



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκής κυψέλης και δοκιμή
φωτοβολταϊκού πλαισίου σε πραγματικές συνθήκες**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Ε. ΧΟΥΣΤΟΥΛΑΚΗ

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκής κυψέλης και δοκιμή φωτοβολταϊκού πλαισίου σε πραγματικές συνθήκες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Ε. ΧΟΥΣΤΟΥΛΑΚΗ

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19^η Δεκεμβρίου 2013.

(Υπογραφή)

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Σταύρος Σ. Παπαθανασίου
Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Πάυλος Γεωργιάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

(Υπογραφή)

.....

ΧΟΥΣΤΟΥΛΑΚΗΣ Ε. ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2013 – All rights reserved

Copyright © Εμμανουήλ Χουστουλάκης, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η παρακολούθηση και η μελέτη της συμπεριφοράς ενός πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού πλαισίου, επί ένα ολόκληρο έτος, σε πραγματικές συνθήκες. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε το φωτοβολταϊκό πλαίσιο SE220 της εταιρίας Silcio, ονομαστικής ισχύος 220 W, το οποίο εγκαταστάθηκε στην οροφή του παλαιού κτιρίου της σχολής των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πλαισίου παράλληλα με τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής καταγράφονταν συνεχόμενα επί ένα έτος και αποθηκεύονταν σε μια βάση δεδομένων. Έπειτα τα δεδομένα επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν υπό τη μορφή γραφικών παραστάσεων.

Επιπλέον έγινε μοντελοποίηση της φωτοβολταϊκής κυψέλης στο περιβάλλον του matlab simulink ώστε να γίνει δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων του πειράματος με τα αντίστοιχα της προσομοίωσης. Η προσομοίωση η οποία κατασκευάστηκε, δέχεται ως δεδομένα τα χαρακτηριστικά βιομηχανικών πλαισίων (τα οποία παρέχονται από τους κατασκευαστές τους) καθώς και την τάση λειτουργίας τους, παρέχοντας στον χρήστη τις I-V και P-V χαρακτηριστικές των πλαισίων αυτών. Ενώ, σε περίπτωση όπου δεν είναι γνωστές οι αντιστάσεις R_s και R_{sh} της κυψέλης μπορούν να υπολογιστούν με παράλληλη γραφική αναπαράσταση της διαδικασίας.

Τέλος, έγινε κατασκευή ενός πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού πλαισίου με χαρακτηριστικά που προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο αυτά του SE220. Το χειροποίητο πλαίσιο τοποθετήθηκε ομοίως στην οροφή του παλαιού κτιρίου της σχολής των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Για το παραπάνω πείραμα, επιλέχθηκαν 60 φωτοβολταϊκές κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου από την Silcio, οι οποίες κολλήθηκαν σε σειρά μεταξύ τους και ενθυλακώθηκαν σε διάταξη διπλού τζαμιού ώστε να μπορούν παράγουν την απαιτούμενη ισχύ των 220W.

Λέξεις Κλειδιά: << φως, ήλιος, ακτινοβολία, ενέργεια, φωτοβολταϊκό, κυψέλη, πλαίσιο, ημιαγωγός, πυρίτιο, ρεύμα, τάση, βραχυκύκλωση, ανοιχτοκύκλωση, θερμοκρασία, αντίσταση, σειρά, παράλληλη υποβάθμιση>>

Abstract

The scope of this thesis was the continuous study and monitoring of the behavior of a polycrystalline photovoltaic module in real life conditions, for an entire year. The module that was chosen for this purpose was the SE220 of the Greek company SILCIO, with nominal power 220W, which was installed on the roof of the old facilities of the electrical engineering and computer engineering school. The electrical characteristics of the module along with the meteorological data of the region were recorded continuously for a whole year and stored in a computer database. Afterwards, the data was analyzed graphically.

Furthermore a simulation of a photovoltaic cell was developed in matlab simulink environment in order to compare the results of the experiment with the respective results of the simulation. The simulation that was build, accepts as income data the technical specifications of industrial photovoltaic modules (supplied by their manufacturers) as well as the operating voltage of the module, providing the user with the I-V and P-V characteristics of the modules as output data. Moreover, in case that the values of the cell resistances R_s and R_{sh} are unknown, they can be evaluated with parallel graphic representation of the procedure.

Finally, a polycrystalline photovoltaic module was fabricated with specifications as close as possible to that of the SE220. The handmade module was also installed on the roof of the old facilities of the electrical engineering and computer engineering school. For this experiment, there were chosen 60 polycrystalline photovoltaic cells from Silcio, which were soldered in series and encapsulated in double glass formation in order to produce the required power of 220W.

Keywords: << light, sun, irradiation, energy, photovoltaic, cell, module, semiconductor, silicon, current, voltage, short-circuit, open-circuit, temperature, resistance, series, shunt, degradation >>

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Νικόλαο Χατζηαργυρίου για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Ιδιαίτερος ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Κωσταντίνο Λατούφη για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφερε, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις του. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πίνακας περιεχομένων

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Εισαγωγή..... | 1 |
| 2 | Φως-Ηλιακή Ακτινοβολία | 5 |
| 2.1 | Φως..... | 5 |
| 2.1.1 | Ροή φωτονίων..... | 8 |
| 2.1.2 | Μέλαινα σώματα..... | 11 |
| 2.2 | Ήλιος..... | 13 |
| 2.2.1 | Ηλιακή ακτινοβολία | 14 |
| 2.2.2 | Ορισμοί και βασικές έννοιες..... | 15 |
| 2.2.3 | Προσδιορισμός της θέσης του ηλίου | 18 |
| 2.2.4 | Ηλιακός χρόνος | 19 |
| 2.2.5 | Μέθοδοι υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας | 20 |
| 3 | Ημιαγωγοί-Δίοδος p-n..... | 25 |
| 3.1 | Ενεργειακές ζώνες..... | 25 |
| 3.1.1 | Εξάρτηση ενεργειακού διακένου από την θερμοκρασία | 27 |
| 3.2 | Μέταλλα μονωτές και ημιαγωγοί..... | 28 |
| 3.2.1 | Ηλεκτρόνια και οπές..... | 30 |
| 3.3 | Συντελεστής απορρόφησης | 32 |
| 3.4 | Βάθος απορρόφησης..... | 34 |
| 3.5 | Ρυθμός παραγωγής φορέων | 36 |
| 3.6 | Επανασύνδεση φορέων..... | 38 |
| 3.7 | Χρόνος ζωής φορέων..... | 40 |
| 3.8 | Μήκος διάχυσης | 42 |
| 3.9 | Ημιαγωγοί άμεσου και έμμεσου διακένου | 43 |
| 3.10 | Ημιαγωγοί προσμίξεων | 46 |
| 3.11 | Στάθμη Fermi | 47 |
| 3.12 | Επαφή p-n..... | 52 |
| 3.12.1 | Επίπεδο ενεργειακό διάγραμμα | 53 |
| 3.12.2 | Ανοιχτό κύκλωμα | 54 |
| 3.12.3 | Ορθή και ανάστροφη πόλωση | 56 |
| 3.13 | Πυρίτιο | 58 |

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| 4 | Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια..... | 61 |
| 4.1 | Φωτοβολταϊκή κυψέλη..... | 61 |
| 4.2 | Φωτόρρευμα..... | 62 |
| 4.3 | Πιθανότητα συγκέντρωσης..... | 63 |
| 4.4 | Κβαντική απόδοση..... | 64 |
| 4.5 | Φασματική απόκριση..... | 65 |
| 4.6 | Φωτοβολταϊκό φαινόμενο..... | 67 |
| 4.7 | Ρεύμα βραχυκύκλωσης..... | 69 |
| 4.8 | Τάση ανοιχτοκύκλωσης..... | 72 |
| 4.9 | Παράγοντας πλήρωσης..... | 75 |
| 4.10 | Απόδοση..... | 77 |
| 4.11 | Κατασκευή ηλιακών κυψελών..... | 78 |
| 4.11.1 | Οπτικές απώλειες..... | 80 |
| 4.11.2 | Αντιανακλαστική επίστρωση..... | 81 |
| 4.11.3 | Τροποποίηση τραχύτητας της επιφάνειας..... | 82 |
| 4.11.4 | Απώλειες επανασύνδεσης..... | 84 |
| 4.11.5 | Δομή φωτοβολταϊκής κυψέλης..... | 85 |
| 4.12 | Φωτοβολταϊκό πλαίσιο..... | 88 |
| 4.12.1 | Δομικά υλικά φωτοβολταϊκού πλαισίου..... | 89 |
| 4.12.2 | Σύνδεση κυψελών..... | 91 |
| 4.13 | Διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων..... | 94 |
| 5 | Συνθήκες Λειτουργίας Φωτοβολταϊκού Πλαισίου..... | 99 |
| 5.1 | Λειτουργία πλαισίου σε χαμηλό φως..... | 99 |
| 5.1.1 | Επίδραση της παράλληλης αντίστασης R_{sh} | 101 |
| 5.2 | Επίδραση της θερμοκρασίας κυψέλης..... | 103 |
| 5.2.1 | Ερμηνεία με μαθηματικές σχέσεις..... | 105 |
| 5.2.2 | Υπολογισμός της θερμοκρασίας κυψέλης..... | 108 |
| 5.3 | Επίδραση της κλίσης του συλλέκτη..... | 111 |
| 5.4 | Επίδραση σκίασης..... | 115 |
| 5.4.1 | Δίοδοι παράκαμψης..... | 118 |
| 5.5 | Επίδραση ακαθαρσιών..... | 120 |
| 5.5.1 | Ακαθαρσίες κρυστάλλου..... | 120 |
| 5.5.2 | Ακαθαρσίες επιφάνειας πλαισίου..... | 124 |
| 5.6 | Επίδραση αντίστασης σειράς R_s | 125 |

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.7 | Υποβάθμιση πλαισίου | 128 |
| 5.7.1 | Ανάλυση υποβάθμισης | 134 |
| 6 | Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκής κυψέλης στο Matlab Simulink | 139 |
| 6.1 | Ισοδύναμο κύκλωμα κυψέλης και μαθηματικές σχέσεις που το περιγράφουν | 139 |
| 6.2 | Μελέτη I-V χαρακτηριστικών με τη χρήση της προσομοίωσης | 143 |
| 6.3 | Ανάλυση μοντελοποίησης στο matlab-simulink | 146 |
| 6.4 | Σύγκριση μοντέλων μιας και δύο διόδων | 162 |
| 6.5 | Δοκιμή προσομοίωσης | 165 |
| 7 | Μέτρηση του πλαισίου SE220 σε πραγματικές συνθήκες για ένα έτος..... | 169 |
| 7.1 | Εισαγωγή..... | 169 |
| 7.2 | Περιγραφή διαδικασίας | 169 |
| 7.3 | Περιγραφή εξοπλισμού, φωτοβολταϊκού δείγματος και τοποθεσίας..... | 171 |
| 7.3.1 | Μετρητικό σύστημα | 171 |
| 7.3.2 | Εξοπλισμός καταγραφής μετεωρολογικών δεδομένων | 174 |
| 7.3.3 | Φωτοβολταϊκό πλαίσιο | 179 |
| 7.3.4 | Περιοχή δοκιμών | 180 |
| 7.3.5 | Κλίμα περιοχής..... | 182 |
| 7.4 | Ετήσια δεδομένα ανά μήνα λειτουργίας..... | 186 |
| 7.5 | Συνολικά διαγράμματα ισχύος-απόδοσης | 189 |
| 7.6 | Συμπεριφορά πλαισίου σε χαμηλή ακτινοβολία..... | 191 |
| 7.7 | Επίδραση της θερμοκρασίας κυψέλης στη συμπεριφορά του πλαισίου | 194 |
| 7.8 | Επίδραση της κλίσης των 30° στη συμπεριφορά του πλαισίου | 197 |
| 7.9 | Επίδραση των ακαθαρσιών στην επιφάνεια του πλαισίου | 203 |
| 7.10 | I-V χαρακτηριστικές..... | 205 |
| 7.11 | Υποβάθμιση του πλαισίου στο ένα έτος λειτουργίας | 207 |
| 7.12 | Ετήσια παραγωγή πλαισίου..... | 212 |
| 7.13 | Συμπεριφορά πλαισίου σε αντίξοες περιβαλλοντολογικές συνθήκες και σύγκριση των αποτελεσμάτων με προσομοίωση..... | 216 |
| 7.14 | Σύγκριση μετρητικών οργάνων | 230 |
| 7.15 | Αβεβαιότητα μετρήσεων | 239 |
| 8 | Κατασκευή πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού πλαισίου ισχύος 220 W | 243 |
| 8.1 | Εισαγωγή..... | 243 |
| 8.2 | Διαδικασία κατασκευής φωτοβολταϊκού πλαισίου | 243 |

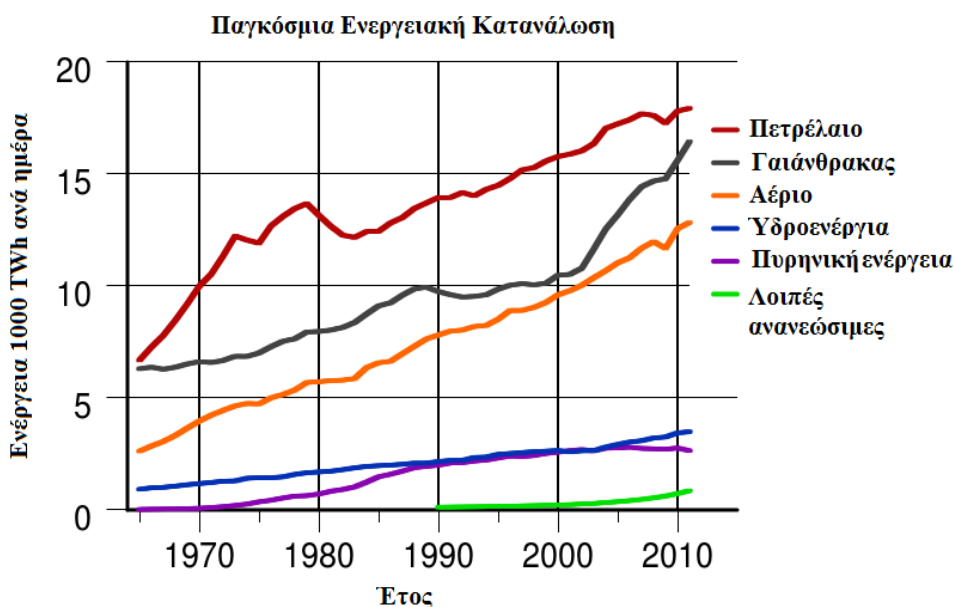
| | | |
|-----------|--------------------------|------------|
| 9 | Παράρτημα..... | 248 |
| 10 | Βιβλιογραφία..... | 262 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα κύρια στοιχεία της φύσης, γη- φως - ύδωρ - άνεμος, ενσωματώνουν μια ενέργεια, η οποία έχει σημαντική επίδραση στην ανθρώπινη δραστηριότητα και γενικότερα στην εξέλιξη της ανθρώπινης οντότητας. Η αναγνώριση της σπουδαιότητας και της δύναμης των στοιχείων αυτών, οδήγησε τον άνθρωπο της πρώιμης περιόδου, αρχικά, στην ταύτισή τους με θεϊκές οντότητες τις οποίες λάτρευε και σεβόταν. Με το πέρας των χρόνων, όμως, ο άνθρωπος κατάφερε να συλλάβει την ιδέα της αξιοποίησης των παραπάνω δυνάμεων προς όφελός του. Έτσι, σήμερα υπάρχουν ποικίλες εφαρμογές οι οποίες εκμεταλλεύονται τα παραπάνω στοιχεία για την παραγωγή ενέργειας. Παραδείγματα χάριν, χρήση ορυκτών καυσίμων, φυτικών υλών από προηγούμενες γεωλογικούς περιόδους, για μεταφορά και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Χρήση βιομάζας, η οποία προσφέρεται για θέρμανση, μεταφορά και ηλεκτρισμό. Εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, είτε για μεταφορά είτε για παροχή μηχανικής αλλά και ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση των ανεμογεννητριών. Χρήση του υδροηλεκτρισμού για την παραγωγή μηχανικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, η οποία επιτυγχάνεται πλέον εύκολα με την χρήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

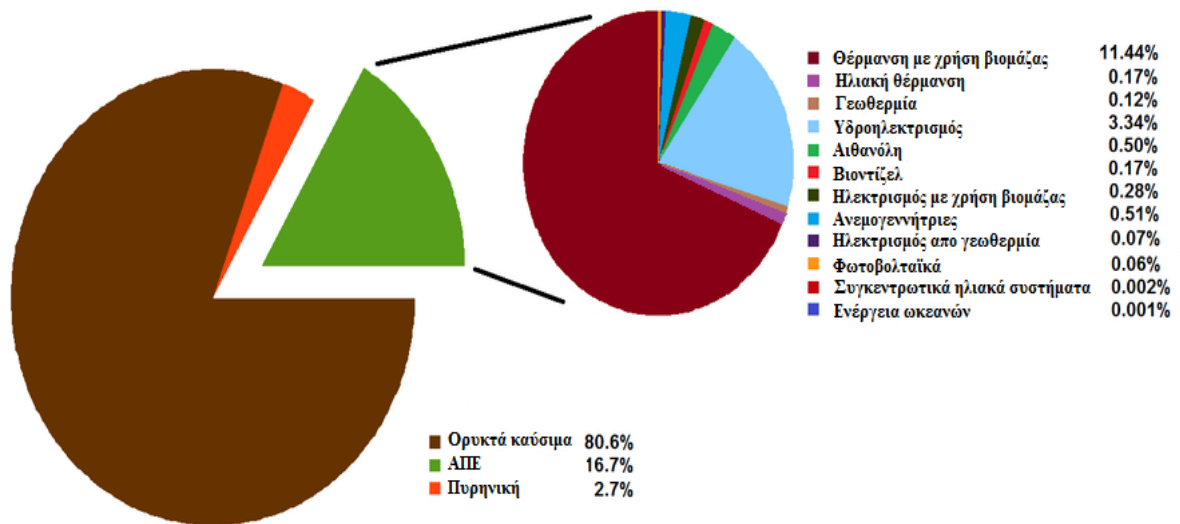
Παρόλο που οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, αργότερα στράφηκε έντονα στη χρήση των ορυκτών καυσίμων όπως γαιάνθρακες, πετρέλαιο, φυσικό αέριο αλλά και στην πυρηνική ενέργεια ως μια πιο αποδοτική και φθηνή πηγή ενέργειας. Έτσι, οι συμβατικές πηγές ενέργειας επικράτησαν σχεδόν αποκλειστικά ως κύριος ενεργειακός πόρος μέχρι και τα τελευταία χρόνια. Τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων του πλανήτη (άνθρακας και πετρέλαιο), όμως, δεν είναι ανανεώσιμα και σε προβλέψιμο χρονικό διάστημα θα εξαντληθούν. Επιπλέον η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων προκάλεσε και συνεχίζει να προκαλεί σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου και της όξινης βροχής, καθώς και σημαντικές κλιματολογικές αλλαγές, που αποτελούν μεγάλες απειλές για το μέλλον της ανθρωπότητας.

Η διεύθυνση των ΑΠΕ στην συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται, λοιπόν, αναγκαία τόσο για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω όσο και λόγω της ολοένα αυξανόμενης παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του **Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας** οι ανάγκες του πλανήτη θα αυξηθούν κατά **35-40%** μέσα στα επόμενα **15 χρόνια**^[1], κυρίως εξαιτίας της σημαντικής αύξησης του πληθυσμού της γης, της αύξησης των οικονομικών και αναπτυξιακών δραστηριοτήτων σε όλο τον πλανήτη και της σημαντικής βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου και όσων αυτή συνεπάγεται. Έτσι, τα τελευταία, περίπου, 20 χρόνια γίνεται μια έντονη προσπάθεια παγκοσμίως, ώστε να ενταχθούν δυναμικότερα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην συνολικά καταναλισκόμενη ενέργεια όπως φαίνεται και στο **σχήμα 1.1**.



Σχήμα 1.1 Διάγραμμα παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης ^[2].

Η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η γεωθερμία, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η βιομάζα ή ακόμη και τα αστικά απορρίμματα αποτελούν μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η εκμετάλλευση των οποίων θα επιφέρει, πέρα από οικονομικά οφέλη, θετικές περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις για μια βιώσιμη ανάπτυξη με οικολογική προοπτική και ανθρώπινο πρόσωπο. Η συμμετοχή των ΑΠΕ έως και το 2010 συγκριτικά με τις συμβατικές μορφές ενέργειας φαίνεται αναλυτικότερα στο **σχήμα 1.2**.



Σχήμα 1.2 Ποσοστιαίο διάγραμμα συνολικής ετήσιας κατανάλωσης έως το 2010 [3].

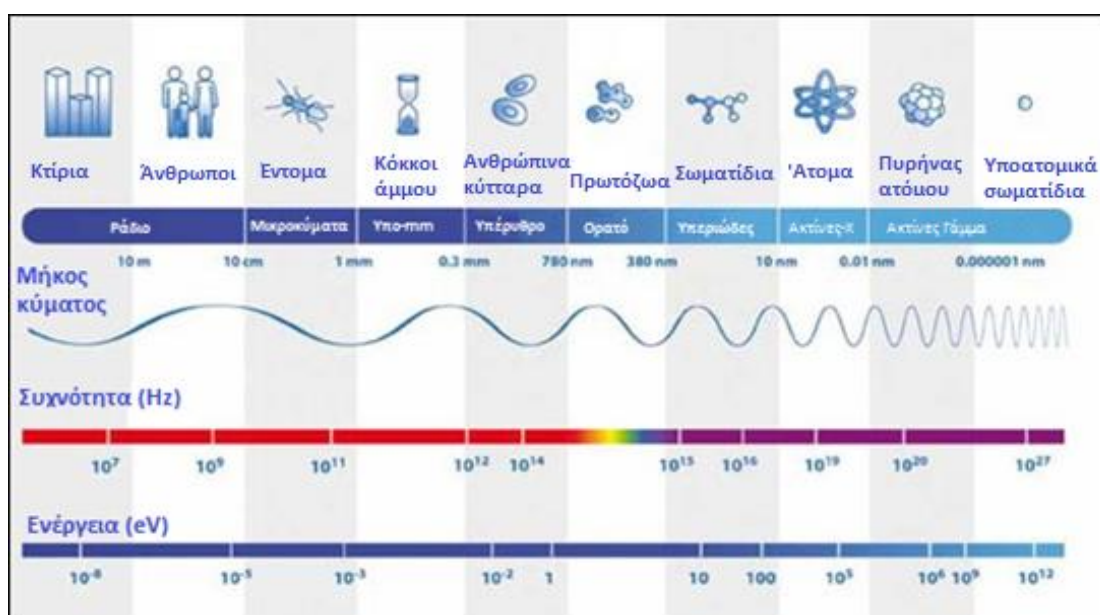
Από όλες τις ανανεώσιμες πηγές που προσφέρονται σήμερα για εκμετάλλευση, η ενέργεια του ήλιου είναι η μεγαλύτερη και πιο αξιόπιστη. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (ηλιακές κυψέλες), τα οποία θα εξετασθούν σε αυτήν την εργασία, προσφέρονται ιδανικά για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας καθώς μετατρέπουν άμεσα την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς θόρυβο, ρύπανση και χωρίς την συμμετοχή κινητών μερών, καθιστώντας τα έτσι μια στιβαρή, αξιόπιστη και μακρόβια κατασκευή.

Αν και η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών στοιχείων ήταν ήδη γνωστή από το 1954 όπου και κατασκευάστηκε η πρώτη φωτοβολταϊκή κυψέλη, τα φωτοβολταϊκά άργησαν πολύ να εδραιωθούν και να γίνουν γνωστά στο ευρύ κοινό, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής. Σήμερα, η διεύδυση των φωτοβολταϊκών στην παγκόσμια ενεργειακή αγορά γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη και αναμένεται να επεκταθεί ακόμα περισσότερο στα επόμενα χρόνια. Παρακάτω θα γίνει εκτενής ανάλυση του τρόπου λειτουργίας αλλά και κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων, ξεκινώντας όμως πρώτα, από τον πιο βασικό παράγοντα που είναι απαραίτητος για την λειτουργία τους, το φως και την ηλιακή ακτινοβολία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΦΩΣ-ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

2.1 ΦΩΣ

Το φως το οποίο γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι αποτελεί μόνο ένα κομμάτι της συνολικής ενέργειας που εκπέμπεται από τον ήλιο προς τη γη. Το φως του ηλίου είναι μια μορφή "ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας" και το μέρος αυτής της ακτινοβολίας, το οποίο είναι ορατό στον άνθρωπο, είναι μόνο ένα μικρό υποσύνολο του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που εμφανίζεται παρακάτω.



Σχήμα 2.1 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα με ενδείξεις για τα μήκη κύματος, τις συχνότητες και τις ενέργειες^[4].

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα περιγράφει το φως ως ένα κύμα με καθορισμένο “μήκος κύματος”. Η περιγραφή του φωτός ως κύμα έγινε αποδεκτή στις αρχές του 1800 όταν τα πειράματα των Thomas Young, François Arago, και Augustin Jean Fresnel έδειξαν φαινόμενα παρεμβολής σε ακτίνες φωτός, αποδεικνύοντας έτσι την κυματική θεωρία του φωτός. Έως τα τέλη του 1860 το φως θεωρούνταν μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ωστόσο, προς τα τέλη του 18^{ου} αιώνα έγινε εμφανές το πρόβλημα αυτής της κυματικής θεωρίας, όταν πειράματα μέτρησης του φάσματος του μήκους κύματος θερμαινόμενων αντικειμένων δεν μπορούσαν να αποδοθούν χρησιμοποιώντας μόνο τις εξισώσεις της κυματικής θεωρίας. Αυτή η αντίφαση επιλύθηκε από τα έργα του Max Planck το 1900, και του Albert Einstein το 1905.

Ο Planck πρότεινε ότι η συνολική ενέργεια του φωτός αποτελείται από δυσδιάκριτα ενεργειακά στοιχεία, ή κβάντα ενέργειας. Ο Einstein, εξετάζοντας το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (την απελευθέρωση, δηλαδή, ηλεκτρονίων από ορισμένα μέταλλα και ημιαγωγούς κατά την πρόσπτωση φωτός στην επιφάνειά τους), διέκρινε σωστά τις τιμές αυτών των κβαντικών στοιχείων ενέργειας. Για το έργο τους στον τομέα αυτό ο Planck και ο Einstein κέρδισαν το βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 1918 και το 1921, αντίστοιχα, και με βάση αυτό το έργο, το φως μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από "πακέτα" ή σωματίδια ενέργειας, τα οποία ονομάζονται **φωτόνια**^[5].

Σήμερα, η κβαντομηχανική αποδέχεται τόσο την κυματική όσο και την σωματιδιακή φύση του φωτός, αποδίδοντάς του έτσι μία **διττή φύση**. Στην κβαντομηχανική, ένα φωτόνιο, όπως όλα τα κβαντομηχανικά σωματίδια, ηλεκτρόνια, πρωτόνια, κλπ. απεικονίζεται ως ένα "πακέτο-κύματος". Ένα πακέτο κύματος ορίζεται ως μια συλλογή από κύματα, τα οποία μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με τέτοιο τρόπο ώστε το πακέτο αυτό είτε να εμφανιστεί τοπικά στο χώρο, είτε εναλλακτικά να εμφανιστεί απλώς ως ένα κύμα. Στις περιπτώσεις όπου το πακέτο κύματος παρουσιάζει τοπικότητα στο χώρο, δρα σαν σωματίδιο. Ως εκ τούτου, ανάλογα με την κατάσταση, ένα φωτόνιο μπορεί να εμφανιστεί είτε σαν κύμα είτε σαν σωματίδιο και αυτή η έννοια ονομάζεται "**Κυματοσωματιδιακός δυϊσμός**".

Το φωτόνιο χαρακτηρίζεται είτε από το μήκος κύματός του, που συμβολίζεται με λ είτε ισοδύναμα από την ενέργειά του, που συμβολίζεται με E . Υπάρχει μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση που συνδέει την ενέργεια του φωτονίου (E) και το μήκος κύματος του φωτός (λ) που δίνεται από την εξίσωση:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

όπου h είναι η σταθερά του Planck $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

και c είναι η ταχύτητα του φωτός $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Πολλαπλασιάζοντας προκύπτει η σχέση του γινομένου, **$h \cdot c = 1.99 \cdot 10^{-25} \text{ Joules}\cdot\text{m}$** .

Η παραπάνω αντιστρόφως ανάλογη σχέση υποδεικνύει ότι το φως το οποίο αποτελείται από φωτόνια υψηλής ενέργειας (όπως το "μπλε" φως) έχει μικρό μήκος κύματος, ενώ το φως το οποίο αποτελείται από φωτόνια χαμηλής ενέργειας (όπως το "κόκκινο" φως) έχει μεγάλο μήκος κύματος.

Όταν γίνεται αναφορά σε "σωματίδια", όπως τα φωτόνια ή τα ηλεκτρόνια, σαν μονάδα ενέργειας χρησιμοποιείται το ηλεκτρονιοβόλτ (eV) και όχι τζάουλ (J). Ένα ηλεκτρονιοβόλτ είναι η ενέργεια που απαιτείται για την διέγερση ενός ηλεκτρονίου κατά 1 volt, έτσι ένα φωτόνιο με ενέργεια 1 eV έχει αντίστοιχα ενέργεια 1.602×10^{-19} J.

Ως εκ τούτου, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί

$$h \cdot c = 1.2398 \approx 1.24 \cdot 10^{-6} \text{ eV} \cdot \text{m} \quad (2.2)$$

Εκφράζοντας την εξίσωση της ενέργειας του φωτονίου σε όρους eV και μm , προκύπτει η παρακάτω σχέση, η οποία συσχετίζει την ενέργεια και το μήκος κύματος ενός φωτονίου:

$$E [\text{eV}] = \frac{1.24}{\lambda [\mu\text{m}]} \quad (2.3)$$

2.1.1 ΡΟΗ ΦΩΤΟΝΙΩΝ

Σαν ροή φωτονίων ορίζεται ο αριθμός των φωτονίων που προσπίπτει σε μία επιφάνεια ανά δευτερόλεπτο και ανά μονάδα επιφάνειας.

$$\Phi = \frac{\text{Αριθμός φωτονίων}}{\text{sec} \cdot \text{m}^2} \quad (2.4)$$

Η ροή των φωτονίων είναι σημαντική για τον προσδιορισμό των παραγόμενων ηλεκτρονίων, και κατ'επέκταση του ρεύματος που παράγεται από μια ηλιακή κυψέλη. Για συγκεκριμένο μήκος κύματος, ο συνδυασμός του μήκους κύματος των φωτονίων (ή της ενέργειας) και της ροής των φωτονίων σε αυτό το μήκος κύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος των φωτονίων. Η πυκνότητα ισχύος υπολογίζεται από το γινόμενο της ροής φωτονίων και της ενέργεια ενός φωτονίου. Αφού η ροή φωτονίων δίνει τον αριθμό των φωτονίων που προσπίπτουν σε μία επιφάνεια σε δεδομένο χρόνο, πολλαπλασιάζοντας με την ενέργεια των φωτονίων που περιλαμβάνονται στην ροή αυτή, προκύπτει η ενέργεια που προσπίπτει σε μια επιφάνεια ανά μονάδα χρόνου, που ισοδυναμεί με την πυκνότητα ισχύος. Για να υπολογιστεί η πυκνότητα ισχύος σε W/m^2 , η ενέργεια των φωτονίων θα πρέπει να είναι σε Joule.

$$H \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] = \Phi \cdot \frac{h}{c \cdot \lambda} = \Phi \cdot q \cdot \frac{1.24}{c \cdot \lambda [\mu\text{m}]} = \Phi \cdot \frac{h}{c \cdot \lambda [\mu\text{m}]} \quad (2.5)$$

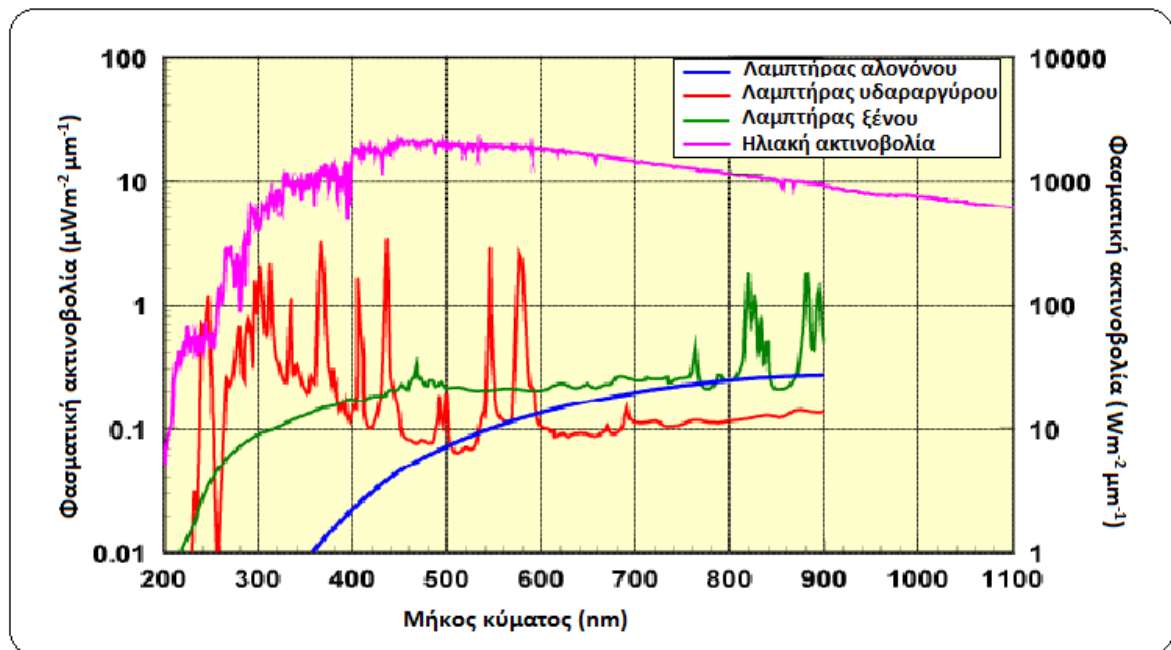
Η πιο συνήθης σχέση για τον χαρακτηρισμό μιας φωτεινής πηγής είναι η φασματική ακτινοβολία συναρτήσει του μήκους κύματος του φωτονίου (ή της ενέργειας), προς την ροή των φωτονίων.

Για την ανάλυση των ηλιακών κυψελών, απαιτείται τόσο η ροή των φωτονίων όσο και η φασματική ακτινοβολία. Η φασματική ακτινοβολία μπορεί να προσδιοριστεί από την ροή των φωτονίων για συγκεκριμένο μήκος κύματος. Το αποτέλεσμα διαιρείται με το μήκος κύματος για να προκύψει η φασματική ακτινοβολία.

$$F(\lambda) = \Phi \cdot E \cdot \frac{1}{\Delta\lambda} \quad (2.6)$$

Όπου

- $F(\lambda)$ είναι η φασματική ακτινοβολία σε $\text{Wm}^{-2}\text{m}^{-1}$.
- Φ είναι η ροή φωτονίων σε αριθμό φωτονίων/ $\text{m}^{-2}\text{sec}^{-1}$.
- E και λ είναι η ενέργεια και το μήκος κύματος των φωτονίων σε J και m αντίστοιχα.
- q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.



Σχήμα 2.2 Η φασματική ακτινοβολία τεχνητών πηγών φωτός (αριστερός άξονας) σε σύγκριση με τη φασματική ακτινοβολία του ήλιου (δεξιός άξονας)^[5].

Η συνολική πυκνότητα ισχύος που εκλύεται από μια πηγή φωτός μπορεί να υπολογισθεί ολοκληρώνοντας την φασματική ακτινοβολία ως προς όλα τα μήκη κύματος ή τις ενέργειες. Έτσι προκύπτει

$$H = \int_0^{\infty} F(\lambda) d\lambda \quad (2.7)$$

Όπου :

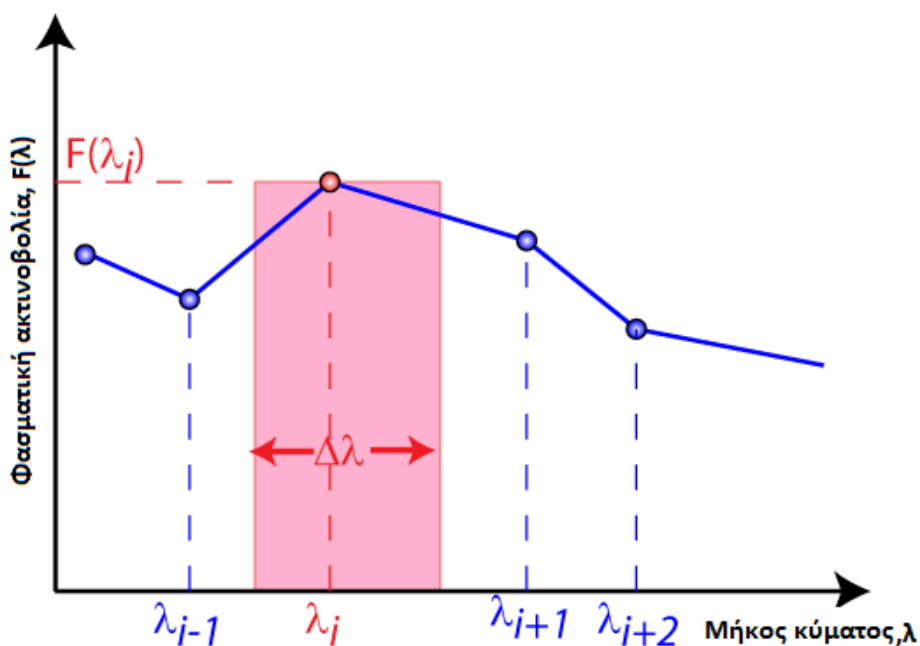
- Η είναι η συνολική πυκνότητα ισχύος που εκπέμπεται από την φωτεινή πηγή σε W/m^2
- $F(\lambda)$ είναι η φασματική ακτινοβολία με μονάδα μέτρησης $Wm^{-2}\mu m^{-1}$
- και $d\lambda$ είναι το μήκος κύματος.

Ωστόσο, δεν υπάρχει κάποια εξίσωση κλειστού τύπου για την εύρεση της φασματικής ακτινοβολίας μιας φωτεινής πηγής. Αντ' αυτού η μετρημένη φασματική ακτινοβολία θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το εύρος μήκους κύματος στο οποίο μετρήθηκε και έπειτα να υπολογισθεί για όλα τα μήκη κύματος.

