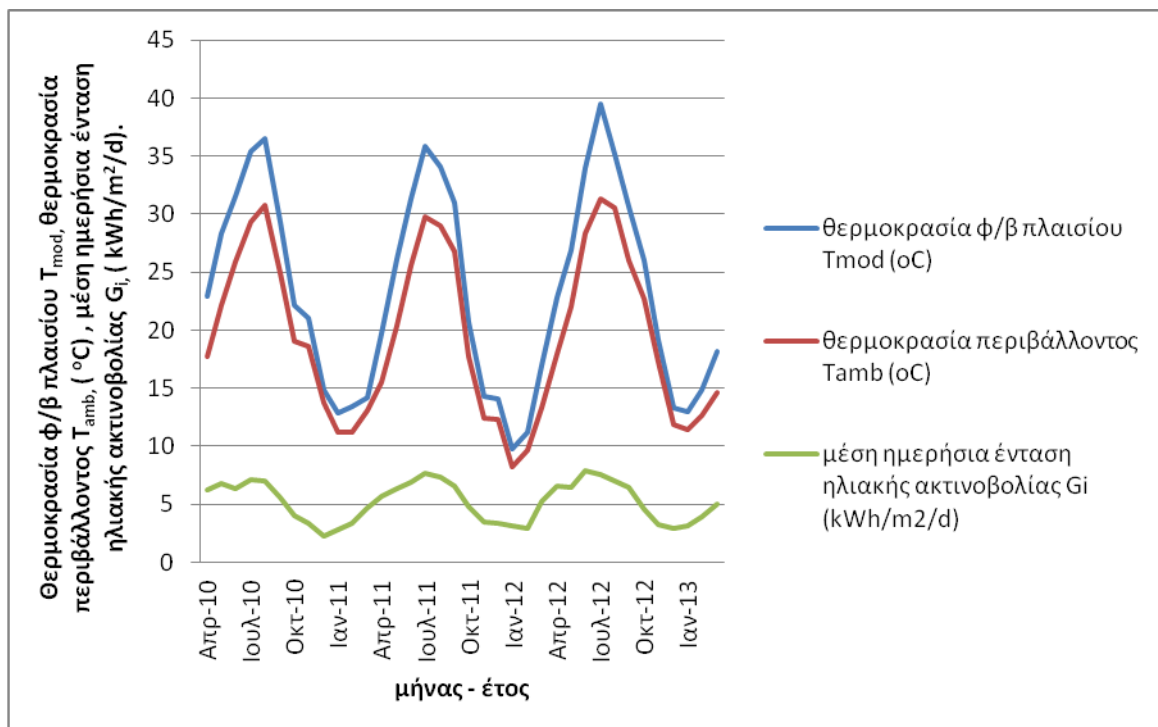
4.6 Υπολογισμός θερμοκρασιακού συντελεστή απωλειών (n_{tem})

Για να υπολογίσουμε το θερμοκρασιακό συντελεστή απωλειών n_{tem} ακολουθούμε την εξής διαδικασία.

Παίρνουμε για το ίδιο χρονικό διάστημα τις τιμές τριών παραγόντων, της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας (G_i) , της θερμοκρασίας αέρα (T_{amb}) και της παραγόμενης ισχύος από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία ($E_{use ,PV}$). Για να μπορέσουμε να ομαδοποιήσουμε αυτούς τους τρεις παράγοντες για το ίδιο χρονικό διάστημα χρησιμοποιούμε την εντολή vlookup του excel στην συνέχεια εισάγουμε τα δεδομένα στο τύπο (16)

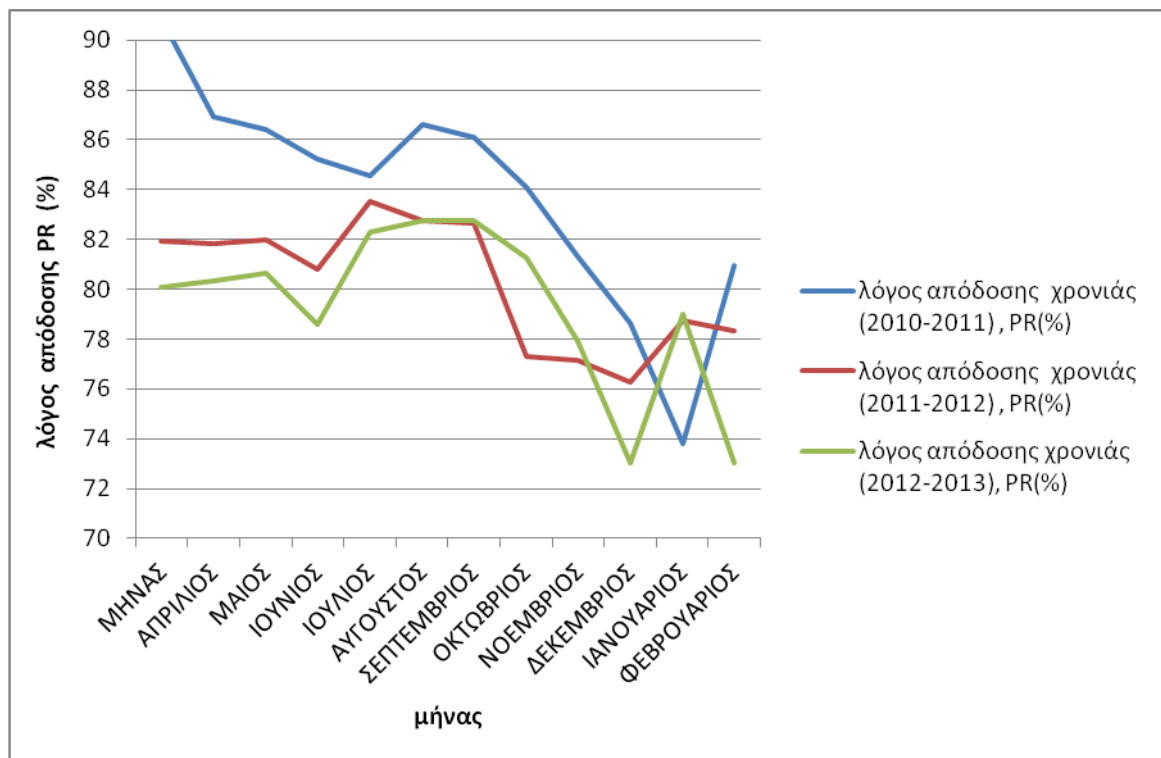
4.6 Αποτελεσμάτα

Βάσει των παραπάνω έχουμε τα παρακάτω αποτελεσμάτα



Εικόνα 23. Γράφημα θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_{amb}), θερμοκρασίας φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_{mod}), μέση ημερήσια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (G_i). Για τα τρία χρόνια παρακολούθησης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

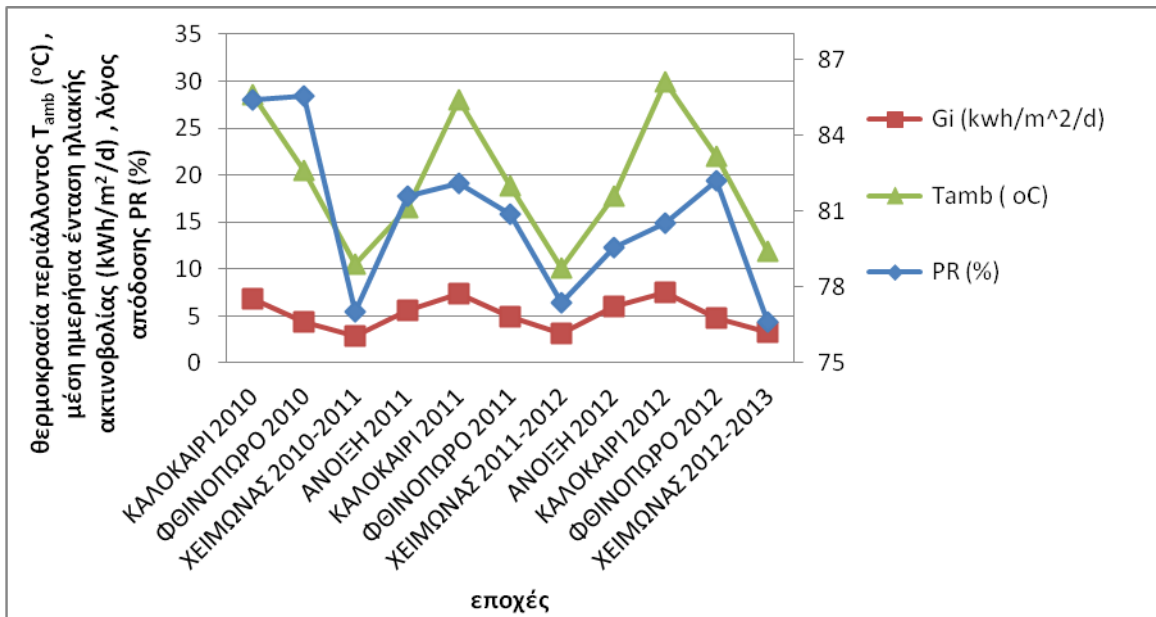
Στην εικόνα 23 βλέπουμε ότι η θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_{amb}), θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_{mod}), η μέση ημερήσια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (G_i) έχουν μια αντίστοιχη μεταβολή παίρνοντας μέγιστες τιμές τους καλοκαιρινούς μήνες και ελάχιστες τους χειμερινούς κάτι λογικό μια και η ηλιοφάνεια και η θερμοκρασία τους καλοκαιρινούς μήνες είναι μεγαλύτερη. Επίσης παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι συνεχώς μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε όλη τη διάρκεια των τριών χρόνων που μελετήσαμε.



Εικόνα 24 Λόγος απόδοσης (PR) για τις τρεις χρονιές παρακολούθησης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

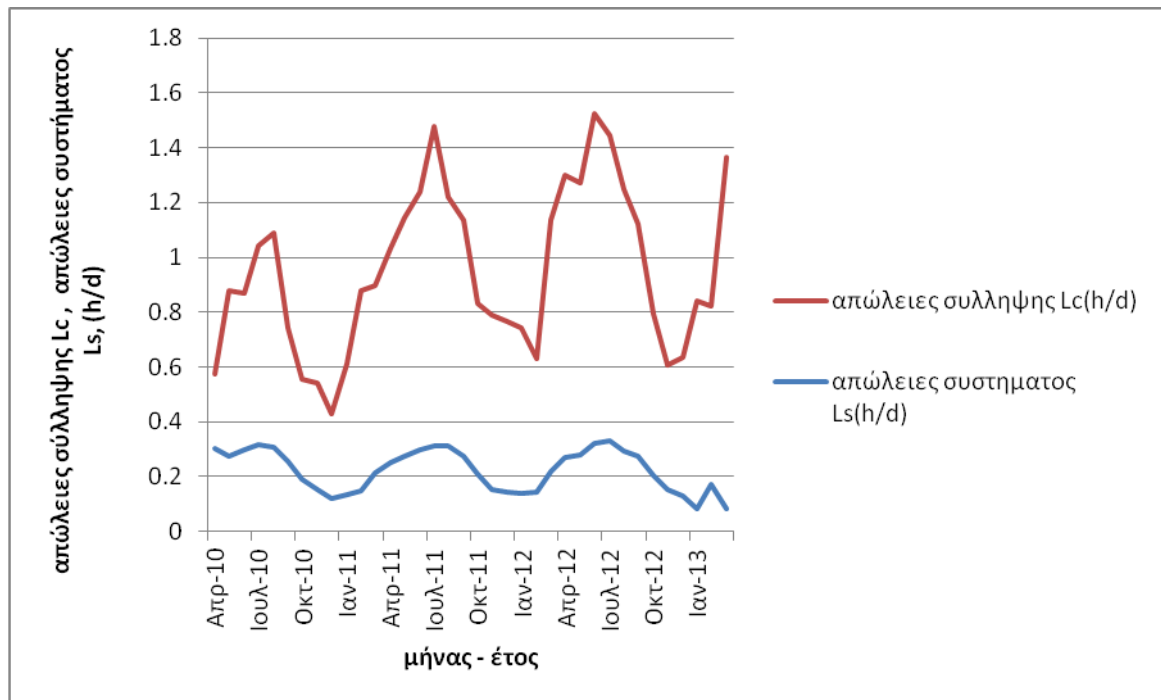
Στην Εικόνα 24 βλέπουμε οι μέσες ετήσιες τιμές είναι 0.84 για τη πρώτη χρονιά 0.8 για τη δεύτερη και 0.79 για την τρίτη. Η μείωση αυτή οφείλεται και στο φαινόμενο Staebler-Wronski [8] και για αυτό και από τη δεύτερη στη τρίτη χρονιά η μείωση είναι αμελητέα καθώς έχει περάσει το πρώτο διάστημα λειτουργίας και το φαινόμενο Staebler-Wronski δεν επηρεάζει τόσο τη φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Οι χαμηλές τιμές του λόγου απόδοσης PR εμφανίζονται κατά τους χειμερινούς μήνες ενώ οι μέγιστες κατά τους καλοκαιρινούς αυτό συμβαίνει μια και η παραγωγή ενέργειας το καλοκαίρι είναι μεγαλύτερη καθώς και οι απώλειες από τους διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του λόγου απόδοσης



Εικόνα 25. Μεση ημερήσια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (G_i) , θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}) , λόγος απόδοσης (PR) ανα εποχή για τα τρία έτη

Στην Εικόνα 25 βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας καθώς επίσης και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και του λόγου απόδοσης εμφανίζονται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες , ενώ οι ελάχιστες κατά τους χειμερινούς . Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος καθώς και έντασης ηλιακής ακτινοβολίας είναι περίπου στα ίδια επίπεδα και για τις τρεις χρονιές ενώ ο λόγος απόδοσης έχει μια πτώση ανα χρονιά όπως είδαμε και παραπάνω.



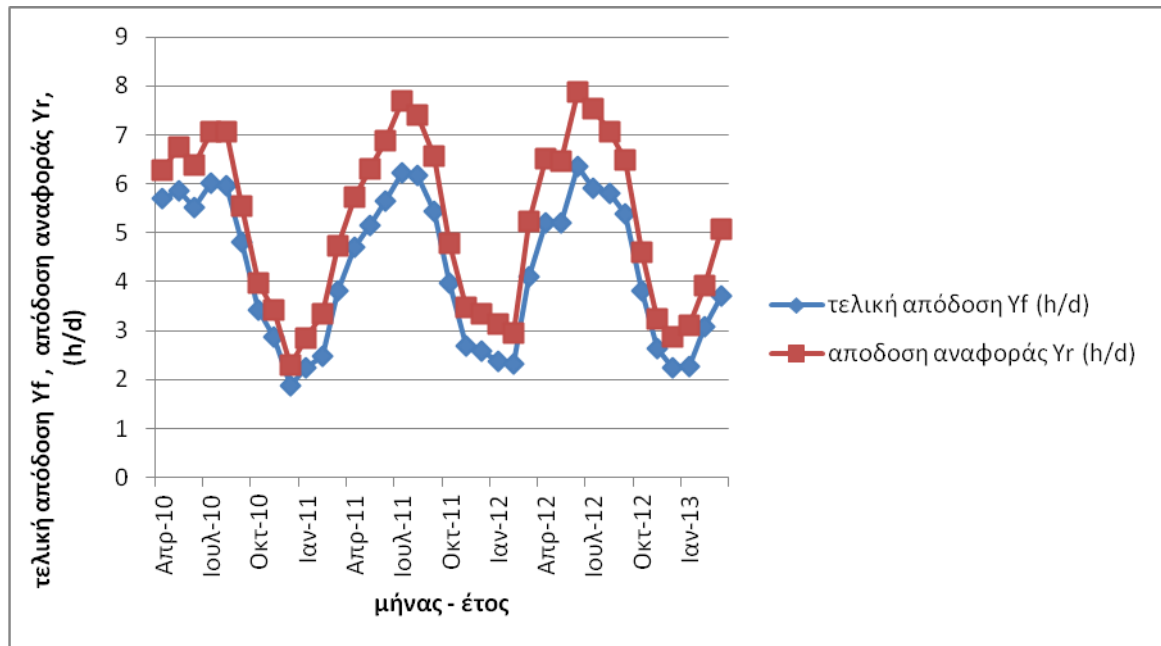
Εικόνα 26. Παράμετροι απωλειών σύλληψης L_c και απωλειών συστήματος L_s για τα τρία έτη

Στην εικόνα 26 οι διακυμάνσεις των τιμών των απωλειών συστήματος L_s ανα έτος και συνολικά στα τρία χρόνια δε είναι μεγάλες κάτι που συμβαδίζει και με την μικρή διακύμανση της τιμής της απόδοσης του μετατροπέα στη διάρκεια των τριών χρόνων.

Οι απώλειες σύλληψης L_c παίρνουν μέγιστη τιμή τους καλοκαιρινούς μήνες και ελάχιστη τους χειμερινούς αυτό είναι λογικό μια και στις συγκεκριμένες απώλειες λαμβάνεται σοβαρά υπόψη και οι απώλειες λόγω αύξησης θερμοκρασίας της φωτοβολταϊκού πλαισίου που τους καλοκαιρινούς μήνες είναι μεγάλη .

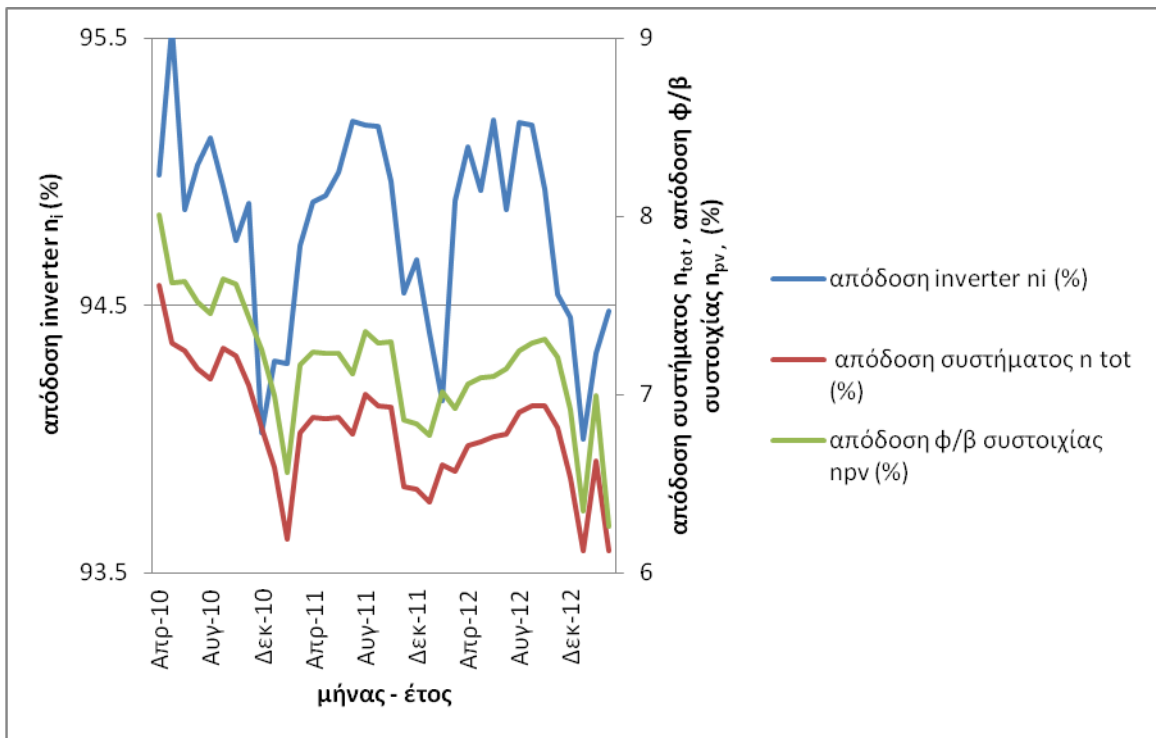
Η μέγιστη τιμή απώλειας σύλληψης L_c για τα τρία χρόνια εμφανίζεται τη τρίτη χρονιά (2012-2013) και η ελάχιστη τιμή τη πρώτη χρονιά (2010-2011). Το ίδιο ισχύει και για τις απώλειες απόδοσης L_s .

Οι τιμές των απωλειών σύλληψης L_c έχουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις μέσα στην τριετία αλλά και ανά χρονιά (από 0.4 εως και 1.65) αυτό οφείλεται στους παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται όπως η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών πλαισίων , οι απώλειες στη καλωδιώσεις κτλ.



Εικόνα 27. Παράμετροι τελικής απόδοσης Y_f και απόδοσης αναφοράς Y_r για τα τρία έτη

Στην εικόνα 27 η τελική απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας Y_f έχει τις μέγιστες τιμές της τους καλοκαιρινούς μήνες και τις μικρότερες τους χειμερινούς, αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η παραγωγή ενέργειας από το σύστημα είναι και αυτή αντίστοιχα μεγαλύτερη το καλοκαίρι και μικρότερη το χειμώνα, η απόδοση αναφοράς Y_r έχει και αυτή τις μέγιστες τιμές της τους καλοκαιρινούς μήνες και τις ελάχιστες τους χειμερινούς, ενώ έχει πάντα μεγαλύτερη τιμή από την Y_f και αποδίδει την ιδανική απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Τους καλοκαιρινούς μήνες από την εικόνα 27 παρατηρούμε ότι είναι μεγαλύτερη η διαφορά στην τιμή μεταξύ των δύο αποδόσεων Y_f , Y_r δηλαδή η απόκλιση της παραγματικής απόδοσης από την ιδανική μεγαλώνει, άρα έχουμε αύξηση απωλειών εκείνους τους μήνες κάτι που διαπιστώσαμε και στην εικόνα 25 με τις απώλειες σύλληψης και συστήματος.