Η παρακάτω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ολικής πυκνότητας ισχύος που εκπέμπεται από μια φωτεινή πηγή:

$$H = \sum_i F(\lambda)\Delta\lambda \quad (2.8)$$

- Η είναι η συνολική πυκνότητα ισχύος που εκπέμπεται από την φωτεινή πηγή σε W/m^2
- $F(\lambda)$ είναι η φασματική ακτινοβολία σε $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$
- $\Delta\lambda$ είναι το μήκος κύματος



Σχήμα 2.3 Ο υπολογισμός της συνολικής πυκνότητας ισχύος μιας πηγής, απαιτεί ολοκλήρωση σε όλο το φάσμα υπολογίζοντας την επιφάνεια για κάθε στοιχείου και έπειτα αθροίζοντας όλα τα στοιχεία^[5].

2.1.2 ΜΕΛΑΝΑ ΣΩΜΑΤΑ

Πολλές φωτεινές πηγές οι οποίες απαντώνται συχνά στην καθημερινότητά, όπως ο ήλιος ή οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, κατηγοριοποιούνται ως εκπομποί "μέλανος σώματος". Ένα μέλαν σώμα απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά του και εκπέμπει ακτινοβολία βάσει της θερμοκρασίας του. Τα μέλανα σώματα οφείλουν το όνομά τους στο γεγονός ότι, εάν δεν εκπέμπουν ακτινοβολία στο ορατό φάσμα, φαίνονται μαύρα και αυτό οφείλετε στην πλήρη απορρόφηση όλων των μηκών κύματος. Οι πηγές μέλανος σώματος που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τα φωτοβολταϊκά, εκπέμπουν φως στην ορατή περιοχή. Η φασματική ακτινοβολίας για ένα μέλαν σώμα δίνεται από την εξίσωση που εμφανίζεται παρακάτω^[5]:

$$F(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1 \right)} \quad (2.9)$$

όπου:

- λ είναι το μήκος κύματος του φωτός
- T είναι η θερμοκρασία του μέλανος σώματος (K)
- F είναι η φασματική ακτινοβολίας σε $Wm^{-2}\mu m^{-1}$
- και h , c και k είναι οι γνωστές σταθερές.

Για να προκύψει σωστό αποτέλεσμα χρησιμοποιούνται οι μονάδες σε SI, έτσι η c είναι σε m/s, η σταθερά h είναι σε Joule·seconds, η θερμοκρασία T είναι σε Kelvin, το k είναι σε Joule/Kelvin και το λ είναι σε m. Αυτό θα δώσει μονάδες φασματικής ακτινοβολίας σε W/m^3 . Διαιρώντας με 10^6 προκύπτουν οι συμβατικές μονάδες φασματικής ακτινοβολίας σε $Wm^{-2}\mu m^{-1}$. Η παράσταση $F(\lambda)$ δηλώνει ότι η φασματική ακτινοβολία μεταβάλλεται με το μήκος κύματος. Η πυκνότητα της συνολικής ισχύος ενός μέλανος σώματος καθορίζεται από την ολοκλήρωση της φασματικής ακτινοβολίας σε όλα τα μήκη κύματος δίνοντας:

$$H = \sigma T^4 \quad (2.10)$$

Όπου:

- σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann και ισούται με $5.67 \times 10^{-8} J/m^2s K^4$
- και T η θερμοκρασία του μέλανος σώματος σε Kelvin

Μια επιπρόσθετη σημαντική παράμετρος μιας πηγής μέλανος σώματος είναι το μήκος κύματος όπου η φασματική ακτινοβολία είναι η υψηλότερη, ή, με άλλα λόγια το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπεται το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος. Η κορυφή του μήκους κύματος της φασματικής ακτινοβολίας προκύπτει από το διαφορικό της φασματικής ακτινοβολίας και την επίλυση της παραγώγου, όταν αυτή ισούται με μηδέν. Το αποτέλεσμα είναι γνωστό ως νόμος του Wien και εμφανίζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\lambda_p (\mu m) = \frac{2900}{T} \quad (2.11)$$

Όπου:

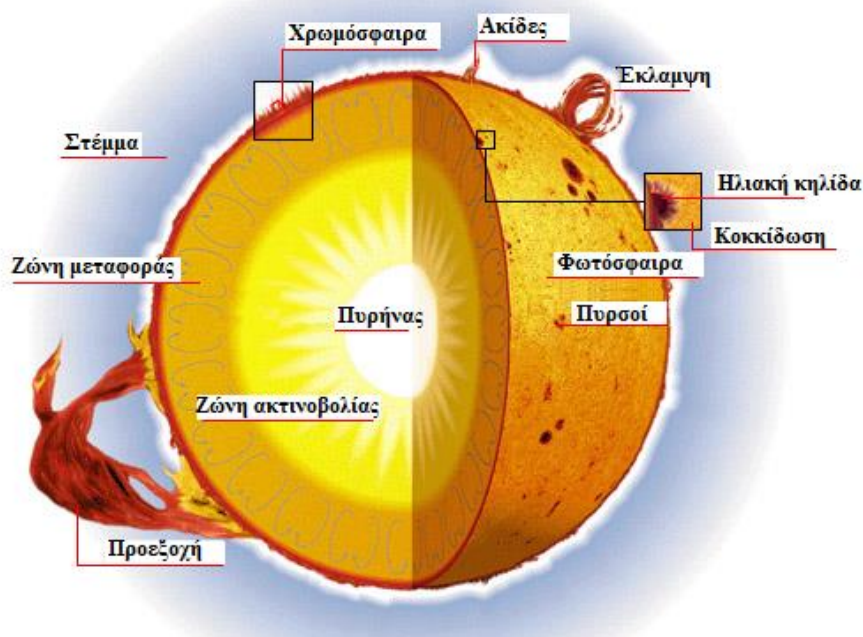
- λ_p είναι το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπεται η μέγιστη φασματική ακτινοβολία
- και T η θερμοκρασία του μέλανος σώματος σε Kelvin

2.2 ΉΛΙΟΣ

Ο ήλιος είναι μια θερμή σφαίρα αερίων με μέση διάμετρο **1.392.000 km**, της οποίας η εσωτερική θερμοκρασία φτάνει πάνω από 20 εκατομμύρια βαθμούς Κέλβιν. Η ακτινοβολία του εσωτερικού πυρήνα δεν είναι ορατή, δεδομένου ότι απορροφάται έντονα από ένα στρώμα ατόμων υδρογόνου, που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του ήλιου. Η θερμότητα μεταφέρεται από αυτό το στρώμα μέσω **συναγωγής**. Η Γη δεν περιστρέφεται περί τον Ήλιο σε κυκλική τροχιά αλλά σε ελλειπτική με τέτοιο τρόπο ώστε την 1η Ιανουαρίου η απόσταση Γης-Ήλιου να λαμβάνει την ελάχιστη τιμή των 147.100.000 km και τη 2α Ιουλίου τη μέγιστη τιμή των 152.100.000 km. Συνεπώς η μέση τιμή απόστασης είναι **149.504.312 km**.

Ο Ήλιος αποτελείται κατά **74%** από υδρογόνο (H), κατά **25%** από ήλιο (He) και **1%** από άλλα στοιχεία. Το υδρογόνο αποτελεί το κύριο καύσιμο για τις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που παράγουν την ενέργεια που ακτινοβολεί, ενώ το ήλιο προέρχεται κυρίως από τα προϊόντα της πυρηνικής σύντηξης του υδρογόνου.

Ο Ήλιος δεν έχει σαφή επιφάνεια όπως έχουν οι γήινοι πλανήτες. Η πυκνότητα των αερίων μειώνεται σε συνάρτηση με την ακτίνα του με ένα νόμο αντιστρόφου τετραγώνου. Η δομή του ήλιου περιλαμβάνει από μέσα προς τα έξω: τον πυρήνα, τη ζώνη ακτινοβολίας, τη ζώνη μεταφοράς, τη φωτόσφαιρα, τη χρωμόσφαιρα και το στέμμα. Η ακτίνα του Ήλιου μετريέται από το κέντρο του άστρου έως τη φωτόσφαιρα, έξω από την οποία δεν λαμβάνει χώρα η πυρηνική σύντηξη. Η θερμοκρασία, στο κέντρο του ήλιου φθάνει τους **20.000.000 K** ενώ στην επιφάνειά του τους **6.000 K**.

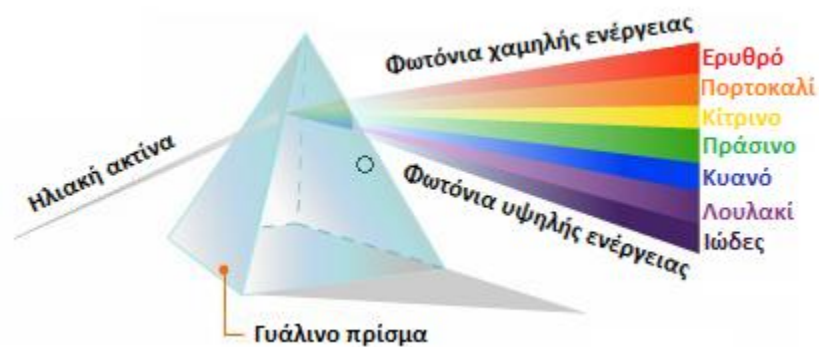


Σχήμα 2.4 Δομή του Ήλιου.

2.2.1 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η συνολική ισχύς που εκλύεται από τον ήλιο υπολογίζεται από το γινόμενο της ισχύος με την επιφάνειά του, και προκύπτει $9.5 \cdot 10^{25} \text{ W}$. Η ισχύς που εκπέμπεται από τον ήλιο αποτελείται από πολλά διαφορετικά μήκη κύματος με αποτέλεσμα να εκλαμβάνεται είτε σαν λευκό είτε σαν κίτρινο από το ανθρώπινο μάτι. Αυτά τα διαφορετικά μήκη κύματος μπορούν να γίνουν αντιληπτά με το πέρασμα του φωτός μέσα από γυάλινο πρίσμα, ή μέσα από σταγονίδια νερού όπως στην περίπτωση του ουράνιου τόξου, βλέπε **σχήμα 2.5**. Τα διαφορετικά μήκη κύματος εμφανίζονται ως διαφορετικά χρώματα, παρόλα αυτά δεν μπορούν να εντοπιστούν όλα τα μήκη κύματος καθώς κάποια είναι "αόρατα" στο ανθρώπινο μάτι. Η διαμόρφωση του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας που εκπέμπει ο Ήλιος προσομοιάζεται με την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος θερμοκρασίας περίπου 5.800 K , όση είναι, κατά μέσο όρο, η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας του ήλιου.

Εκτός από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ο Ήλιος εκπέμπει και μια ασθενή σωματιδιακή ακτινοβολία που αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, κυρίως ηλεκτρόνια και πρωτόνια, και ονομάζεται **ηλιακός άνεμος**. Η μορφή αυτή της ηλιακής ακτινοβολίας ωστόσο δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον από πλευράς ενεργειακής εκμετάλλευσης.



Σχήμα 2.5 Πέρασμα ηλιακής ακτινοβολίας μέσα από γυάλινο πρίσμα

2.2.2 ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Παρακάτω αναφέρονται όλοι οι ορισμοί που συνδέονται με την ηλιακή ακτινοβολία και είναι απαραίτητοι για την εκμετάλλευση της, αλλά και χρήσιμοι για την κατανόηση του υπόλοιπου μέρους της εργασίας το οποίο θα ακολουθήσει^[6].

Ηλιακή σταθερά (G_{sc}). Η μέση τιμή της έντασης της ακτινοβολίας, που προσπίπτει σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ήλιου, ονομάζεται ηλιακή σταθερά και στα όρια της ατμόσφαιρας ισούται με $G_{sc}=1367 \text{ W/m}^2$ (ακτινοβολία ενός ήλιου). Το όζον, που είναι άφθονο στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, απορροφά έντονα την υπεριώδη ακτινοβολία, και κυρίως τα μήκη κύματος $0.2 - 0.35 \mu\text{m}$, το μοριακό οξυγόνο απορροφά κυρίως στην περιοχή του ερυθρού 0.63 και $0.69 \mu\text{m}$, το διοξείδιο του άνθρακα στο υπέρυθρο 2.7 και $4.3 \mu\text{m}$ και οι υδρατμοί στο ερυθρό και το υπέρυθρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ένταση της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της θάλασσας όταν ο ήλιος είναι στο ζενίθ να είναι 1000 W/m^2 , αντί για 1367 W/m^2 που είναι έξω από την ατμόσφαιρα.

Άμεση ακτινοβολία (b). Από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης συνήθως λιγότερο από το 60% είναι άμεση, δηλαδή λαμβάνεται σε μορφή δέσμης ακτίνων χωρίς να έχει υποστεί διάχυση από την ατμόσφαιρα.

Διάχυτη Ακτινοβολία (d). Η υπόλοιπη είναι ακτινοβολία είναι η διάχυτη, δηλαδή έχει προηγουμένως σκεδαστεί και ανακλαστεί στα διάφορα σωματίδια και σταγονίδια που αιωρούνται στον αέρα, ανάλογα βέβαια με τη σύσταση της ατμόσφαιρας και το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας μέσα σε αυτήν.

Ολική Ηλιακή Ακτινοβολία($b+d$). Το άθροισμα άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια. Οι πιο συνηθισμένες μετρήσεις ακτινοβολίας αναφέρονται σε ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο.

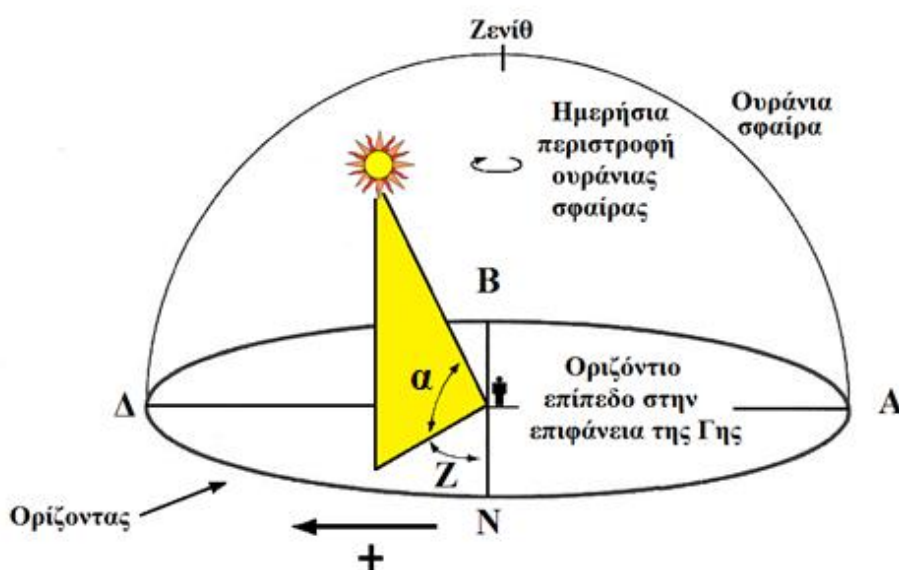
Ένταση Ακτινοβολίας (G). [W/m^2] Η τιμή της ακτινοβολούμενης ενέργειας που προσπίπτει σε μοναδιαία επιφάνεια προς την επιφάνεια αυτή. Το σύμβολο G χρησιμοποιείται για την περιγραφή της έντασης της ακτινοβολίας με αντίστοιχους δείκτες για την ακτινική και τη διάχυτη.

Ακτινοβολία ή Ηλιακή Έκθεση. [J/m^2] Η προσπίπτουσα ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας που προκύπτει από την ολοκλήρωση της έντασης ακτινοβολίας σε καθορισμένο χρονικό διάστημα, συνήθως μιας ώρας ή μέρας. Το σύμβολο I χρησιμοποιείται για την ολοκλήρωση της ακτινοβολίας σε διάστημα μιας ώρας ενώ το σύμβολο H σε διάστημα μιας ημέρας.

Ζενίθ. Η τομή μεταξύ της καθέτου στο επίπεδο αναφοράς της θέσης ενός παρατηρητή και της ουράνιας σφαίρας προσδιορίζει το ζενίθ της συγκεκριμένης θέσης βλ. **σχήμα 2.6**.

Ύψος ήλιου (α). Το ύψος υπεράνω του οριζοντος είναι η γωνία υπό την οποία φαίνεται ο Ήλιος ως προς το οριζόντιο τοπικό επίπεδο ενός παρατηρητή στη συγκεκριμένη θέση στην επιφάνεια της Γης. Το εύρος τιμών για το ύψος του ήλιου είναι ($-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$).

Αζιμούθιο (Z). Το αζιμούθιο είναι η γωνία που δημιουργείται ανάμεσα σε μια ορισμένη κατεύθυνση και την προβολή του ήλιου απάνω στο οριζόντιο επίπεδο αναφοράς. Η κατεύθυνση αναφοράς επιλέγεται να είναι ο Νότος. Οι αζιμούθιες γωνίες που κατευθύνονται προς τη Δύση θεωρούνται ως θετικές ($-180^\circ \leq Z \leq 180^\circ$).



Σχήμα 2.6 Το οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων για παρατηρητή που βρίσκεται επάνω στην επιφάνεια της γης και ατενίζει το Νότο. Η θέση του Ήλιου καθορίζεται από δυο γωνίες, το ύψος α και το αζιμούθιο Z .

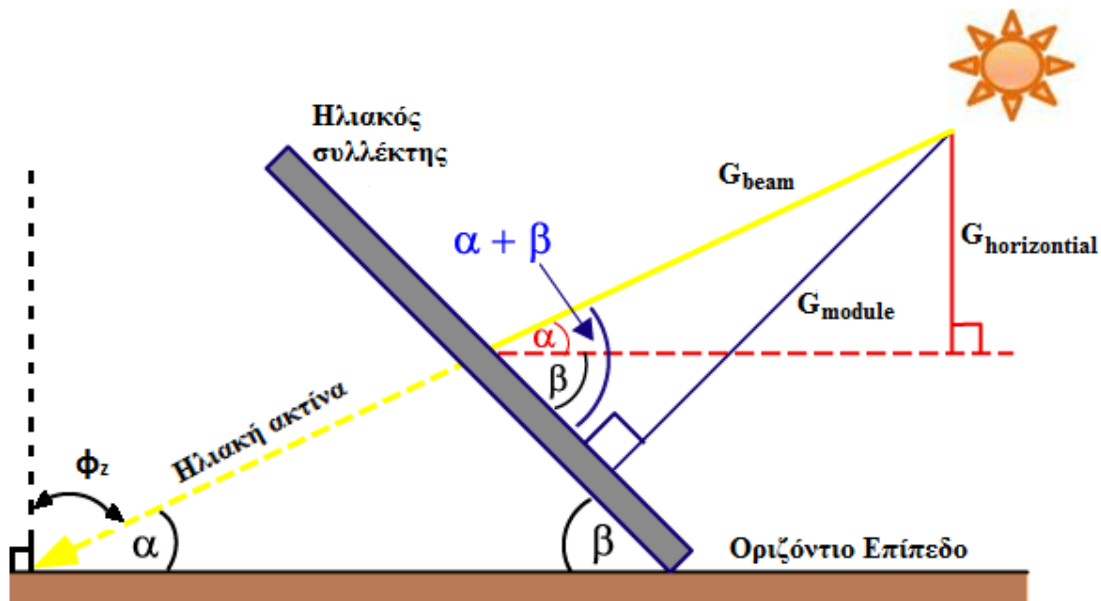
Γεωγραφικό πλάτος (φ). Είναι η γωνιακή θέση της τοποθεσίας βόρεια ή νότια από τον ισημερινό, θετικό στο βόρειο ημισφαίριο και αρνητικό στο νότιο ($-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$).

Ηλιακή απόκλιση (δ). Είναι η γωνιακή θέση του ήλιου το ηλιακό μεσημέρι (δηλ. όταν ο ήλιος είναι στον τοπικό μεσημβρινό) σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού, θετική στο βόρειο ημισφαίριο και αρνητική στο νότιο ($-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$). Για οποιαδήποτε ημέρα του έτους η ηλιακή απόκλιση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = 23.44 \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (2.12)$$

Κλίση (β). Είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου της υπό εξέταση επιφάνειας και του οριζοντα, $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ ($\beta > 90^\circ$ σημαίνει ότι το επίπεδο της επιφάνειας είναι στραμμένο προς τα κάτω).

Ζενίθια γωνία (φ_z). Είναι η γωνία μεταξύ της κατακορύφου και της ευθείας με τον ήλιο, ή η γωνία της προσπίπτουσας δέσμης ως προς το τοπικό ζενίθ, συμπληρωματική της α . Αν $\varphi_z=90^\circ$, η αντίστοιχη ωριαία γωνία λέγεται ωριαία γωνία δύσης και συμβολίζεται ως ω_s .



Σχήμα 2.7 Οι συνιστώσες της άμεσης ηλιακής δέσμης G_{beam} στο έδαφος, για διαφορετικά επίπεδα πρόσπτωσης: μεταφορά από το οριζόντιο επίπεδο του εδάφους στον επικλινή ηλιακό συλλέκτη.

Ωριαία γωνία (ω). Είναι η γωνιακή απόκλιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά από τον τοπικό μεσημβρινό που οφείλεται στην περιστροφή της γης γύρω από τον άξονα της κατά 15° την ώρα, πρωί αρνητική, απόγευμα θετική. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega = 15^\circ / h \cdot (t_s - 12) \quad (2.13)$$

Γωνία πρόσπτωσης (θ). Είναι η γωνία μεταξύ της ακτινικής συνιστώσας της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια και της καθέτου στην επιφάνεια αυτή.

Αέριος μάζα (AM), είναι το πηλίκο του οπτικού πάχους της ατμόσφαιρας δια μέσου του οποίου περνάει η άμεση ακτινοβολία προς το οπτικό πάχος αν ο ήλιος βρισκόταν στο ζενίθ. Συνεπώς $AM=1$ στο επίπεδο της θαλάσσης όταν ο ήλιος είναι στο ζενίθ και $AM=2$ για ζενίθια γωνία $\varphi_z = 60^\circ$. Η αέρια μάζα εξαρτάται από τη ζενίθια γωνία ως εξής:

$$AM = \frac{1}{\cos \varphi_z}, \quad 0 \leq \varphi_z \leq 70^\circ \quad (2.14)$$

2.2.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

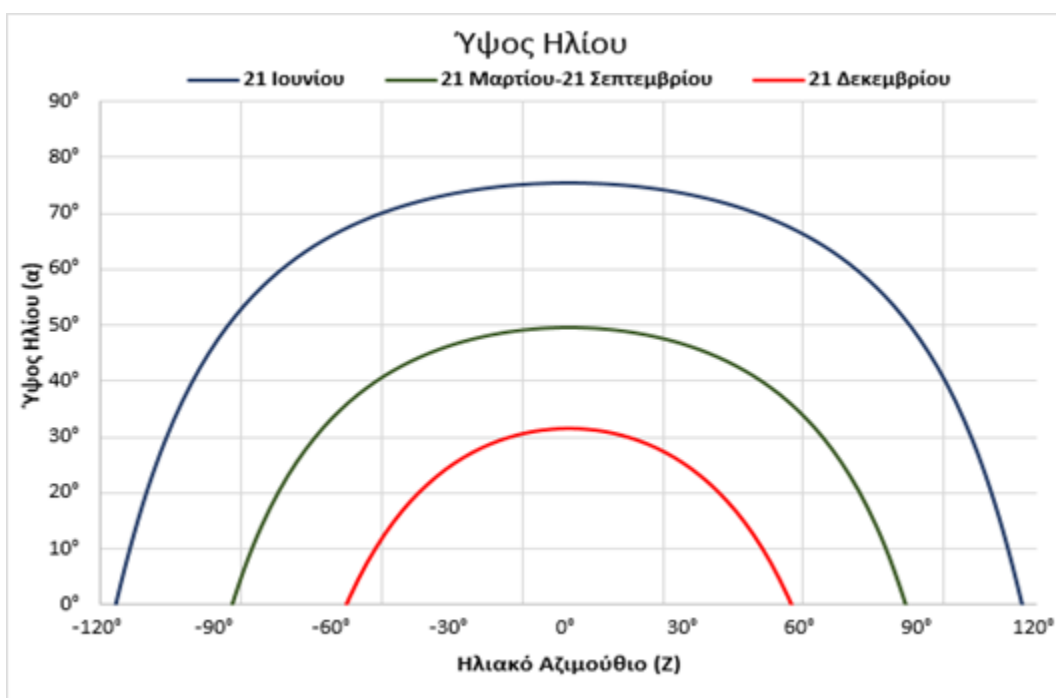
Γνωρίζοντας την ωριαία γωνία ω , είναι δυνατό να υπολογιστεί το ύψος, α , στο οποίο βρίσκεται ο ήλιος, ως εξής ^[7]:

$$\sin \alpha = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega = \cos \varphi_z \quad (2.15)$$

Ενώ στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η αζιμούθια γωνία ως εξής:

$$\cos Z = \frac{\sin \alpha \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \beta \cdot \cos \varphi} \quad (2.16)$$

Βάσει των άνω σχέσεων υπολογισμού της θέσης του ήλιου, προκύπτει για την Αθήνα με γεωγραφικό πλάτος $\varphi=38^\circ$ Β, το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 2.1. Ηλιακό ύψος συναρτήσει του αζιμούθιου στη διάρκεια των ισημεριών (εαρινή 21/3 και φθινοπωρινή 21/9), και των ηλιοστασιών (θερινό 21/6 και χειμερινό 21/12) για την πόλη της Αθήνας, όπως αυτό προέκυψε στο excel.

2.2.4 ΗΛΙΑΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ

Είναι ο χρόνος βασισμένος στη φαινόμενη κίνηση του ήλιου στον ουρανό με το ηλιακό μεσημέρι να είναι η χρονική στιγμή που ο ήλιος περνά από το μεσημβρινό του παρατηρητή.

Ο ηλιακός χρόνος είναι ο χρόνος που χρησιμοποιείται σε όλες τις σχέσεις προσδιορισμού γωνιών του ήλιου και δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο του ωρολογίου. Είναι απαραίτητη η μετατροπή του τοπικού χρόνου σε ηλιακό με τις εξής δύο διορθώσεις. Πρώτον, υπάρχει μια σταθερή διόρθωση για τη διαφορά του γεωγραφικού μήκους μεταξύ του μεσημβρινού του παρατηρητή και του μεσημβρινού στον οποίο βασίζεται ο τοπικός χρόνος. Ο ήλιος κάνει 4 λεπτά για να διασχίσει 1° γεωγραφικού πλάτους. Η δεύτερη διόρθωση προκύπτει από μία εξίσωση χρόνου που λαμβάνει υπόψη τις παρεκκλίσεις της τροχιάς της γης οι οποίες επηρεάζουν τη χρονική στιγμή που ο ήλιος περνά από το μεσημβρινό του παρατηρητή.

Η σχέση μεταξύ ηλιακού και τοπικού χρόνου είναι:

$$t_s = t_c + \frac{L_{loc}}{15} - T_c + E \quad (2.17)$$

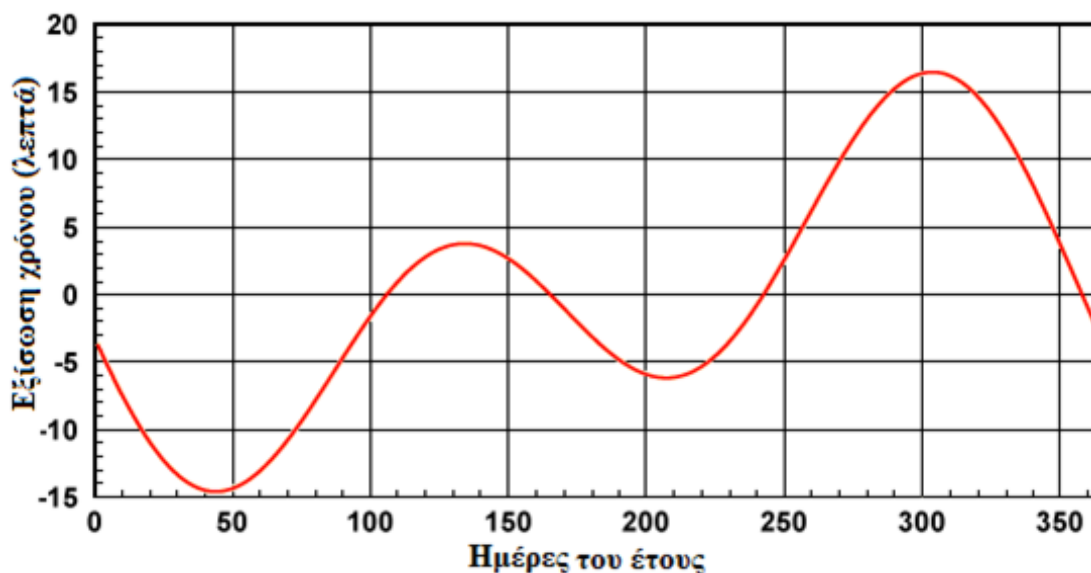
όπου:

- t_s , ο ηλιακός χρόνος (σε ώρες)
- t_c , ο τοπικός χρόνος (σε ώρες, από 1 έως 24)
- L_{loc} , το γεωγραφικό μήκος της θέσης του παρατηρητή (σε μοίρες)
- T_c , η τοπική ωρολογιακή ζώνη ανατολικά του GMT (σε ώρες, για την Ελλάδα +2 ώρες)
- E , η παρακάτω εξίσωση χρόνου (σε ώρες)

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868\cos B - 0.032077\sin B - 0.014615\cos 2B - 0.04089\sin 2B) \quad (2.18)$$

$$\text{όπου} \quad B = (n - 1) \frac{360}{365}$$

και n = ημέρα του έτους, οπότε $1 \leq n \leq 360$.



Διάγραμμα 2.2 Η εξίσωση του E κατά τη διάρκεια του έτους.

2.2.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο είναι απαραίτητη στις περισσότερες εφαρμογές και μελέτες των ηλιακών συστημάτων. Επειδή όμως στους περισσότερους μετεωρολογικούς σταθμούς είναι διαθέσιμη συνήθως η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, θα πρέπει να δοθεί μέθοδος υπολογισμού της ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο σε ωριαία ή μηνιαία βάση. Στα παρακάτω κεφάλαια δίνεται η μεθοδολογία για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο σε ωριαία και μηνιαία βάση.

A) Ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια

Σε κάθε χρονική στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας που

πέφτει σε οριζόντια επιφάνεια δίνεται από τη σχέση:

$$G_0 = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \cos \varphi_z \Rightarrow \quad (2.19)$$
$$G_0 = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] (\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega)$$

Ολοκληρώνοντας τη σχέση από την ανατολή μέχρι τη δύση του ηλίου

προκύπτει η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας σε οριζόντια

επιφάνεια:

$$H_0 = \frac{24 \cdot 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0,33 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] (\omega_s \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega \cdot \sin \omega_s) \quad (2.20)$$

Ολοκληρώνοντας τη σχέση από τις ωριαίες γωνίες ω_1 έως ω_2 ($\omega_2 > \omega_1$)

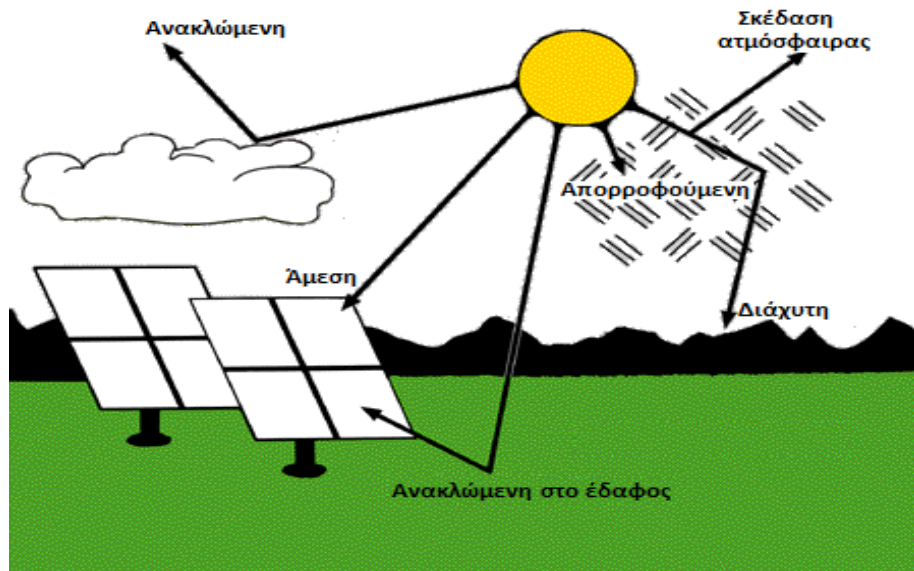
προκύπτει η ωριαία ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας σε οριζόντια επιφάνεια:

$$I_0 = \frac{12 \cdot 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0,33 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] ((\omega_2 - \omega_1) \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1)) \quad (2.21)$$

Η σχέση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαίας ημερήσιας ακτινοβολίας αρκεί τα n και δ να αναφέρονται στη μέση ημέρα του μήνα.

B) Ηλιακή ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια

Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια του εδάφους αποτελείται από τρεις συνιστώσες : την άμεση που προέρχεται από τον ηλιακό δίσκο, τη διάχυτη που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο και την ανακλώμενη που προέρχεται από το έδαφος της γύρω περιοχής, όπως φαίνεται και στο **σχήμα 2.8**. Παρακάτω θα γίνει ανάλυση του υπολογισμού της άμεσης αλλά και ολικής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια.



Σχήμα 2.8 Ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας.

ι. Υπολογισμός της άμεσης ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια

Για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια G_{module} , με χρήση της άμεσης μόνο ακτινοβολίας G_{beam} , όπως φαίνεται και στο **σχήμα 2.7**, εφαρμόζεται η παρακάτω σχέση^[5]:

$$G_{\text{module}} = G_{\text{beam}} \cdot \sin(a + \beta) \quad (2.22)$$

Ενώ για την οριζόντια ακτινοβολία, $G_{\text{horizontal}}$:

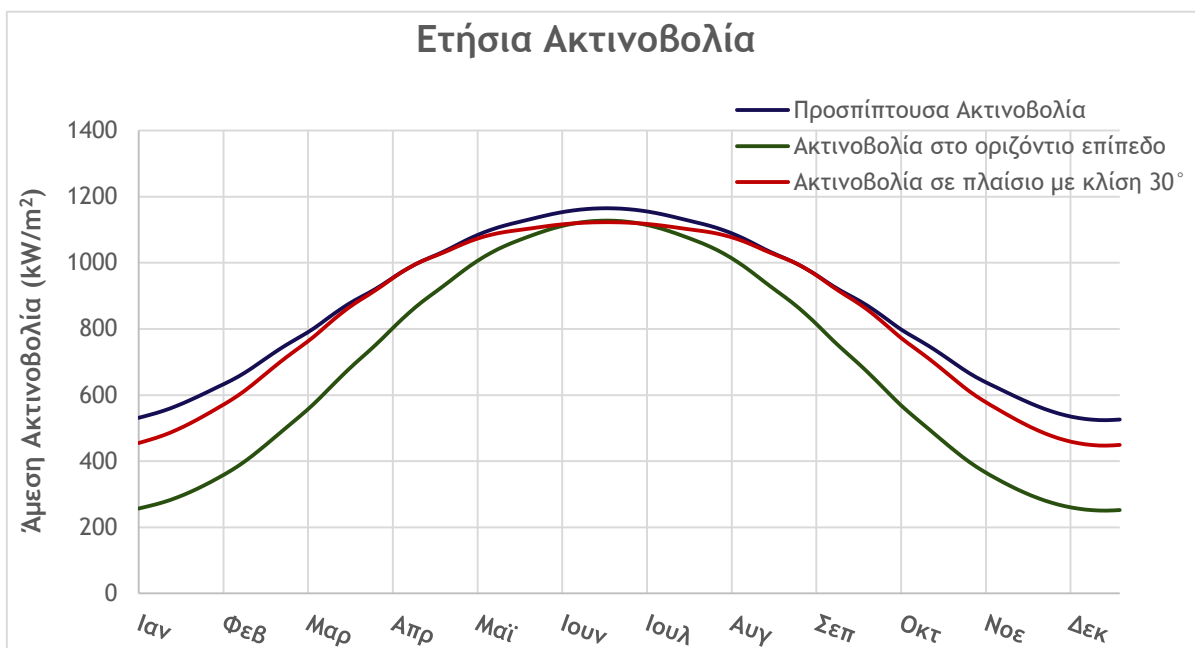
$$G_{\text{horizontal}} = G_{\text{beam}} \cdot \sin a \quad (2.23)$$

Έτσι για κλίση πλαισίου 30° , η ιδανική θέση του ηλίου ώστε η άμεση ακτινοβολία να ισούται με την προσπίπτουσα ακτινοβολία στο πλαίσιο προκύπτει:

$$G_{\text{module}} = G_{\text{beam}} \cdot \sin(a + \beta) \Rightarrow \cancel{G_{\text{module}}} = \cancel{G_{\text{beam}}} \cdot \sin(a + 30^\circ) \Rightarrow \sin(a + 30^\circ) = 1 \Rightarrow a = 60^\circ$$

Επομένως η βέλτιστη θέση του ηλίου για κλίση πλαισίου 30° είναι οι 60° .

Ενώ με χρήση των σχέσεων 2.22 και 2.23 μπορεί να υπολογιστεί η άμεση ακτινοβολία που δέχεται κεκλιμένη επιφάνεια (30°) κατά τη διάρκεια του έτους στην Αθήνα.



Διάγραμμα 2.3 Μεταβολή της άμεσης ακτινοβολίας για την Αθήνα ($\varphi=38^\circ$) κατά τη διάρκεια του έτους, σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο κλίσης 30° , όπως προέκυψε στο excel.

ii. Υπολογισμός της ολικής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια

Η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια είναι απαραίτητη στις περισσότερες εφαρμογές φωτοβολταϊκών και άλλων ηλιακών συστημάτων. Από μετρήσεις όμως τα μόνα δεδομένα που προκύπτουν αφορούν την ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει μέσω κάποιου τύπου να μπορεί να εξαχθεί η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια, από την ηλιακή ακτινοβολία της οριζόντιας επιφάνειας. Έτσι σε μια επιφάνεια με κλίση β , η ωριαία ολική ηλιακή ακτινοβολία δίνεται από τη σχέση 2.24^[8]:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.24)$$

όπου I_b και I_d είναι οι συνιστώσες της άμεσης και διάχυτης ωριαίας ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια, $I_b + I_d$ είναι η ολική ωριαία ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, ρ είναι ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους (με τιμές 0,2 για έδαφος χωρίς χιόνι και 0,7 με χιόνι)

και R_b είναι ο λόγος της άμεσης ακτινοβολίας σε μία υπό κλίση επιφάνεια προς την άμεση ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια που δίνεται από τη σχέση:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (2.25)$$

Με ανάλογο τρόπο η μέση μηνιαία ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια ορίζεται από τη σχέση:

$$\overline{H_T} = \overline{H} \left(1 - \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} \right) \overline{R_b} + \overline{H_d} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \overline{H_\rho} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.26)$$

, όπου H_d η συνιστώσα της διάχυτης μέσης μηνιαίας ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια και R_b είναι ο λόγος της άμεσης μέσης μηνιαίας ημερήσιας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια προς αυτήν σε οριζόντια επιφάνεια που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega'_s + (\pi / 180) \omega'_s \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega'_s + (\pi / 180) \omega'_s \sin \varphi \sin \delta} \quad (2.27)$$

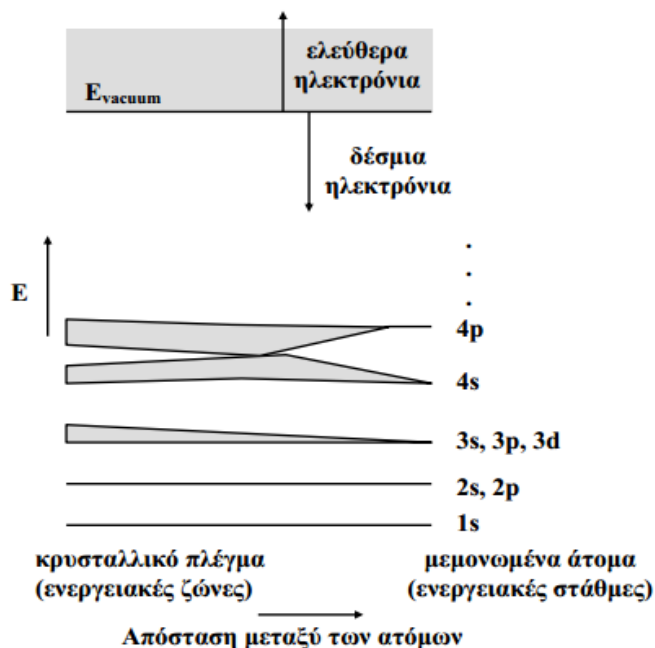
όπου ω'_s είναι η ωριαία γωνία δύσης για την κεκλιμένη επιφάνεια για τη μέση ημέρα του μήνα και υπολογίζεται από την σχέση:

$$\omega'_s = \min \left[\cos^{-1}(\tan \varphi \tan \delta), \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta) \right]. \quad (2.28)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ-ΔΙΟΔΟΣ P-N

3.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΖΩΝΕΣ

Σε ένα μεμονωμένο άτομο, τα ηλεκτρόνια βρίσκονται γύρω από τον πυρήνα και οι ενέργειές τους είναι κβαντισμένες, μπορεί δηλαδή να έχουν μόνο μια συγκεκριμένη διακριτή τιμή E_n ($n=1,2,3,\dots$).



Σχήμα 3.1 Σχηματική παράσταση της μετατροπής των ενεργειακών σταθμών σε ζώνες κατά το σχηματισμό κρυσταλλικού στερεού^[9].

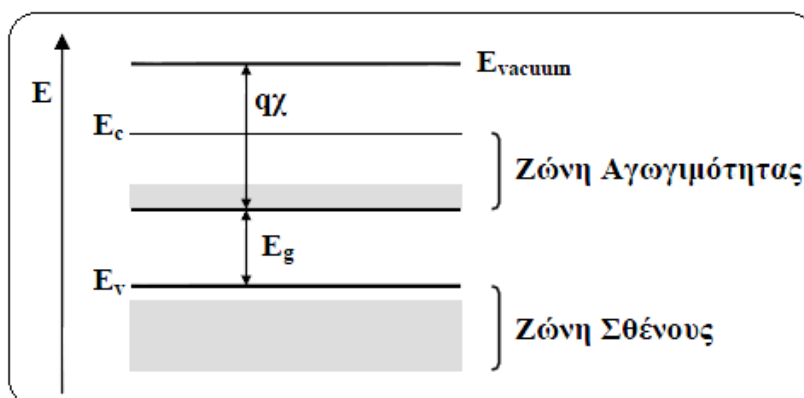
Στο **σχήμα 3.1** φαίνεται το γραμμικό ενεργειακό φάσμα ενός τυπικού μεμονωμένου ατόμου αποτελούμενο από δυο καταστάσεις: την θεμελιώδη κατάσταση, όπου τα ηλεκτρόνια συγκρατούνται από τον πυρήνα με δυνάμεις Coulomb και την ελεύθερη κατάσταση όπου τα ηλεκτρόνια είναι ελεύθερα. Οι δυο αυτές περιοχές διαχωρίζονται από μια κατάσταση μηδενικής ενέργειας E_{vacuum} . Στη θεμελιώδη κατάσταση η ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι αρνητική σε σχέση με τη στάθμη κενού. Οι επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες είναι διακριτές, χωρίζονται μεταξύ τους από απαγορευμένες περιοχές και περιλαμβάνουν ορισμένο αριθμό ηλεκτρονιακών καταστάσεων. Έστω τώρα η περίπτωση κατά την οποία N άτομα συνδέονται μεταξύ τους για το σχηματισμό ενός κρυσταλλικού στερεού. Καθώς οι αποστάσεις μεταξύ τους μικραίνουν, οι τροχιές των ηλεκτρονίων σθένους υπερκαλύπτονται και τα ηλεκτρόνια αντικρίζουν τους πυρήνες των γειτονικών ατόμων.

Όμως η απαγορευτική αρχή του Pauli η οποία ορίζει ότι <<δύο ηλεκτρόνια ενός ατόμου δεν μπορεί να συνυπάρχουν στην ίδια κατάσταση>>, υπαγορεύει το διαχωρισμό του ενεργειακού διαγράμματος σε N το πλήθος πολύ κοντά διατεταγμένες στάθμες.

Καθώς η απόσταση μεταξύ των ατόμων ελαττώνεται, άλλες εσωτερικές τροχιές αρχίζουν να υπερκαλύπτονται και οι ενεργειακές τους στάθμες χωρίζονται επίσης σε N πολύ κοντά ταξινομημένες στάθμες. Κάθε ομάδα χωριστών ενεργειακών σταθμών ονομάζεται **ενεργειακή ζώνη**. Οι ζώνες διαχωρίζονται μεταξύ τους από **ενεργειακά διάκενα**, δηλαδή απαγορευμένες τιμές ενέργειας στις οποίες δεν μπορούν να υπάρξουν ελεύθεροι φορείς (Σχήμα 3.2).

Σε συνθήκες $T=0$ K, η ζώνη που είναι πλήρης καλείται **ζώνη σθένους** και τα ηλεκτρόνια δεν συμμετέχουν στην αγωγιμότητα του στερεού, αφού δεν υπάρχουν διαθέσιμες ενεργειακές καταστάσεις, που μπορούν να τις καταλάβουν υπό την επίδραση εξωτερικού πεδίου. Η αμέσως επόμενη ζώνη που είναι κενή ή μερικώς πληρωμένη, είναι γνωστή ως **ζώνη αγωγιμότητας**.

Ένα απλοποιημένο ενεργειακό διάγραμμα ημιαγωγού φαίνεται στο **σχήμα 3.2**, όπου διακρίνεται η σχεδόν κενή ζώνη αγωγιμότητας. Η οριζόντια γραμμή **E_c** σημειώνει τον πυθμένα της ζώνης. Ομοίως, η κορυφή της ζώνης σθένους σημειώνεται από τη γραμμή **E_v** .



Σχήμα 3.2 Απλοποιημένο ενεργειακό διάγραμμα ημιαγωγού, όπου φαίνεται το ενεργειακό διάκενο E_g και η ενέργεια ελεύθερων ηλεκτρονίων E_{vacuum} εκτός κρυστάλλου^[9].

Το ενεργειακό διάκενο βρίσκεται μεταξύ των δυο αυτών γραμμών, που χωρίζονται από ενέργεια E_g . Είναι δηλαδή, $E_g = E_c - E_v$.

3.1.1 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΔΙΑΚΕΝΟΥ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Το ενεργειακό διάκενο στους ημιαγωγούς εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Όταν αυτή αυξάνεται το διάκενο μικραίνει. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα δεδομένου ότι, λόγω της θερμικής ενέργειας, αυξάνει το πλάτος των ατομικών ταλαντώσεων και ως εκ τούτου, αυξάνει η απόσταση μεταξύ των ατόμων. Μια αύξηση των διατομικών αποστάσεων, ελαττώνει το δυναμικό που βλέπουν τα ηλεκτρόνια του κρυσταλλικού στερεού και αυτό με τη σειρά του μικραίνει το ενεργειακό διάκενο. Επίσης, μια απ'ευθείας διαμόρφωση των διατομικών αποστάσεων, όπως για παράδειγμα η τοποθέτηση του κρυστάλλου σε σύστημα εφελκυσμού, επιφέρει ανάλογα αποτελέσματα. Η εξάρτηση του ενεργειακού διακένου από τη θερμοκρασία, δίνεται από την πειραματική σχέση^[10]:

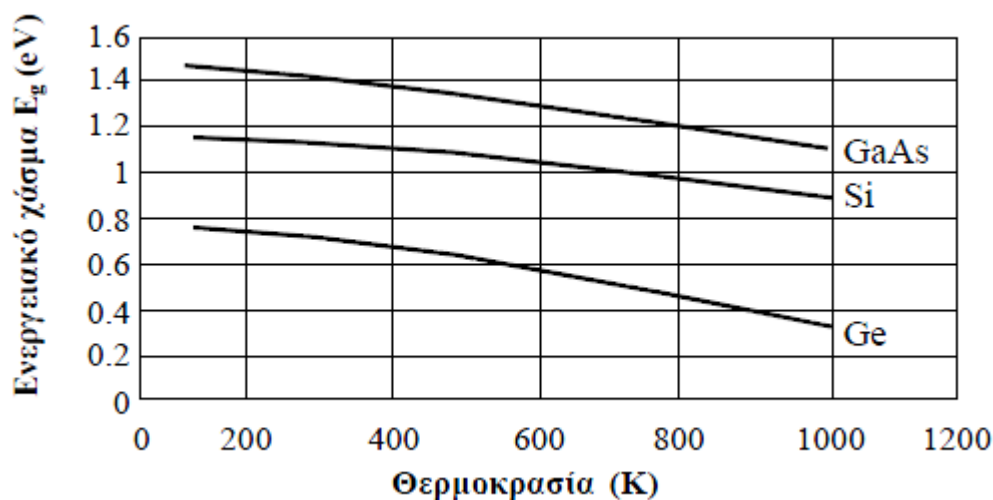
$$E_g(T) = E_g(0) - (a T^2)/(T + b) \quad (3.1)$$

Όπου $E_g(0)$, a , b παράμετροι. Οι παράμετροι αυτοί παρατίθενται στον **πίνακα 3.1** για το γερμάνιο (Ge), το πυρίτιο (Si) και το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs)

| | Ge | Si | GaAs |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $E_g(0)$ [eV] | 0.7437 | 1.166 | 1.519 |
| a [eV/K] | 4.77×10^{-4} | 4.73×10^{-4} | 5.41×10^{-4} |
| b [K] | 235 | 636 | 204 |

Πίνακας 3.1 Οι παράμετροι a , b , $E_g(0)$ για τα στοιχεία Ge, Si και GaAs.

Στο **σχήμα 3.3** φαίνεται γραφικά η σχέση θερμοκρασίας – ενεργειακού διακένου.



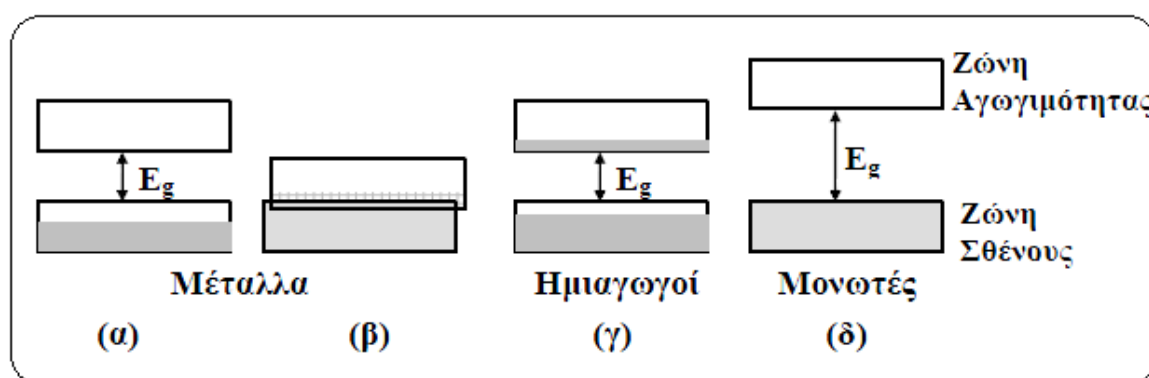
Σχήμα 3.3 Εξάρτηση ενεργειακού διακένου Ge, Si και GaAs από τη θερμοκρασία^[9].

3.2 ΜΕΤΑΛΛΑ ΜΟΝΩΤΕΣ ΚΑΙ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

Ακόμα και αν είναι γνωστή η ενεργειακή δομή ενός υλικού, χρειάζεται να είναι γνωστό και το ποιες ενεργειακές στάθμες είναι κατειλημμένες και ποιες συγκεκριμένες ενεργειακές ζώνες είναι κενές, μερικώς πληρωμένες ή τελείως πληρωμένες. Οι κενές ζώνες δεν περιέχουν ηλεκτρόνια και δεν συμμετέχουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. Μερικώς πληρωμένες ζώνες περιέχουν ηλεκτρόνια και έχουν διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες σε λίγο υψηλότερες ενέργειες. Οι ελεύθερες αυτές ενεργειακές στάθμες, επιτρέπουν στους φορείς να αποκτήσουν ενέργεια, όταν μετακινούνται υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Σ' αυτή την περίπτωση, τα ηλεκτρόνια συμμετέχουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. Οι τελείως πληρωμένες ζώνες περιέχουν μεγάλο αριθμό ηλεκτρονίων, αλλά δεν συμμετέχουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω του ότι δεν αποκτούν ενέργεια, αφού δεν υπάρχουν διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες.

Για να βρεθούν οι πλήρεις ή κενές ζώνες θα πρέπει να είναι γνωστό το πόσα ηλεκτρόνια τοποθετούνται σε κάθε ζώνη και πόσα είναι διαθέσιμα. Κάθε ζώνη δημιουργείται από το διαχωρισμό μιας ή περισσότερων ατομικών ενεργειακών σταθμών. Επομένως, ο ελάχιστος αριθμός σταθμών σε μια ζώνη ισούται με το διπλάσιο του αριθμού των ατόμων στο υλικό. Ο λόγος, που αναφέρεται το διπλάσιο είναι ότι σε κάθε ενεργειακή στάθμη αντιστοιχούν δυο ηλεκτρόνια με αντίθετο spin. Για να απλοποιηθεί περισσότερο η ανάλυση, θεωρείται ότι μόνο τα ηλεκτρόνια σθένους παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Τα ηλεκτρόνια, που βρίσκονται κοντά στον πυρήνα, λόγω της ισχυρής έλξης, δεν μπορούν να κινηθούν ελεύθερα στο υλικό.

Τέσσερις διαφορετικές πιθανές περιπτώσεις παρουσιάζονται στο **σχήμα 3.4**.



Σχήμα 3.4 Πιθανά ενεργειακά διαγράμματα ενός κρυστάλλου. (α) Μερικώς συμπληρωμένη ζώνη. (β) Δυο ζώνες επικαλυπτόμενες. (γ) Μια σχεδόν συμπληρωμένη ζώνη διαχωριζόμενη από μια σχεδόν κενή ζώνη με μικρό ενεργειακό διάκενο. (δ) Μια πλήρης και μια κενή ζώνες, διαχωριζόμενες από μεγάλο ενεργειακό διάκενο^[9].

Η **περίπτωση (α)** παρουσιάζεται σε υλικά, που έχουν άτομα με ένα ηλεκτρόνιο σθένους ανά άτομο. Αυτά τα υλικά παρουσιάζουν υψηλή αγωγιμότητα, όπως για παράδειγμα ο χαλκός, ο χρυσός και το ασήμι. Υλικά, των οποίων τα άτομα έχουν δυο ηλεκτρόνια σθένους, παρουσιάζουν και αυτά υψηλή αγωγιμότητα όταν η πλήρης ζώνη επικαλύπτεται με την κενή ζώνη (**περίπτωση β**). Στην **περίπτωση (δ)**, η αγωγιμότητα του υλικού είναι μηδενική λόγω του μεγάλου ενεργειακού διακένου και το υλικό συμπεριφέρεται ως μονωτής. Στην **περίπτωση (γ)**, η πλήρης ζώνη διαχωρίζεται από την κενή ζώνη με μικρό ενεργειακό χάσμα ($\approx 1\text{eV}$), που επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να μετακινηθούν προς την αμέσως υψηλότερη ζώνη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια σχεδόν πλήρη ζώνη (ζώνη σθένους) κάτω από μια σχεδόν κενή ζώνη (ζώνη αγωγιμότητας) και το υλικό συμπεριφέρεται ως ημιαγωγός.

Παρακάτω παρουσιάζεται τμήμα του περιοδικός πίνακας με έμφαση στα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται περισσότερο για το σχηματισμό ημιαγωγών.

| | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|--------------------------|
| | | | | | | | VIIIA |
| | | | | | | | ² He 4.003 |
| | | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | B | C | N | O | F | Ne |
| | | 10.811 | 12.011 | 14.007 | 15.999 | 18.998 | 20.183 |
| | | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| | | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| | | 26.982 | 28.086 | 30.974 | 32.064 | 35.453 | 39.948 |
| IB | IIB | | | | | | |
| 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| 63.54 | 65.37 | 69.72 | 72.59 | 74.922 | 78.96 | 79.909 | 83.80 |
| 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 |
| Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| 107.870 | 112.40 | 114.82 | 118.69 | 121.75 | 127.60 | 126.904 | 131.30 |
| 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 |
| Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| 196.967 | 200.59 | 204.37 | 207.19 | 208.980 | (210) | (210) | (222) |

Σχήμα 3.5 Τμήμα του περιοδικού πίνακα. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται περισσότερο για το σχηματισμό ημιαγωγών εμφανίζονται με μπλε χρώμα. Ένας ημιαγωγός μπορεί να είναι είτε ένα μεμονωμένο στοιχείο, όπως το Si ή το Ge, μια ένωση, όπως το GaAs, InP ή CdTe, ή ένα κράμα, όπως $\text{Si}_x\text{Ge}_{(1-x)}$ ή $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$, όπου x είναι ο αριθμός του συγκεκριμένου στοιχείου και κυμαίνεται από 0 έως 1^[5].

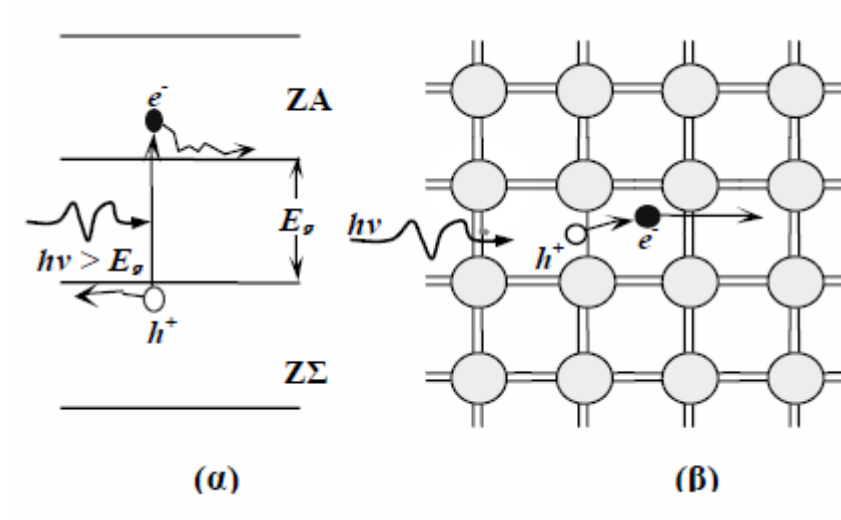
3.2.1 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΚΑΙ ΟΠΕΣ

Η μετακίνηση των ηλεκτρονίων σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, συνήθως γίνεται με θερμική ή οπτική διέγερση με ελάχιστο ποσό ενέργειας ίσο με το ενεργειακό διάκενο του κρυστάλλου E_g . Ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας είναι ελεύθερο να κινηθεί στον κρύσταλλο και επίσης να ανταποκριθεί σε ηλεκτρικά πεδία, λόγω των κενών γειτονικών ενεργειακών ζωνών.

Όταν ένα φωτόνιο προσπέσει στην επιφάνεια του ημιαγωγού υπάρχουν τρεις δυνατές εκδοχές ανάλογα με την ενέργεια που φέρει το φωτόνιο

- $h\nu < E_g$ Τα φωτόνια με ενέργεια μικρότερη της ενέργειας διακένου E_g επιδρούν σθεναρά με τον ημιαγωγό, διαπερνώντας τον σαν να ήταν διαφανής.
- $h\nu = E_g$ Τα φωτόνια με ενέργεια ίση με την ενέργεια διακένου E_g έχουν ακριβώς την απαιτούμενη ενέργεια για να δημιουργήσουν ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής και απορροφούνται πλήρως.
- $h\nu > E_g$ Τα φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη της ενέργειας διακένου E_g απορροφούνται ισχυρά.

Θεωρώντας την περίπτωση, όπου ένα φωτόνιο με ενέργεια $h\nu > E_g$ αλληλοεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη σθένους του ημιαγωγού και απορροφάται από αυτό (σχήμα 3.6). Το ηλεκτρόνιο τότε θα αποκτήσει ενέργεια ικανή για να ξεπεράσει το ενεργειακό διάκενο E_g , να φθάσει στη ζώνη αγωγιμότητας και να καταστεί ελεύθερο. Κατά την μετακίνηση του ηλεκτρονίου προς τη ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργείται μια ελεύθερη θέση στη ζώνη σθένους, που καλείται **οπή**. Η περιοχή γύρω από την οπή είναι θετικά φορτισμένη λόγω της αφαίρεσης ενός αρνητικού φορτίου από μια ουδέτερη, κατά τα άλλα περιοχή. Η οπή, που συμβολίζεται ως h^+ , επίσης μετακινείται ελεύθερα στον κρύσταλλο λόγω του ότι ένα ηλεκτρόνιο γειτονικού δεσμού, μπορεί να καλύψει τη θέση της, δημιουργώντας έτσι μια καινούργια ελεύθερη θέση. Αυτό ισοδυναμεί με κίνηση της οπής προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του ηλεκτρονίου. Έτσι και τα ηλεκτρόνια και οι οπές με φορτία $-e$ και $+e$ αντίστοιχα, συμμετέχουν στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Αν και στο συγκεκριμένο παράδειγμα, φωτόνιο ενέργειας $h\nu > E_g$ δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής, υπάρχουν και άλλες πηγές ενέργειας, που επίσης δημιουργούν τέτοια ζεύγη.

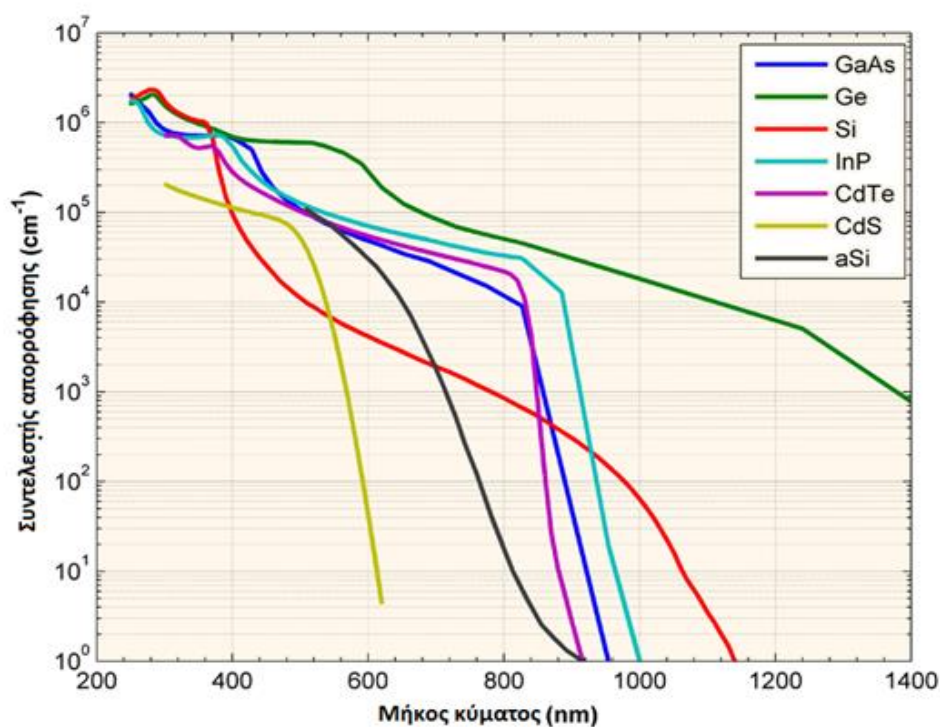


Σχήμα 3.6 (α) Ένα φωτόνιο με ενέργεια $h\nu > E_g$ διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο από τη ΖΣ στη ΖΑ. **(β)** Κάθε γραμμή σ' ένα δεσμό μεταξύ ατόμων Si-Si, είναι ένα ηλεκτρόνιο σθένους. Όταν ένα φωτόνιο σπάσει το δεσμό, δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου – οπής^[9].

Σε μερικούς ημιαγωγούς, όπως GaAs και InP, το πλεονάζον ποσό ενέργειας του ηλεκτρονίου, που πέφτει από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους, εκπέμπεται ως φωτόνιο. Στους ημιαγωγούς Si και Ge διαφεύγει υπό τη μορφή θερμότητας.

3.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Ο συντελεστής απορρόφησης καθορίζει το πόσο βαθιά σε ένα υλικό μπορεί να διεισδύσει ένα φωτόνιο με καθορισμένο μήκος κύματος για να απορροφηθεί. Σε ένα υλικό με χαμηλό συντελεστή απορρόφησης, το φως απορροφάται σθεναρά, και αν το υλικό είναι αρκετά λεπτό, θα εκληφθεί ως διαφανές στο συγκεκριμένο μήκος κύματος. Ο συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται από το υλικό αλλά και από το μήκος κύματος του φωτός το οποίο απορροφάται. Τα ημιαγωγά υλικά έχουν μια αιχμή στον συντελεστή απορρόφησης τους, καθώς το φως το οποίο έχει ενέργεια κατώτερη της ενέργειας διακένου δεν μπορεί να διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Κατά συνέπεια το φως αυτό δεν απορροφάται. Παρακάτω φαίνεται ο συντελεστής απορρόφησης για διάφορα ημιαγωγά υλικά.



Διάγραμμα 3.1 Ο συντελεστής απορρόφησης α , για διάφορα ημιαγωγά υλικά στους 300K συναρτήσει του μήκους κύματος του φωτός στο κενό^[5].

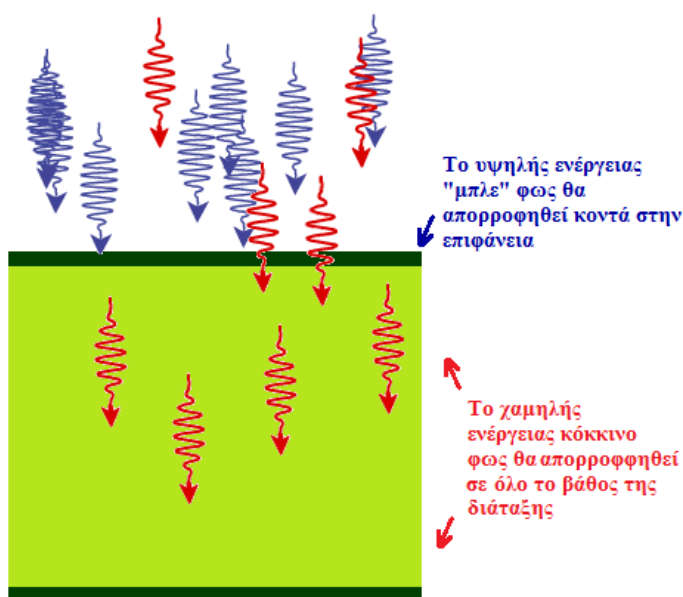
Το **διάγραμμα 3.1** δείχνει ότι ακόμη και για εκείνα τα φωτόνια τα οποία έχουν ενέργεια μεγαλύτερη του διακένου, ο συντελεστής απορρόφησης δεν είναι σταθερός, αλλά εξακολουθεί να εξαρτάται έντονα από το μήκος κύματος. Η πιθανότητα να απορροφηθεί ένα φωτόνιο εξαρτάται από την πιθανότητα της αλληλεπίδρασης ενός φωτονίου και ενός ηλεκτρονίου έτσι ώστε το ηλεκτρόνιο να μεταπηδήσει από μια ενεργειακή στάθμη σε μία άλλη. Για τα φωτόνια που έχουν ενέργεια πολύ κοντά στην ενέργεια διακένου, η απορρόφηση είναι σχετικά χαμηλή, καθώς μόνο τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην άκρη της ζώνης σθένους μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με το φωτόνιο και να το απορροφήσουν. Καθώς αυξάνει η ενέργεια των φωτονίων, αυξάνει και ο αριθμός των διαθέσιμων ηλεκτρονίων, διότι πλέον δεν περιορίζονται μόνο σε αυτά που βρίσκονται στη ζώνη σθένους, έτσι μεγαλύτερος αριθμός των ηλεκτρονίων μπορεί πλέον να αλληλεπιδράσει με το φωτόνιο και να το απορροφήσει. Ο συντελεστής απορρόφησης, α , σχετίζεται με το συντελεστή απόσβεσης, k , με την σχέση:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (3.2)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος.

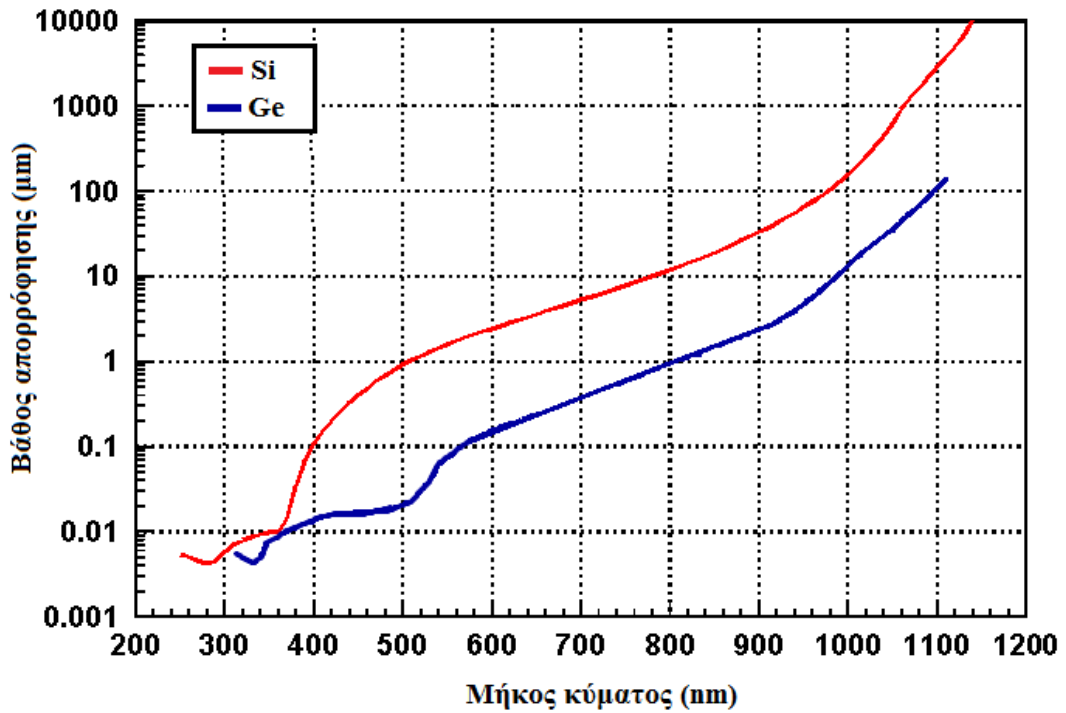
3.4 ΒΑΘΟΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Η σχέση μεταξύ του συντελεστή απορρόφησης και του μήκους κύματος έχει σαν αποτέλεσμα διαφορετικά μήκη κύματος να διανύουν διαφορετικές αποστάσεις μέσα σε έναν ημιαγωγό πριν απορροφηθεί το μεγαλύτερο μέρος του προσπίπτοντος φωτός. Το βάθος απορρόφησης δίνεται από την αντιστροφή του συντελεστή απορρόφησης, ή α^{-1} . Το βάθος απορρόφησης είναι μια σημαντική παράμετρος, η οποία δίνει την απόσταση μέσα στο υλικό στην οποία το φως μειώνεται έως το **36%** της αρχικής του έντασης, ή διαφορετικά μειώνεται κατά **1/e**. Αφού το υψηλής ενέργειας φως (μικρού μήκους κύματος), όπως το μπλε φως, έχει μεγάλο συντελεστή απορρόφησης, απορροφάται σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια (για ηλιακές κυψέλες πυριτίου μέσα σε μερικά μικρόμετρα), ενώ το κόκκινο φως (χαμηλότερης ενέργειας, μεγαλύτερου μήκους κύματος) απορροφάται ασθενέστερα. Ακόμα και μετά από μερικές εκατοντάδες μικρά, δεν θα απορροφηθεί όλο το κόκκινο φως στο πυρίτιο. Η διαφορά στο βάθος απορρόφησης για "μπλε" και "κόκκινα" φωτόνια παρουσιάζεται στο **σχήμα 3.7**.

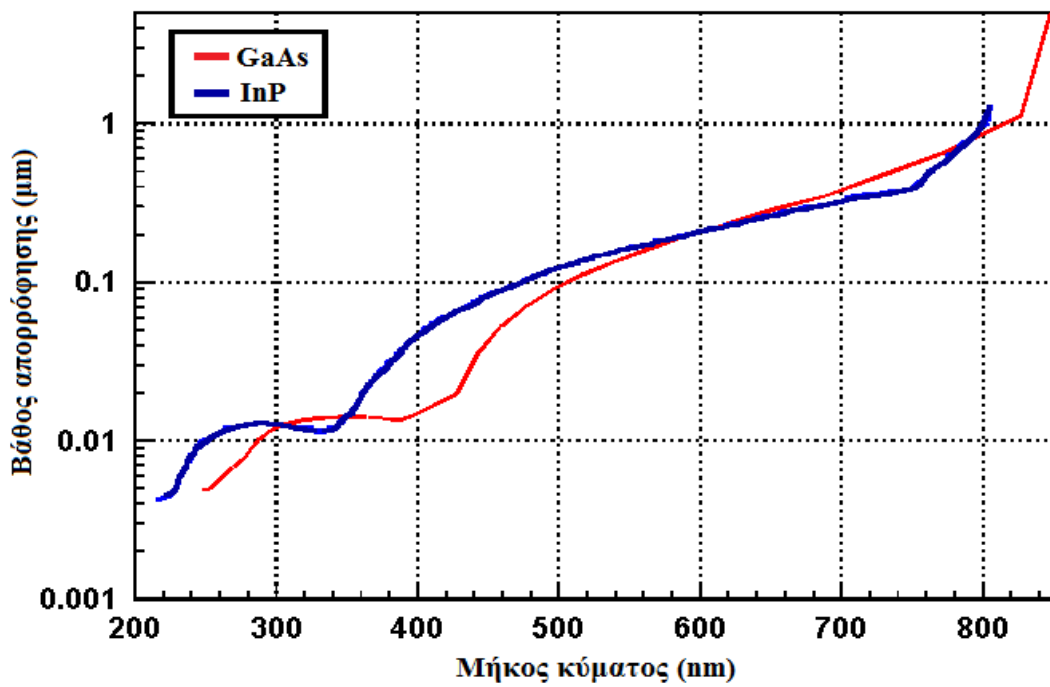


Σχήμα 3.7 Ηλιακή κυψέλη. Τα μπλε φωτόνια απορροφούνται πολύ κοντά στην επιφάνεια ενώ τα κόκκινα φωτόνια απορροφούνται βαθιά μέσα στην διάταξη^[5].

Παρακάτω φαίνονται τα βάθη απορρόφησης για τους ημιαγωγούς Si, Ge, InP και GaAs.



Διάγραμμα 3.2 Βάθος απορρόφησης για Si και Ge^[5].



Διάγραμμα 3.3 Βάθος απορρόφησης για GaAs και InP^[5].

3.5 ΡΥΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΦΟΡΕΩΝ

Ο ρυθμός παραγωγής δίνει τον αριθμό των ηλεκτρονίων που παράγονται σε κάθε σημείο της διάταξης, εξ' αιτίας της απορρόφησης φωτονίων. Η παραγωγή είναι μία σημαντική παράμετρος για την λειτουργία των ηλιακών κυψελών.

Θεωρώντας την ανάκλαση αμελητέα, το ποσό του φωτός που απορροφάται από ένα υλικό εξαρτάται από το συντελεστή απορρόφησης ($\alpha \text{ cm}^{-1}$) και το πάχος του υλικού απορρόφησης. Η ένταση του φωτός σε οποιοδήποτε σημείο της διάταξης μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την εξίσωση:

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3.3)$$

Όπου:

- α είναι ο συντελεστής απορρόφησης σε cm^{-1} .
- x είναι η απόσταση μέσα στο υλικό στην οποία υπολογίζεται η ένταση του φωτός.
- I_0 είναι η ένταση του φωτός στην ανώτατη επιφάνεια.