Εικόνα 28. Απόδοση φωτοβολταϊκής συστοιχίας (η_{pv}), συνολική απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος (η_{tot}), απόδοση μετατροπέα (η_{inv}) για τη πρώτη χρονιά παρακολούθησης του συστήματος.

Στην εικόνα 28 η μέση τιμή της απόδοσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας η_{pv} είναι 7.41% τη πρώτη χρονιά, 7.09% τη δεύτερη χρονιά και 7% τη τρίτη χρονιά.

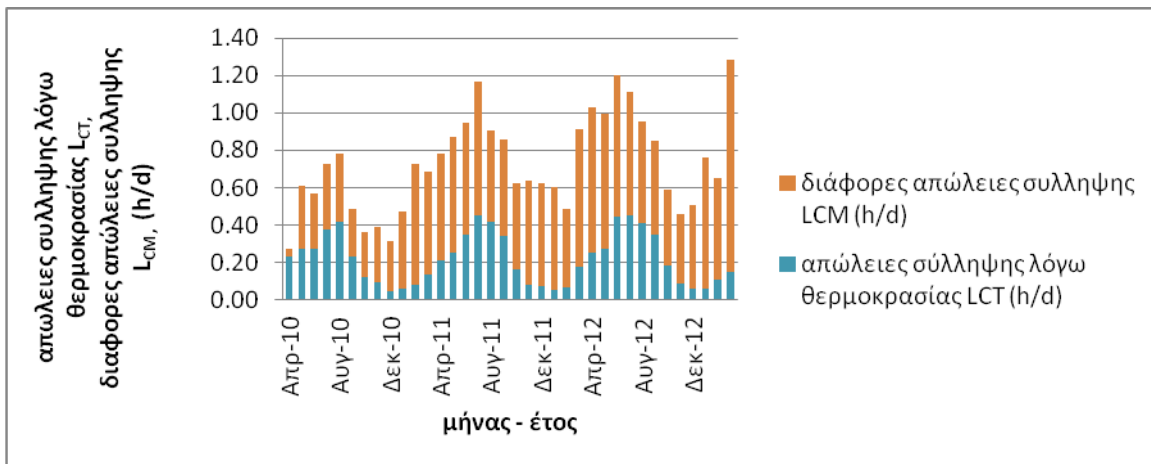
Αντίστοιχη εικόνα παρουσιάζει και η μέση τιμή ανά χρονιά της συνολικής απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος η_{tot} συγκεκριμένα πρώτη χρονιά 7.02%, δεύτερη χρονιά 6.73% και τρίτη χρονιά 6.66%

Η μέση τιμή της απόδοσης του μετατροπέα η_{inv} είναι για τις τρεις χρονιές περίπου σταθερή με τιμή 94.8%.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι οι συντελεστές αποδόσεις (φωτοβολταϊκής συστοιχίας, φωτοβολταϊκού συστήματος) έχουν μια αμελητέα μείωση στα τρία χρόνια, κυρίως από τη πρώτη στη δεύτερη χρονιά αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί ότι το

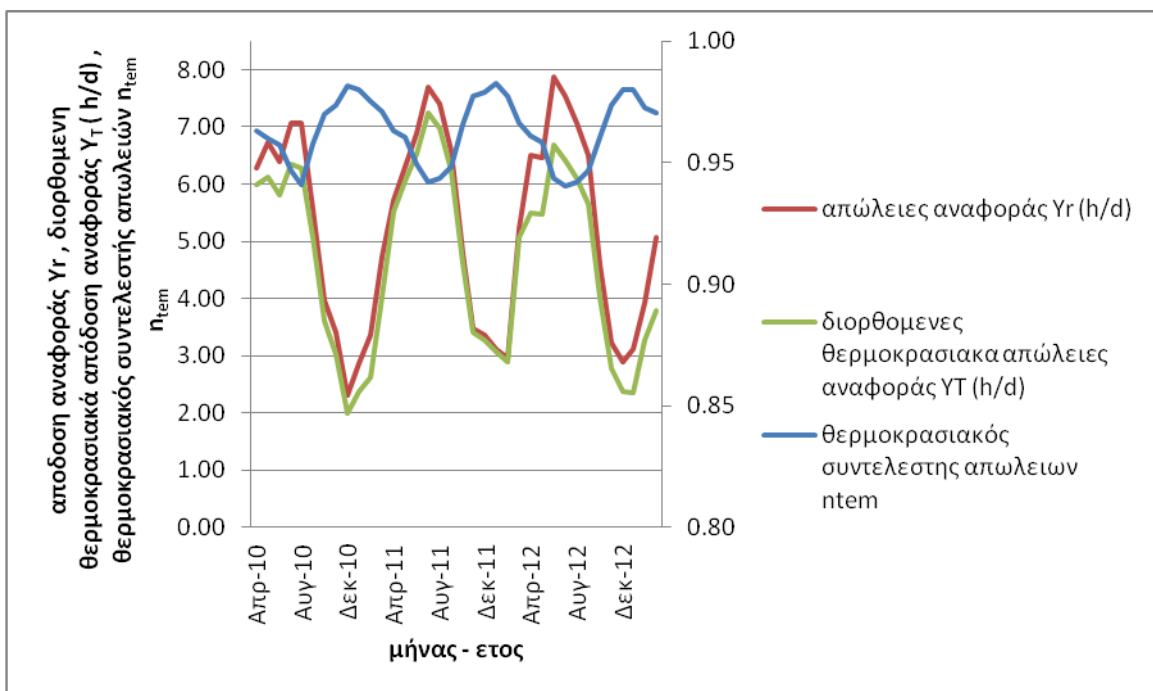
φωτοβολταϊκό σύστημα την πρώτη χρονιά λειτουργίας του είναι καινούργιο χωρίς να έχει λειτουργήσει οπότε η όποια φθορά του είναι μηδαμινή

Η μέγιστη τιμή απώλειας L_c για τα τρία χρόνια εμφανίζεται τη τρίτη χρονιά (2012-2013) και η ελάχιστη τιμή τη πρώτη χρονιά (2010-2011). Αυτό δικαιολογεί και τις καλύτερες αποδόσεις η_{pv} , η_{tot} που έχουν τις μέγιστες τιμές τους τη πρώτη χρονιά. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι το Μάρτιο του 2011 και 2013 έχουμε μέγιστες τιμές στο συντελεστή η_{inv} τους ίδιους μήνες όμως παρατηρούμε ότι έχουμε τις μικρότερες τιμές στις απώλειες L_s που εξαρτώνται από τη λειτουργία του μετατροπέα, αντίστοιχα τον Φεβρουάριο του 2011 και Ιούλιο του 2012 έχουμε τις χαμηλότερες τιμές του συντελεστή η_{inv} και αντίστοιχα τις υψηλότερες στις απώλειες L_s που μας δείχνουν ίσως κάποια δυσλειτουργία του μετατροπέα



έχουμε τη μικρότερη τιμή της συνολικής απόδοσης του συστήματος η_{tot} για όλη τη τριετία που μελετάμε

Η μέση τιμή των απωλειών L_{CT} , L_{CM} αυξάνεται χρόνο με το χρόνο με μεγαλύτερη μεταβολή από το πρώτο χρόνο στο δεύτερο και μικρότερη από το δεύτερο στο τρίτο



Εικόνα 30. Θερμοκρασιακά διορθωμένη απόδοση αναφοράς (Y_c), απόδοση αναφοράς (Y_r), και συντελεστής θερμοκρασιακών απωλειών (n_{tem}) για το πρώτο χρόνο παρακολούθησης του φωτοβολταϊκού συστήματος

Ο συντελεστής θερμοκρασιακών απωλειών n_{tem} και της τριετίας έχει ελάχιστες τιμές τους καλοκαιρινούς μήνες και μέγιστες τους χειμερινούς αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη θερμοκρασία περιβάλλοντος το καλοκαίρι και κατά συνέπεια αύξηση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου οπότε μείωση της τιμής n_{tem} .

Αυτή η αύξηση έχει σαν συνέπεια την απόκλιση τους καλοκαιρινούς μήνες μεταξύ των τιμών Y_t και Y_{t-1} , έχουμε δηλαδή διόρθωση της τιμής Y_t λόγω θερμοκρασίας από την οποία προκύπτει μια μικρότερη τιμή Y_t .

Παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος ανα χρονιά

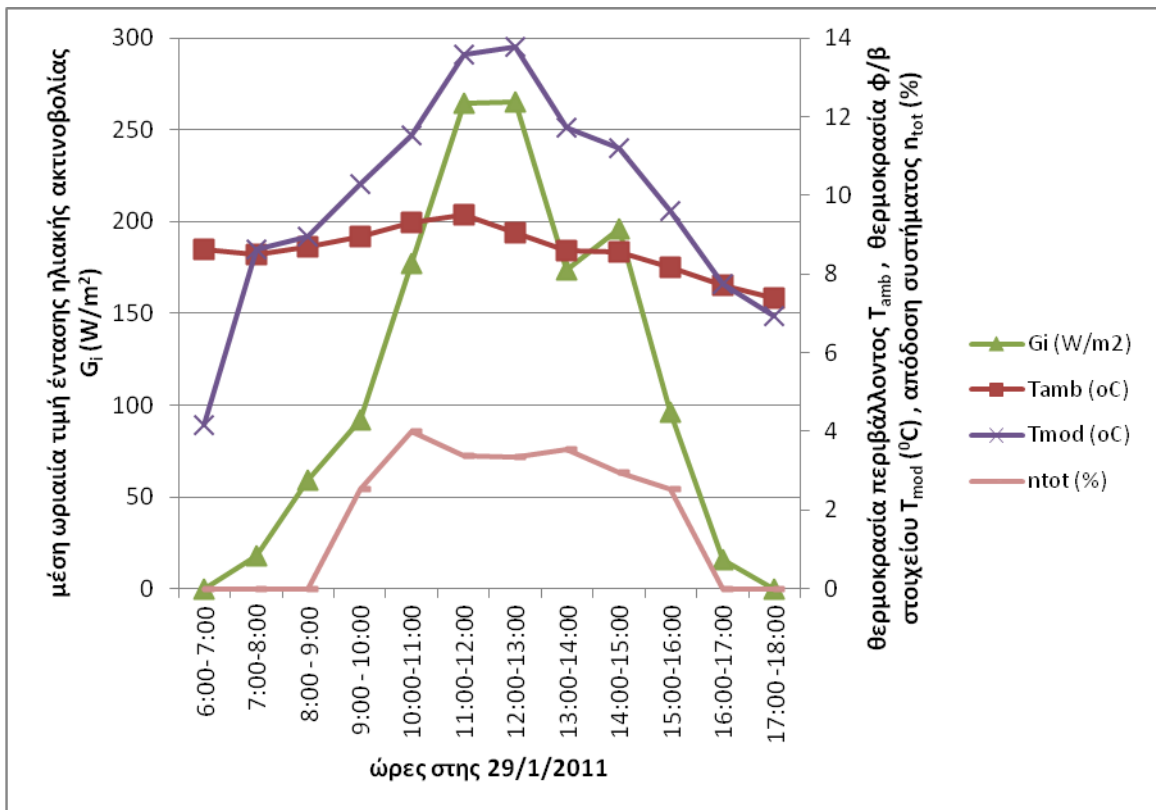
χρονική περίοδος	ετήσια παραγόμενη ενέργεια (kWh)
1 χρόνος (2010-2011)	3348
2 χρόνος (2011-2012)	3315
3 χρόνος (2012-2013)	3376

Πίνακας 1 Συνολική παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος για τις τρεις χρονιές παρακολούθησης του.

Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια είναι σχεδόν σταθερή τα τρία χρόνια με μικρές διακύμανσης.

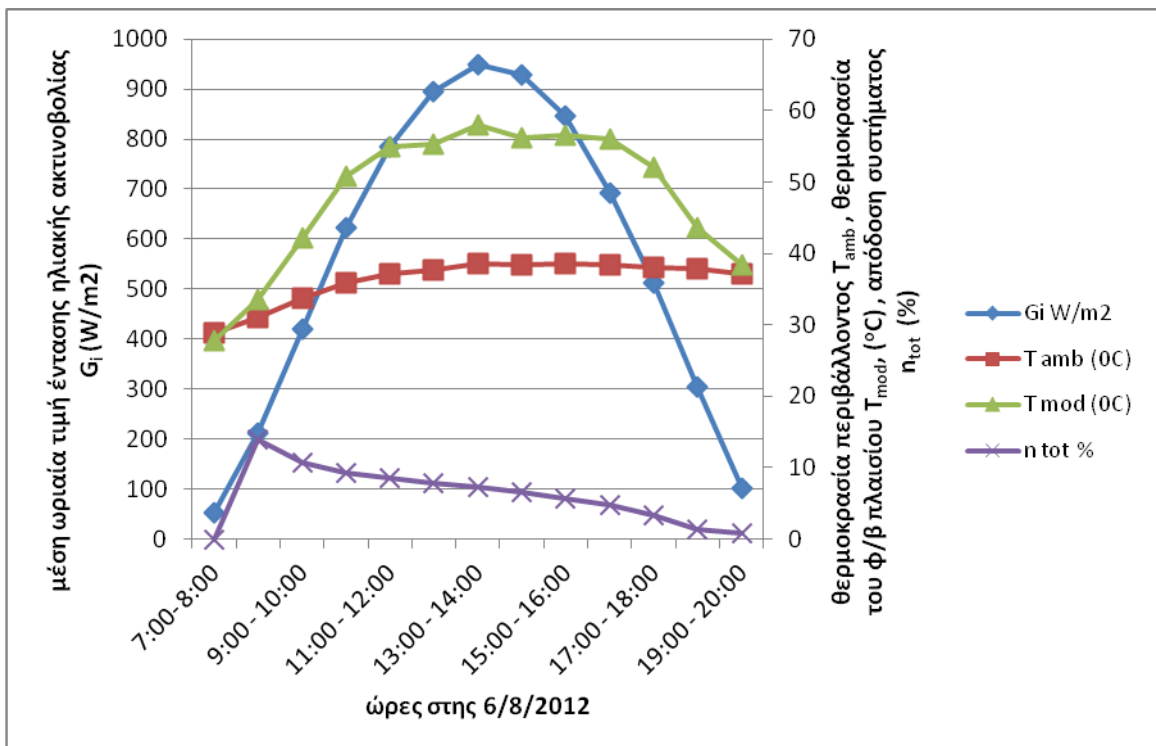
Συγκεκριμένα από το πρώτο στο δεύτερο χρόνο έχουμε μια μείωση κατά 33 kWh (3348 kWh έναντι 3315 kWh) ενώ από το δεύτερο στο τρίτο χρόνο έχουμε μια αύξηση της παραγόμενης ενέργειας κατά 61 kWh (3315 kWh έναντι 3376 kWh).

Παρόλο που έχουμε διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της κάθε χρονιάς συνολικά και οι τρεις χρονιές έχουν σχεδόν ίδια ετήσια παραγωγή. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την διάρκεια ενός έτους έχουμε περιόδους - εποχές με περισσότερη ή λιγότερη ηλιοφάνεια που καθορίζουν την παραγωγή του συστημάτος μας και που από έτος σε έτος είναι διαφορετικές αρα δίνουν και διαφορετική παραγωγή ενέργειας στα πλαίσια αυτών, αλλά αν εξετάσουμε την παραγόμενη ενέργεια σε επίπεδο έτους κ όχι περιόδων – εποχών δε φαίνονται οι διαφορές αυτές όπως είδαμε στο πίνακα 1



Εικόνα 31. Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (G_i), συνολική απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος (n_{tot}), θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου T_m και θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}) για μια χειμερινή μέρα (29/1/2011).

Στη εικόνα 31 έχουμε τα δεδομένα για μια μέρα του χειμώνα με χαμηλές θερμοκρασίες της τριετίας που ήταν στις 29/1/2011. Αυτή τη μέρα είχαμε θερμοκρασία περιβάλλοντος από 4 μέχρι 10 βαθμούς, βλέπουμε ότι οι μέγιστες τιμές στα μεγέθη, θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας συμπίπτουν χρονικά στις 11:00 – 13:00 ενώ και η συνολική απόδοση της συστοιχίας έχει μια άνοδο τις πρώτες πρωινές ώρες μέχρι της 10:00 ενώ στη συνέχεια μειώνεται όσο αρχίζει και μειώνεται και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας οπότε ακολουθεί τη καμπύλη της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι συνεχώς ανοδική καθ όλη τη διάρκεια της ημέρας παρ'όλα αυτά η θερμοκρασία των κυψελών ακολουθεί την καμπύλη της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας



Εικόνα 32. Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (G_i), συνολική απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος (n_{tot}), θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου T_m και θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}) για μια καλοκαιρινή μέρα (6/8/2012).

Στην εικόνα 32 έχουμε τα δεδομένα για τη πιο ζεστή μέρα της τριετίας που ήταν στις 6/8/2012. Αυτή τη μέρα είχαμε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25 °C με 40 °C, βλέπουμε ότι οι μέγιστες τιμές στα μεγέθη θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου, έντασή ηλιακής ακτινοβολίας συμπίπτουν χρονικά στις 13:00 – 14:00 το μεσημέρι ενώ και η συνολική απόδοση της συστοιχίας έχει μια πτώση καθ όλη τη διάρκεια της ημέρας αν και έχουμε αύξηση της ηλιοφάνειας απ το πρωί προς το μεσημέρι μια και επηρεάζετε και απ την αυξημένη θερμοκρασία του πλαισίου λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

4.8 Συμπεράσματα

Γενικά όλοι οι δείκτες απόδοσης έχουν ελάχιστη μείωση στη τριετία με μεγαλύτερη αυτή από το πρώτο στο δεύτερο έτος οπότε συμπεράνουμε ότι ο πρώτος χρόνος λειτουργίας είναι ο χρόνος με τις μικρότερες απώλειες στο σύστημα μας.

Οι δείκτες απωλειών έχουν μικρή αύξηση μέσα στη τριετία με μεγαλύτερη διακύμανση από το πρώτο στο δεύτερο χρόνο.

Από τα δύο παραπάνω συνάγεται το συμπέρασμα ότι όσο λειτουργεί η εγκατάσταση τόσο υπάρχει και κάποια μείωση της απόδοσής της ενώ αυτή η μείωση είναι πιο αισθητή μετά τη πρώτη χρονιά λειτουργίας και λιγότερο μετά τη δεύτερη χρονιά.

Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια είναι σχεδόν σταθερή τα τρία χρόνια με μικρές διακυμάνσεις.

Τον Ιούνιο του 2012 είχαμε τη μεγαλύτερη μηνιαία παραγωγή ενέργειας από το σύστημα μέσα στα τρία χρόνια (13.87 kWh/d) γι' αυτό το μήνα ο λόγος απόδοσης PR είναι 81% , οι απώλειες συστήματος L_s (0.32 h/d) και οι απώλειες σύλληψης L_c (1.2 h/d) ενώ η μικρότερη μηνιαία παραγωγή ενέργειας εμφανίζεται το Δεκέμβριο του 2010 (4.08 kWh/d) και ο λόγος απόδοσης PR είναι πάλι 81% αλλά οι απώλειες είναι αισθητά μικρότερες συγκεκριμένα η L_s (0.12 h/d) και η L_c (0.31 h/d).

Ο συντελεστής θερμοκρασιακών απωλειών n_{tem} και τις τρεις χρονιές έχει ελάχιστες τιμές τους καλοκαιρινούς μήνες και μέγιστες τους χειμερινούς αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη θερμοκρασία περιβάλλοντος το καλοκαίρι και κατά συνέπεια αύξηση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου οπότε μείωση της τιμής n_{tem} .

5. Λογισμικό Όμηρος

5.1 Εισαγωγή

Ο Όμηρος είναι ένα μοντέλο βελτιστοποίησης συστημάτων μικροισχύος που απλοποιεί το έργο της αξιολόγησης των υπό υλοποίησης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας διασυνδεδεμένων και αυτόνομων για μια ποικιλία εφαρμογών.

Όταν σχεδιάζουμε ένα σύστημα ισχύος θα πρέπει να πάρουμε πολλές αποφάσεις σχετικά με τη διαμόρφωση του όπως ποια στοιχεία έχουν νόημα να συμπεριληφθούν στο σχεδιασμό του, πόσα και τι μέγεθος από το κάθε σύστημα θα χρησιμοποιηθεί.

Ο μεγάλος αριθμός των επιλογών της τεχνολογίας και η διακύμανση του κόστους καθώς και η διαθεσιμότητα των ενεργειακών πόρων κάνουν αυτές τις αποφάσεις δύσκολες. Μέσω του Όμηρου και της βελτιστοποίησης που αυτό πετυχαίνει καθώς και με τους αλγορίθμους ανάλυσης ευαισθησίας καθίσταται ευκολότερη η αξιολόγηση πιθανών σεναρίων με τα οποία θα διαμορφώσουμε το σύστημα που μας ενδιαφέρει.

Ο Όμηρος είναι ένα μοντέλο στο οποίο εισάγουμε κάποια δεδομένα όπως περιγραφή της υπό επιλογή τεχνολογίας, κόστος, διαθεσιμότητα πόρων. Ο Όμηρος χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα προσομοιώνει διαφορετικούς συνδυασμούς του συστήματος και παράγει αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε μια λίστα. Επίσης η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται και σε μια ευρεία ποικιλία από γραφήματα και πίνακες ώστε να είναι εφικτό να γίνουν συγκρίσεις των διαφόρων σεναρίων και να αξιολογούνται τεχνικοοικονομικά.

Τέλος με τις αναλύσεις ευαισθησίας που κάνει ο Όμηρος μπορούν να διερευνηθούν το πόσο επιδρούν οι αλλαγές σε διάφορες παραμέτρους στο αποτέλεσμα και έτσι εντοπίζουμε ποιοι παράμετροι είναι οι πιο σημαντικοί στο σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και πράττουμε αναλόγως.

Το Homer προσομοιώνει τη λειτουργία ενός συστήματος κάνοντας υπολογισμούς ισοζυγίου ενέργειας για κάθε ώρα σε ένα έτος.

Κατόπιν καθορίζει αν μια ρύθμιση είναι εφικτή δηλαδή αν μπορεί να ανταποκριθεί η ηλεκτρική απαίτηση υπό τους όρους που καθορίζετε και εκτιμά κόστος εγκατάστασης λειτουργίας του συστήματος κατά τη διάρκεια ζωής του έργου.

Το κόστος υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη δαπάνες όπως : αρχικό κεφάλαιο , κόστος αντικατάστασης , κόστος λειτουργίας και συντήρησης , καύσιμα

Μετά τη προσομοίωση των διαφόρων σεναρίων που εισάγουμε στον όμηρο εμφανίζετε μια λίστα με τα σενάρια αυτά τα οποία κατατάσσονται σύμφωνα με το καθαρό παρόν κόστος (NPC) το οποίο και χρησιμοποιείται για να συγκρίνουμε τις επιλογές του συστήματος που έχουμε. Επίσης ο Όμηρος κάνει και ανάλυση ευαισθησίας , ορίζουμε μεταβλητές ευαισθησίας ως εισροές και ο Όμηρος επαναλαμβάνει τη διαδικασία βελτιστοποίησης για κάθε μεταβλητή ευαισθησίας που έχουμε ορίσει. [17]

5.2 Καταχώρηση δεδομένων

Εισάγοντας στον Όμηρο τα πειραματικά δεδομένα που έχουμε παραπάνω για κάθε ένα από τα τρία έτη που έχουμε μελετήσει θα μας υπολογίσει την ετήσια παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματός μας για κάθε μια από τις τρεις χρονιές και αυτή θα τη συγκρίνουμε με την πραγματική παραγόμενη ενέργεια που έχουμε υπολογίσει στη προηγούμενη ενότητα.

Στη συνέχεια θα κάνουμε με τη βοήθεια του Όμηρου μια σύγκριση ανάμεσα σε δύο συστήματα ισχύος 2.18 kW το κάθε ένα, δηλαδή σε ένα με πολυκρυσταλλικά πλαίσια και σε ένα με πλαίσια αμόρφου πυριτίου υποθέτοντας ότι λειτουργούν στον ίδιο χώρο την ίδια χρονική περίοδο με τις ίδιες συνθήκες ηλιοφάνειας και εξωτερικής θερμοκρασίας. Τις δύο ομάδες δεδομένων θα τις πάρουμε από πραγματικές μετρήσεις, και συγκεκριμένα της χρονιάς του 2011 που είναι διαθέσιμα.

Τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων των δύο συστημάτων που θα συγκριθούν είναι τα εξής :

A. πολυκρυσταλλικό πλαίσιο Bosch 240 c-Si P 60 με ονομαστική ισχύ 240 W , απόδοση 14.6% , $T_{NOCT}= 46\text{ }^{\circ}\text{C}$, θερμοκρασιακό συντελεστή ισχύος $C_T= -0.44\%$ ανά $^{\circ}\text{C}$.

B. μικροαμόρφου πυριτίου πλαίσιο Sharp NA – F 121 G5 με ονομαστική ισχύ 121 W , απόδοση 9.3% , $T_{NOCT}= 44^{\circ}\text{C}$, θερμοκρασιακό συντελεστή ισχύος $C_T= - 0.24\%$ ανά $^{\circ}\text{C}$.

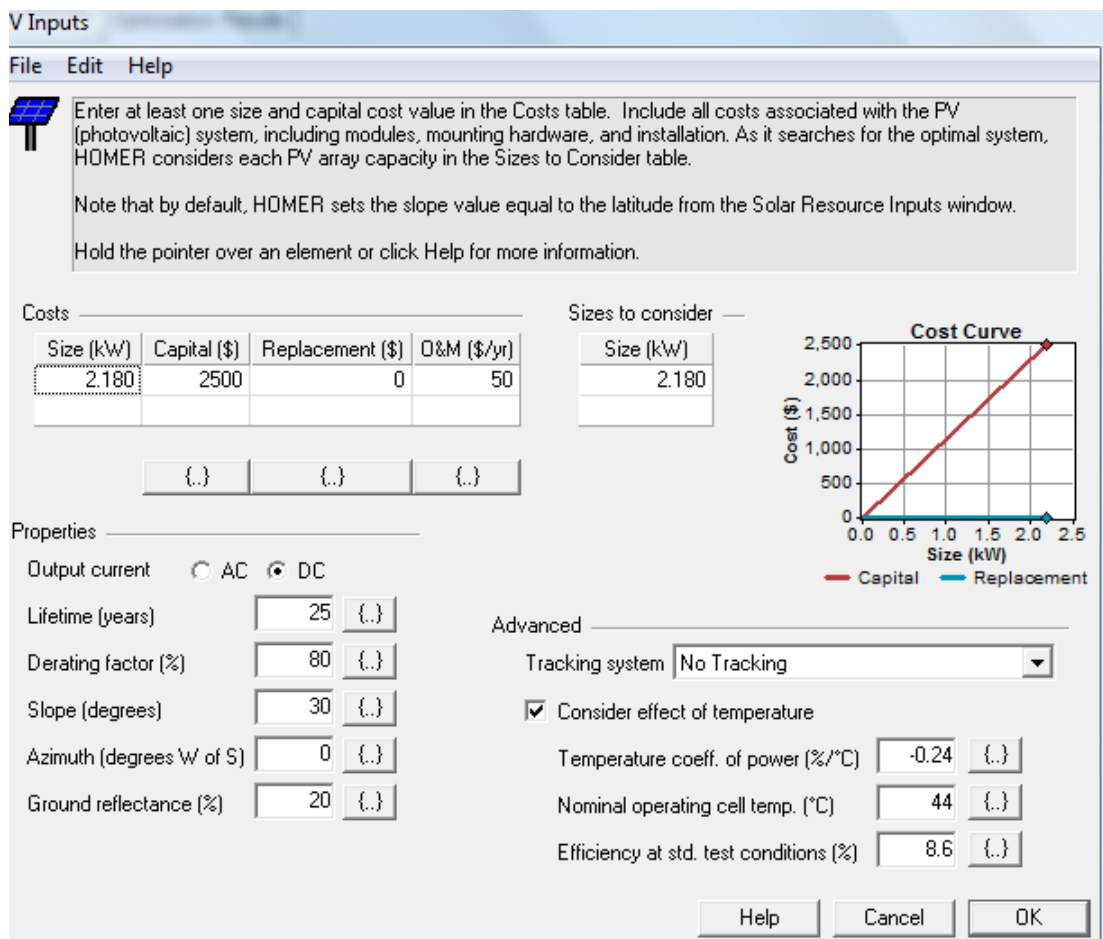
Η τιμή των δύο πλαισίων είναι για το Bosch 0.85 € / W και για το Sharp 0.45 €/W. Οι τιμές είναι από καταλόγους πώλησης φωτοβολταϊκών πλαισίων για τον Ιανουαρίου 2014 στην Ελλάδα.

Ο μετατροπέας που έχει επιλεγεί είναι της SMA 2.5 kW με τιμή 1000 €.

Κάνοντας τη παραδοχή ότι το 60% της αξίας μιας ολοκληρωμένης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι η αξία των πλαισίων που θα χρησιμοποιηθούν εξάγουμε το κόστος των δύο συστημάτων.

Συγκεκριμένα το σύστημα με τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια κοστίζει 4632 € και το σύστημα με τα μικροαμόρφου πυριτίου πλαίσια 2450 €.

Παρακάτω θα δούμε τα δεδομένα που πρέπει να εισαγάγουμε στον Όμηρο ώστε να προχωρήσει στους υπολογισμούς.



Εικόνα 33. Εισαγωγή δεδομένων φωτοβολταϊκής εγκατάστασης [17]

Στην εικόνα 33 επιλέγουμε το αρχικό κόστος που είναι ανάλογο του μεγέθους του φωτοβολταϊκού συστήματος, καθορίζουμε το κόστος κεφαλαίου το κόστος αντικατάστασης και κόστος συντήρησης και λειτουργίας. Στο κόστος κεφαλαίου υπολογίζουμε το κόστος αγοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων, το κόστος τοποθέτησης, το κόστος των καλωδιώσεων δηλαδή το κόστος στησίματος όλης της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης ώστε να είναι έτοιμη για λειτουργία. Το κόστος αντικατάστασης αναφέρεται στο τέλος του κύκλου ζωής του φωτοβολταϊκής συστοιχίας (μόνο αν η διάρκεια ζωής του έργου υπερβαίνει τη διάρκεια ζωής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας).

Εισάγουμε αν το ρεύμα εξόδου είναι εναλλασσόμενο η συνεχές, στις περισσότερες περιπτώσεις είναι συνεχές και τη διάρκεια ζωής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Παράγοντας υποβιβασμού (derating factor) είναι ένας συντελεστής που εφαρμόζεται για να δείξει την μειωμένη απόδοση στην έξοδο, της φωτοβολταϊκής

ισχύος σε πραγματικές συνθήκες σε σύγκριση με τις συνθήκες λειτουργίας κατά τις οποίες η φωτοβολταϊκή γεννήτρια αξιολογείται.

Επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως το λέρωμα των πλαισίων , απώλειες στα καλώδια , σκιάσεις , χιόνι , γήρανση των πλαισίων.

Κλίση (slope) η γωνία τοποθέτησης των πάνελ σε σχέση με το οριζόντιο αζιμούθιο.