Η ανωτέρω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του αριθμού των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών που παράγονται σε μια ηλιακή κυψέλη. Υποθέτοντας ότι η απώλεια στην ένταση του φωτός (δηλαδή, η απορρόφηση των φωτονίων), προκαλεί άμεσα την παραγωγή ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής, τότε η παραγωγή G σε μια λεπτή φέτα υλικού προσδιορίζεται με την εύρεση της αλλαγής στην ένταση του φωτός σε αυτό το κομμάτι. Κατά συνέπεια, διαφορίζοντας την παραπάνω εξίσωση θα προκύψει η παραγωγή, σε οποιοδήποτε σημείο της διάταξης.

$$G = \alpha N_0 e^{-\alpha x} \quad (3.4)$$

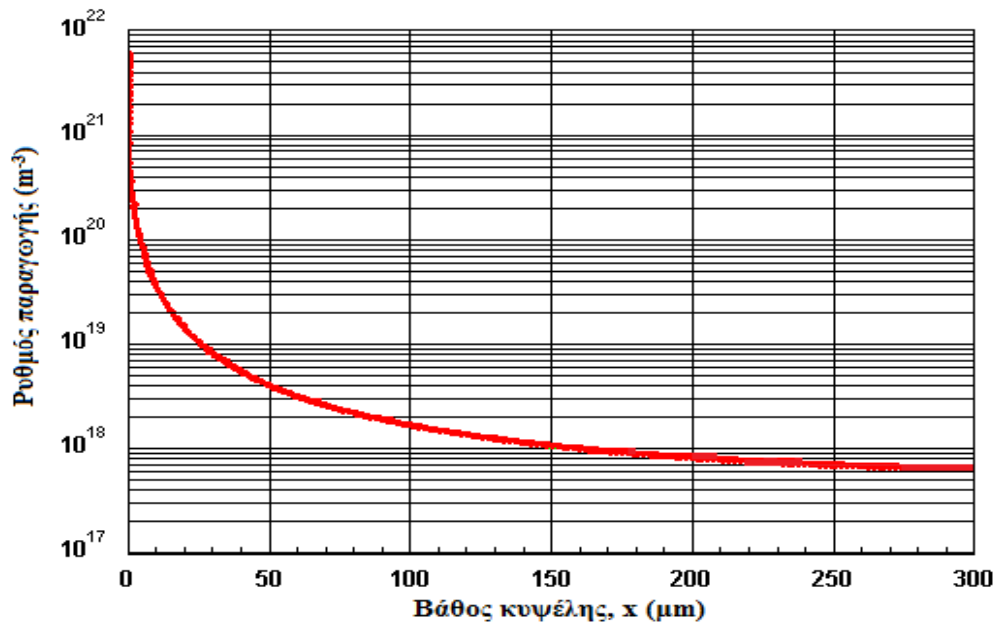
Όπου:

- N_0 είναι η ροή φωτονίων στην επιφάνεια (φωτόνια/επιφάνεια/sec).
- α είναι ο συντελεστής απορρόφησης σε cm^{-1} .
- x είναι η απόσταση μέσα στο υλικό.

Οι παραπάνω εξισώσεις δείχνουν ότι η ένταση του φωτός μειώνεται εκθετικά σε όλο το υλικό, ενώ η παραγωγή είναι υψηλότερη στην επιφάνεια του υλικού.

Για φωτοβολταϊκές εφαρμογές, το προσπίπτον φως αποτελείται από ένα συνδυασμό πολλών διαφορετικών μηκών κύματος, επομένως ο ρυθμός παραγωγής σε κάθε μήκος κύματος είναι διαφορετικός.

Για να υπολογιστεί η παραγωγή ενός συνόλου από διαφορετικά μήκη κύματος, η ολική παραγωγή προκύπτει ως το άθροισμα της παραγωγής κάθε μήκους κύματος χωριστά. Η παραγωγή ως συνάρτηση της απόστασης για ένα πρότυπο ηλιακό φάσμα (AM 1.5) προσπίπτων σε ένα κομμάτι πυριτίου παρουσιάζεται παρακάτω. Ο άξονας y είναι σε λογαριθμική κλίμακα για να φανεί ότι υπάρχει πολύ μεγαλύτερη παραγωγή ζευγών ηλεκτρονίων-οπών κοντά στην μπροστινή επιφάνεια της κυψέλης, ενώ βαθύτερα στην ηλιακή κυψέλη ο ρυθμός παραγωγής γίνεται σχεδόν σταθερός.



Διάγραμμα 3.4 Ρυθμός παραγωγής ζευγών οπών-ηλεκτρονίων σε ένα κομμάτι πυριτίου σαν συνάρτηση της απόστασης στην κυψέλη. Η μπροστινή επιφάνεια της κυψέλης είναι στα 0 μm και είναι εκεί όπου απορροφάται το μεγαλύτερο μέρος του φωτός με την υψηλή ενέργεια (μπλε φως) ^[5].

3.6 ΕΠΑΝΑΣΥΝΔΕΣΗ ΦΟΡΕΩΝ

Όταν ένα ηλεκτρόνιο μετακινηθεί από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους, συναντά μια οπή την οποία και καλύπτει. Το φαινόμενο καλείται **επανασύνδεση** και έχει ως αποτέλεσμα την εξαφάνιση του ζεύγους ηλεκτρονίου–οπής^[7].

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι επανασύνδεσης σε όλο τον όγκο ενός μονοκρυσταλλικού ημιαγωγού . Αυτοί είναι:

1. Άμεση επανασύνδεση με ακτινοβόληση
2. Επανασύνδεση μέσω κέντρων επανασύνδεσης (Shockley-Read-Hall)
3. Επανασύνδεση Auger

1. Επανασύνδεση από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους ή επανασύνδεση με ακτινοβόληση (Band-to-Band)

Είναι ο απλούστερος μηχανισμός για την επανασύνδεση φορέα ο οποίος οφείλεται στο ηλεκτρόνιο εκείνο το οποίο καταρρέει μέσω του ενεργειακού διακένου σε μία οπή. Το φως που παράγεται από μια φωτοδίοδο (LED) είναι το πιο καταφανές παράδειγμα της επανασύνδεσης band-to-band σε μια ημιαγωγή συσκευή. Οι συμπυκνωτές και οι ηλιακές κυψέλες που χρησιμοποιούνται στο διάστημα κατασκευάζονται συνήθως από υλικά άμεσου ενεργειακού διακένου (GaAs) όπου επικρατεί η επανασύνδεση band-to-band. Ωστόσο, οι περισσότερες ηλιακές κυψέλες είναι κατασκευασμένες από πυρίτιο, το οποίο είναι ημιαγωγός έμμεσου διακένου και η επανασύνδεση band-to-band είναι εξαιρετικά χαμηλή και συνήθως θεωρείται αμελητέα. Τα βασικά χαρακτηριστικά της επανασύνδεσης band-to-band είναι:

- Ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη αγωγιμότητας συνδυάζεται απευθείας με μια οπή στη ζώνη σθένους και απελευθερώνει ένα φωτόνιο.
- Το εκπεμπόμενο φωτόνιο έχει ενέργεια κοντά στην ενέργεια διακένου με αποτέλεσμα να απορροφάται σθεναρά και να καταφέρνει να εξέρχεται από τον ημιαγωγό.

2. Επανασύνδεση μέσω κέντρων επανασύνδεσης (SRH)

Η επανασύνδεση μέσω κέντρων επανασύνδεσης (defects), γνωστή και ως Shockley-Read-Hall ή SRH επανασύνδεση, δεν συμβαίνει σε απόλυτα καθαρά και αμόλυντα υλικά. Η επανασύνδεση SRH είναι μια διαδικασία δύο επιπέδων. Τα δύο επίπεδα που εμπλέκονται στην επανασύνδεση SRH είναι:

- Ένα ηλεκτρόνιο (ή οπή) παγιδεύεται σε μία βαθιά ενεργειακή στάθμη (deep level) στην απαγορευμένη περιοχή η οποία εισάγεται μέσω ατελειών στο πλέγμα του κρυστάλλου. Οι ατέλειες αυτές μπορούν να εισαχθούν είτε ακούσια ή εκούσια στο υλικό.
- Αν μια οπή (ή ένα ηλεκτρόνιο) μεταπηδήσει πάνω στην ίδια βαθιά στάθμη πριν το ηλεκτρόνιο επανεκπεμφθεί θερμικά στη ζώνη αγωγιμότητας, τότε θα επανασυνδεθούν μεταξύ τους.

Ο ρυθμός με τον οποίο ένας φορέας κινείται στο επίπεδο ενέργειας του απαγορευμένης στάθμης εξαρτάται από την απόσταση της εισαχθέντας βαθιάς στάθμης από τις ακραίες ζώνες. Ως εκ τούτου, εάν εισαχθεί ενέργεια κοντά σε μια ακραία ζώνη, η επανασύνδεση είναι λιγότερο πιθανή, καθώς το ηλεκτρόνιο είναι περισσότερο πιθανό να επανεκπεμφθεί στη ζώνη αγωγιμότητας, παρά να επανασυνδεθεί με μια οπή που κινείται στο κέντρο επανασύνδεσης από τη ζώνη σθένους. Για αυτό το λόγο, οι βαθιές στάθμες που δημιουργούνται **στο μέσο του ενεργειακού διακένου** είναι πολύ πιο αποτελεσματικές για επανασύνδεση.

3. Επανασύνδεση Auger

Η επανασύνδεση Auger περιλαμβάνει τρεις φορείς. Όταν ένα ηλεκτρόνιο συγκρουστεί ταυτόχρονα με ένα άλλο ηλεκτρόνιο, η ενέργεια που απελευθερώνεται από την επανασύνδεση απορροφάται από ένα σκεδαζόμενο ηλεκτρόνιο. Το ηλεκτρόνιο που δεν επανασυνδέθηκε χάνει σταδιακά την προσληφθείσα ενέργεια σε μια σειρά διαδοχικών κρούσεων με το κρυσταλλικό πλέγμα.

Η επανασύνδεση Auger είναι πιο σημαντική σε υψηλές συγκεντρώσεις φορέων που προκαλούνται από βαριές νοθεύσεις ή υψηλού επιπέδου εγχύσεις κάτω από συγκεντρωμένο ηλιακό φως. Σε ηλιακές κυψέλες αποτελούμενες από πυρίτιο (οι πιο διαδεδομένες), η επανασύνδεση Auger περιορίζει τη διάρκεια ζωής και την τελική απόδοση. Όσο πιο βαριά νοθευμένο είναι το υλικό, τόσο μικρότερη είναι η διάρκεια ζωής της επανασύνδεσης Auger.

3.7 ΧΡΟΝΟΣ ΖΩΗΣ ΦΟΡΕΩΝ

Όταν ο αριθμός των φορέων μειονότητας αυξηθεί και υπερβεί την κατάσταση ισορροπίας από κάποια παροδική εξωτερική διέγερση (όπως το προσπίπτον φως του ήλιου), θα δημιουργηθούν πλεονάζοντες φορείς μειονότητας οι οποίοι θα εξασθενίσουν και θα επιστρέψουν πάλι σε κατάσταση ισορροπίας λόγω και μέσω της διαδικασίας της επανασύνδεσης. Μια κρίσιμη παράμετρος για την ηλιακή κυψέλη είναι ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η επανασύνδεση. Αυτή η διαδικασία, γνωστή ως "ρυθμός επανασύνδεσης" εξαρτάται από τον αριθμό των πλεοναζόντων φορέων μειονότητας. Αν για παράδειγμα, δεν υπάρχει κανένας πλεονάζοντας φορέας μειονότητας, τότε ο ρυθμός επανασύνδεσης πρέπει να είναι μηδέν. Δύο καθοριστικοί παράμετροι για τον ρυθμό επανασύνδεσης είναι ο χρόνος ζωής και το μήκος διάχυσης του φορέα μειονότητας.

Διάρκεια ζωής του φορέα μειονότητας ενός υλικού, ονομάζεται ο μέσος χρόνος που θα περάσει ο φορέας σε διεγερμένη κατάσταση μετά από τη παραγωγή ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής πριν επανασυνδεθεί και συμβολίζεται με τ_n ή τ_p . Συχνά αναφέρεται για συντομία ως "χρόνος ζωής" και δεν έχει να κάνει με τη σταθερότητα του υλικού. Η έκφραση «μια πλακέτα πυριτίου έχει μεγάλο χρόνο ζωής» σημαίνει ότι οι φορείς μειονότητας που παρήχθησαν στον όγκο της πλακέτας, από το φως ή από άλλα μέσα, θα παραμείνουν για μεγάλο χρονικό διάστημα στην πλακέτα πριν επανασυνδεθούν. Ανάλογα με τη δομή, οι ηλιακές κυψέλες που είναι κατασκευασμένες από πλακίδια (wafers) με μεγάλους χρόνους ζωής φορέων μειονότητας είθισται να είναι πιο αποτελεσματικές από κυψέλες κατασκευασμένες από πλακίδια με μικρό χρόνο ζωής φορέων μειονότητας.

Στο χαμηλού επιπέδου έγχυσης υλικό (όπου ο αριθμός των φορέων μειονότητας είναι μικρότερος από την νόθευση) ο χρόνος ζωής σχετίζεται με το ρυθμό επανασύνδεσης με την παρακάτω σχέση:

$$\tau = \frac{\Delta n}{R} \quad (3.5)$$

Όπου:

- τ είναι ο χρόνος ζωής του φορέα μειονότητας
- Δn είναι η συγκέντρωση των πλεοναζόντων φορέων μειονότητας
- R είναι ο ρυθμός επανασύνδεσης

Ενώ για την επανασύνδεση τύπου Auger ο χρόνος ζωής των φορέων μειονότητας δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{\text{Auger}} = \frac{1}{CN_A^2} \quad (3.6)$$

Όπου:

- τ_{Auger} είναι ο χρόνος ζωής του φορέα μειονότητας
- C είναι ο συντελεστής Auger ο οποίος για το πυρίτιο ισούται με $1.66 \times 10^{-30} \text{cm}^6/\text{s}$
- N_A είναι η συγκέντρωση αποδεκτών.

3.8 ΜΗΚΟΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

Η δεύτερη παράμετρος που σχετίζεται άμεσα με τον ρυθμό επανασύνδεσης, ονομάζεται "μήκος διάχυσης του φορέα μειονότητας" και είναι η μέση απόσταση που μπορεί να διανύσει ο φορέας από το σημείο παραγωγής του μέχρι να επανασυνδεθεί.

Η διάρκεια ζωής του φορέα μειονότητας καθώς και το μήκος διάχυσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το είδος και το μέγεθος της διαδικασίας επανασύνδεσης στον ημιαγωγό. Για πολλούς τύπους ηλιακών κυψελών πυριτίου, η SRH επανασύνδεση είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός επανασύνδεσης. Ο ρυθμός επανασύνδεσης θα εξαρτηθεί από τον αριθμό ατελειών που υπάρχουν στο υλικό, καθώς η νόθευση του ημιαγωγού αυξάνει τις ατέλειες στην ηλιακή κυψέλη, και παράλληλα αυξάνει το ρυθμό επανασύνδεσης SRH. Επιπλέον, δεδομένου ότι η επανασύνδεση τύπου Auger είναι πιο πιθανή σε βαριά νοθευμένα και διεγερμένα υλικά, η διαδικασία της επανασύνδεσης ενισχύεται, όσο αυξάνεται η νόθευση. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για να κατασκευαστούν και να επεξεργαστούν οι πλακέτες του ημιαγωγού έχουν επίσης σημαντικό αντίκτυπο στο μήκος διάχυσης.

Στο πυρίτιο, η διάρκεια ζωής μπορεί να φτάσει έως και 1 msec. Για μια ηλιακή κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου, το μήκος διάχυσης είναι συνήθως 100-300 μm. Αυτές οι δύο παράμετροι είναι ενδεικτικές για την ποιότητα και την καταλληλότητα ενός υλικού ως ηλιακή κυψέλη.

Το μήκος της διάχυσης σχετίζεται με τη διάρκεια ζωής του φορέα μέσω της διαχυτικότητας σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (3.7)$$

Όπου:

- L είναι το μήκος διάχυσης σε μέτρα.
- D είναι η διαχυτικότητα σε m²/s.
- τ είναι ο χρόνος ζωής σε δευτερόλεπτα.

3.9 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΑΜΕΣΟΥ ΚΑΙ ΕΜΜΕΣΟΥ ΔΙΑΚΕΝΟΥ

Κατά τη κβαντομηχανική, η κίνηση ενός σωματιδίου εκφράζεται από μια σειρά επίπεδων κυμάτων της μορφής $e^{j(\omega t - \vec{k}\vec{X})}$, όπου \vec{k} είναι η διεύθυνση κατά την οποία κινείται το σωματίδιο και καλείται κυματικό άνυσμά. Η συχνότητα ω συνδέεται με την ενέργεια E με τη σχέση $E = \hbar\omega$, όπου $\hbar = h/2\pi$ και επειδή $\omega = 2\pi\nu$, προκύπτει τελικά $E = \hbar\nu$. Η ορμή p συνδέεται με το κυματικό άνυσμα με τη σχέση $\vec{p} = \hbar\vec{k}$.

Στην περίπτωση ενός κλασσικού σωματιδίου μάζας m , που κινείται σε ελεύθερο χώρο, η ενέργεια συνδέεται με την ορμή με τη σχέση:

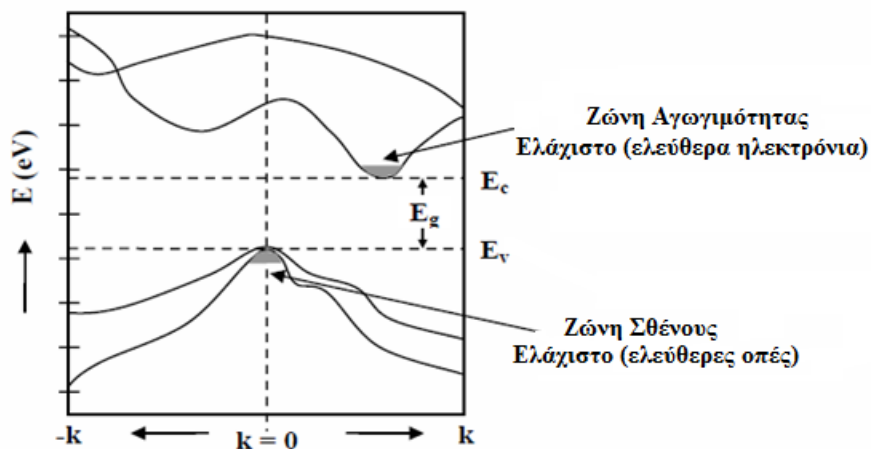
$$E = p^2/2m \quad (3.8)$$

ή αν χρησιμοποιηθεί η σχέση μεταξύ ορμής και κυματικού ανύσματος η σχέση (3.8) γίνεται:

$$E = (\hbar k)^2 / 2m \quad (3.9)$$

Στην περίπτωση των ημιαγωγών θεωρείται η σχέση ενέργειας/ορμής σε ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο (ή οπή) κινούμενο εντός του ημιαγωγού και όχι σε ελεύθερο χώρο.

Η απεικόνιση της συνάρτησης (3.9) είναι μια παραβολή. Στους ημιαγωγούς η εξάρτηση από το κυματικό άνυσμα είναι αρκετά περίπλοκη λόγω της αλληλεπίδρασης των ελεύθερων ηλεκτρονίων με το κρυσταλλικό δυναμικό, έτσι ώστε η σχέση (3.9) να ισχύει για μικρές τιμές του k . Στη γενική περίπτωση, η εξάρτηση της ενέργειας από κυματικό διάνυσμα σχετίζεται με τη διεύθυνση διάδοσης και παρουσιάζει δυο ελάχιστα. Ένα κεντρικό στη θέση $k = 0$ και ένα δευτερεύον, κοντά στο κεντρικό, επίσης παραβολικό.

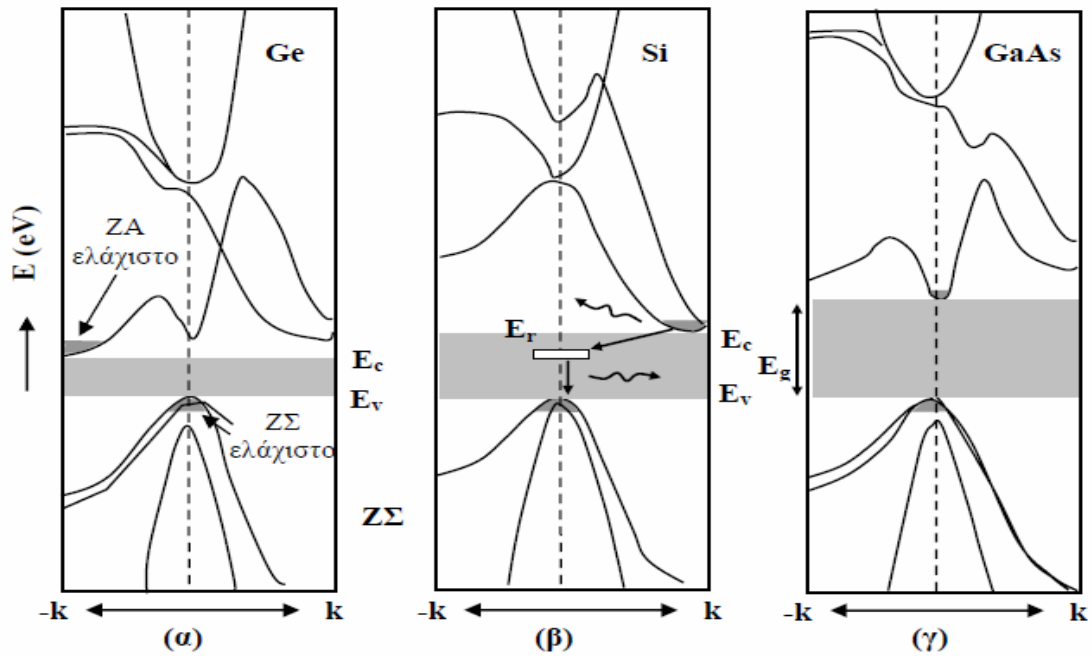


Σχήμα 3.8 Γενικό διάγραμμα $E - k$ ^[9].

Στο **σχήμα 3.8** παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας στο επίπεδο ενέργειας - ορμής (διάγραμμα $E - k$). Παρατηρείται ότι η ζώνη αγωγιμότητας παρουσιάζει μια ελάχιστη τιμή ενέργειας E_c και κάτω από συνθήκες ισορροπίας, τα ηλεκτρόνια βρίσκονται σ' αυτή την ελάχιστη ενεργειακή κατάσταση. Η σχέση $E-k$ για τη ζώνη σθένους, αντιστοιχεί στη σχέση ενέργειας-ορμής για τις οπές. Σ' αυτή την περίπτωση οι τιμές της ενέργειας αυξάνουν με την απομάκρυνση από την κορυφή της ζώνης, με το ελάχιστο ενεργειακό επίπεδο E_v να υφίσταται στο μέγιστο σημείο της.

Μια βασική παράμετρος σε ένα ενεργειακό διάγραμμα, είναι αν ο πυθμένας της ζώνης αγωγιμότητας και η κορυφή της ζώνης σθένους εμφανίζονται στην ίδια τιμή του κυματικού ανύσματος k . Αν συμβαίνει αυτό, το ενεργειακό διάκενο είναι άμεσο και ο ημιαγωγός καλείται **ημιαγωγός άμεσου διακένου**. Αν δεν εμφανίζονται στην ίδια τιμή, τότε το ενεργειακό διάκενο είναι έμμεσο και ο ημιαγωγός καλείται **ημιαγωγός έμμεσου διακένου**.

Στο **σχήμα 3.9** φαίνονται λεπτομερώς τα ενεργειακά διαγράμματα τα του Ge, Si και GaAs. Παρατηρείται ότι οι κρύσταλλοι Ge και Si παρουσιάζουν ελάχιστο της ζώνης σθένους σε διαφορετική τιμή του k , απ' αυτήν που παρουσιάζει ελάχιστο η ζώνη αγωγιμότητας και επομένως είναι ημιαγωγοί έμμεσου διακένου. Ένα ηλεκτρόνιο, επομένως, που βρίσκεται στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας δεν μπορεί να επανασυνδεθεί άμεσα με μια οπή στην κορυφή της ζώνης σθένους, γιατί θα πρέπει να μεταβληθεί η ορμή του (δηλαδή το k), πράγμα που δεν ευνοείται από το νόμο διατήρησης της ορμής.



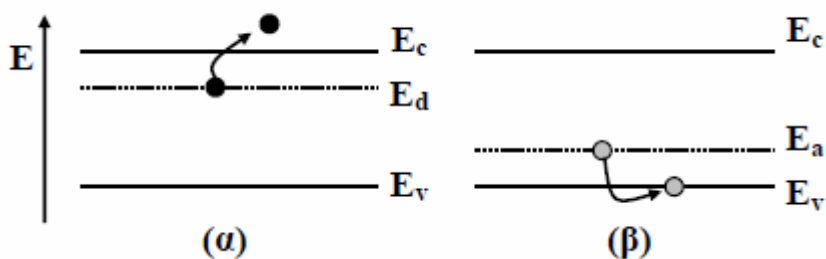
Σχήμα 3.9 Ζώνες αγωγιμότητας και σθένους για Ge, Si και GaAs [9].

Έτσι στους ημιαγωγούς Ge και Si δεν παρατηρούνται άμεσες επανασυνδέσεις ηλεκτρονίου–οπής. Η διαδικασία επανασυνδέσεων σ'αυτούς τους ημιαγωγούς πραγματοποιείται μέσω ενός **κέντρου επανασύνδεσης**, σε μια ενεργειακή στάθμη E_r εντός της ζώνης απογύμνωσης, όπως φαίνεται για παράδειγμα στο **σχήμα 3.9 (β)**. Αυτά τα κέντρα επανασύνδεσης μπορεί να δημιουργηθούν από πλεγματικές ατέλειες όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Σε πρώτη φάση το ηλεκτρόνιο χάνει ένα μέρος της ενέργειάς του και δεσμεύεται από το κέντρο επανασύνδεσης, με ταυτόχρονη μεταβολή της ορμής του και σε δεύτερη φάση μεταπίπτει στη ζώνη σθένους και επανασυνδέεται με μια οπή. Οι μεταβολή της ενέργειας και της ορμής του κατά τη διαδικασία δέσμευσης από το κέντρο επανασύνδεσης, μεταβιβάζεται σε πλεγματικές ταλαντώσεις. Επομένως στους ημιαγωγούς έμμεσου ενεργειακού διακένου η πιθανότητα εκπομπής φωτονίων (**ακτινοβολούσες επανασυνδέσεις**) είναι μικρή. Σε μερικούς όμως ημιαγωγούς έμμεσου διακένου, όπως για παράδειγμα GaP, η επανασύνδεση ηλεκτρονίου–οπής έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίου.

Στο ενεργειακό διάγραμμα του GaAs, τα δυο ελάχιστα παρουσιάζονται στην ίδια τιμή του k και επομένως το GaAs είναι ημιαγωγός άμεσου διακένου, όπου τα ζεύγη ηλεκτρονίου–οπής μπορούν να επανασυνδεθούν άμεσα και να εκπέμψουν ένα φωτόνιο. Η πλειοψηφία των διατάξεων φωτοεκπομπής (LEDs, δίοδοι Laser) χρησιμοποιούν ημιαγωγούς άμεσου ενεργειακού διακένου.

3.10 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΠΡΟΣΜΙΞΕΩΝ

Αν εισαχθούν ξένα άτομα σε ένα καθαρό κατά τα άλλα κρύσταλλο (**ενδογενές υλικό**), είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένας ημιαγωγός, που η συγκέντρωση φορέων μιας πολικότητας να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του άλλου τύπου. Αυτοί οι ημιαγωγοί καλούνται **ημιαγωγοί πρόσμιξης**. Η δημιουργία ελεύθερων φορέων, απαιτεί όχι μόνο την παρουσία προσμίξεων, αλλά και την ικανότητά τους να προσθέσουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας. Σ' αυτή την περίπτωση καλούνται **δότες**. Αν προσθέσουν οπές στη ζώνη σθένους, καλούνται **αποδέκτες** (δέχονται ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους, δημιουργώντας έτσι μια οπή). Στο **σχήμα 3.10** φαίνονται τα τυπικά ενεργειακά διαγράμματα ενός δότη και ενός αποδέκτη, όπου E_d και E_a οι αντίστοιχες ενέργειές τους. Το ενεργειακό επίπεδο του δότη, πριν τον ιονισμό, είναι συμπληρωμένο.



Σχήμα 3.10 Ενεργειακά διαγράμματα. (α) Δότη (β) Αποδέκτη^[9].

Κατά τον ιονισμό, ο δότης δίνει ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας ενώ ο αποδέκτης δίνει μια οπή στη ζώνη σθένους. Βαριές προσμίξεις, που η ενεργειακή στάθμη τους απέχει πολύ από τις δυο ζώνες μπορούν να αποτελέσουν κέντρα επανασύνδεσης. Τέτοιες προσμίξεις καλούνται και **παγίδες**. Ένας ημιαγωγός με προσμίξεις δοτών καλείται **n-τύπου**, ενώ με προσμίξεις αποδεκτών καλείται **p-τύπου**. Σ' ένα ημιαγωγό **n-τύπου** ($n > p$), τα ηλεκτρόνια είναι **φορείς πλειοψηφίας** και οι οπές **φορείς μειοψηφίας**. Στην περίπτωση **p-τύπου** ημιαγωγού ($p > n$), οι οπές είναι φορείς πλειοψηφίας και τα ηλεκτρόνια φορείς μειοψηφίας.

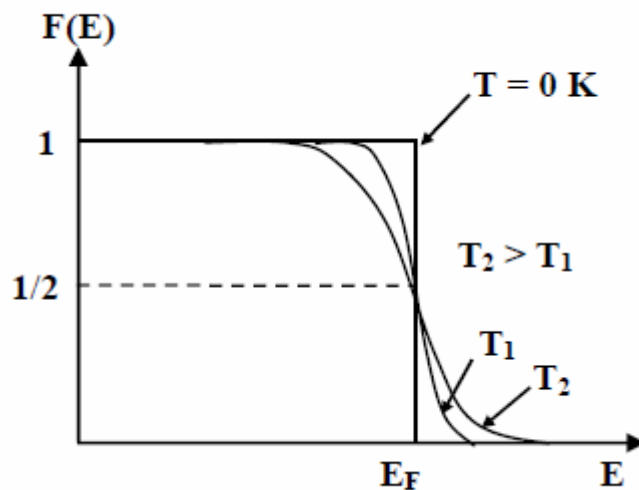
3.11 ΣΤΑΘΜΗ FERMI

Η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας εξαρτάται από δυο παράγοντες. Ο ένας είναι η πυκνότητα των ενεργειακών καταστάσεων $D(E)$ όπου μπορεί να υπάρξουν ηλεκτρόνια και ο άλλος είναι η συνάρτηση κατανομής ενέργειας $F(E, T)$ των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Η συνάρτηση κατανομής ενέργειας δίνεται από τη συνάρτηση κατανομής **Fermi-Dirac** και εκφράζει την πιθανότητα του να βρεθεί ένα ηλεκτρόνιο σε μια κβαντική κατάσταση ενέργειας E , όταν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας.

$$F(E) = \left[1 + \exp\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right) \right]^{-1} \quad (3.10)$$

όπου k_B η σταθερά Boltzmann, T η θερμοκρασία σε (K) και E_F μια ενεργειακή παράμετρος που καλείται **ενέργεια Fermi** ή απλώς **στάθμη Fermi**

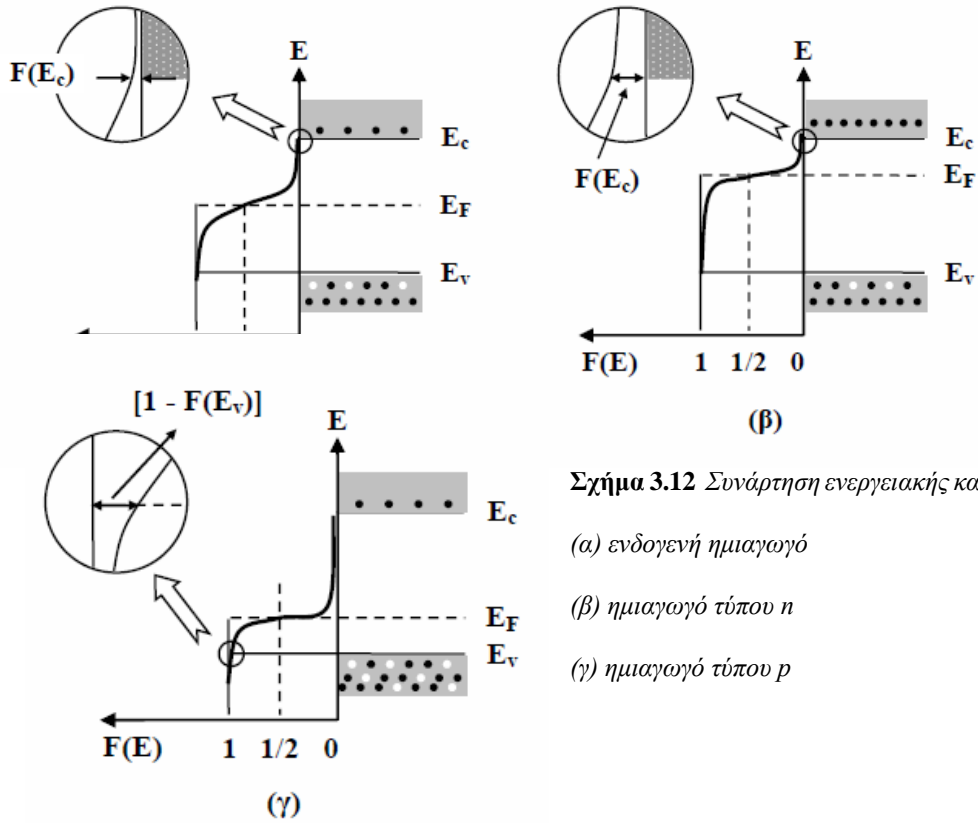
Η σχέση (3.10) στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις μπορεί να προσεγγιστεί με τη συνάρτηση κατανομής Maxwell-Boltzmann.



Σχήμα 3.11 Συνάρτηση κατανομής Fermi-Dirac και στάθμη Fermi ως συνάρτηση της θερμοκρασίας^[9].

Η στάθμη Fermi E_F είναι μια τιμή της ενέργειας στην οποία η πιθανότητα να καταληφθεί μια ενεργειακή κατάσταση είναι $1/2$. Πιο απλά, η στάθμη Fermi αποτελεί ένα δείκτη στο κατά πόσο υπάρχουν συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας και οπών στη ζώνη σθένους. Σε ένα μονωτή η στάθμη συναντάται στη ζώνη σθένους, ενώ σε έναν αγωγό βρίσκεται στη ζώνη αγωγιμότητας. Στους ημιαγωγούς η ενέργεια Fermi ευρίσκεται μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας και μπορεί να δρα είτε ως μονωτής, είτε ως αγωγός. Σε υλικό, που βρίσκεται υπό συνθήκες σκότους και σε θερμοδυναμική ισορροπία, $\Delta E_F = 0$ και η στάθμη Fermi είναι ομοιόμορφη κατά μήκος του.

Στο **σχήμα 3.11** φαίνεται η συνάρτηση κατανομής Fermi με τη στάθμη Fermi, σε σχέση με τη θερμοκρασία. Με την αύξηση της θερμοκρασίας η κατανομή απλώνεται και είναι δυνατό να υπάρξουν συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων σε ενέργειες υψηλότερες της στάθμης Fermi και επομένως να βρεθούν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτή η μεταπήδηση των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία οπών στη ζώνη σθένους. Δηλαδή η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει τη δημιουργία φωτοφορέων (**ενδογενείς φορείς**). Στις οπτοηλεκτρονικές διατάξεις, το φαινόμενο αυτό εμποδίζει την ομαλή λειτουργία τους σε υψηλές θερμοκρασίες, δεδομένου ότι δεν μπορεί να ελεγχθεί αποτελεσματικά η συμπεριφορά τους από ηλεκτρικά πεδία. Στο **σχήμα 3.12** παρουσιάζονται τρία παραδείγματα της συμπεριφοράς ημιαγωγών υλικών, κατά τη μεταβολή της στάθμης Fermi εντός της ζώνης απογύμνωσης. Όταν η στάθμη πλησιάζει τη ζώνη αγωγιμότητας, αυξάνει η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων σ' αυτή τη ζώνη, ενώ αυξάνει η συγκέντρωση των οπών όταν η στάθμη πλησιάζει τη ζώνη σθένους. Προκύπτει, λοιπόν, ότι η πιθανότητα να βρεθεί μια οπή σε μια ενεργειακή κατάσταση E , είναι $1 - F(E)$.



Σχήμα 3.12 Συνάρτηση ενεργειακής κατανομής Fermi σε:

(α) ενδογενή ημιαγωγό

(β) ημιαγωγό τύπου n

(γ) ημιαγωγό τύπου p

Από την άλλη πλευρά η πυκνότητα των ενεργειακών καταστάσεων $D(E)$ εξαρτάται από το υλικό του ημιαγωγού. Προσεγγιστικά ισχύει:

$$D_n(E) = M_c \frac{\sqrt{2} (E_v - E)^{1/2}}{\pi^2 \hbar^3} (m_e^*)^{3/2} \quad \text{για τα ηλεκτρόνια} \quad (3.11)$$

και

$$D_p(E) = M_v \frac{\sqrt{2} (E_v - E)^{1/2}}{\pi^2 \hbar^3} (m_h^*)^{3/2} \quad \text{για τις οπές} \quad (3.12)$$

όπου M_c , M_v το πλήθος των ισοδύναμων ελάχιστων στις ζώνες αγωγιμότητας και σθένους αντίστοιχα και m_e^* , m_h^* η ενεργός μάζα των ηλεκτρονίων και των οπών σε Kg.

Αν n είναι η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας, τότε:

$$n = \int_{E=E_c}^{\infty} F(E, T) D(E) dE \quad (3.13)$$

και στην περίπτωση που η στάθμη Fermi βρίσκεται σημαντικά πιο κάτω από την στάθμη E_c , δηλαδή η ενεργειακή διαφορά της στάθμης E_F από την ενέργεια E_c στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας είναι μεγάλη (περίπτωση στατιστικής κατανομής Maxwell-Boltzmann), τότε:

$$n = N_c \exp \left[-\frac{(E_c - E_F)}{k_B T} \right] \quad (3.14)$$

Όταν το σύστημα βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία, η στατιστική των οπών περιγράφεται από την ίδια στάθμη Fermi (θεωρούμε ότι βρίσκεται αρκετά πάνω από την ενέργεια E_v) και η συγκέντρωση (των οπών) p στη ζώνη σθένους προσδιορίζεται με παρόμοια ανάλυση με αυτή για τα ηλεκτρόνια και είναι:

$$p = N_v \exp \left[-\frac{(E_F - E_v)}{k_B T} \right] \quad (3.15)$$

όπου N_c , N_v είναι η πυκνότητα καταστάσεων (δηλαδή το πλήθος των ενεργειακών τιμών που μπορούν να κατέχουν τα ηλεκτρόνια ή οι οπές ανά μονάδα όγκου) στη ζώνη αγωγιμότητας και ζώνη σθένους αντίστοιχα.

Προσεγγιστικά ισχύει:

$$N_c = 2(2\pi m_e^* k_B T / h^2)^{3/2} / 2M_c \quad (3.16)$$

και

$$N_v = 2(2\pi m_h^* k_B T / h^2)^{3/2} / 2M_v \quad (3.17)$$

Οι πυκνότητες καταστάσεων είναι βασικές παράμετροι για τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των ημιαγωγών. Οι σχέσεις (3.16) και (3.17) ισχύουν τόσο για τους ενδογενείς ημιαγωγούς, όσο και για τους ημιαγωγούς πρόσμιξης. Το γινόμενο \mathbf{np} είναι ανεξάρτητο από τη στάθμη Fermi και δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{np} = N_c N_v e^{-E_g/k_B T} \quad (3.18)$$

όπου E_g το ενεργειακό χάσμα, δηλαδή $E_g = E_c - E_v$

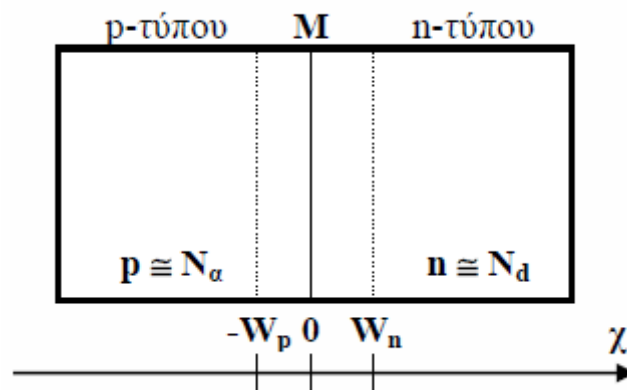
Στην περίπτωση ενδογενούς ημιαγωγού $n = p \equiv n_i$ και επομένως:

$$n_i^2 = N_c N_v e^{-E_g/k_B T} \quad (3.19)$$

όπου n_i η ενδογενής συγκέντρωση φορέων

3.12 ΕΠΑΦΗ P-N

Μια ημιαγωγός επαφή ή επαφή p-n, αποτελείται από δυο περιοχές ενός ημιαγωγού με αντίθετες προσμίξεις όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.13** Η περιοχή αριστερά είναι p- τύπου με συγκεντρώσεις αποδεκτών N_a και η περιοχή δεξιά είναι n-τύπου με συγκεντρώσεις δοτών N_d . Θεωρούμε ότι οι προσμίξεις είναι ελαφρές, έτσι ώστε οι πυκνότητα των ηλεκτρονίων/οπών στην περιοχή n-τύπου/p-τύπου είναι περίπου ίση με την πυκνότητα των δοτών/αποδεκτών.

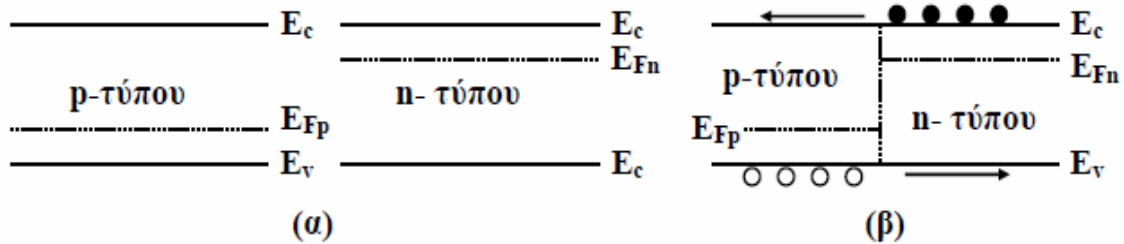


Σχήμα 3.13 Τομή μιας επαφής p-n ^[9].

Πολύ συχνά συναντιόνται περιπτώσεις, όπου η μια περιοχή της επαφής παρουσιάζει βαριά πρόσμιξη. Σε μια τέτοια περίπτωση, μόνο η περιοχή ελαφράς πρόσμιξης παρουσιάζει ενδιαφέρον γιατί κυρίως αυτή προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά της διάταξης. Στο ανωτέρω σχήμα, έχει θεωρηθεί πως η κατανομή των προσμίξεων στις δυο περιοχές είναι ομοιόμορφη

3.12.1 ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

Έστω ότι οι δυο περιοχές του ημιαγωγού έρχονται σε επαφή και οι ενεργειακές τους ζώνες ευθυγραμμίζονται. Τότε θα προκύψει ένα ενεργειακό διάγραμμα, γνωστό ως **επίπεδο ενεργειακό διάγραμμα** (σχήμα 3.14).



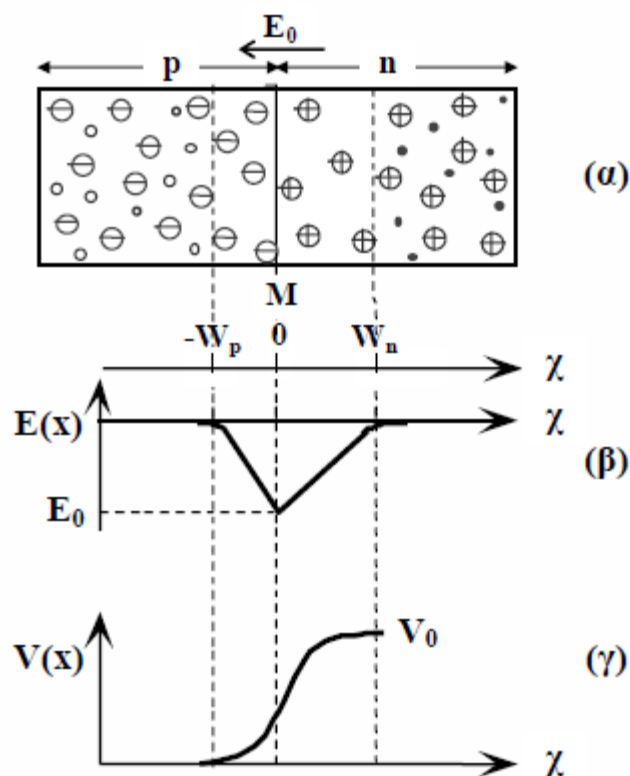
Σχήμα 3.14 Ενεργειακό διάγραμμα επαφής p-n. (α) πριν και (β) μετά την ένωση των περιοχών n-τύπου και p-τύπου ^[9].

Οι ενέργειες Fermi E_{Fp} και E_{Fn} , ωστόσο, δεν ευθυγραμμίζονται αυτόματα και το διάγραμμα δεν είναι ισορροπημένο αφού και τα ηλεκτρόνια και οι οπές μπορούν να χάσουν ενέργεια, περνώντας την επαφή. Θα πρέπει, επομένως να προηγηθεί μετακίνηση των φορέων πριν επιτευχθεί θερμική ισορροπία. Υποδηλώνεται επίσης η απουσία ηλεκτρικού πεδίου.

3.12.2 ΑΝΟΙΧΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

Στην περίπτωση ανοιχτού κυκλώματος, δηλαδή χωρίς εξωτερική πόλωση, οι οπές διαχέονται από την περιοχή p προς την περιοχή n και επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια, που είναι φορείς πλειονότητας. Η περιοχή n , κοντά στην επαφή απογυμνώνεται έτσι από φορείς πλειονότητας και δημιουργείται πλεόνασμα θετικού φορτίου (θετικά ιόντα δότη). Ομοίως, τα ηλεκτρόνια διαχέονται από την περιοχή n προς την περιοχή p και επανασυνδέονται με τις οπές, που είναι φορείς πλειονότητας. Η περιοχή p κοντά στην επαφή απογυμνώνεται από φορείς πλειονότητας και δημιουργείται πλεόνασμα αρνητικού φορτίου (αρνητικά ιόντα αποδέκτη). Δημιουργείται επομένως, εκατέρωθεν της επαφής, μια περιοχή απογυμνωμένη από ελεύθερους φορείς, με εύρος $W_0 = W_p + W_n$ που καλείται **ζώνη απογύμνωσης**.

Εξ αιτίας του διαχωρισμού των φορέων, αναπτύσσεται στη ζώνη ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο E_0 , που τείνει να σαρώσει τις οπές/ηλεκτρόνια προς κατευθύνσεις αντίθετες από τις κατευθύνσεις διάχυσής τους. Είναι φανερό ότι όσο περισσότερες οπές/ηλεκτρόνια διαχέονται, το εσωτερικό πεδίο E_0 θα αυξάνει μέχρι να ισορροπήσει το σύστημα. Μέχρι δηλαδή οι οπές/ηλεκτρόνια, που διαχέονται να ισορροπήσουν με τις οπές/ηλεκτρόνια, που σαρώνονται από το πεδίο (**σχήμα 3.15 α**).



Σχήμα 3.15 Χαρακτηριστικές ιδιότητες επαφής p-n ^[9].

Η μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου, κατά μήκος της επαφής p-n, φαίνεται στο **σχήμα 3.15 β**. Το $E(x)$ φτάνει τη μέγιστη τιμή του E_0 στο M. Αν θεωρηθεί ότι το δυναμικό $V(x)$ στην περιοχή p είναι μηδέν, τότε παρατηρείται ότι στη ζώνη αποκοπής αυξάνει για να φτάσει μια μέγιστη τιμή V_0 στην περιοχή n. Το V_0 καλείται και **ενσωματωμένο δυναμικό**.

Αποδεικνύεται ότι:

$$V_0 = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \quad (3.20)$$

όπου:

k = σταθερά Boltzmann $1.3807 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

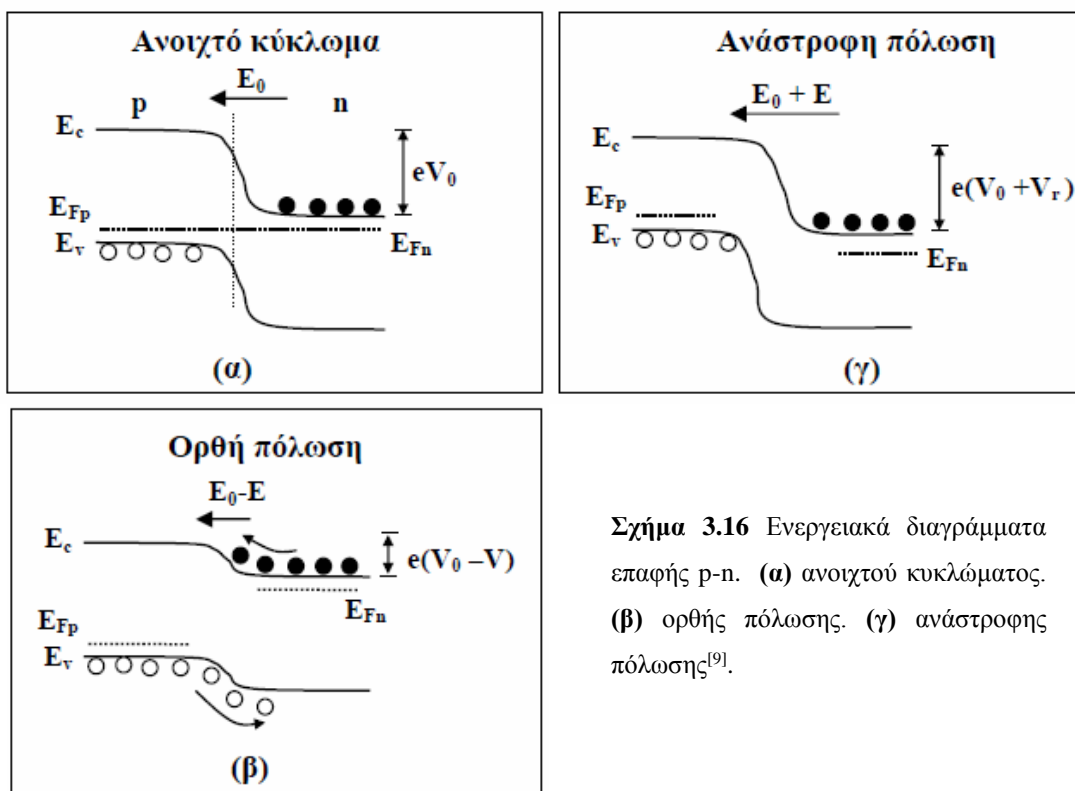
T = απόλυτη θερμοκρασία σε K

$n_i^2 = np$

3.12.3 ΟΡΘΗ ΚΑΙ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΠΟΛΩΣΗ

Αν στα άκρα της επαφής p-n, εφαρμοστεί τάση V (ορθής φοράς), τότε κατά μήκος της ζώνης αποκοπής δημιουργείται πτώση τάσης και το ενσωματωμένο δυναμικό θα μειωθεί κατά $V_0 - V$ με συνέπεια τη μείωση του πεδίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του εύρους της ζώνης αποκοπής, πράγμα που σημαίνει ότι ο αριθμός των φορέων που διαχέονται αυξάνει. Το αντίθετο συμβαίνει κατά την ανάστροφη πόλωση, όπου το δυναμικό αυξάνει κατά $V_0 + V$.

Ενεργειακά διαγράμματα:



Σχήμα 3.16 Ενεργειακά διαγράμματα επαφής p-n. (α) ανοιχτού κυκλώματος. (β) ορθής πόλωσης. (γ) ανάστροφης πόλωσης^[9].

Στο **σχήμα 3.16 α** φαίνεται και το ενεργειακό διάγραμμα μιας επαφής p-n υπό συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος. Αν E_{Fn} και E_{Fp} είναι οι στάθμες Fermi στις περιοχές p και n αντίστοιχα, τότε σε κατάσταση ισορροπίας η στάθμη Fermi πρέπει να είναι ομοιόμορφη κατά μήκος των δυο περιοχών. Στην περιοχή n, μακριά από την επαφή M, οι στάθμες $E_c - E_{Fn}$ είναι ίδιες όπως θα ήταν στην περίπτωση, που το n – τύπου υλικό θα ήταν απομονωμένο. Οι ίδιες συνθήκες ισχύουν και στην περιοχή p, δηλαδή $E_{Fp} - E_v$ είναι ίδιες. Είναι φανερό ότι για να είναι, οι στάθμες $E_{Fn} - E_{Fp}$ και $E_c - E_v$ ίδιες, κατά μήκος του συστήματος, θα πρέπει να καμφθούν οι $E_c - E_v$ κοντά στην επαφή M.

Τη στιγμή, που οι δυο ημιαγωγοί ενώνονται για να σχηματίσουν την επαφή, τα ηλεκτρόνια διαχέονται από την περιοχή n προς την περιοχή p, απογυμνώνοντας την n κοντά στην επαφή. Έτσι, πλησιάζοντας προς το M η E_c θα πρέπει να απομακρύνεται από την E_{Fn} , πράγμα που φαίνεται καθαρά στο σχήμα. Αντίστοιχα, στην περιοχή p η E_v απομακρύνεται από την E_{Fp} .

Η ηλεκτροστατική δυναμική ενέργεια (ΗΔΕ) των ηλεκτρονίων, μεταβάλλεται από μηδέν (στην περιοχή p) σε $-eV_0$ (στην περιοχή n), δηλαδή η συνολική του ενέργεια ελαττώνεται κατά eV_0 . Με άλλα λόγια, τα ηλεκτρόνια της περιοχής n στην E_c θα πρέπει να ξεπεράσουν ένα **φράγμα δυναμικού** eV_0 για να μετακινηθούν προς την E_c της περιοχής p. Το ίδιο φράγμα δυναμικού εμποδίζει και τη διάχυση των οπών από την p στη n περιοχή.

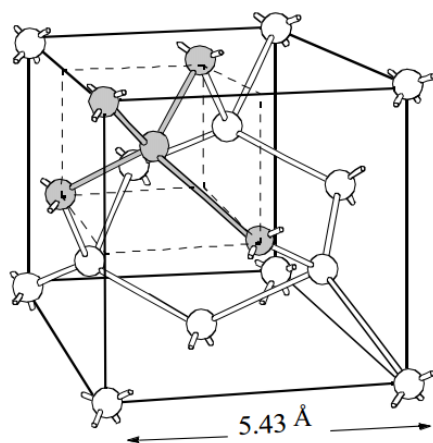
Όταν η επαφή p-n πολωθεί ορθά με μια τάση V , δημιουργείται μια πτώση τάσης κατά μήκος της περιοχής απογύμνωσης, ελαττώνοντας το φράγμα δυναμικού από eV_0 σε $e(V_0 - V)$, έτσι που τα ηλεκτρόνια της πλευράς n να μπορούν να ξεπεράσουν το φράγμα και να διαχυθούν προς την πλευρά p (**σχήμα 3.16 β**). Σε αντικατάσταση των ηλεκτρονίων που διαχέονται προς την περιοχή p, η περιοχή n τροφοδοτείται με ηλεκτρόνια από τον αρνητικό πόλο της πηγής. Κατά τον ίδιο τρόπο, οι οπές μπορούν να διαχυθούν από την p στην n περιοχή, που διατηρεί τα φορτία της από το θετικό πόλο της πηγής. Αυτή η διαδικασία διάχυσης – αντικατάστασης φορέων, δημιουργεί ροή ρεύματος στο κύκλωμα ημιαγωγού – εξωτερικής πόλωσης.

Στην περίπτωση ανάστροφης πόλωσης, $V = V_r$, της επαφής p-n η περιοχή απογύμνωσης δέχεται μια πτώση τάσης, που προστίθεται στο ενσωματωμένο δυναμικό V_0 με αποτέλεσμα την αύξηση του φράγματος δυναμικού σε $e(V_0 + V_r)$, όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.16 γ**. Σ' αυτή την περίπτωση, στο κύκλωμα ρέει ένα μικρό ανάστροφο ρεύμα λόγω θερμικών διεργασιών.

3.13 ΠΥΡΙΤΙΟ

Το **πυρίτιο (Si)** ως στοιχείο δεν απαντάται ελεύθερο στη φύση. Τα διάφορα ορυκτά και πετρώματα του πυριτίου αποτελούν το **87%** του φλοιού της Γης, ενώ είναι το δεύτερο σε αφθονία χημικό στοιχείο στο στερεό φλοιό της Γης μετά το οξυγόνο.

Το πυρίτιο είναι στοιχείο της τέταρτης ομάδας του περιοδικού συστήματος που ευνοεί την κρυστάλλωσή του σε τετραεδρική κρυσταλλική δομή **σχήμα 3.17**. Διαθέτει 14 συνολικά ηλεκτρόνια, ενώ 4 από αυτά βρίσκονται στην εξωτερική του στιβάδα (ηλεκτρόνια σθένους) και έχουν καθοριστικό ρόλο στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο^[7]



Σχήμα 3.17 Κρυσταλλική δομή του πυριτίου.

Λόγω της δομής του πυριτίου τα ηλεκτρόνια σθένους συμμετέχουν στο σχηματισμό ομοιοπολικών χημικών δεσμών και το υλικό κατατάσσεται στους ημιαγωγούς. Το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου είναι έμμεσο. Αυτό σημαίνει ότι αν το χαμηλότερο σημείο στη ζώνη αγωγιμότητας και το υψηλότερο σημείο στη ζώνη σθένους απέχουν ενεργειακά μόνο κατά 1.1eV σε θερμοκρασία δωματίου, αυτά τα στοιχεία αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της κρυσταλλικής ορμής του υλικού. Ως αποτέλεσμα προκειμένου να διεγερθεί ένα ηλεκτρόνιο, είναι απαραίτητο μαζί με το φωτόνιο, να συνυπάρξει και ένα φωνόνιο, (δηλαδή ένας κατάλληλος ρυθμός ταλάντωσης του κρυσταλλικού πλέγματος) προκειμένου να ολοκληρωθεί η μετάβαση του ηλεκτρονίου από τη μια ενεργειακή κατάσταση στην άλλη.

Επιπλέον, το πυρίτιο μπορεί να γίνει εύκολα

- τύπου-n με την προσθήκη προσμίξεων πεντασθενών ατόμων με παραπλήσια ατομική ακτίνα π.χ φωσφόρου (P), αρσενικού (As), αντιμονίου (Sb)
- τύπου-p με την προσθήκη τρισθενών ατόμων παραπλήσιας ατομικής ακτίνας π.χ βορίου (B), αλουμινίου (Al), γαλλίου (Ga), ινδίου (In).

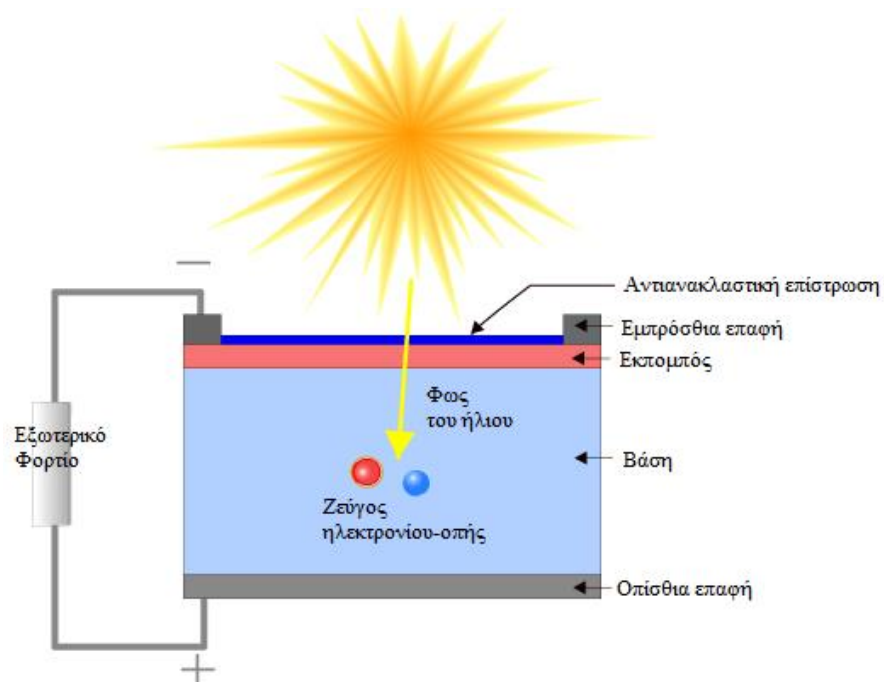
Τέλος, το πυρίτιο ,λόγω του έμμεσου διακένου του , έχει πολύ χαμηλό ρυθμό επανασύνδεσης από ακτινοβολούσες διεργασίες. Αφού, το χαμηλότερο ενεργειακό σημείο της ζώνης αγωγιμότητας (προς το οποίο βαίνουν τα ηλεκτρόνια προκειμένου να μειώσουν την ενέργειά τους και για να μεταβούν στη ζώνη σθένους) και το υψηλότερο ενεργειακό σημείο της ζώνης σθένους (προς το οποίο βαίνουν οι οπές προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η δυναμική τους ενέργεια) αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της κρυσταλλικής ροής.

Όλες οι παραπάνω ιδιότητες καθιστούν το πυρίτιο ιδανικό στοιχείο για την κατασκευή p-n επαφών, τόσο για φωτοβολταϊκές κυψέλες, όσο και γενικότερα για ηλεκτρονικές διατάξεις .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

4.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΚΥΨΕΛΗ

Η φωτοβολταϊκή κυψέλη είναι μια ηλεκτρονική συσκευή η οποία μετατρέπει το ηλιακό φως σε ηλεκτρισμό. Η παραπάνω διαδικασία απαιτεί αρχικά, ένα υλικό το οποίο κατά την απορρόφηση φωτός θα διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη και δεύτερον τη μεταφορά αυτού του υψηλής ενέργειας ηλεκτρονίου από την ηλιακή κυψέλη σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Το ηλεκτρόνιο αφού αποδώσει την ενέργειά του στο εξωτερικό κύκλωμα θα επιστρέψει στην ηλιακή κυψέλη. Οι απαιτήσεις για την παραπάνω μετατροπή μπορούν να ικανοποιηθούν από ποικίλα υλικά και διαδικασίες, αλλά στην πράξη σχεδόν όλες οι μετατροπές φωτοβολταϊκής ενέργειας γίνονται από ημιαγωγά υλικά με χρήση της επαφής p-n.



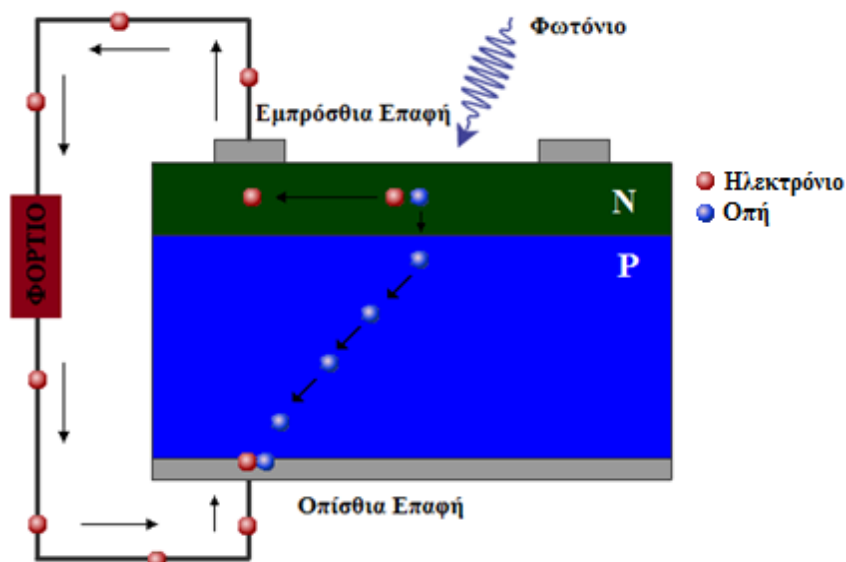
Σχήμα 4.1 Δομή φωτοβολταϊκής κυψέλης^[5].

Οι βασικές αρχές της φωτοβολταϊκής κυψέλης συνοψίζονται λοιπόν ως εξής:

- Δημιουργία φωτοφορέων.
- Συγκέντρωση των φωτοφορέων για την δημιουργία ρεύματος.
- Παραγωγή τάσης στα άκρα της κυψέλης.
- Απόδοση της ισχύος στο φορτίο και σε παρασιτικές αντιστάσεις.

4.2 ΦΩΤΟΡΕΥΜΑ

Η παραγωγή ρεύματος σε μια ηλιακή κυψέλη, γνωστό ως "φωτόρευμα", αποτελείται από δυο βασικές διαδικασίες. Η πρώτη διαδικασία είναι η απορρόφηση των προσπιπτόντων φωτονίων για τη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίου-οπής. Τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών θα παραχθούν στη κυψέλη υπό την προϋπόθεση ότι το προσπίπτον φωτόνιο θα έχει ενέργεια μεγαλύτερη της ενέργειας διακένου. Ωστόσο, τα ηλεκτρόνια (στο p-τύπου υλικό), και οι οπές (στο n-τύπου υλικό) είναι σε μετασταθή κατάσταση και θα είναι διαθέσιμα, κατά μέσο όρο, για διάρκεια χρόνου ίση με το χρόνο ζωής του φορέα μειονότητας προτού επανασυνδεθούν. Εάν ο φορέας επανασυνδεθεί, τότε το ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής χάνεται και δεν μπορεί πλέον να συμμετέχει στην παραγωγή ρεύματος και κατ'επέκταση ισχύος.



Σχήμα 4.2 Ιδανική ροή ηλεκτρονίων-οπών στην επαφή p-n κατά την πρόσπτωση φωτός στην επιφάνειά της.

Η δεύτερη διαδικασία είναι η συγκέντρωση των φορέων. Η διάδοος p-n αποτρέπει την επανασύνδεση των φορέων απομονώνοντας το ηλεκτρόνιο από την οπή. Οι φορείς απομονώνονται με τη δράση του ηλεκτρικού πεδίου που υπάρχει στην επαφή p-n. Εάν ο φωτοφορέας μειονότητας φτάσει την επαφή p-n, απωθείται από το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής, και απλώνεται με αποτέλεσμα να γίνει φορέας πλειονότητας. Εάν ο εκπομπός και η βάση της ηλιακής κυψέλης είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους (π.χ, εάν η κυψέλη είναι βραχυκυκλωμένη), οι φωτοπαραγόμενοι φορείς κυκλοφορούν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος. Η ιδανική ροή των φορέων κατά το βραχυκύκλωμα φαίνεται στο **σχήμα 4.2**.

4.3 ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Η πιθανότητα "συγκέντρωσης" περιγράφει την πιθανότητα ενός φωτοφορέα να συλλεχθεί από την επαφή p-n και ως εκ τούτου, να συνεισφέρει στην παραγωγή του φωτορεύματος. Η πιθανότητα αυτή εξαρτάται από την απόσταση που πρέπει να διανύσει ο φωτοφορέας σε σύγκριση με το μήκος διάχυσης, καθώς επίσης και από τις επιφανειακές ιδιότητες της συσκευής. Η πιθανότητα συγκέντρωσης των φορέων που παράγονται στην περιοχή απογύμνωσης ισούται με τη μονάδα, καθώς το ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής παρασύρεται γρήγορα από το ηλεκτρικό πεδίο και συλλέγεται. Κατά την απομάκρυνση από την επαφή, η πιθανότητα συγκέντρωσης ελαττώνεται. Εάν το φορτίο παραχθεί περισσότερο από ένα μήκος διάχυσης μακριά από την επαφή, τότε η πιθανότητα συγκέντρωσής του είναι αρκετά χαμηλή. Ομοίως, αν το φορτίο παραχθεί πιο κοντά σε μια περιοχή, όπου ο ρυθμός επανασύνδεσης είναι υψηλότερος από την επαφή, τότε το φορτίο θα επανασυνδεθεί.

Η πιθανότητα συγκέντρωσης σε συνδυασμό με το ρυθμό παραγωγής καθορίζει το φωτόρευμα που θα παραχθεί από την ηλιακή κυψέλη. Το φωτόρευμα είναι το ολοκλήρωμα του ρυθμού παραγωγής σε ένα συγκεκριμένο σημείο της διάταξης ως προς το ολικό πάχος της διάταξης, πολλαπλασιασμένο με την πιθανότητα συγκέντρωσης στο συγκεκριμένο σημείο. Η εξίσωση για την πυκνότητα του φωτορεύματος (J_L), με μια αυθαίρετη τιμή ρυθμού παραγωγής ($G(x)$) και πιθανότητας συγκέντρωσης ($CP(x)$), παρουσιάζεται παρακάτω:

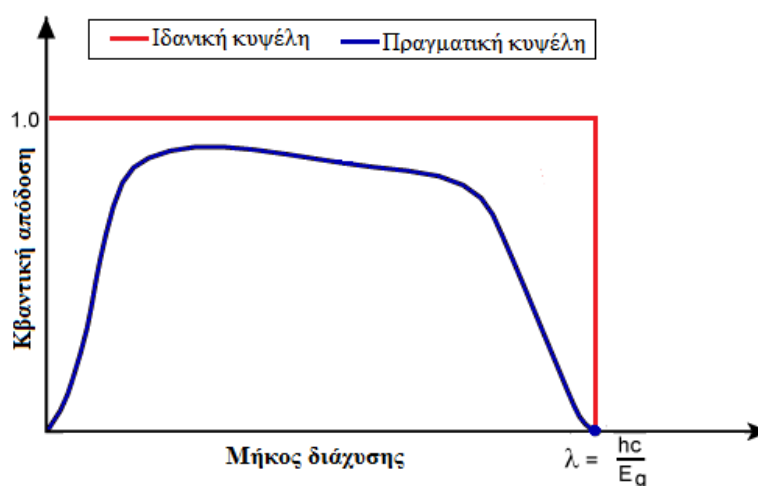
$$J_L = q \int_0^W G(x)CP(x)dx = q \int_0^W \left[\int_0^W a(\lambda)H_0 \exp(-a(\lambda)x)d\lambda \right] CP(x)dx \quad (4.1)$$

Όπου:

- q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου
- W είναι το πάχος της διάταξης
- $a(\lambda)$ είναι ο συντελεστής απορρόφησης
- H_0 είναι ο αριθμός των φωτονίων ανά μήκος κύματος.

4.4 ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Η «κβαντική απόδοση» (Κ.Α) ορίζεται ως ο λόγος των του αριθμού των φορέων που συλλέγονται από την ηλιακή κυψέλη προς τον αριθμό των φωτονίων μιας δεδομένης ενέργειας προσπιπτόντων στη ηλιακή κυψέλη. Η κβαντική απόδοση μπορεί να εκφραστεί είτε σαν συνάρτηση του μήκους κύματος είτε σαν ενέργεια. Εάν απορριφθούν όλα τα φωτόνια από ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος και συλλεχθούν όλοι οι παραγόμενοι φορείς μειονότητας, τότε η κβαντική απόδοση για το συγκεκριμένο μήκος κύματος είναι μονάδα. Η κβαντική απόδοση για φωτόνια με ενέργεια κάτω της ενέργειας διακένου είναι μηδέν.



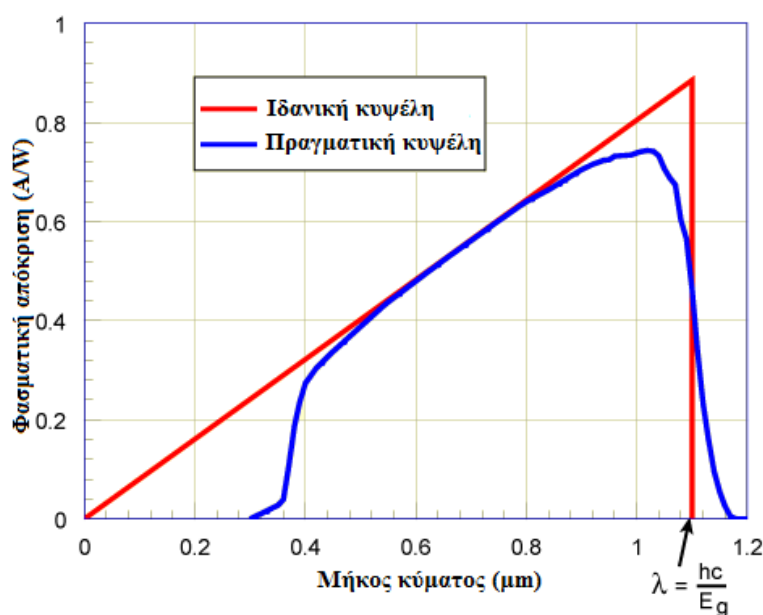
Σχήμα 4.3 Κβαντική απόδοση συναρτήσει του μήκους διάχυσης σε ιδανική και πραγματική κυψέλη.

Ενώ η κβαντική απόδοση έχει ιδανικά το τετράγωνο σχήμα που φαίνεται στο **σχήμα 4.3**, για τις περισσότερες ηλιακές κυψέλες είναι μειωμένη λόγω φαινομένων επανασύνδεσης. Οι ίδιοι μηχανισμοί που επηρεάζουν την πιθανότητα συγκέντρωσης επηρεάζουν ομοίως και την κβαντική απόδοση. Για παράδειγμα, η αδρανοποίηση της εμπρόσθιας επιφάνειας επηρεάζει τους φορείς που δημιουργούνται κοντά στην επιφάνεια, και δεδομένου ότι το μπλε φως απορροφάται πολύ κοντά στην επιφάνεια, η έντονη επανασύνδεση θα επηρεάσει το «μπλε» τμήμα της κβαντικής απόδοσης. Ομοίως, το πράσινο φως απορροφάται από το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής κυψέλης και ένα χαμηλό μήκος διάχυσης θα επηρεάσει την πιθανότητα συγκέντρωσης της κυψέλης και θα μειώσει την κβαντική απόδοση στο πράσινο τμήμα του φάσματος. Η κβαντική απόδοση μπορεί να περιγραφεί ως η πιθανότητα συγκέντρωσης λόγω της παραγωγής ενός μόνο μήκους κύματος, ολοκληρωμένο ως προς το πάχος της διάταξης και κανονικοποιημένο στον αριθμό των προσπιπτόντων φωτονίων.

4.5 ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ

Η φασματική απόκριση είναι εννοιολογικά όμοια με την κβαντική απόδοση. Η κβαντική απόδοση δίνει τον αριθμό των ηλεκτρονίων που εξάγονται από την ηλιακή κυψέλη σε σύγκριση με τον αριθμό των φωτονίων που προσπίπτουν σε αυτή, ενώ η φασματική απόκριση είναι ο λόγος του ρεύματος που παράγεται από την ηλιακή κυψέλη προς την προσπίπτουσα ενέργεια σε αυτήν.

Παρακάτω φαίνεται η καμπύλη φασματικής απόκρισης.



Σχήμα 4.4 Φασματική απόκριση μιας ηλιακής κυψέλης πυριτίου σε γυαλί.

Σε μικρά μήκη κύματος κάτω από 400 nm το γυαλί απορροφά το μεγαλύτερο μέρος του φωτός και η απόκριση της κυψέλης είναι πολύ χαμηλή. Σε ενδιάμεσα μήκη κύματος η κυψέλη πλησιάζει το ιδανικό. Ενώ, σε μεγάλα μήκη κύματος η απόκριση πέφτει πάλι στο μηδέν. Το πυρίτιο είναι ένας έμμεσος ημιαγωγός διακένου, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει απότομη πτώση στο μήκος κύματος που αντιστοιχεί στην ενέργεια διακένου ($E_g = 1.12$ eV).

Η ιδανική φασματική απόκριση περιορίζεται στα μεγάλα μήκη κύματος από την αδυναμία του ημιαγωγού να απορροφήσει φωτόνια ενεργειών χαμηλότερων της ενέργειας διακένου. Το όριο αυτό είναι ίδιο με αυτό που προκύπτει και στις καμπύλες κβαντικής απόδοσης. Ωστόσο, σε αντίθεση με το τετράγωνο σχήμα των καμπυλών ΚΑ, η φασματική απόκριση

έχει τρίγωνο σχήμα καθώς μειώνεται σε μικρά μήκη κύματος. Σε αυτά τα μήκη κύματος, κάθε φωτόνιο έχει μεγάλη ενέργεια, και ως εκ τούτου μειώνεται ο λόγος του αριθμού φωτονίων προς την ισχύ. Οποιαδήποτε ενέργεια πάνω από την ενέργεια διακένου δεν αξιοποιείται από την ηλιακή κυψέλη και αντί αυτού την επιβαρύνει θερμαίνοντάς την. Η αδυναμία της πλήρους αξιοποίησης του προσπίπτοντος φωτός υψηλής ενέργειας, καθώς και η αδυναμία της απορρόφησης φωτός χαμηλής ενέργειας αποτελούν μια σημαντική απώλεια ισχύος για τις ηλιακές κυψέλες p-n επαφής.

Η φασματική απόκριση είναι σημαντική, δεδομένου ότι είναι αυτή η οποία μετράται σε μια ηλιακή κυψέλη και από αυτήν υπολογίζεται έπειτα η κβαντική απόδοση. Η κβαντική απόδοση μπορεί να προσδιοριστεί από τη φασματική απόκριση αντικαθιστώντας την ισχύ του φωτός σε ένα καθορισμένο μήκος κύματος με τη ροή φωτονίων του συγκεκριμένου μήκους κύματος.