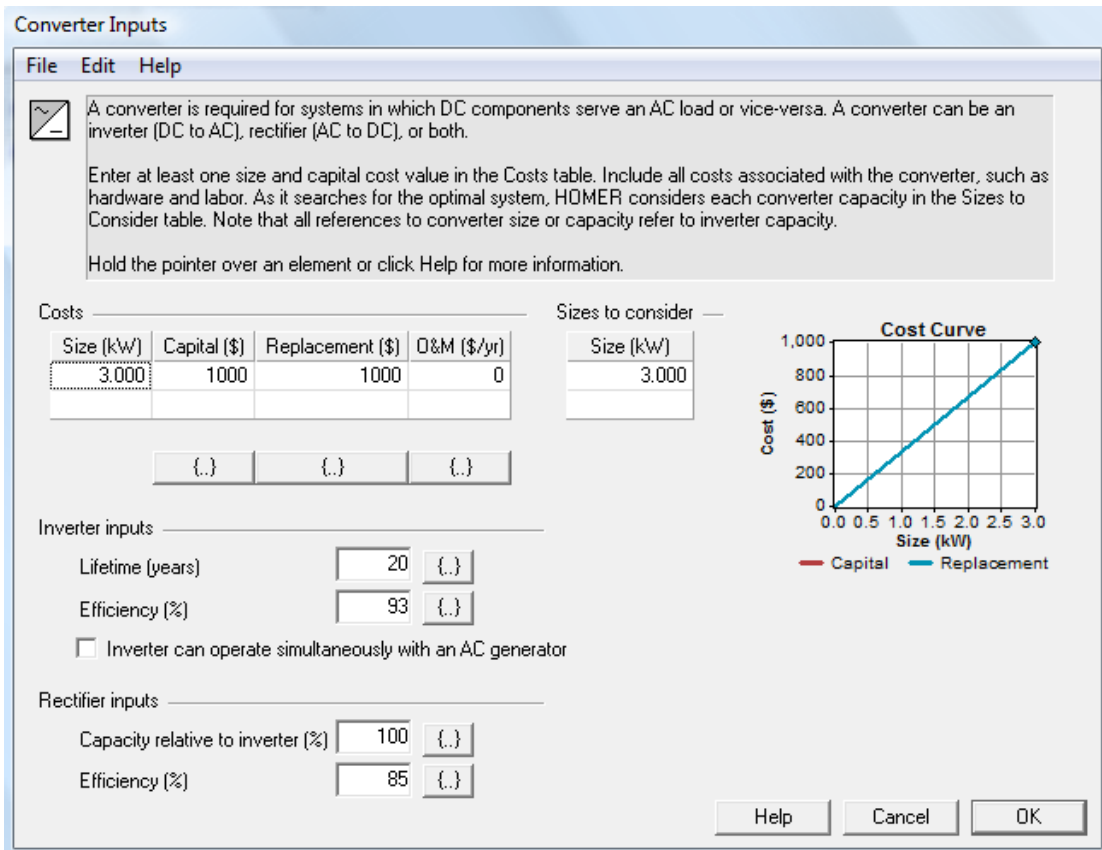
Ανάκλαση εδάφους το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο έδαφος και ανακλάται.

Θερμοκρασιακός συντελεστής της ισχύος είναι ένα μέγεθος που δείχνει πόσο έντονα εξαρτάται η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου από τη θερμοκρασία των στοιχείων.

Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων. Είναι η θερμοκρασία των πλαισίων στις παρακάτω συνθήκες ηλιακή ακτινοβολία 0.8 kW/m^2 θερμοκρασία περιβάλλοντος $20 \text{ }^\circ\text{C}$ και ταχύτητα ανέμου 1 m/s .

Αποδοτικότητα σε κανονικές συνθήκες δοκιμής είναι η μέγιστη απόδοση ισχύος σε κανονικές συνθήκες δοκιμής.(STC) (ηλιακή ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία περιβάλλοντος $25 \text{ }^\circ\text{C}$).

Το θερμοκρασιακό συντελεστή ισχύος και την ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων τα παίρνουμε από τον οδηγό με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας που συνοδεύει το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο



Εικόνα 34 Εισαγωγή δεδομένων μετατροπέα [17]

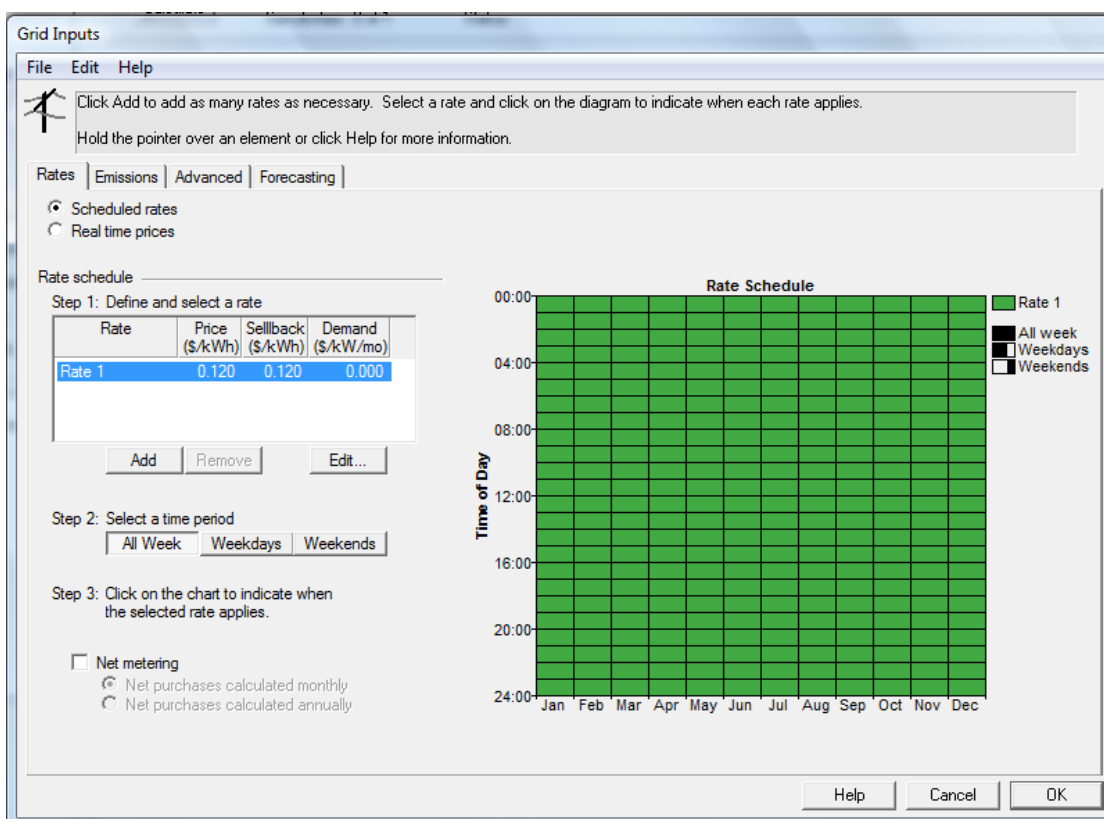
Όπως και στην εικόνα 33 έτσι και στην 34 εισάγουμε το μέγεθος του μετατροπέα καθώς και το κόστος κεφαλαίου, αντικατάστασης και λειτουργίας συντήρησης.

Διάρκεια ζωής του μετατροπέα

Αποδοτικότητα επί της % είναι το ποσοστό του συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος που μετατρέπει ο inverter σε εναλλασσόμενο και δίνει στο δίκτυο πόλης.

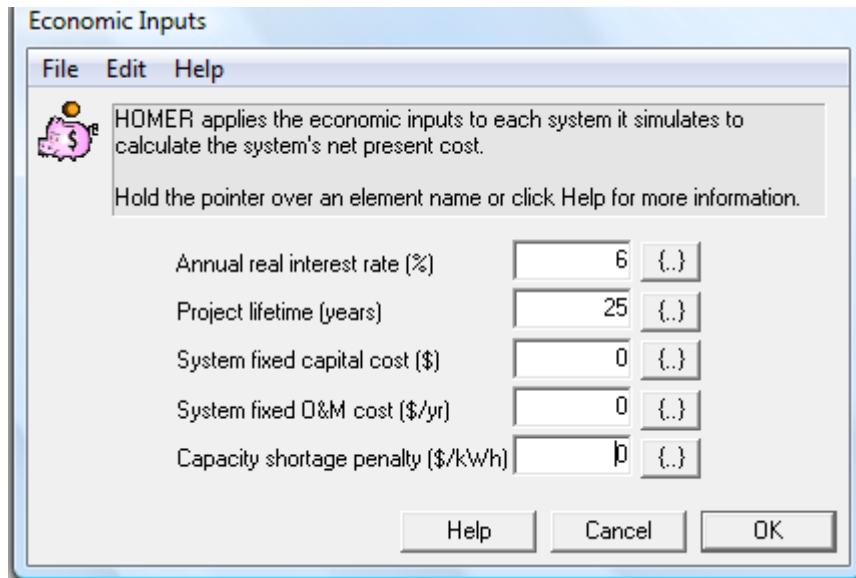
Εισάγουμε το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της περιοχής που βρίσκεται η εγκατάστασή μας και το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας εκφραζόμενο σε kWh/m²/d για κάθε μήνα ενός έτους που διατίθεται στη φωτοβολταϊκή συστοιχία που

μελετάμε. Ο όμηρος χρησιμοποιεί αυτά τα δεδομένα για να υπολογίσει την ενέργεια εξόδου που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία κάθε ώρα του έτους. Το γεωγραφικό πλάτος καθορίζει την θέση της εγκατάστασης στην επιφάνεια της γής. Χρησιμοποιείται κατά τον υπολογισμό των τιμών ακτινοβολίας από τους δείκτες καθαρότητας (clearness index) και το αντίστροφο. Επίσης είναι χρήσιμο για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια. [17]



Εικόνα 35. Εισαγωγή δεδομένων δικτύου [17]

Στην εικόνα 35 έχουμε τις εισροές δικτύου όπου εισάγουμε στο πεδίο αξίες (rate) την τιμή πώλησης της KWh που παράγεται από το σύστημα μας στην ΔΕΔΗΕ. Η τιμή που ισχύει αυτή τη στιγμή είναι 0.125 € / Kwh

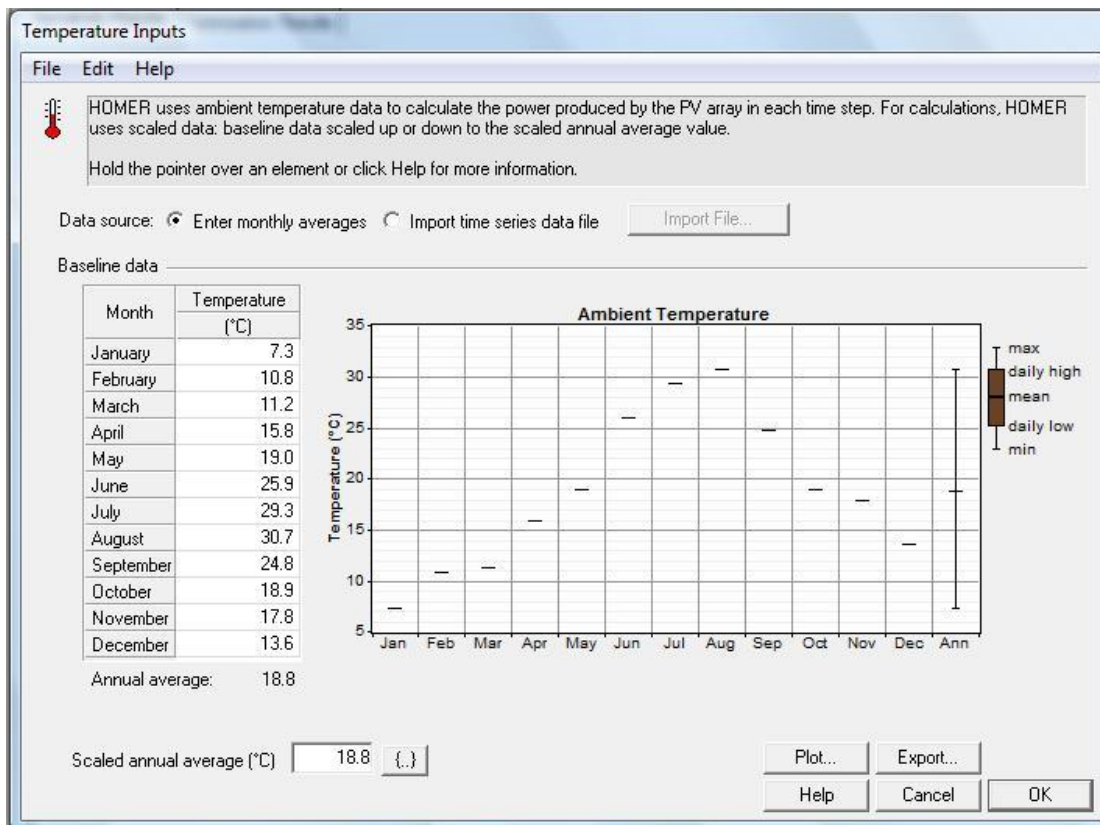


Εικόνα 36 Εισαγωγή οικονομικών δεδομένων [17]