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} QE \quad (4.2)$$

Απλοποιώντας προκύπτει

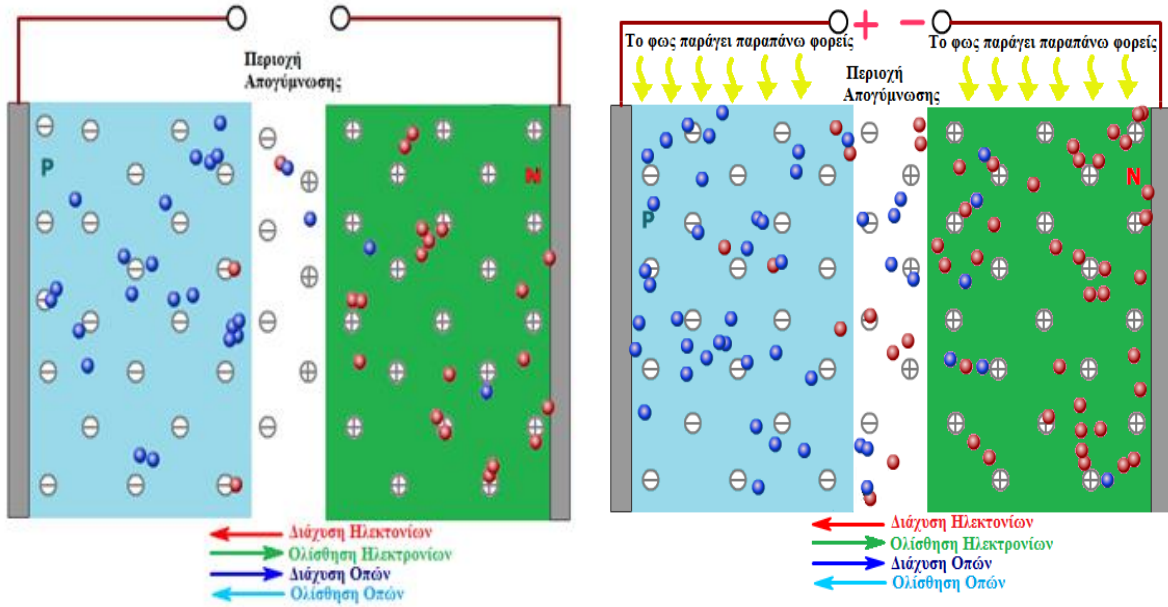
$$SR \left[\frac{A}{W} \right] = \frac{QE}{\lambda[\mu m]} \cdot 1.2398 \quad (4.3)$$

4.6 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός τύπου p με έναν ημιαγωγό τύπου n τότε αναπτύσσονται δύο ρεύματα με αντίθετες φορές:

- **Το ρεύμα διάχυσης** από τον τύπο-p στον τύπο-n που οφείλεται στην κίνηση των οπών από τον p στον n και των ηλεκτρονίων από τον n στον p.
- **Το ρεύμα ολίσθησης** που οφείλεται στην δημιουργία ηλεκτρονίων και οπών, λόγω θερμικής διέγερσης κυρίως στο στρώμα απογύμνωσης, που κινούνται, οι μεν οπές από τον ημιαγωγό n στον p τα δε ηλεκτρόνια από τον p στον n.

Η συγκέντρωση των φορέων σε μια φωτοβολταϊκή κυψέλη δεν έχει την ικανότητα να παράγει από μόνη της ηλεκτρική ενέργεια. Για να παραχθεί ενέργεια, θα πρέπει να παραχθεί πρώτα τάση και ρεύμα. Η τάση σε μια ηλιακή κυψέλη παράγεται από μια διαδικασία γνωστή ως "**φωτοβολταϊκό φαινόμενο**". Η συγκέντρωση των φωτοφορέων από την επαφή p-n προκαλεί κίνηση των ηλεκτρονίων στην πλευρά του n-τύπου και των οπών στην πλευρά του p-τύπου της επαφής. Υπό συνθήκες βραχυκυκλώματος, δεν υπάρχει αύξηση φορτίων, καθώς οι φορείς εξέρχονται από τη συσκευή υπό τη μορφή φωτορεύματος. Ωστόσο, αν οι φωτοφορείς δεν καταφέρουν να εξέλθουν από την ηλιακή κυψέλη, τότε θα προκληθεί αύξηση του αριθμού των ηλεκτρονίων στην n πλευρά του τύπου n υλικού και ανάλογη αύξηση των οπών στην p πλευρά του τύπου p υλικού. Αυτός ο διαχωρισμός φορτίων θα δημιουργήσει ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή που θα είναι αντίθετο του ήδη υπάρχοντος πεδίου, με αποτέλεσμα τη μείωση του ολικού ηλεκτρικού πεδίου. Δεδομένου ότι το ηλεκτρικό πεδίο εμποδίζει τη ροή του ορθά πολωμένου ρεύματος διάχυσης, η μείωση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνει το ρεύμα διάχυσης. Επιτυγχάνεται έτσι μια νέα ισορροπία στην οποία επιβάλλεται πλέον μια τάση στην επαφή p-n. Το ρεύμα στην ηλιακή κυψέλη είναι η διαφορά μεταξύ του I_L και του ρεύματος ορθής πόλωσης. Υπό συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, η ορθή πόλωση της επαφής αυξάνει έως ένα σημείο όπου το φωτόρευμα εξισορροπείται ακριβώς με το ορθά πολωμένο ρεύμα διάχυσης, με αποτέλεσμα το ολικό ρεύμα είναι μηδέν. Η τάση που απαιτείται ώστε αυτά τα δύο ρεύματα να αλληλοεξουδετερωθούν καλείται «τάση ανοικτού κυκλώματος». Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι ροές των φορέων σε βραχυκύκλωμα και συνθήκες ανοικτού κυκλώματος.

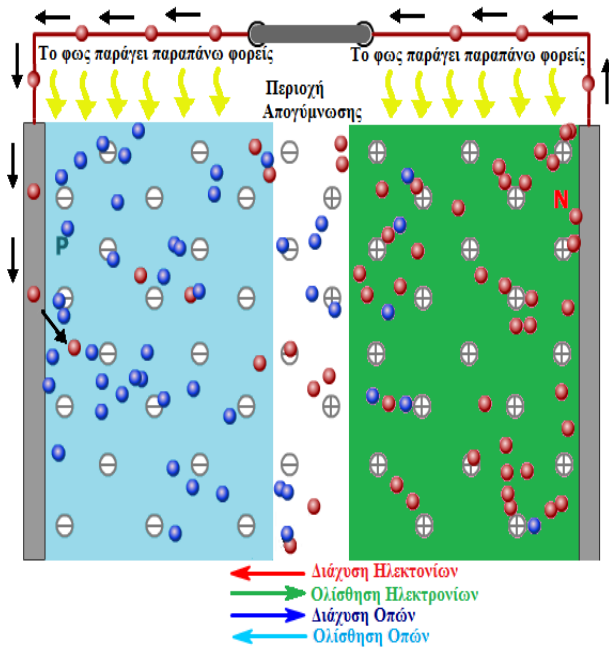


α) Μηδενική τάση στα άκρα της διόδου.

Δεν υπάρχει ροή ρεύματος

β) Πρόσπτωση φωτός στην επαφή.

Η ασυμμετρία των φορτίων παράγει τάση



γ) Με βραχυκυκλωμένους ακροδέκτες

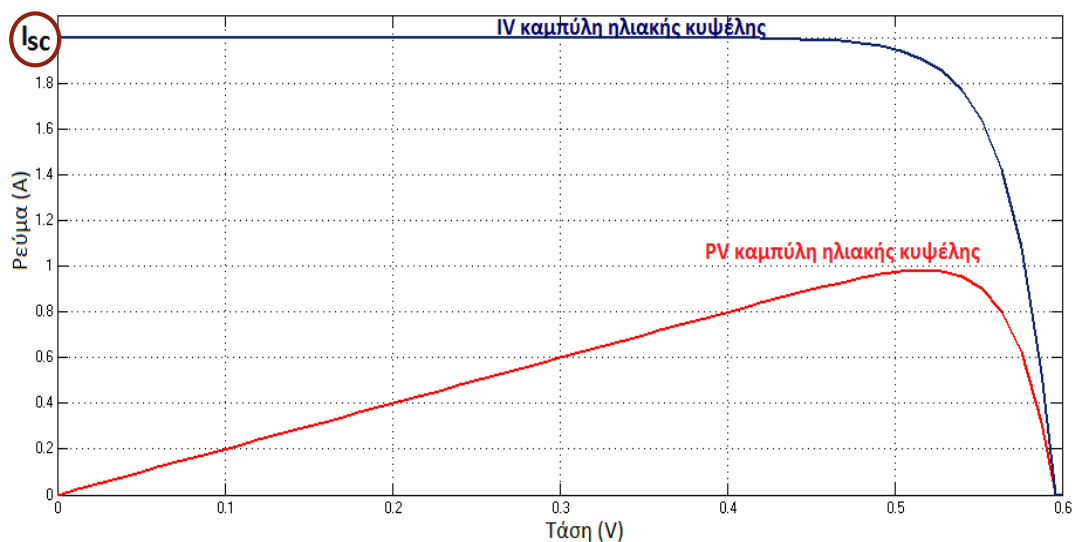
υπάρχει ροή ρεύματος ανάλογη του

προσπίπτοντος φωτός.

Σχήμα 4.5 Σχηματική αναπαράσταση της ροής των φορέων στην ηλιακή κυψέλη κάτω από συνθήκες ισορροπίας, βραχυκυκλώματος και ανοιχτοκυκλώματος. Σε ισορροπία (π.χ. στο σκοτάδι) τα ρεύματα διάχυσης και ολίσθησης είναι μικρά. Σε βραχυκύκλωμα, η συγκέντρωση φορέων μειονότητας στις δύο πλευρές της επαφής είναι αυξημένη και το ρεύμα ολίσθησης, το οποίο εξαρτάται από τον αριθμό των φορέων μειονότητας, είναι αυξημένο. Σε ανοιχτοκύκλωμα, οι φωτοφορείς πολώνουν ορθά την επαφή, αυξάνοντας έτσι το ρεύμα διάχυσης. Αφού το ρεύμα διάχυσης είναι αντίθετο με το ρεύμα ολίσθησης, το συνολικό ρεύμα της επαφής θα είναι μηδέν^[5].

4.7 ΡΕΥΜΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι το ρεύμα που διαρρέει την ηλιακή κυψέλη, όταν η τάση στα άκρα της είναι μηδέν (δηλαδή, όταν η ηλιακή κυψέλη είναι βραχυκυκλωμένη). Συνήθως γράφεται I_{sc} , ενώ παρακάτω εμφανίζεται η γραφική αναπαράστασή του στην καμπύλη IV.



Σχήμα 4.6 Το ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{sc} , είναι το μέγιστο ρεύμα της ηλιακής κυψέλης και παράγεται όταν η συνολική τάση στην κυψέλη είναι μηδέν.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης οφείλεται στην παραγωγή και τη συγκέντρωση των φορέων που δημιουργούνται από το φως. Για μια ιδανική ηλιακή κυψέλη αν θεωρηθούν αμελητέες οι απώλειες, το ρεύμα βραχυκύκλωσης και το φωτόρρευμα ταυτίζονται. Ως εκ τούτου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι το μεγαλύτερο ρεύμα που μπορεί να εξαχθεί από την ηλιακή κυψέλη.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω:

- Την επιφάνεια της ηλιακής κυψέλης. Για να εξαλειφθεί η εξάρτηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης από την επιφάνεια της ηλιακής κυψέλης, συχνά χρησιμοποιείται η πυκνότητα του ρεύματος βραχυκύκλωσης (J_{sc} σε mA/cm²).
- Τον αριθμό των φωτονίων, δηλαδή την ισχύ της προσπίπτουσας φωτεινής πηγής. Το I_{sc} μιας ηλιακής κυψέλης είναι ευθέως ανάλογο της έντασης του φωτός
- Το φάσμα του προσπίπτοντος φωτός. Για τις περισσότερες μετρήσεις φωτοβολταϊκών κυψελών επιλέγεται το φάσμα για A.M 1.5.
- Τις οπτικές ιδιότητες (απορρόφηση και ανάκλαση) της ηλιακής κυψέλης
- Την πιθανότητα συγκέντρωσης της ηλιακής κυψέλης, η οποία εξαρτάται κυρίως από την μεταδοτικότητα της επιφάνειας και τον χρόνο ζωής των φορέων μειονότητας στη βάση.

Όταν γίνεται σύγκριση μεταξύ κυψελών ίδιου τύπου υλικού, οι κυριότεροι παράμετροι που εξετάζονται είναι το μήκος διάχυσης και η παθητικότητα της επιφανείας του υλικού. Σε μια κυψέλη με τέλεια παθητικότητα επιφανείας και ομοιόμορφη παραγωγή, η εξίσωση για το ρεύμα βραχυκυκλώσεως μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση:

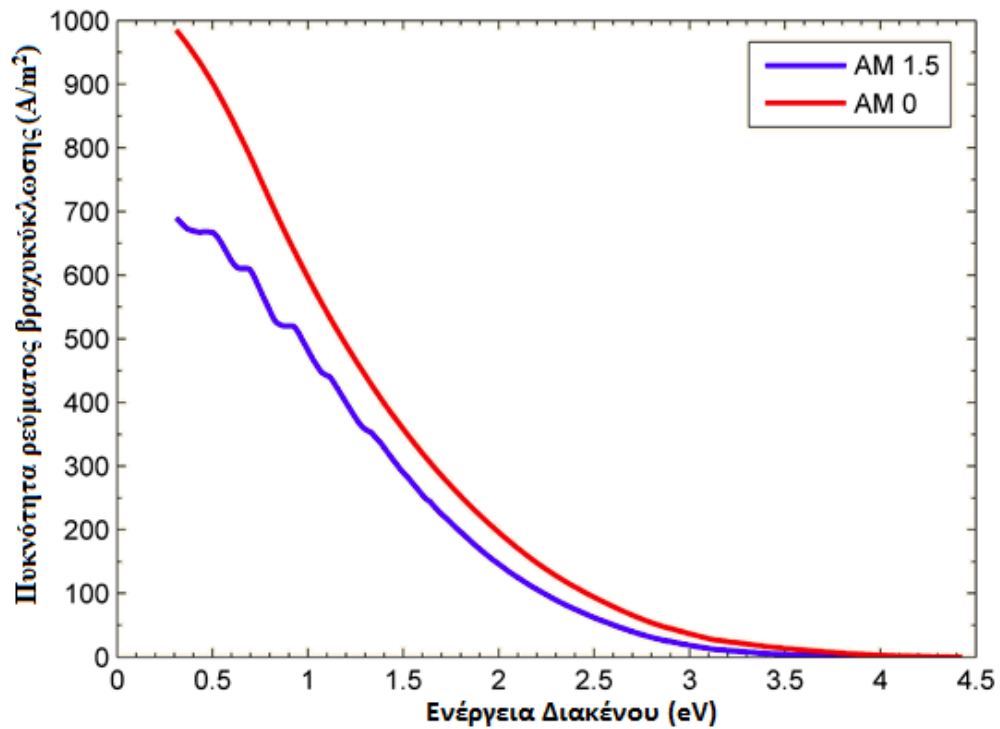
$$I_{sc} = qG(L_n + L_p) \quad (4.4)$$

Όπου:

- G είναι ο ρυθμός παραγωγής φωτοφορέων
- L_n και L_p είναι τα μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα.

Παρόλο που η παραπάνω εξίσωση θεωρεί κάποιες παραδοχές που δεν ισχύουν για τις συνθήκες που απαντώνται στις περισσότερες ηλιακές κυψέλες, είναι μια ένδειξη ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης εξαρτάται έντονα από το ρυθμό παραγωγής και το μήκος διάχυσης.

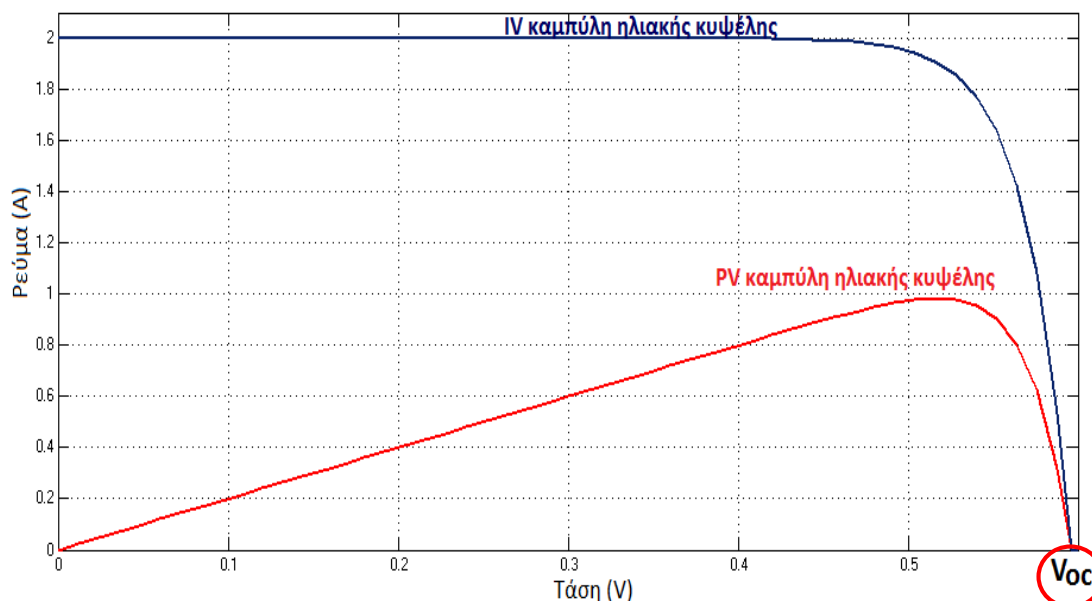
Οι ηλιακές κυψέλες πυριτίου κάτω από ένα φάσμα AM1.5 μπορούν να παράγουν μέγιστο δυνατό ρεύμα 46 mA/cm^2 . Σε εργαστηριακές διατάξεις έχουν μετρηθεί ρεύματα βραχυκύκλωσης πάνω από 42 mA/cm^2 , ενώ οι εμπορικές ηλιακές κυψέλες έχουν ρεύματα βραχυκύκλωσης μεταξύ 28 mA/cm^2 και 35 mA/cm^2 .



Διάγραμμα 4.1 Διάγραμμα πυκνότητας ρεύματος βραχυκύκλωσης συναρτήσει της ενέργειας διακένου για AM 0 και 1.5^[5].

4.8 ΤΑΣΗ ΑΝΟΙΧΤΟΚΥΚΛΩΣΗΣ

Η τάση ανοιχτοκύκλωσης, V_{oc} , είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να παράγει μια ηλιακή κυψέλη, και αυτό συμβαίνει για μηδενικό ρεύμα. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος επηρεάζεται από την ορθή πόλωση της ηλιακής κυψέλης, η οποία οφείλεται στην πόλωση της επαφής από φωτόρευμα και παρουσιάζεται στην παρακάτω καμπύλη IV.



Σχήμα 4.7 Η τάση ανοιχτοκύκλωσης, V_{oc} , είναι η μέγιστη τάση της ηλιακής κυψέλης και παράγεται όταν το συνολικό ρεύμα στην κυψέλη είναι μηδέν.

Η εξίσωση για την V_{oc} προκύπτει θέτοντας το ολικό ρεύμα ίσο με μηδέν στην εξίσωση της ηλιακής κυψέλης, οπότε γίνεται:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right)$$

(4.5)

Όπου:

- n είναι ο συντελεστής ιδανικότητας
- k η σταθερά Boltzmann
- T η θερμοκρασία σε Kelvin
- q το φορτίο του ηλεκτρονίου
- I_L το φωτόρευμα

- I_0 το ρεύμα κόρου

Η ανωτέρω εξίσωση δείχνει ότι η V_{oc} εξαρτάται από το ρεύμα κόρου της ηλιακής κυψέλης καθώς και από το φωτόρευμα. Το I_{sc} έχει συνήθως μικρές διακυμάνσεις, ενώ καθοριστικό ρόλο έχει το ρεύμα κόρου, δεδομένου ότι μπορεί να διαφέρει σε τάξη μεγέθους. Το ρεύμα κόρου, I_0 εξαρτάται από την επανασύνδεση στην ηλιακή κυψέλη. Η τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι ένα μέτρο της επανασύνδεσης που συμβαίνει στην διάταξη. Οι ηλιακές κυψέλες υψηλής ποιότητας μονοκρυσταλλικού πυριτίου έχουν τάση ανοιχτοκύκλωσης μέχρι και 730 mV όταν εκτίθενται σε ήλιο και AM1.5, ενώ οι εμπορικές διατάξεις πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχουν συνήθως τάση ανοιχτοκύκλωσης περίπου 600 mV.

Η V_{oc} μπορεί επίσης να προσδιοριστεί από την συγκέντρωση των φορέων:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{(N_A + \Delta n) \Delta n}{n_i^2} \right] \quad (4.6)$$

Όπου:

- kT/q είναι η θερμική τάση
- N_A είναι η συγκέντρωση αποδεκτών
- Δn είναι η συγκέντρωση φορέων πλειονότητας
- n_i η εγγενής συγκέντρωση φορέων

Καθώς το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας διακένου, η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυξάνεται. Σε μία ιδανική διάταξη η V_{oc} περιορίζεται από την επανασύνδεση με ακτινοβόληση και για τον προσδιορισμό της ελάχιστης δυνατής τιμής του J_0 χρησιμοποιούνται οι αρχές της αναλυτικής ισορροπίας.

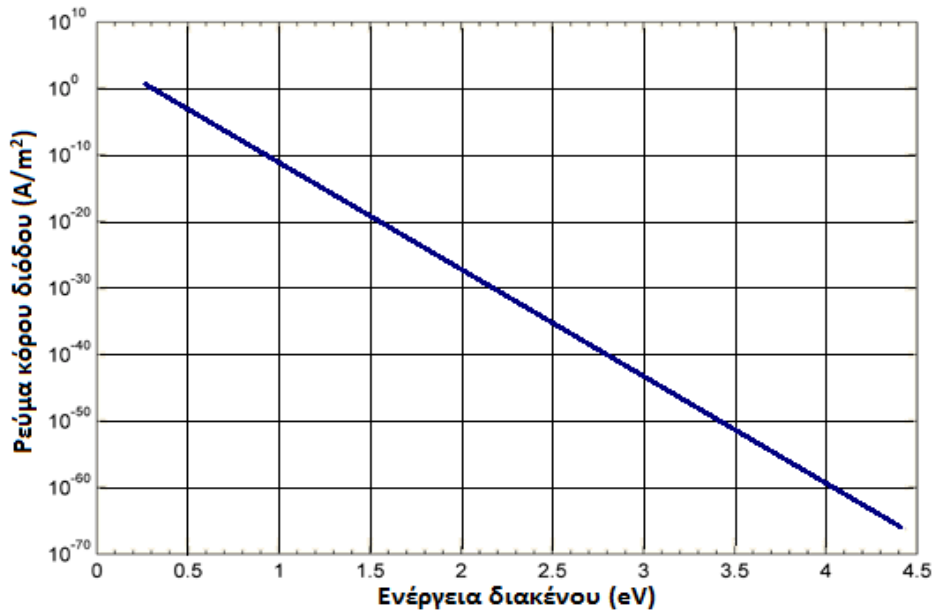
Η ελάχιστη τιμή του ρεύματος κόρου της διόδου δίνεται από την εξίσωση.

$$J_0 = \frac{q}{k} \frac{15\sigma}{\pi^4} T^3 \int_u^\infty \frac{x^2}{e^x - 1} dx \quad (4.7)$$

Όπου

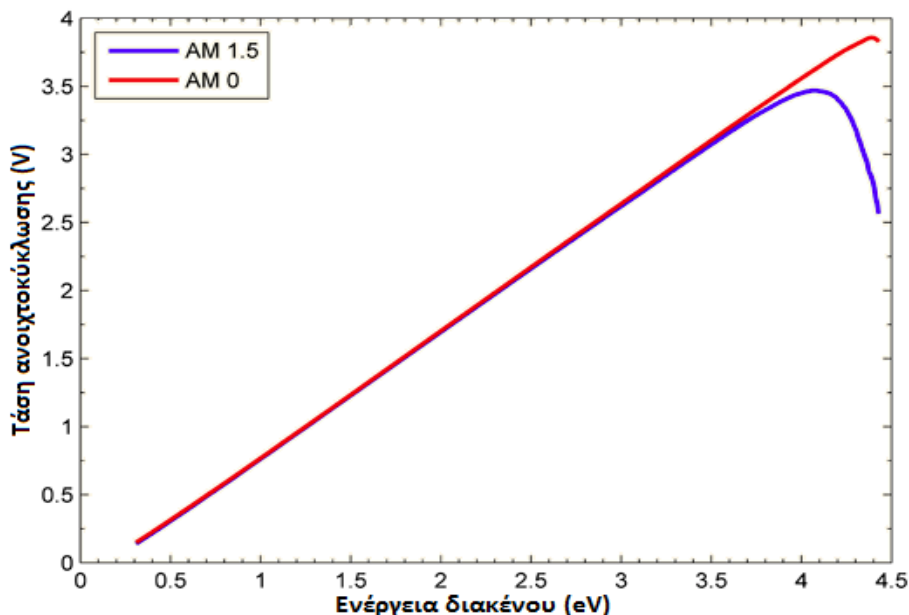
- q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου
- σ η σταθερά Stefan-Boltzmann, $5.670373 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
- k η σταθερά Boltzmann
- T η θερμοκρασία σε Kelvin
- $u = \frac{E_g}{kT}$

Ο υπολογισμός του παραπάνω ολοκληρώματος είναι περίπλοκος, παρακάτω παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση του J_0 με χρήση της μεθόδου που αναπτύχθηκε από τους Levy MY, Honsberg CB^[10].



Διάγραμμα 4.2 Ρεύμα κόρου διόδου συναρτήσει της ενέργειας διακένου. Οι τιμές προσδιορίστηκαν από την αναλυτική ισορροπία, οριοθετώντας την τάση ανοιχτοκύκλωσης της κυψέλης^[5].

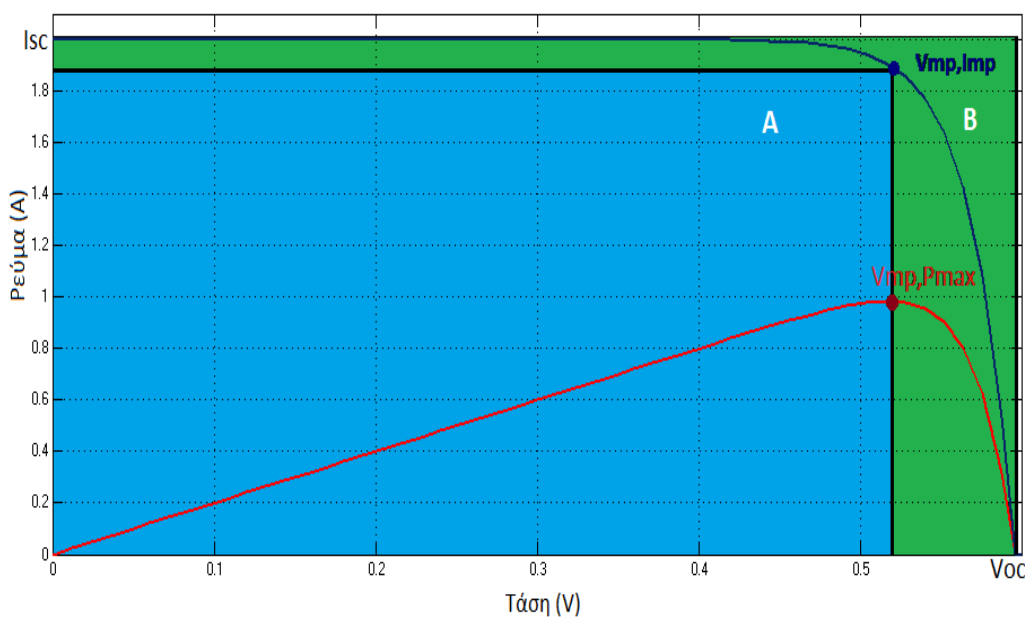
Το J_0 που υπολογίστηκε παραπάνω μπορεί να εισαχθεί απευθείας στην εξίσωση της ηλιακής κυψέλης για να προσδιοριστεί η V_{oc} για όσο η τάση είναι μικρότερη του διακένου.



Διάγραμμα 4.3 Η V_{oc} συναρτήσει της ενέργειας διακένου για κυψέλη με AM 0 και AM 1.5. Η V_{oc} αυξάνει με την ενέργεια διακένου καθώς το ρεύμα επανασύνδεσης μειώνεται. Η απότομη πτώση της V_{oc} σε πολύ υψηλές ενέργειες διακένου οφείλεται στο χαμηλό I_{sc} .

4.9 ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι η μέγιστη τάση και ρεύμα αντίστοιχα που μπορούν να παραχθούν από μια κυψέλη. Ωστόσο, όταν η κυψέλη αποκτήσει οποιαδήποτε από τις δύο αυτές τιμές, η παραγόμενη ισχύς θα είναι μηδέν. Ο παράγοντας πλήρωσης "FF", είναι μια παράμετρος η οποία σε συνδυασμό με τα I_{sc} και V_{oc} καθορίζει τη μέγιστη ισχύ μιας ηλιακής κυψέλης. Ο FF ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ισχύος μιας ηλιακής κυψέλης προς το γινόμενο των I_{sc} και V_{oc} . Γραφικά, ο FF αποτελεί μέτρο της "τετραγωνικότητας" της χαρακτηριστικής της ηλιακής κυψέλης, ενώ παράλληλα, αναπαριστά το εμβαδό του μεγαλύτερου ορθογώνιου που μπορεί να χωρέσει στην IV καμπύλη της κυψέλης. Παρακάτω φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση του FF.



Σχήμα 4.8 Γραφική παράσταση του ρεύματος (κόκκινη γραμμή) και της ισχύος (μπλε γραμμή) συναρτήσει της τάσης.

Ο παράγοντας πλήρωσης FF δίνεται λοιπόν από την παρακάτω σχέση:

$$FF = \frac{\text{Εμβαδόν Α}}{\text{Εμβαδόν Β}} = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (4.8)$$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο παράγοντας πλήρωσης FF αποτελεί ένα μέτρο της "τετραγωνικότητας" της IV καμπύλης, έτσι μια ηλιακή κυψέλη με υψηλή τάση θα έχει και μεγαλύτερο FF καθώς το καμπύλο τμήμα της IV χαρακτηριστικής θα είναι μικρό και θα προσεγγίζει περισσότερο την ορθογώνια μορφή. Ο μέγιστος θεωρητικά FF μιας ηλιακής κυψέλης μπορεί να προσδιοριστεί εξισώνοντας με το μηδέν το διαφορικό της ισχύος της κυψέλης ως προς την τάση.

Έτσι προκύπτει:

$$\frac{d(IV)}{dV} = 0 \Rightarrow V_{mp} = V_{oc} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{V_{mp}}{nkT/q} + 1\right) \quad (4.9)$$

Ωστόσο, η παραπάνω εξίσωση συσχετίζει μόνο τις τάσεις V_{mp} και V_{oc} και για να βρεθούν τα I_{mp} και FF χρειάζονται περαιτέρω εξισώσεις.

Μια εμπειρική σχέση που προκύπτει για τον FF δίνεται παρακάτω:

$$FF = \frac{V_{ocN} - \ln(V_{ocN} + 0.72)}{V_{ocN} + 1} \quad (4.10)$$

Όπου σαν V_{ocN} συμβολίζεται η κανονικοποιημένη τάση ανοιχτοκύκλωσης:

$$V_{ocN} = \frac{q}{nkT} V_{oc} \quad (4.11)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι κυψέλες με μεγάλες τάσεις θα έχουν και μεγάλο FF. Ωστόσο, σε μια δεδομένη υλική διάταξη δεν συνηθίζεται να υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις στην τάση ανοικτού κυκλώματος. Για παράδειγμα, σε ακτινοβολία G_{sc} , η διαφορά μεταξύ της μέγιστη τάσης ανοικτού κυκλώματος μιας εργαστηριακή διάταξης πυριτίου και μιας τυπικής εμπορικής ηλιακής κυψέλης είναι περίπου 120 mV, δίνοντας μέγιστο FF 0.85 και 0.83 αντίστοιχα. Ωστόσο, η διακύμανση στον μέγιστο FF μπορεί να είναι σημαντική για ηλιακές κυψέλες κατασκευασμένες από διαφορετικά υλικά. Για παράδειγμα, μια ηλιακή κυψέλη GaAs μπορεί να έχει FF κοντά στο 0.89.

Η ανωτέρω εξίσωση δείχνει επίσης τη σημασία του παράγοντα ιδανικότητας, γνωστός και ως "παράγοντας n" μιας ηλιακής κυψέλης. Ο παράγοντας ιδανικότητας είναι μέτρο της ποιότητας της επαφής και ενδεικτικός της επανασύνδεσης στην ηλιακή κυψέλη. Για τους απλούς μηχανισμούς επανασύνδεσης που περιεγράφηκαν σε παραπάνω κεφάλαιο, ο παράγοντας n έχει την τιμή 1. Ωστόσο, μερικοί μηχανισμοί επανασύνδεσης, ιδιαίτερα αν είναι ισχυροί, μπορεί να εισαγάγουν παράγοντα ιδανικότητας με τιμή 2. Η υψηλή τιμή του παράγοντα n, όχι μόνο υποβαθμίζει τον FF αλλά μιας και συνεπάγεται υψηλά επίπεδα επανασύνδεσης, θα έχει σαν αποτέλεσμα χαμηλές τιμές τάσεως ανοιχτού κυκλώματος.

Όλες οι εξισώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω περιγράφουν τον ιδανικό μέγιστο παράγοντα πλήρωσης FF, στην πραγματικότητα όμως ο παράγοντας αυτός θα είναι χαμηλότερος καθώς παρεμβάλλονται και απώλειες εξαιτίας παρασιτικών αντιστάσεων. Γι αυτό το λόγο ο FF προσδιορίζεται συνήθως από τις μετρήσεις της IV χαρακτηριστικής, όπως περιεγράφηκε αρχικά.

4.10 ΑΠΟΔΟΣΗ

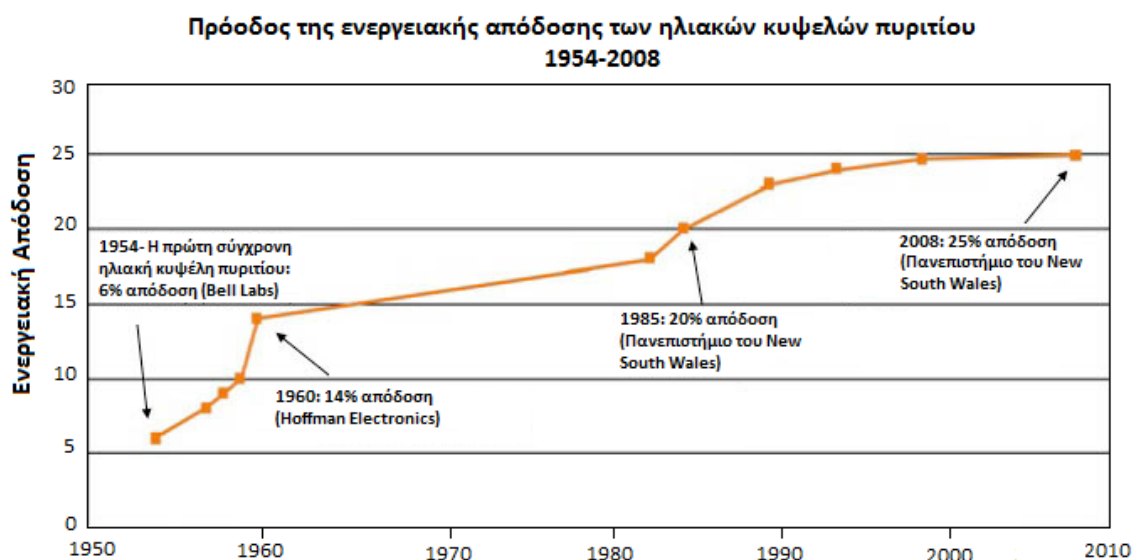
Η απόδοση είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος παράγοντας για την σύγκριση της συμπεριφοράς των πλαισίων και των κυψελών. Σαν απόδοση ορίζεται ο λόγος της ισχύος που παράγεται από ένα πλαίσιο προς την εισερχόμενη ισχύ από τον ήλιο. Παρόλο, που η απόδοση χαρακτηρίζει την συμπεριφορά του πλαισίου, επηρεάζεται έντονα από το φάσμα και την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αλλά και την θερμοκρασία της ηλιακής κυψέλης. Επομένως, οι συνθήκες κάτω από τις οποίες μετράται η απόδοση θα πρέπει να είναι καλά ελεγμένες ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ διαφορετικών πλαισίων. Οι ηλιακές κυψέλες του εμπορίου μετριούνται σε συνθήκες AM 1.5 και 25°C.

Η απόδοση μιας ηλιακής κυψέλης προσδιορίζεται ως το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρισμό και δίνεται από την σχέση:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{P}_{\max}}{\mathbf{P}_{\text{in}}} = \frac{\mathbf{V}_{\text{oc}} \mathbf{I}_{\text{sc}} \mathbf{FF}}{\mathbf{P}_{\text{in}}} \quad (4.12)$$

4.11 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ

Ο σχεδιασμός μιας ηλιακής κυψέλης απαιτεί τον προσδιορισμό των δομικών παραμέτρων της, που θα οδηγήσουν στην μεγιστοποίηση της απόδοσης, μέσα από ένα σύνολο περιορισμών. Αυτοί οι περιορισμοί θα καθοριστούν από το εργασιακό περιβάλλον στο οποίο θα γίνει η κατασκευή των κυψελών. Για παράδειγμα, σε ένα εμπορικό περιβάλλον όπου σκοπός είναι να κατασκευαστούν ηλιακές κυψέλες σε όσο το δυνατόν πιο ανταγωνιστικές τιμές, θα ληφθεί υπ'όψιν περισσότερο το κόστος της κατασκευής. Σε αντίθεση σε ένα ερευνητικό περιβάλλον, όπου σκοπός είναι να παραχθεί μία υψηλής ποιότητας κυψέλη, το κόστος έχει δευτερεύουσα σημασία και προέχει η μεγιστοποίηση της απόδοσης.



Διάγραμμα 4.4 Εξέλιξη της απόδοσης των ηλιακών κυψελών πυριτίου στο διάστημα 1954-2008 ^[11].

Η θεωρητική απόδοση της φωτοβολταϊκής μετατροπής είναι πάνω από 86.8 % ^[5]. Ωστόσο, το 86.8% προκύπτει από υπολογισμούς αναλυτικής ισορροπίας και δεν περιγράφει την υλοποίηση της διάταξης. Για ηλιακές κυψέλες πυριτίου, μια πιο αληθοφανής τιμή απόδοσης, κάτω από συνθήκες λειτουργίας μιας ηλιακής σταθεράς είναι 29%. Η μέγιστη απόδοση ηλιακής κυψέλης πυριτίου που έχει μετρηθεί έως τώρα είναι 24.7% σε AM 1.5. Η διαφορά ανάμεσα στις υψηλές θεωρητικές αποδόσεις και στις αποδόσεις που μετρούνται σε πραγματικές συνθήκες έγκειται σε δύο βασικούς παράγοντες.

Ο πρώτος είναι ότι οι προβλέψεις της μέγιστης θεωρητικής απόδοσης δέχονται πως κάθε φωτόνιο με ενέργεια ίση της ενέργειας διακένου του ημιαγωγού θα απορριφθεί από το υλικό. Αυτό επιτυγχάνεται θεωρητικά δημιουργώντας μια στρώμα από κυψέλες με υλικά διαφορετικών ενεργειών διακένου, καθεμία από τις οποίες θα απορροφά μόνο τα φωτόνια που αντιστοιχούν ακριβώς στο ενεργειακό της διάκενο.

Ο δεύτερος παράγοντας είναι ότι οι προβλέψεις της μέγιστης θεωρητικής απόδοσης δέχονται υψηλό ρυθμό συγκέντρωσης φορέων. Υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία και η επίδραση από τις αντιστάσεις θεωρούνται αμελητέες σε μια συγκεντρωτική ηλιακή κυψέλη, η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας θα προκαλέσει αντίστοιχη αύξηση στο ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}). Δεδομένου ότι η τάση ανοιχτού κύκλου (V_{oc}) εξαρτάται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης, θα αυξηθεί και αυτή λογαριθμικά με την ακτινοβολία. Επιπλέον, επειδή ο μέγιστος παράγοντας πλήρωσης (FF) αυξάνεται με την V_{oc} , θα αυξηθεί και αυτός με την συγκέντρωση. Η αύξηση των V_{oc} και FF με την συγκέντρωση επιτρέπει στις συγκεντρωτικές κυψέλες να επιτύχουν μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης.

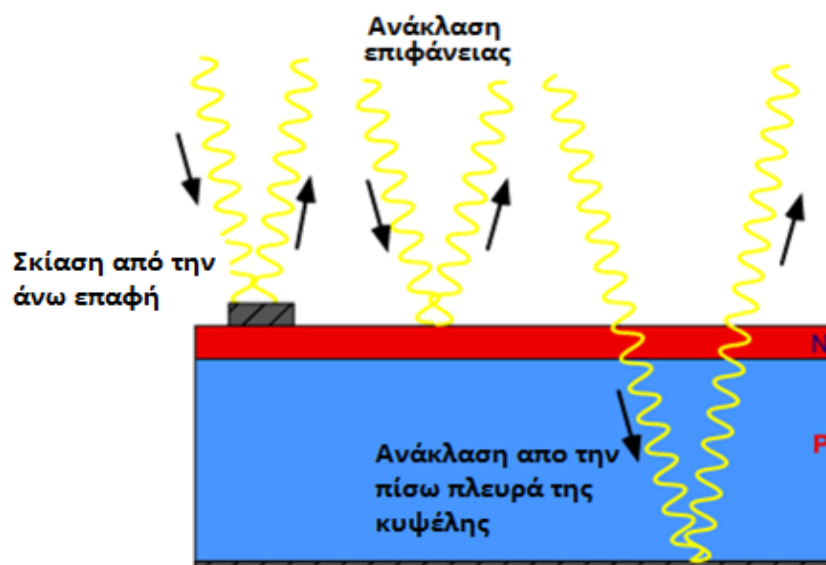
Συγκεντρωτικά, λοιπόν, οι αρχές για την μεγιστοποίηση της απόδοσης μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης είναι^[7]:

- Βέλτιστο ενεργειακό διάκενο.
- Πλήρης απορρόφηση φωτονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από το ενεργειακό διάκενο.
- Τέλειος διαχωρισμός των παραγόμενων φορέων στην περιοχή της επαφής (w).
- Υψηλό ενσωματωμένο δυναμικό διάχυσης της διόδου.
- Μηδενικές απώλειες κατά τη μεταφορά των παραγόμενων φορέων (από επανασυνδέσεις) μέχρι τα σημεία των ωμικών επαφών.
- Μηδενικές ηλεκτρικές απώλειες.

Παρακάτω γίνεται ανάλυση των μεγεθών σε μία κυψέλη που σχετίζονται με τις άνω απαιτήσεις, καθώς και περιγραφή της δομής της κυψέλης.

4.11.1 ΟΠΤΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Οι οπτικές απώλειες επιδρούν ισχυρά στην παραγόμενη ισχύ της ηλιακής κυψέλης μειώνοντας το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Οι οπτικές απώλειες αποτελούνται από φως το οποίο δεν κατάφερε να δημιουργήσει ζεύγος οπής-ηλεκτρονίου, είτε λόγω ανάκλασης στην εμπρόσθια επιφάνεια, είτε λόγω μη απορρόφησης από την κυψέλη. Για τους κοινούς ημιαγωγούς κατασκευής ηλιακών κυψελών, όλο το ορατό φάσμα διαθέτει την απαιτούμενη ενέργεια ώστε να δημιουργήσει ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων, άρα ιδανικά μπορεί να απορριφθεί ολόκληρο το ορατό φως.



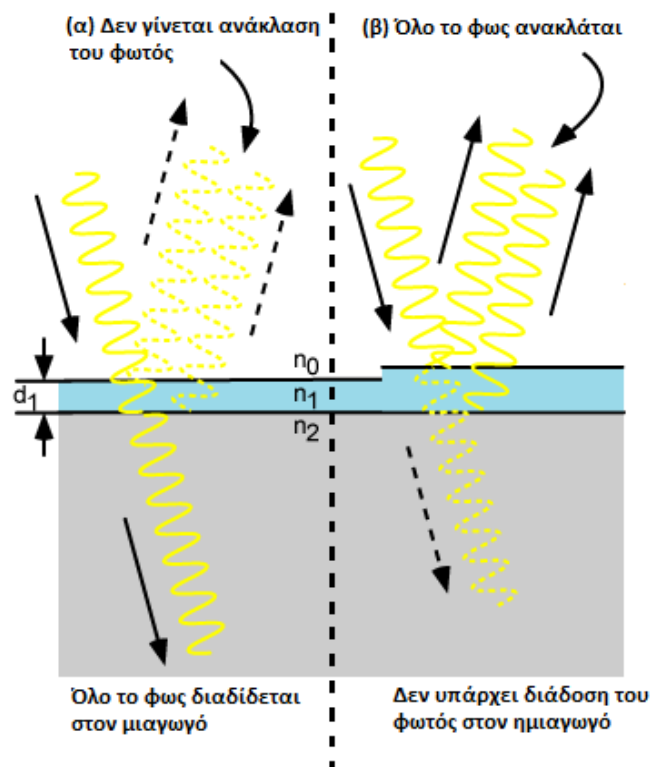
Σχήμα 4.9 Παράγοντες που επιφέρουν οπτικές απώλειες σε μια ηλιακή κυψέλη^[5].

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την μείωση των οπτικών απωλειών:

- Ελαχιστοποίηση του μεγέθους της άνω μεταλλικής επαφής.
- Χρήση αντιανακλαστικής επίστρωσης στην επιφάνεια της κυψέλης.
- Η ανάκλαση μπορεί να περιοριστεί με την τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας (surface texturing).
- Η ηλιακή κυψέλη μπορεί να κατασκευαστεί λεπτότερη ώστε να αυξηθεί η απορροφητικότητα της.
- Το μήκος του οπτικού δρόμου στην ηλιακή κυψέλη μπορεί να αυξηθεί με το συνδυασμό της τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας και της παγίδευσης του φωτός (light trapping).

4.11.2 ΑΝΤΙΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗ

Οι αντανανακλαστικές επιστρώσεις στις ηλιακές κυψέλες είναι όμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται και σε άλλα οπτικά εξαρτήματα όπως τους φακούς των φωτογραφικών μηχανών. Αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα διηλεκτρικό υλικού, με ειδικά επιλεγμένο πάχος ώστε η επίδραση των παρεμβολών στην επίστρωση να αναγκάζει το κύμα που ανακλάται από την αντανανακλαστική επίστρωση της άνω επιφάνειας να είναι εκτός φάσης με το ανακλώμενο κύμα της επιφάνειας του ημιαγωγού. Αυτά τα εκτός φάσης αντανανακλώμενα κύματα αλληλοεξουδετερώνονται αποδίδοντας συνολική ενέργεια ανάκλασης ίση με μηδέν.



Σχήμα 4.10 Συμπεριφορά ημιαγωγού σε φως α) με χρήση αντανανακλαστικής επίστρωσης

β) χωρίς χρήση αντανανακλαστικής επίστρωσης^[5].

Το πάχος της αντανανακλαστικής επίστρωσης επιλέγεται έτσι ώστε το μήκος κύματος στο διηλεκτρικό υλικό να είναι το ένα τέταρτο του μήκους κύματος της εισερχόμενης ακτινοβολίας. Για ένα τέταρτο μήκος κύματος αντανανακλαστικής επίστρωσης από διαφανές υλικό με δείκτη διάθλασης n_1 και προσπίπτων φως στην επίστρωση με μήκος κύματος λ_0 , το πάχος d_1 που προκαλεί ελάχιστη ανάκλαση υπολογίζεται από:

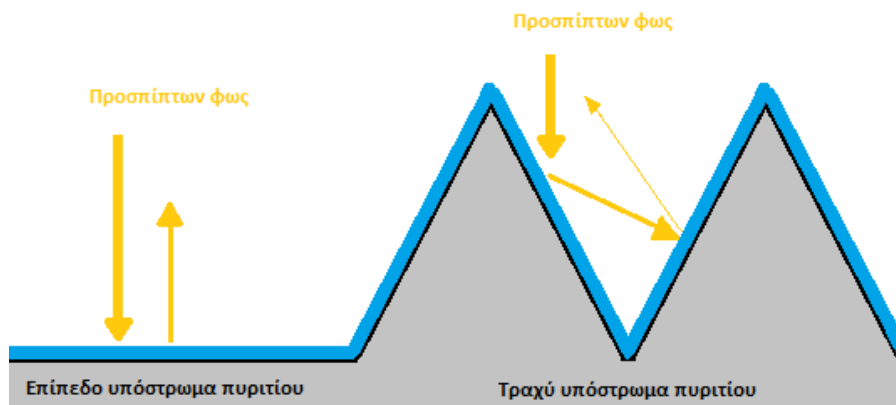
$$d_1 = \frac{\lambda_0}{4n_1} \quad (4.13)$$

Η ανάκλαση μπορεί να ελαχιστοποιηθεί περαιτέρω, εάν ο δείκτης διάθλασης της αντανάκλαστικής επίστρωσης γίνει ίσος με το γεωμετρικό μέσο των υλικών εκατέρωθεν των πλευρών της. Δηλαδή, του γυαλιού ή του αέρα (n_0) και του ημιαγωγού (n_2). Αυτό εκφράζεται από:

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad (4.14)$$

4.11.3 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

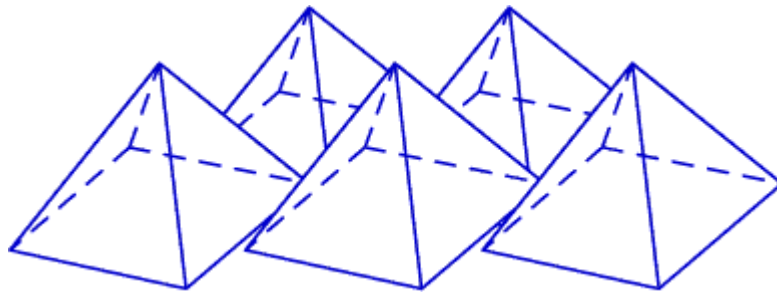
Η τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας, είτε συνδυασμένη με αντανάκλαστική επίστρωση είτε μόνη της, μπορεί να συμβάλει στην μείωση των ανακλάσεων. Κάθε "τραχύτητα" που υπάρχει στην επιφάνεια του υλικού μειώνει τα ποσά ανάκλασης, αφού αυξάνει την πιθανότητα του ανακλώμενου φωτός να ξαναχτυπήσει την επιφάνεια αντί να χαθεί στο περιβάλλον. ^[5]



Σχήμα 4.11 Σχηματική αναπαράσταση της πρόσπτωσης φωτός σε τραχιά και λεία επιφάνεια.

Όταν το προσπίπτον φως έντασης I χτυπήσει την λεία επιφάνεια με συντελεστή ανάκλασης R ($0 < R < 1$), θα δημιουργηθεί ένα ανακλώμενο φως, RI , με γωνία ανάκλασης ίδια με την γωνία πρόσπτωσης, επομένως μπορεί εύκολα να χαθεί στο περιβάλλον. Στην τραχιά επιφάνεια, όμως, το ανακλώμενο φως θα ξαναχτυπήσει την επιφάνεια του πυριτίου, μειώνοντας έτσι την ανάκλαση σε R^2I , με αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας της απορρόφησης του φωτός από τον ημιαγωγό.

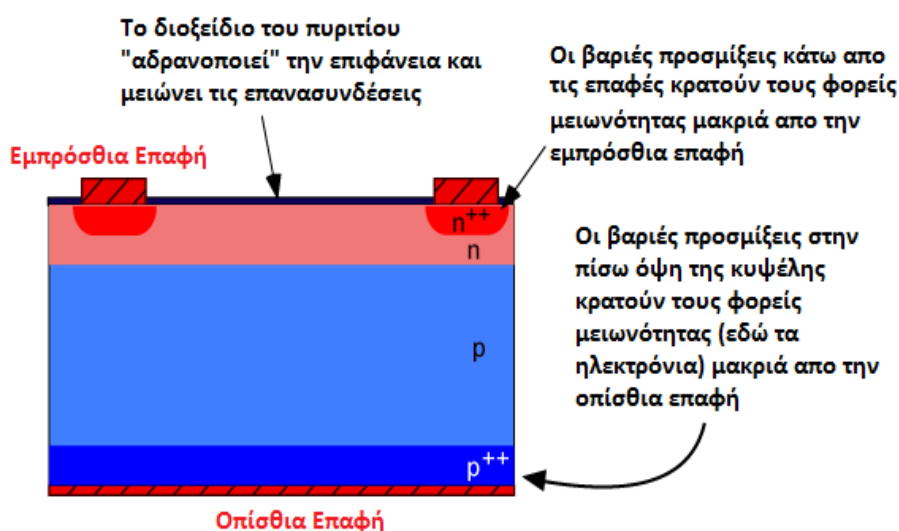
Η τροποποίηση της τραχύτητας μιας επιφάνειας μπορεί να επιτευχθεί με ποικίλους τρόπους. Η τραχύτητα ενός υποστρώματος μονοκρυσταλλικού πυριτίου μπορεί να τροποποιηθεί χαράσσοντας τις όψεις των επιπέδων του κρυστάλλου. Η κρυσταλλική δομή του πυριτίου θα οδηγήσει σε μία επιφάνεια αποτελούμενη από πυραμίδες, εάν γίνει σωστή ευθυγράμμιση με τα εσωτερικά άτομα. Μία τέτοια πυραμίδα φαίνεται στο **σχήμα 4.12**. Αυτός ο τύπος τροποποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας του πυριτίου ονομάζεται τροποποίηση "τυχαίας πυραμίδας", και χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία μονοκρυσταλλικών πλακών πυριτίου.



Σχήμα 4.12 Πυραμίδα τετραγωνικής βάσης που σχηματίζεται από την κατάλληλη τροποποίηση της επιφάνειας της κυψέλης κρυσταλλικού πυριτίου^[5].

4.11.4 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΠΑΝΑΣΥΝΔΕΣΗΣ

Οι απώλειες επανασύνδεσης επιδρούν τόσο στην συγκέντρωση του ρεύματος (και κατά συνέπεια, στο ρεύμα βραχυκύκλωσης) όσο και στο ρεύμα διάχυσης ορθής πολώσεως (και κατά συνέπεια, στην τάση ανοιχτοκύκλωσης). Οι επανασυνδέσεις κατατάσσονται ανάλογα με την περιοχή της κυψέλης στην οποία δημιουργούνται. Οι κύριες περιοχές επανασυνδέσεις είναι αυτές της επιφάνειας (επανασύνδεση επιφάνειας) και του υποστρώματος της ηλιακής κυψέλης (επανασύνδεση υποστρώματος). Η περιοχή απογύμνωσης είναι ακόμα μια περιοχή στην οποία μπορεί να συμβεί επανασύνδεση (επανασύνδεση περιοχής απογύμνωσης).

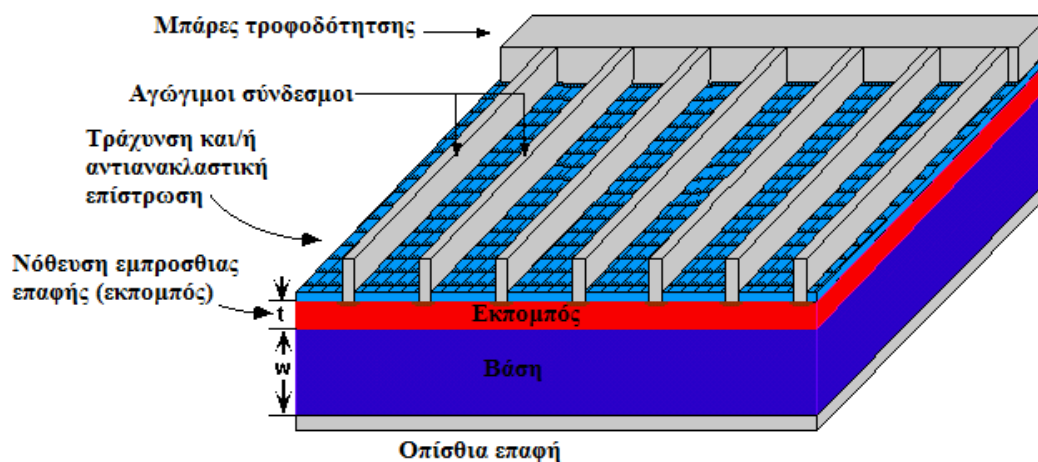


Σχήμα 4.13 Τεχνικές μείωσης της επανασύνδεσης της επιφάνειας.

Η επανασύνδεση της επιφάνειας έχει καταλυτική επίδραση τόσο στο ρεύμα βραχυκύκλωσης όσο και στην τάση ανοιχτοκύκλωσης. Οι υψηλοί ρυθμοί επανασύνδεσης στην άνω επιφάνεια έχουν άμεσο αντίκτυπο στο ρεύμα βραχυκύκλωσης καθώς αποτελεί την περιοχή με τη μεγαλύτερη παραγωγή φορέων στην ηλιακή κυψέλη. Η εξάλειψη των φαινομένων επανασύνδεσης στην άνω επιφάνεια, επιτυγχάνεται με τη μείωση του αριθμού των σπασμένων δεσμών του πυριτίου, χρησιμοποιώντας ένα στρώμα "αδρανοποίησης" στην άνω επιφάνεια. Στην πλειοψηφία των βιομηχανιών ηλεκτρονικής γίνεται χρήση ενός στρώματος διοξειδίου του πυριτίου για την αδρανοποίηση της επιφάνειας. Για τις ηλιακές κυψέλες του εμπορίου, εΐθισται η χρήση διηλεκτρικών στρωμάτων όπως το νιτρικό πυρίτιο.

4.11.5 ΔΟΜΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ

Στις ηλιακές κυψέλες πυριτίου, ο βασικός σχεδιασμός περιορίζεται από ανακλάσεις επιφάνειας, συγκεντρώσεις φορέων, επανασυνδέσεις και παρασιτικές αντιστάσεις, παράγοντες που οδηγούν σε μια διάταξη με μέγιστο θεωρητικό βαθμό απόδοσης 25%. Παρακάτω φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση μιας τέτοιας κυψέλης.



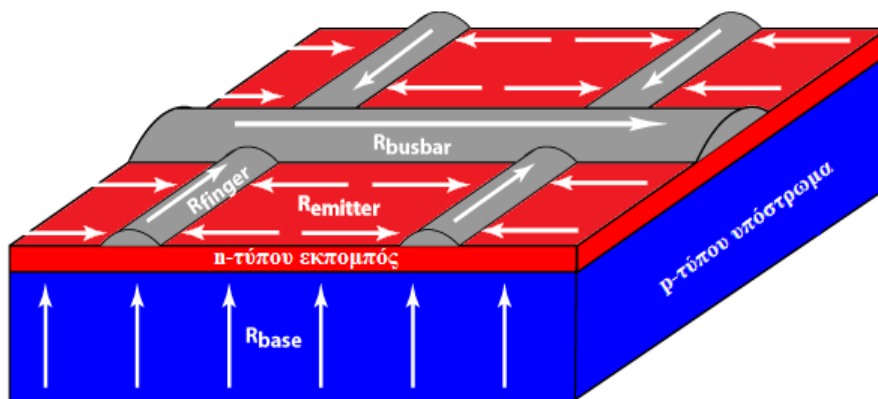
Σχήμα 4.14 Σχηματική αναπαράσταση ηλιακής κυψέλης πυριτίου. Το άνω στρώμα ονομάζεται εκτομπός και το υλικό του υποστρώματος ονομάζεται βάση.

Βασικοί παράγοντες για την κατασκευή μιας κυψέλης υψηλών αποδόσεων, είναι η μεγιστοποίηση της απορρόφησης, καθώς και η ελαχιστοποίηση των επανασυνδέσεων. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες των παρασιτικών αντιστάσεων. Τόσο οι αντιστάσεις σειράς R_s , όσο και οι παράλληλες αντιστάσεις R_{shunt} μειώνουν τον παράγοντα πλήρωσης και την απόδοση μιας ηλιακής κυψέλης.

Η **παράλληλη αντίσταση** (R_{sh}) αποτελεί πρακτικά μια διαρροή ρεύματος στην επαφή p-n της κυψέλης, η οποία οδηγεί σε αύξηση του σκοτεινού ρεύματος διάχυσης και μπορεί να προκληθεί είτε από ατέλειες του υλικού είτε από την υποβάθμιση του πλαισίου λόγω της έκθεσής του σε εξωτερικές συνθήκες.

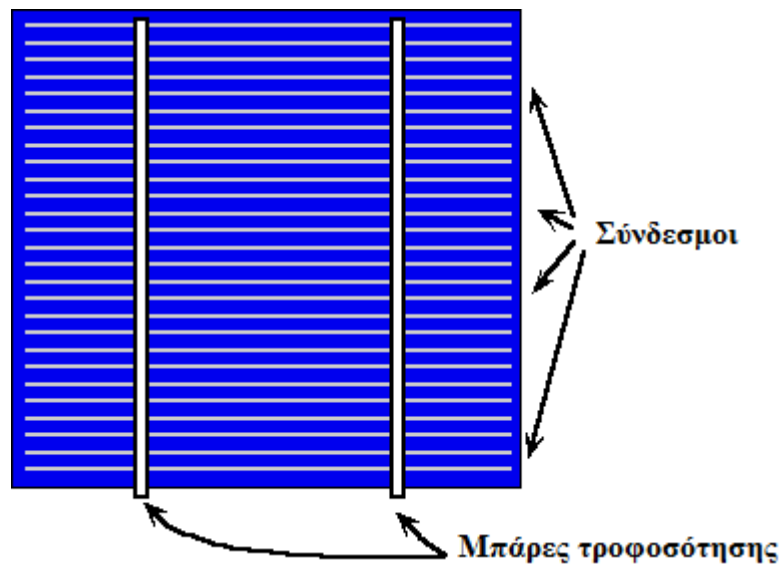
- Οι ατέλειες του υλικού μπορούν να αποδοθούν σε υψηλής πυκνότητας εξαρμώσεις, κενά ή ακαθαρσίες που περνούν στον κρύσταλλο κατά την επεξεργασία των πλακιδίων του πυριτίου. ^[12]
- Η συνεχόμενη λειτουργία του πλαισίου μπορεί να επιφέρει κατάλοιπα του εκπομπού στις άκρες της κυψέλης. Επιπλέον λόγω εξωτερικών συνθηκών μπορεί να εμφανιστούν ραγίσματα τρύπες ή και γρατζουνιές στην επιφάνεια της κυψέλης. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες θα οδηγήσουν σε χαμηλή παράλληλη αντίσταση.

Η **αντίσταση σειράς** (R_s), αποτελείται από τη διάταξη της άνω επαφής, από την αντίσταση του εκπομπού και την αντίσταση της βάσης όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Από αυτά τα στοιχεία, ο εκπομπός και το άνω πλέγμα, το οποίο αποτελείται από τους αγωγίμους συνδέσμους (fingers) και τις μπάρες τροφοδότησης (busbars), είναι οι κυρίαρχες συνιστώσες της συνολικής αντίστασης σειράς. Γι αυτό κατά το σχεδιασμό ηλιακών κυψελών δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη βελτιστοποίησή των παραπάνω τμημάτων για την επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων.



Σχήμα 4.15 Αναπαράσταση της ροής του ρεύματος στην κυψέλη καθώς και των τμημάτων της κυψέλης που σχηματίζουν την αντίσταση σειράς.

Οι μεταλλικές άνω επαφές είναι απαραίτητες για να συλλέγουν το ρεύμα που παράγεται από την ηλιακή κυψέλη. Οι "μπάρες τροφοδότησης" είναι συνδεδεμένες απευθείας με τους εξωτερικούς αγωγούς, ενώ οι "αγώγιμοι σύνδεσμοι" είναι περιοχές από φινιρισμένο μέταλλο οι οποίες συγκεντρώνουν το ρεύμα και το μεταφέρουν στους αγώγιμους συνδέσμους. Το σημείο κλειδί στην κατασκευή του άνω τμήματος μιας κυψέλης, είναι η ισορρόπηση μεταξύ των υψηλών παρασιτικών απωλειών που παράγονται όταν το πλέγμα είναι αραιό και της υψηλής ανάκλασης που προκαλείται όταν το μεταλλικό πλέγμα της επιφάνειας γίνει πιο πυκνό.

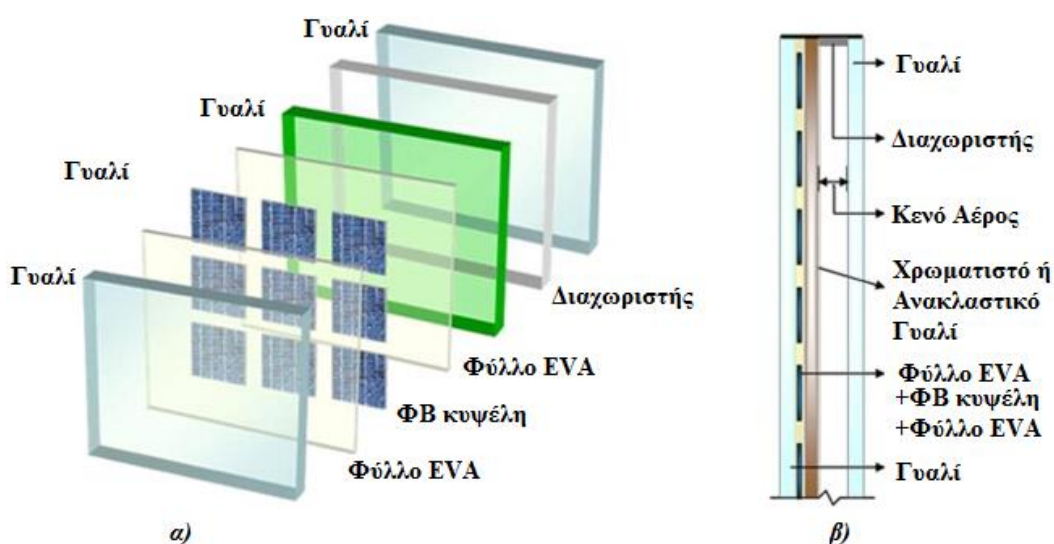


Σχήμα 4.16 Άνω τμήμα της ηλιακής κυψέλης. Οι μπάρες τροφοδότησης ενώνουν μεταξύ τους τους συνδέσμους και μεταφέρουν το ρεύμα στους εξωτερικούς αγωγούς [5].

4.12 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από μια σειρά διασυνδεδεμένων ηλιακών κυψελών (συνήθως 36 κυψέλες συνδεδεμένες εν σειρά) ενθυλακωμένες σε μια ενιαία σταθερή διάταξη. Βασικός στόχος της ενθυλάκωσης είναι η προστασία, τόσο των ίδιων των κυψελών, όσο και των καλωδίων διασύνδεσης από τις αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες μπορεί να εκτεθούν. Οι ηλιακές κυψέλες, λόγω του λεπτού σχεδιασμού τους, είναι επιρρεπείς σε μηχανικές βλάβες, εάν παραμείνουν απροστάτευτες. Επιπλέον, το μεταλλικό πλέγμα στην άνω επιφάνεια της κυψέλης καθώς και τα καλώδια διασύνδεσης, μπορεί να υποστούν διάβρωση από το νερό ή τους υδρατμούς. Οι δύο βασικές λειτουργίες της ενθυλάκωσης, λοιπόν, είναι η προστασία της ηλιακής κυψέλης από μηχανική βλάβη και από νερό ή υδρατμούς που μπορούν να διαβρώσουν τις ηλεκτρικές επαφές.

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι φ/β πλαισίων με διαφορετική κατασκευαστική δομή, ανάλογα με τον τύπο των κυψελών τους ή την χρήση για την οποία προορίζονται. Έτσι, για παράδειγμα, οι κυψέλες άμορφου πυριτίου ενθυλακώνονται συνήθως σε μια εύκαμπτη διάταξη, ενώ οι κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου σε μια πιο σταθερή διάταξη με γυάλινη εμπρόσθια επιφάνεια όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.17**.



Σχήμα 4.17 Δομή ηλιακής κυψέλης ενός πλαισίου. α) Εμπρόσθια όψη β) πλάγια όψη

4.12.1 ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Εμπρόσθια επιφάνεια: Η εμπρόσθια επιφάνεια ενός φ/β πλαισίου θα πρέπει να έχει υψηλή μεταδοτικότητα στα μήκη κύματος που απορροφούνται από τις κυψέλες του. Στις ηλιακές κυψέλες πυριτίου, η μεταδοτικότητα του γυαλιού που χρησιμοποιείται στην επιφάνεια θα πρέπει να έχει ένα εύρος μήκος κύματος 350 nm με 1200 nm. Επιπλέον, η ανάκλαση της εμπρόσθιας επιφάνειας θα πρέπει να είναι χαμηλή. Ενώ θεωρητικά η ανάκλαση θα μπορούσε να μειωθεί με τη χρήση μιας αντιανακλαστικής επίστρωσης, στην πράξη οι επιστρώσεις αυτές δεν είναι αρκετά ανθεκτικές ώστε να αντέχουν τις συνθήκες έκθεσης του πλαισίου. Μια εναλλακτική τεχνική που χρησιμοποιείται για την μείωση των ανακλάσεων, όπως έχει περιγραφεί και παραπάνω, είναι η τράχυνση της επιφάνειας. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση η σκόνη και οι ακαθαρσίες είναι πιθανότερο να επικάθονται στην επιφάνεια, παρά να παρασύρονται από το νερό ή τον αέρα. Γι αυτό το λόγο, πλαίσια τέτοιου τύπου δεν είναι «αυτοκαθαριζόμενα», με αποτέλεσμα το πλεονέκτημα της μειωμένης ανάκλασης να αντισταθμίζεται από τις απώλειες λόγω συγκέντρωσης ακαθαρσιών στην επιφάνεια.

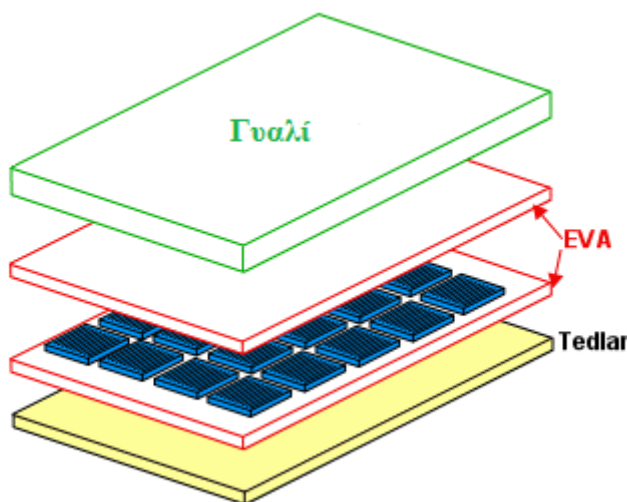
Πέρα από τις ιδιότητες ανάκλασης και μετάδοσης, το υλικό της άνω επιφάνειας θα πρέπει να είναι αδιάβροχο, να έχει αντοχή σε κρούσεις, να είναι σταθερό μετά από μεγάλες εκθέσεις σε UV ακτινοβολία και να έχει χαμηλή θερμική αντίσταση. Η διείσδυση νερού ή υδρατμού στο φ/β πλαίσιο θα διαβρώσει τις μεταλλικές επαφές και τις συνδέσεις, με συνέπεια να μειώσει δραστικά το χρόνο ζωής του πλαισίου. Στα περισσότερα πλαίσια η εμπρόσθια κάλυψη χρησιμοποιείται για να προσφέρει μηχανική αντοχή και σταθερότητα στο πλαίσιο, γι αυτό το λόγο η εμπρόσθια (είτε η πίσω) επιφάνεια του πλαισίου θα πρέπει να είναι άκαμπτη και σταθερή ώστε να προστατεύει τις κυψέλες και τις καλωδιώσεις.

Υπάρχουν πολλές επιλογές όσον αφορά τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην εμπρόσθια επιφάνεια όπως είναι το ακρυλικό, το πολυμερές και το γυαλί. Είθισται να χρησιμοποιείται ψημένο γυαλί, χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο (low-iron-glass), επειδή συνδυάζει χαμηλή τιμή με αντοχή, σταθερότητα, αντίσταση στο νερό και σε αέρια και καλές ιδιότητες.

Υλικό Ενθυλάκωσης: Το υλικό ενθυλάκωσης χρησιμοποιείται για να παρέχει πρόσφυση μεταξύ των ηλιακών κυψελών, της άνω επιφάνειας και της πίσω όψης του το φ/β πλαισίου. Το υλικό ενθυλάκωσης πρέπει να είναι σταθερό σε υψηλές θερμοκρασίες και σε υψηλές εκθέσεις υπεριώδους ακτινοβολίας. Επίσης πρέπει να είναι οπτικά διαφανές και να έχει χαμηλή θερμική αντίσταση. Ο EVA (αιθυλο-βινυλο-οξικός πολυεστέρας) είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό ενθυλάκωσης. Ο EVA χρησιμοποιείται σε λεπτά φύλλα που παρεμβάλλονται μεταξύ των κυψελών της άνω επιφάνειας και της πίσω όψης του πλαισίου. Η παραπάνω διάταξη στη συνέχεια θερμαίνεται στους 150 ° C για να πολυμεριστεί ο EVA και να δεθούν τα υλικά μεταξύ τους.

Οπίσθια επιφάνεια: Τα βασικά χαρακτηριστικά της οπίσθιας επιφάνειας του το φ/β πλαισίου είναι να έχει χαμηλή θερμική αντίσταση και να εμποδίζει τη διείσδυση νερού ή υδρατμού. Στα περισσότερα πλαίσια χρησιμοποιείται, ένα λεπτό φύλλο πολυμερούς, συνήθως Tedlar, στην πίσω επιφάνεια. Μερικά φ/β πλαίσια, γνωστά ως πλαίσια διπλής όψης έχουν σχεδιαστεί για να δέχονται το φως από την εμπρόσθια ή την πίσω όψη της ηλιακής κυψέλης. Στα φωτοβολταϊκά πλαίσια διπλής όψης τόσο το μπροστινό όσο και το πίσω μέρος τους πρέπει να είναι οπτικά διαφανές.

Περίβλημά: Ένας τελευταίος δομικός παράγοντας είναι το περίβλημα του πλαισίου. Ένα συμβατικό περίβλημα φ/β πλαισίου είναι συνήθως κατασκευασμένο από αλουμίνιο. Η δομή του περιβλήματος θα πρέπει να μην έχει προεξοχές, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε εγκαθίσεις νερού, σκόνης ή άλλων υλικών.



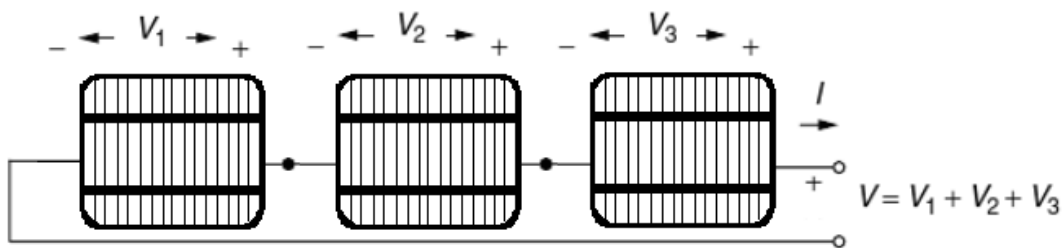
Σχήμα 4.18 Χαρακτηριστική σύνθεση ενός πλαισίου πυριτίου.

4.12.2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΥΨΕΛΩΝ ΣΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Οι βασικοί τρόποι σύνδεσης των κυψελών σε ένα πλαίσιο είναι δύο, είτε σε σειρά είτε παράλληλα μεταξύ τους. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι δύο αυτές διατάξεις.

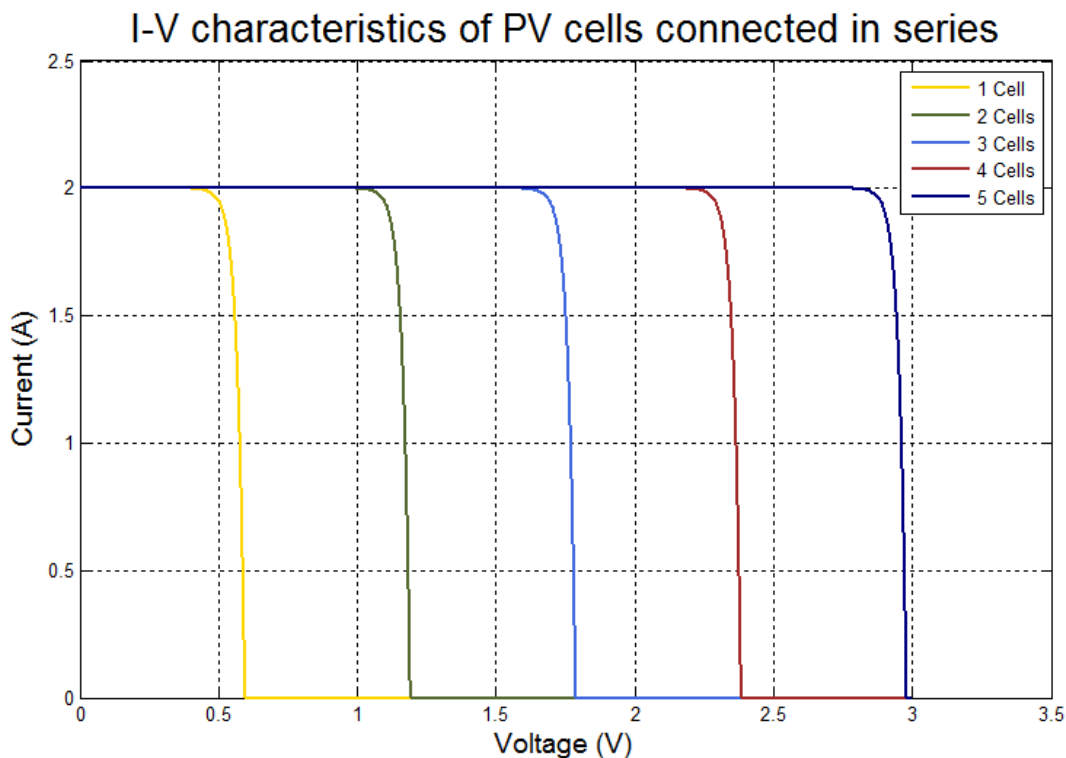
A) Εν σειρά

Όταν οι κυψέλες συνδέονται εν σειρά σε ένα πλαίσιο τότε αθροίζεται η τάση τους ενώ το ρεύμα που τις διαρρέει είναι κοινό για όλες τις κυψέλες.