Στην εικόνα 36 ορίζουμε το ετήσιο πραγματικό επιτόκιο 6%. Το πραγματικό επιτόκιο ενός στοιχείου, αντιπροσωπεύει το βαθμό στον οποίο η πραγματική του αξία, αυξάνει διαχρονικά. Αντιθέτως, το ονομαστικό επιτόκιο είναι αριθμός με τον οποίο η ονομαστική αξία ενός περιουσιακού στοιχείου αυξάνει διαχρονικά.

Το πραγματικό επιτόκιο συνδέεται με το ονομαστικό επιτόκιο και το πληθωρισμό με το τύπο $i = (i' - f) / (1 + f)$ όπου i = πραγματικό επιτόκιο, i' = ονομαστικό επιτόκιο και f = ετήσιος πληθωρισμός.

Επίσης ορίζουμε την περίοδο ζωής της επένδυσης μας στα 25 χρόνια.



Εικόνα 37 Εισαγωγή δεδομένων θερμοκρασίας περιβάλλοντος[17]

Στην εικόνα 37 εισάγουμε τις τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος από τις μέσες μηνιαίες τιμές που έχουμε για τους 12 μήνες του έτους και ο όμηρος υπολογίζει την ενέργεια που παράγει η φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Το καθαρό παρόν κόστος (NPC) είναι από τους κυριότερους οικονομικούς παράγοντες στον Όμηρο. Είναι η παρούσα αξία όλων των δαπανών που έχει ένα σύστημα κατά την διάρκεια της ζωής του μείον τη παρούσα αξία του συνόλου των εσόδων που κερδίζει στη διάρκεια αυτή.

Το κόστος περιλαμβάνει κόστος κεφαλαίου , κόστος αντικατάστασης , κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Τα έσοδα περιλαμβάνουν την αξία εκποίησης και τα έσοδα από τις πωλήσεις.

Κόστος της ενέργειας (COE) είναι το μέσο κόστος ανά kWh της χρήσιμης ηλεκτρικής ενέργειας (δηλαδή ότι πουλάμε) που παράγεται από το σύστημα μας.

5.3 Αποτελέσματα

Συγκρίνοντας την ετήσια παραγωγή ενέργειας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με τα πλαίσια μικρόαμόρφου πυριτίου για τις τρεις χρονιές που μελετήσαμε παραπάνω με την ετήσια παραγωγή για την ίδια συστοιχία που μας δίνει ο Όμηρος αν του εισάγουμε τα δεδομένα από τις πειραματικές μετρήσεις που έχουμε καταλήγουμε στο παρακάτω πίνακα.

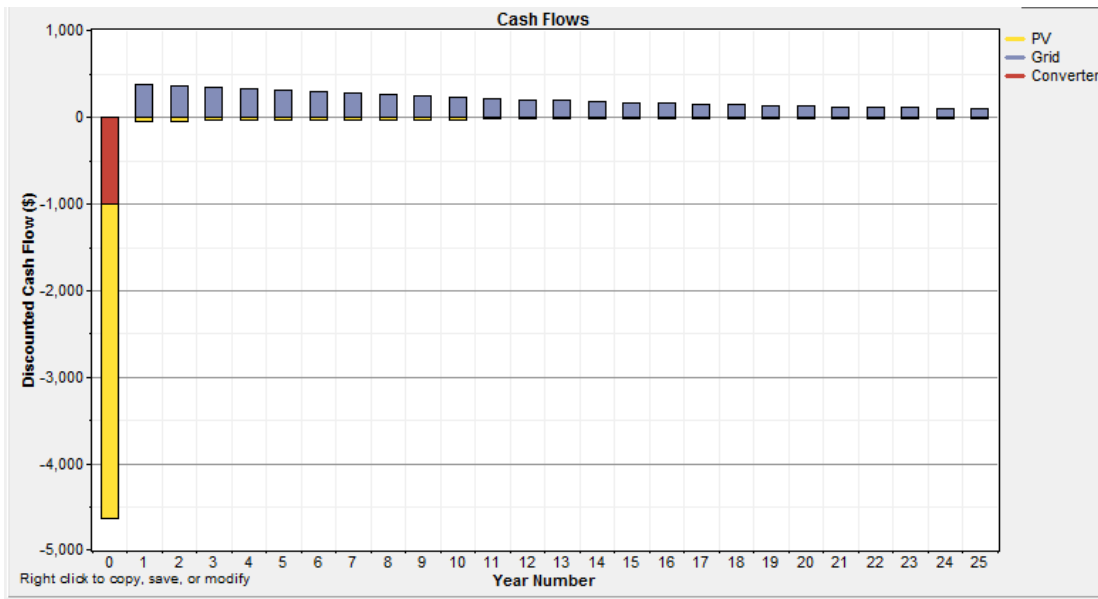
Σύγκριση παραγόμενης ενέργειας μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας που έχει μετρηθεί σε σχέση με την τιμή της ίδιας παραγόμενης ενέργειας που δίνει ο Όμηρος

Χρονική περίοδος	Ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh)	Ετήσια παραγωγή ενέργειας από Homer (kWh)	Απόκλιση %
2010 – 2011	3348	3285	1.85
2011 – 2012	3315	3350	1.04
2012 - 2013	3376	3285	2.7

Πίνακας 2 Σύγκριση πραγματικής ετήσιας παραγωγής ενέργειας για κάθε ένα από τα τρία έτη σε σχέση με την ετήσια παραγωγή ενέργειας που δίνει το λογισμικό Homer. (για τη φωτοβολταϊκή συστοιχία με πλαίσια μικροαμόρφου πυριτίου)

Βλέπουμε ότι η απόκλιση του Όμηρου σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις είναι παρά πολύ μικρή και στις τρεις χρονιές οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι είναι ένα αξιόπιστο λογισμικό[17]

Στη συνέχεια κάνουμε τη σύγκριση μεταξύ των δυο συστημάτων που αναφέραμε παραπάνω. Στην αρχή τρέχουμε το Homer με τα δεδομένα για το σύστημα με τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια και παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα



Εικόνα 38 Προεξοφλημένη χρηματική ροή για το φωτοβολταϊκό σύστημα με τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια, αρχικό κόστος μετατροπέα (κόκκινη στήλη) , αρχικό κόστος φωτοβολταϊκής συστοιχίας (κίτρινη στήλη) συντήρηση εγκατάστασης (κίτρινες μικρες στήλες) το κέρδος από τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος (μπλε στήλες)

Οικονομικά αποτελέσματα του Όμηρου για πολυκρυσταλλικά πλαίσια

Συνιστώσα	Αρχικό κόστος (€)	Κόστος συντήρησης (€)	Κέρδος (€)	Καθαρό κέρδος (€)
Φ/Β συστοιχία	-3.632	-639	0	-4.271
Δίκτυο	0	0	5.176	5.176
Μετατροπέας	-1.000	0	0	-1.000
Σύστημα	-4.632	-639	5.176	-96

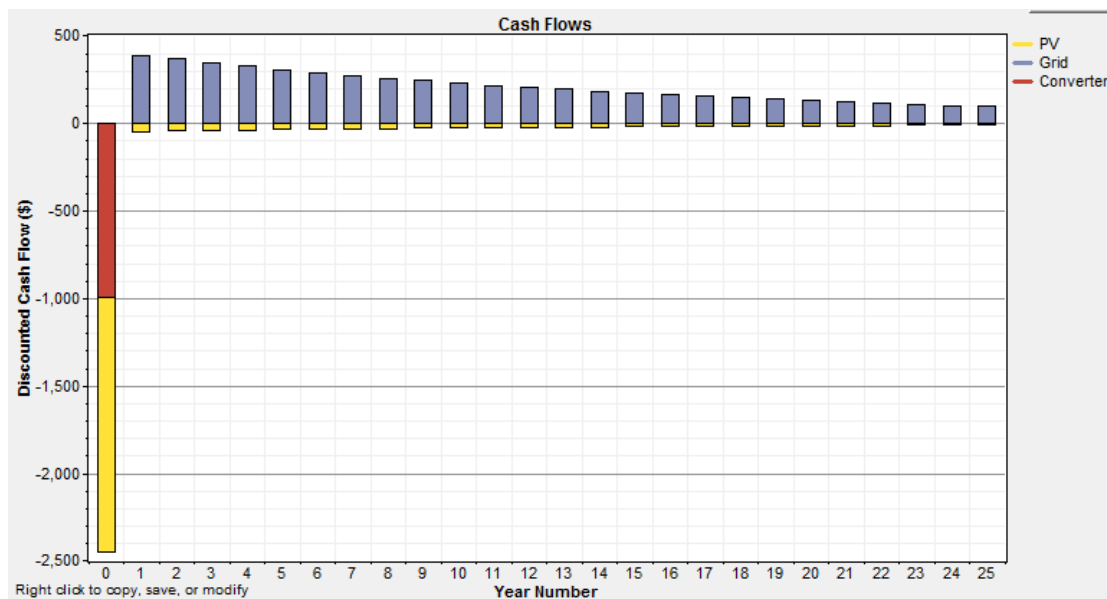
Πίνακας 3. Αρχικό κόστος, κόστος συντήρησης , εισροές και κέρδος φωτοβολταϊκής εγκατάστασης με πολυκρυσταλλικά πλαίσια

Σύμφωνα με το πίνακα 3 το κόστος συντήρησης ανά είναι 639€ ενώ έχουμε κέρδη από τη πώληση του ρεύματος στο δίκτυο σε σημερινή αξία χρήματος μετά από 25 χρόνια

5176 €. Στο τέλος ζωής της επένδυσης βλέπουμε ότι θα έχουμε ένα έλλειμα 96 € σε σημερινή αξία, πράγμα που σημαίνει ότι οριακά, ότι θα δαπανήσουμε αρχικά

για την εγκατάσταση θα το εξοφλήσουμε στο τέλος της 25 ετίας έχοντας και ένα χάσιμο 96 €. Άρα είναι μια ασύμφορη επί της ουσίας επένδυση.

Για το δεύτερο σύστημα με τα μικροαμόρφου πυριτίου πλαίσια μας δίνει τα εξής αποτελέσματα



Εικόνα 39. Προεξοφλημένη χρηματική ροή για τη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση με τα μικροαμόρφου πυριτίου πλαίσια, αρχικό κόστος μετατροπέα (κόκκινη στήλη), αρχικό κόστος φωτοβολταϊκής συστοιχίας (κίτρινη στήλη) συντήρηση εγκατάστασης (κιτρινες μικρες στήλες) το κέρδος από τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος (μπλε στήλες).

Οικονομικά αποτελέσματα του Όμηρου για μικρο-αμόρφου πλαίσια

Συνιστώσα	Αρχικό κόστος (€)	Κόστος συντήρησης (€)	Εισροές (€)	Κέρδος (€)
Φ/Β συστοιχία	-1.450	-639	0	-2.089
Δίκτυο	0	0	5.251	5.251
Μετατροπέας	-1.000	0	0	-1.000
Σύστημα	-2.450	-639	5.249	2.161

Πίνακας 4 .Αρχικό κόστος, κόστος συντήρησης, εισροές και κέρδος φωτοβολταϊκής εγκατάστασης με μικρο-αμόρφου πυριτίου πλαίσια

Από το πίνακα 4 βλέπουμε ότι το κόστος συντήρησης είναι 639 € (έχουμε εισάγει στον Όμηρο ως δεδομένο ετήσιο κόστος συντήρησης 50 €) ενώ έχουμε κέρδη από τη πώληση του ρεύματος στο δίκτυο σε σημερινή αξία χρήματος μετά από 25 χρόνια 5251 €. Η παραγόμενη ενέργεια μας κοστίζει 0.05 € ανά kWh μια τιμή πιο χαμηλή σε σχέση με τη τιμή που αγοράζουμε τη kWh από τη ΔΕΔΔΗΕ.

Οπότε συμπεραίνουμε ότι το σύστημα μας παράγει ενέργεια σε ανταγωνιστική τιμή.

Το τελικό κέρδος στο τέλος της 25 ετίας προεξοφλημένο είναι 2146 € , είναι μικρό κέρδος μια και το σύστημα μας είναι μικρής ισχύος 2.18 kW και το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι μεγαλύτερο ανά εγκατεστημένο W για μικρά συστήματα σε σύγκριση με το αντίστοιχο κόστος μεγαλύτερων σε ισχύ συστημάτων. Επίσης η τιμή πώλησης ανά παραγόμενη kWh από το σύστημα είναι 0.125 € όπως είδαμε στην εικόνα 35 πολύ μικρότερο σε σχέση με το 0.55 € που ήταν η τιμή το 2009 που ξεκίνησε η εφαρμογή του προγράμματος για εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών σε ταράτσες κτιρίων, οπότε και αυτός είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το χαμηλό κέρδος που έχουμε στο τέλος της 25ετίας.

Στη σύγκριση των δυο συστημάτων ενώ τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια έχουν ένα βαθμό απόδοσης 14.6 % και τα μικρο-αμόρφου 9.3 % το σύστημα με τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια παρήγαγε σε ένα έτος 3483 kWh ενώ το σύστημα με τα μικροαμόρφου πυριτίου 3533 kWh.

Κέρδος έχουμε από τα πλαίσια με την μικρότερη απόδοση ενώ με τα πολυκρυσταλλικά είναι ασύμφορη επένδυση και οριακά και με αρνητικό πρόσημο, επί της ουσίας παίρνουμε πίσω τα λεφτά που επενδύσαμε μετά από 25 χρόνια και τίποτα παραπάνω.

Για να αποδόσουν τα πλαίσια του μικροαμόρφου πυριτίου ίδια ισχύ με τα πολυκρυσταλλικά χρειαζόμαστε για τα μεν πρώτα χώρο επιφάνειας 25.6 m² για την εγκατάστασή τους και για τα δεύτερα 14.9 m²

Οπότε απαιτείται 72% μεγαλύτερη διαθέσιμη επιφάνεια για την εγκατάσταση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με τα πλαίσια μικρο-αμόρφου πυριτίου σε σχέση με την αντίστοιχη σε ισχύ συστοιχία με πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Αυτό είναι ένα μειονέκτημα των πλαισίων μικρο-αμόρφου πυριτίου

Τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια που επιλέξαμε έχουν σχεδόν διπλάσια τιμή ανα W από τα μικρο-αμόρφου πυριτίου όποτε το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι αρκετά μεγαλύτερο (47 %) στο σύστημα με τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια σε σχέση με το σύστημα με τα πλαίσια μικρο-αμόρφου πυριτίου.

Ενας άλλος παράγοντας είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής του κάθε πλαισίου. Για τα μεν πολυκρυσταλλικά είναι - 0.44 %/°C ενώ για τα μικροαμόρφου πυριτίου - 0.24 %/°C πράγμα που σημαίνει ότι οι απώλειες τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω υψηλής θερμοκρασίας στο σύστημα είναι μεγαλύτερες στο σύστημα με τα πολυκρυσταλλικά σχεδόν διπλάσιες σε σχέση με τα μικρο-αμόρφου πυριτίου οπότε από αυτό βλέπουμε ότι τα μικρο-αμόρφου πυριτίου έχουν μια πολύ καλύτερη συμπεριφορά τις μέρες με υψηλή θερμοκρασία.

Αυτός είναι και ο λόγος που ενώ τα δύο είδη φωτοβολταϊκών πλαισίων έχουν μεγάλη διαφορά στην ονομαστική απόδοση τους έχουμε λιγότερη μείωση στην παραγωγή ισχύος τους καλοκαιρινούς μήνες για το σύστημα μικρο-αμόρφου πυριτίου

5.4 Συμπεράσματα

Το λογισμικό Όμηρος δίνει αποτελέσματα με πολύ μικρή απόκλιση σε σχέση με τη πραγματικότητα και αυτό το διαπιστώνουμε από τις τιμές που μας δίνει για τη συνολική ενέργεια που παρήγαγε το σύστημα που είναι τοποθετημένο στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών σε σχέση με τις πραγματικές τιμές ενέργειας που πήραμε από το μετρητικό σταθμό για κάθε μια από τις τρεις χρονιές που μελετήσαμε.

Το αρχικό κόστος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης με πολυκρυσταλλικά πλαίσια είναι κατά 2182€ ακριβότερο από του μικρο-αμόρφου. Η ετήσια παραγωγή ενέργειας στη περίπτωση του πόλυκρυσταλλικού είναι 3226 kWh και του μικρο-αμόρφου 3285 kWh. Παρόλο που το πολυκρυσταλλικό πλαίσιο έχει απόδοση 14.6% σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας και το αμόρφου πυριτίου 9.3% το οικονομικό όφελος είναι - 96 € δηλαδή δεν υπάρχει όφελος για το σύστημα με το πολυκρυσταλλικά πλαίσια και 2161 € για το σύστημα με το μικροαμόρφου πυριτίου πλαίσια. Δηλαδή με φθηνότερο αρχικό κόστος εγκατάστασης κατά 2182 € έχουμε οικονομικό όφελος από τη πώληση του ρεύματος στο δίκτυο $2161 + 96 = 2257$ € σε σχέση με το να διαλέξουμε την φωτοβολταϊκή εγκατάσταση με τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια. Από αυτό βλέπουμε πόσο μεγάλο ρόλο παίζει ο θερμοκρασιακός συντελεστής C_T καθώς και η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου T_{NOCT} που έχουν μικρότερες τιμές στη περίπτωση του πλαισίου απο μικρο-αμόρφο πυρίτιο ειδικά για τις περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος όπως είναι και η χώρα μας αλλά και όλα τα κράτη της Μεσογείου, Βόρειας Αφρικής και της Μέσης Ανατολής μια και η διαφορά στις ονομαστικές αποδόσεις των δύο συστημάτων (5.3%) καλύπτεται και τελικά το σύστημα μικρο-αμόρφου πυριτίου αποδίδει καλύτερα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Markvart, T. (2003), Ηλεκτρισμός από ηλιακή ενέργεια .Αθήνα Εκδόσεις ΙΩΝ.
2. Μανιάς, Σ. Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά. ΕΜΠ
3. Γεωργούλας, Ε.(2013), Ανάλυση λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων αμόρφου πυριτίου υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Διπλωματική εργασία. Αθήνα.ΕΜΠ.
4. Δέρβος, Κ. (2009), Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
5. Δαμιανίδης Μ, Κατσαρός Γ, Τόλης Μ. (2011), Οδηγός μελέτης και υλοποίησης φωτοβολταϊκών έργων. Θεσσαλονίκη. ΤΕΕ.
6. Yaw-Juen Wang, and Po-Chun Hsu, (2009), « *Analysis of Partially Shaded PV Modules Using Piecewise Linear Parallel Branches Model* »
7. Tyagi V, Nurul A, Rahim A. (2011), Progress in solar PV technology Research and achievement . Department of physics.India.
8. The German Energy Society, (2008), “Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects, and engineers”, *2nd ed.*, *Earthscan*, London, pp. 23-51.
9. http://en.wikipedia.org/wiki/Staebler-Wronski_effect
10. El Chaar L , Alamont L. (2011) Review of photovoltaic technologies. USA.

11. Green M, Basore P.A, Chang N, Clugston D, Egan R, Evans R, Hogg D, Jarnason S, Keevers M, Lasswell P, O'Sullivan J, Schubert U, Turner A, Wenham S.R, Young T, (2004), "Crystalline silicon on glass (CSG) thin-film solar cell modules", *Energy Materials and Solar Cells*, 77 pp. 857–863.

12. Mrazykov T, Ferekides C.S. (2011) Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. USA.

13. Blaessev G, Munro D (Halcrow & Gilbert). (1995), Guidelines for the assessment of photovoltaic plants.

14. Kanakis I , Tsoutos T, Papadakis G , Kyriakarakos G. Savvakis N. , Schwartz B. (2013) Performance analysis of the two twins grid connected thin film pv installatiosn 2.18 KWp for the first two year of their operation in the island of Crete and in Athens.

15. Kyriakarakos G. Papadakis G. Tsoustos T. ,Savvakis N. , Kanakis I. , Schwartz B . (2013),Can the better temperature coefficient of thin film modules make up for their lower efficiency under southern European climatic conditions.

16 Catalogue Sharp pv module data sheet

17. Manual book at Homer