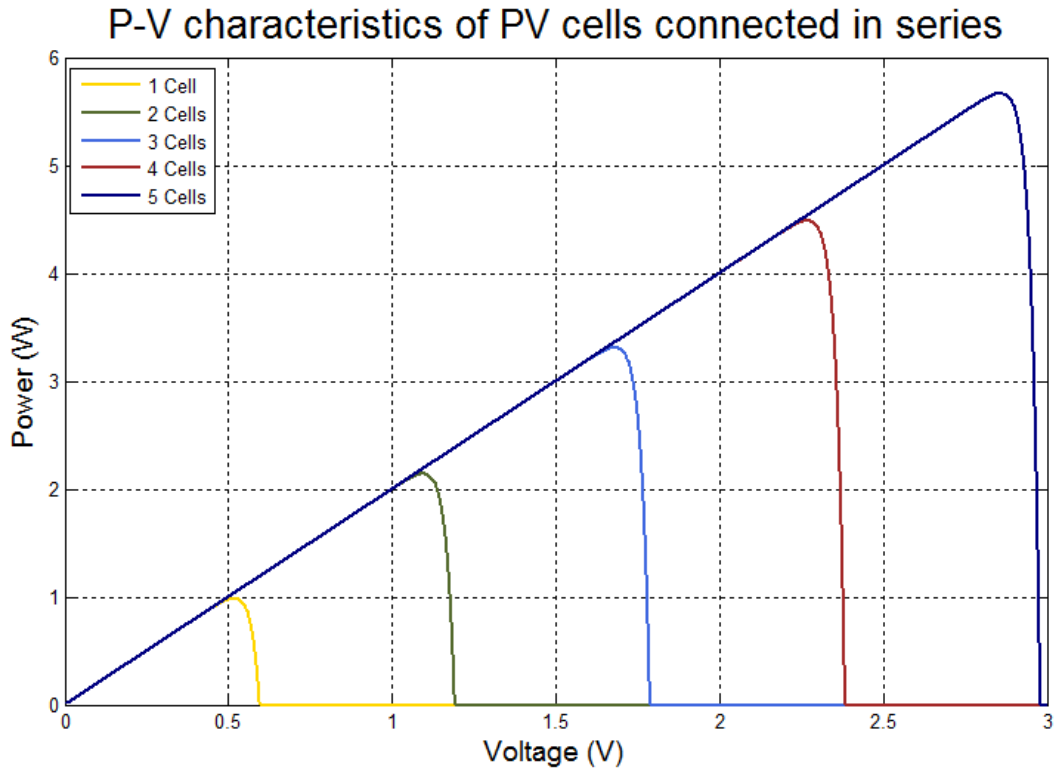


Σχήμα 4.19 Σύνδεση κυψελών σε σειρά.

Παρακάτω έγινε προσομοίωση της εν σειρά σύνδεσης για ιδανική κυψέλη με παράγοντα ιδανικότητας $n=1$, $V_{oc}=0.596$ V, $I_{sc}=2$ A σε συνθήκες θερμοκρασίας κυψέλης 25°C και ακτινοβολίας $1000\text{W}/\text{m}^2$.



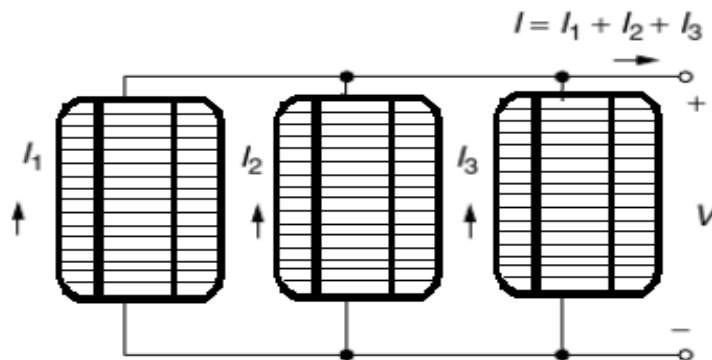
Διάγραμμα 4.5 I-V χαρακτηριστική εν σειρά συνδεδεμένων ιδανικών κυψελών.



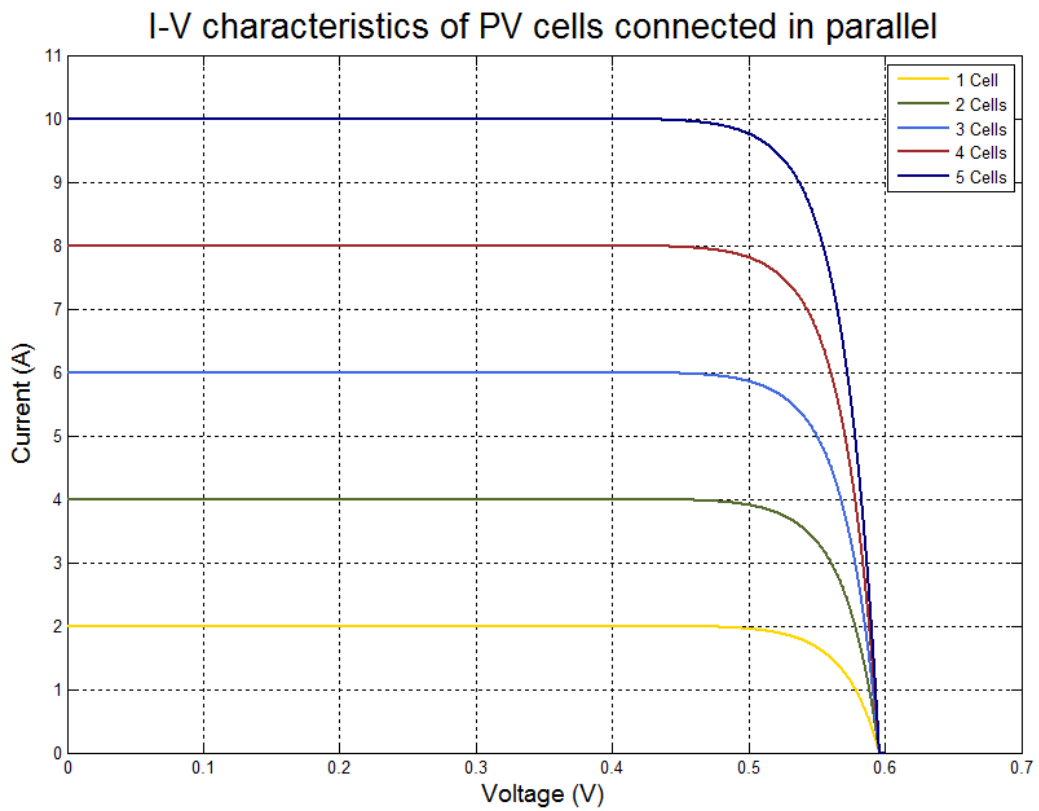
Διάγραμμα 4.6 P-V χαρακτηριστική εν σειρά συνδεδεμένων ιδανικών κυψελών.

B) Παράλληλα

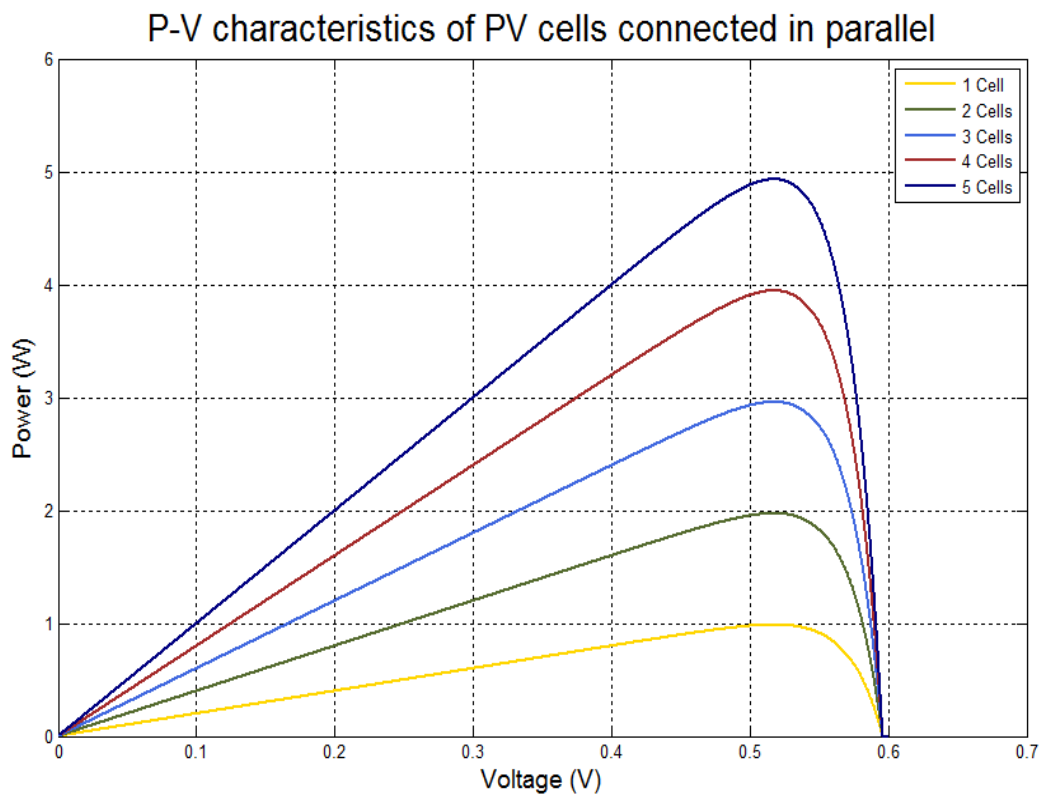
Όταν οι κυψέλες συνδέονται παράλληλα σε ένα πλαίσιο τότε αθροίζεται το ρεύμα τους ενώ η τάση στους ακροδέκτες τους είναι κοινή για όλες τις κυψέλες.



Σχήμα 4.20 Σύνδεση κυψελών παράλληλα.



Διάγραμμα 4.7 I-V χαρακτηριστική ιδανικών κυψελών συνδεδεμένων παράλληλα.



Διάγραμμα 4.8 P-V χαρακτηριστική ιδανικών κυψελών συνδεδεμένων παράλληλα.

4.13 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Εδώ παρουσιάζονται όλες οι γνωστές τεχνολογίες κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων.

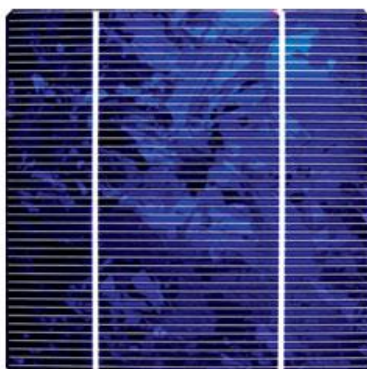
α. Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon)



Σχήμα 4.21 Κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Το μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης-επιφάνειας ή "ενεργειακής πυκνότητας". Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι επίσης το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά, ενώ η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 - 18% για το πλαίσιο. Στο εργαστήριο όμως έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%.

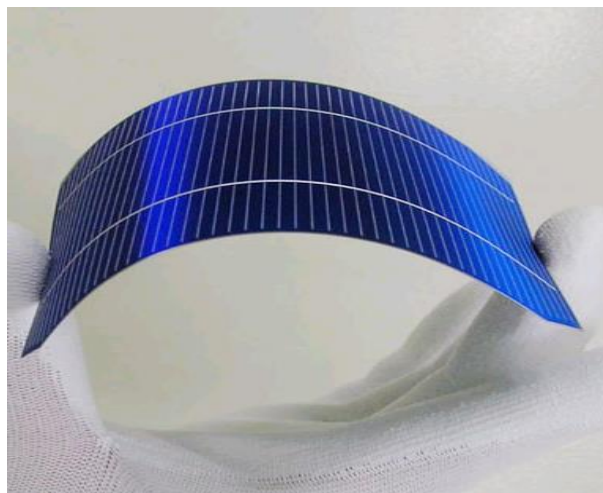
β. Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon)



Σχήμα 4.22 Κυψέλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Τα στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου αποτελούνται από επιμέρους, οπτικά διακριτές μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά. Το πάχος τους είναι περίπου 0.3 χιλιοστά, ενώ η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση"), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13% έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ).

γ. **Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)**



Σχήμα 4.23 Κυψέλη ταινίας πυριτίου.

Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις "παραδοσιακές τεχνικές" κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου. Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτού του τύπου έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.

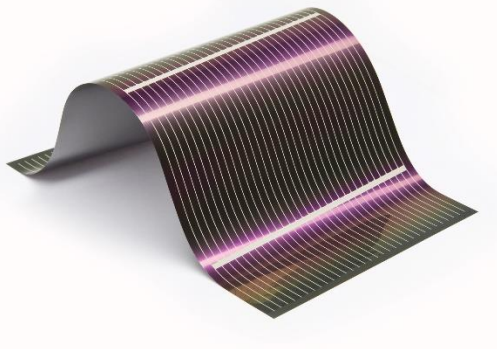
δ. Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη γάλλιου CIGS)



Σχήμα 4.24 Κυψέλη CIGS.

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

ε. Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)



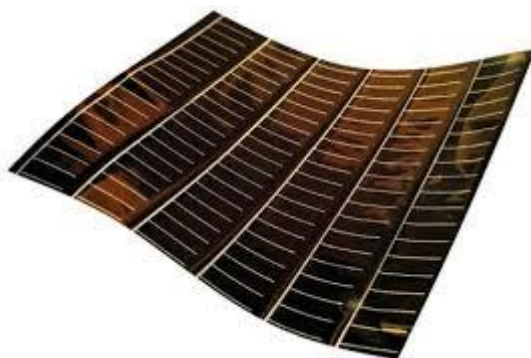
Σχήμα 4.25 Κυψέλη άμορφου πυριτίου.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι και λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι αρκετά χαμηλότερη.

Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά thin films πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6 έως 8% ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά ΦΒ, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παραχθεί η ίδια ενέργεια απαιτείται σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0.0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά.

στ. Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

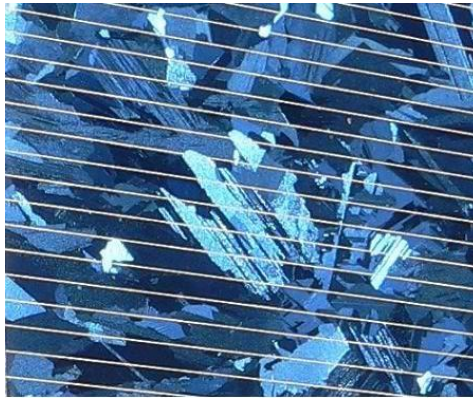


Σχήμα 4.26 Κυψέλη CdTe.

Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φθάσει το 16%. Τροχοπέδη για την χρήση του αποτελεί η έλλειψη του Τελλουρίου στη φύση καθώς και το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό (BIPV Building Integrated Photovoltaic).

ζ. Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. Τα πιο γνωστά εμπορικά υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι τα HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer), τα οποία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.



Σχήμα 4.27 Κυψέλη HIT.

Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2% και το οποίο σημαίνει ότι απαιτείται μικρότερη επιφάνεια για να επιτευχθεί η ίδια εγκατεστημένη ισχύς. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Άλλα πλεονεκτήματα για τα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία.

η. Άλλες τεχνολογίες

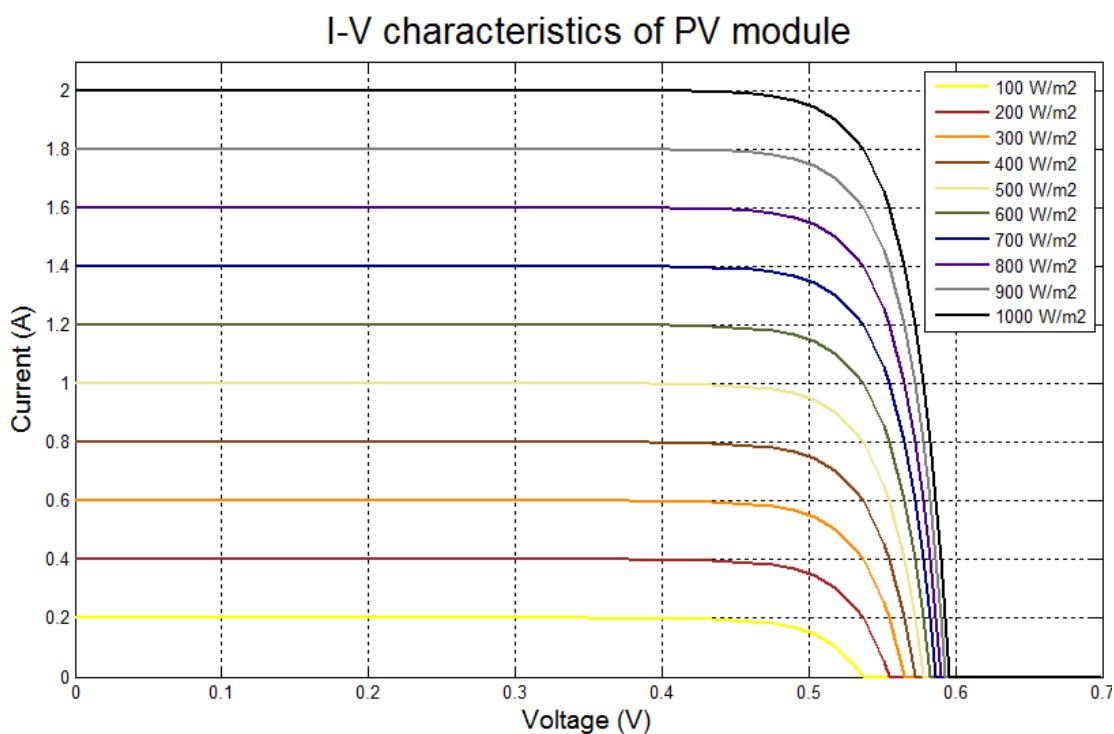
Καθώς η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς παρουσιάζονται όλο και περισσότερες μέθοδοι κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων. Παρακάτω αναφέρονται κάποιες από τις τεχνολογίες που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους:

- Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si).
- Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία.

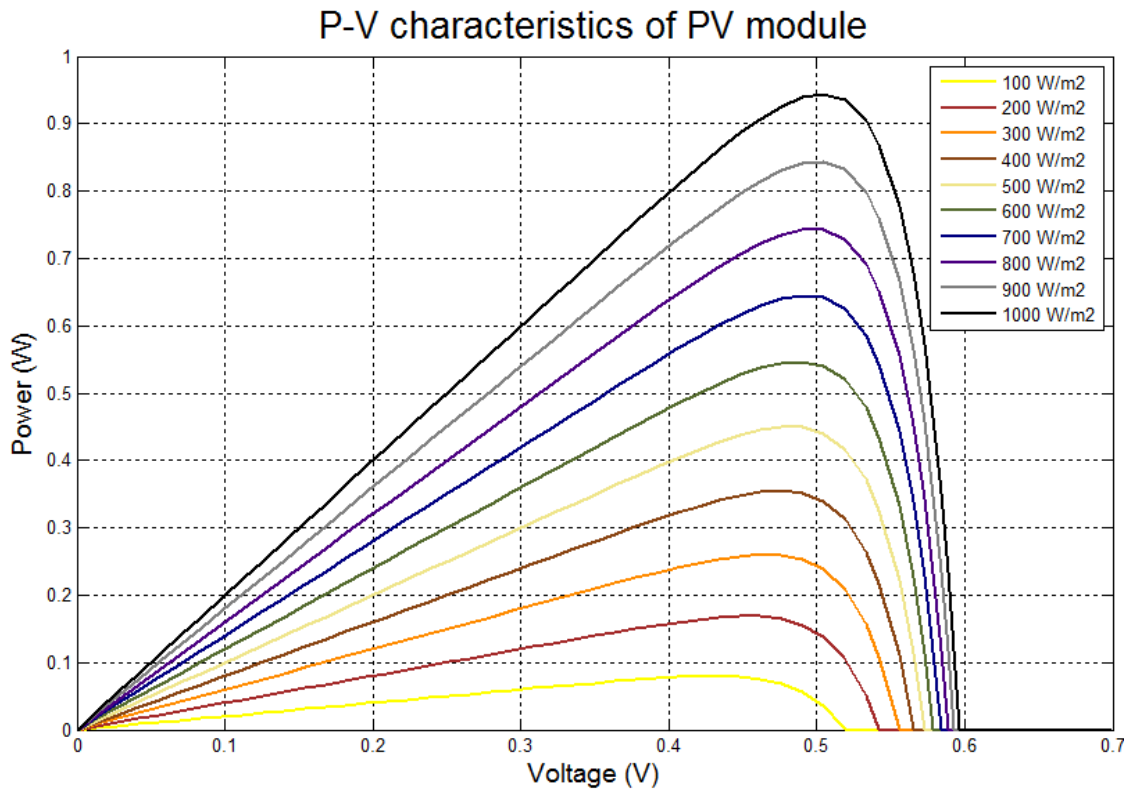
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

5.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΣΕ ΧΑΜΗΛΟ ΦΩΣ

Η ακτινοβολία έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην ισχύ του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να προσφέρει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει άμεση εξάρτηση από την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Όσο λιγότερη είναι η ακτινοβολία τόσο λιγότερο είναι και το ρεύμα που διαρρέει την διάταξη, αντιθέτως η τάση του μέγιστου σημείου ισχύος παραμένει σχετικά σταθερή όπως φαίνεται και στα διαγράμματα 5.1,5.2.



Διάγραμμα 5.1. I-V καμπύλες για ιδανική κυψέλη με $V_{oc} = 0.596 \text{ V}$, $I_{sc} = 2 \text{ A}$, $R_s = 0 \text{ ohm}$, $R_{shunt} = \infty$, συντελεστής ιδανικότητας $n=1$ και θερμοκρασία κυψέλης 25°C για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.



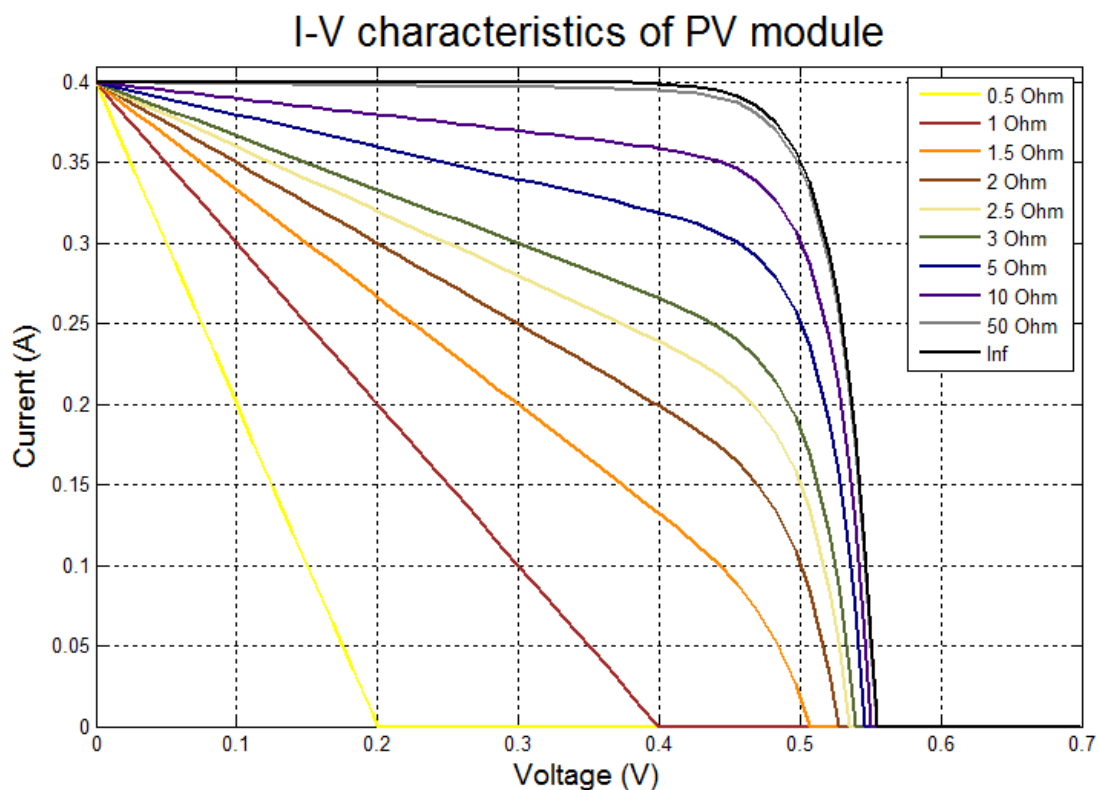
Διάγραμμα 5.2 P-V καμπύλες για ιδανική κυψέλη με $V_{oc} = 0.596 \text{ V}$, $I_{sc} = 2 \text{ A}$, $R_s = 0 \text{ ohm}$, $R_{shunt} = \infty$, συντελεστής ιδανικότητας $n=1$ και θερμοκρασία κυψέλης 25°C για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.

Η αρχική μείωση που υφίσταται το I_{sc} ενός πλαισίου, κατά τις πρώτες ώρες λειτουργίας του, αναμένεται να είναι 1-5% ^[13] και οφείλεται στην άμεση υποβάθμιση του πλακιδίου του πυριτίου (wafer) από το φως. Επιπλέον, υπάρχει μια μείωση της τάξης του 0.5-1% ετησίως λόγω υποβάθμισης του υλικού ενθυλάκωσης (γυαλί/EVA). Διαφορές στις κυψέλες μπορεί να αποβούν σημαντικές σε διάχυτες ακτινοβολίες και σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη του ήλιου. Αλλά, σε αντίθεση με την τεχνολογία λεπτού υμενίου, στις κρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου η διακύμανση στη φασματική απόκριση δεν είναι αρκετά σημαντική ώστε να προκαλέσει μεγάλες μεταβολές στην συνολική ενεργειακή παραγωγή.

5.1.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ R_{sh}

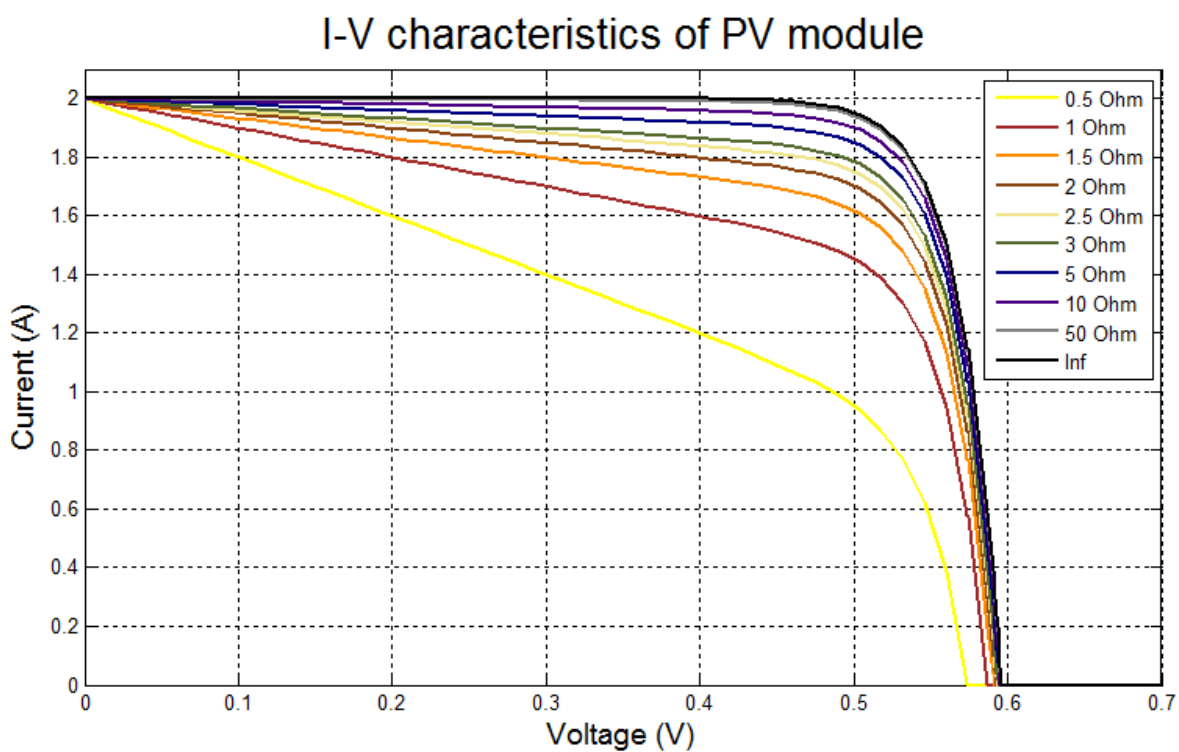
Ένας σημαντικός παράγοντας ο οποίος μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία του πλαισίου σε χαμηλό φως είναι η παράλληλη αντίσταση R_{sh} . Η παρουσία της παράλληλης αντίστασης, R_{sh} , προκαλεί σημαντικές απώλειες ισχύος οι οποίες δεν οφείλονται τόσο στον φτηνό σχεδιασμό των ηλιακών κυψελών όσο σε κατασκευαστικές ατέλειες και στην φθορά του πλαισίου. Η χαμηλή τιμή της παράλληλης αντίστασης προκαλεί απώλειες ισχύος αφού παρέχει ένα εναλλακτικό μονοπάτι για να περάσει το φωτόρευμα. Μια τέτοια παράκαμψη μειώνει την ποσότητα του ρεύματος που ρέει δια μέσου της διόδου της ηλιακής κυψέλης και έτσι μειώνει την τάση της ηλιακής κυψέλης. Η επίδραση της παράλληλης αντίστασης είναι ιδιαίτερα σοβαρή σε χαμηλά επίπεδα φωτός, δεδομένου ότι τότε θα υπάρξει λιγότερο παραγόμενο φωτόρευμα με αποτέλεσμα η απώλεια αυτού του ρεύματος στη δίοδο να έχει το μεγαλύτερο δυνατό αντίκτυπο.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η επίδραση της R_{sh} σε ιδανική κυψέλη με χαμηλή ακτινοβολία 200 W/m^2



Διάγραμμα 5.3 I-V καμπύλες για ιδανική κυψέλη με $V_{oc} = 0.596 \text{ V}$, $I_{sc} = 2 \text{ A}$, $R_s = 0 \text{ ohm}$, συντελεστής ιδανικότητας $n=1$, θερμοκρασία κυψέλης 25°C , ακτινοβολία 200 W/m^2 για διάφορες τιμές R_{shunt} .

Για να φανεί η επίδραση της R_{sh} ιδιαίτερα στις χαμηλές ακτινοβολίες, εκτελέστηκε η ίδια προσομοίωση αλλά για υψηλή αυτή τη φορά ακτινοβολία 1000 W/m^2 . Έτσι προέκυψε:

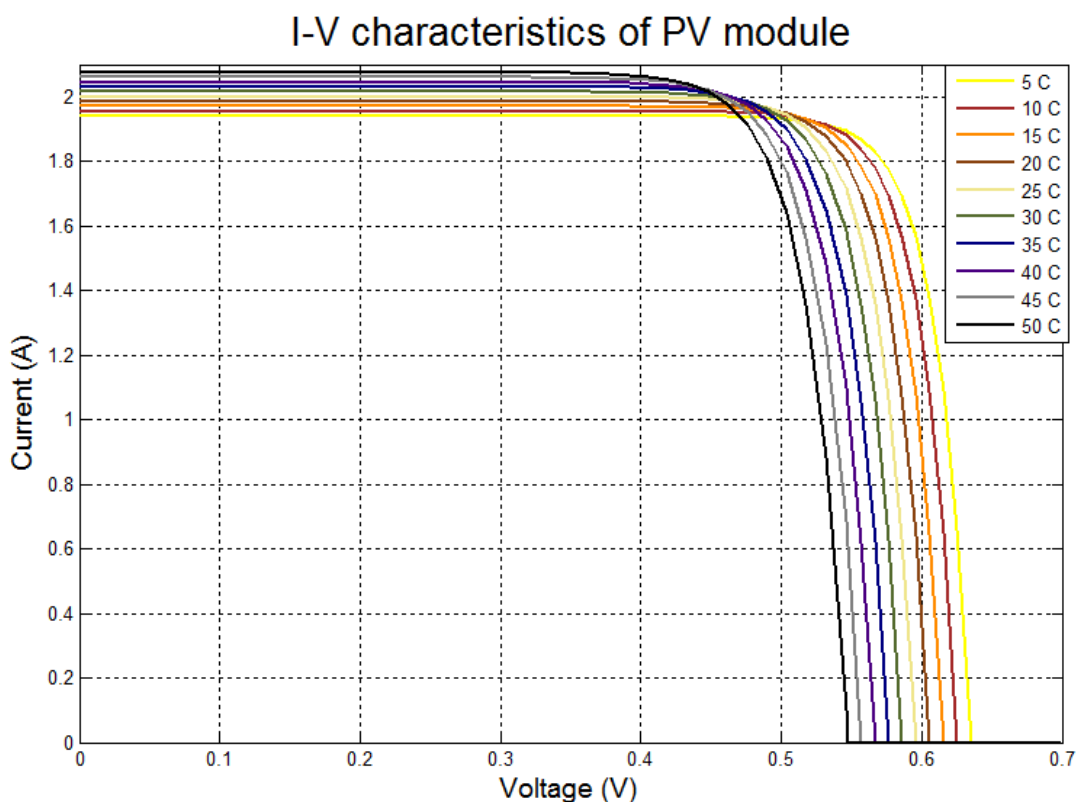


Διάγραμμα 5.4 I-V καμπύλες για ιδανική κυψέλη με $V_{oc} = 0.596 \text{ V}$, $I_{sc} = 2 \text{ A}$, $R_s = 0 \text{ ohm}$, συντελεστής ιδανικότητας $n=1$, θερμοκρασία κυψέλης 25°C , ακτινοβολία 1000 W/m^2 για διάφορες τιμές R_{shunt} .

Διαφορές στην παράλληλη αντίσταση μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορά της τάξης του 10% στην ετήσια ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η ενεργειακή απόδοση θα αρχίσει να μειώνεται για παράλληλες αντιστάσεις κάτω από 20-30 Ohm (για κυψέλες διαστάσεων $150\text{mm} \times 150\text{mm}$). Τέλος, οι μειωμένες επιδόσεις σε πλαίσια με μικτά είδη R_{sh} οφείλονται στις κυψέλες με τις χαμηλότερες τιμές R_{sh} ^[14].

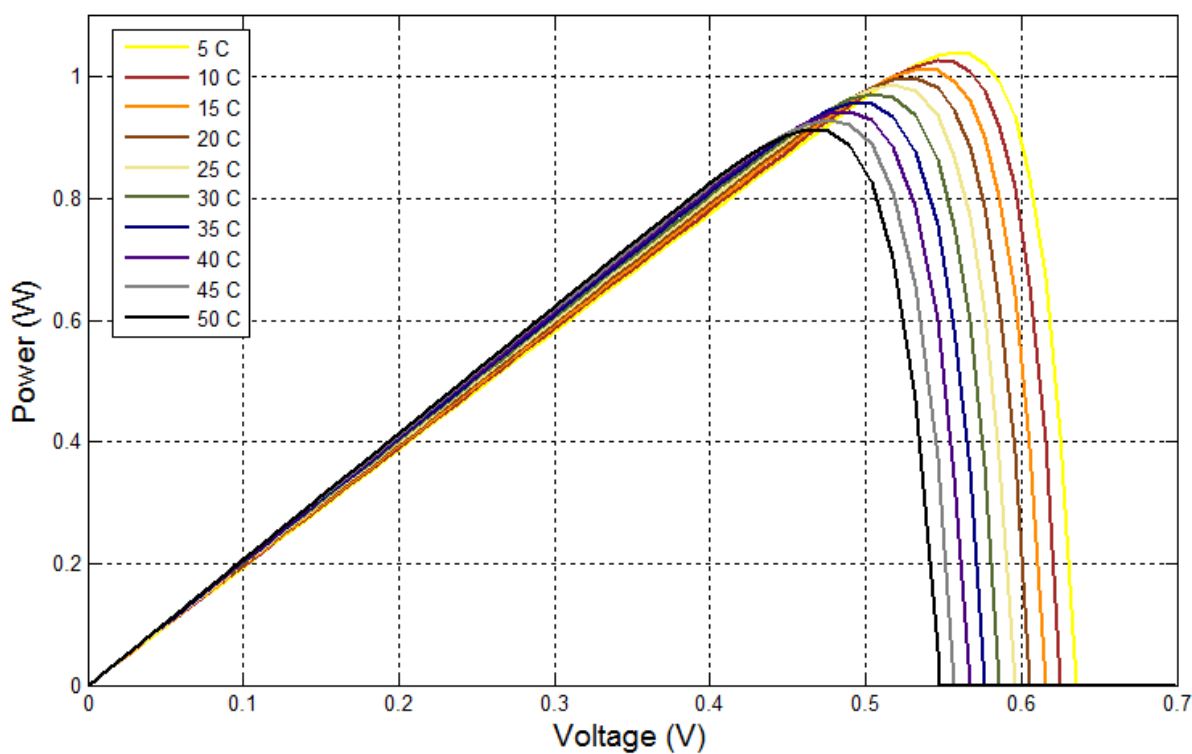
5.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ

Όπως περιεγράφηκε παραπάνω η ηλεκτρική απόδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακτινοβολία, επηρεάζεται όμως άμεσα και από την θερμοκρασία. Όπως όλες οι ημιαγωγές συσκευές, έτσι και οι ηλιακές κυψέλες είναι ευαίσθητες στη μεταβολή της θερμοκρασία. Οι αυξήσεις στη θερμοκρασία μειώνουν το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, επηρεάζοντας με αυτόν τον τρόπο τις περισσότερες από τις παραμέτρους του . Η μείωση του ενεργειακού διακένου με την αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να ερμηνευθεί σαν αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων. Έτσι, απαιτείται πλέον λιγότερη ενέργεια για να σπάσουν οι χημικοί δεσμοί του πυριτίου.



Διάγραμμα 5.5 I-V καμπύλες για ιδανική κυψέλη με $V_{oc} = 0.596 \text{ V}$, $I_{sc} = 2 \text{ A}$, $R_s = 0 \text{ ohm}$, $R_{sh} = \infty$, συντελεστής ιδανικότητας $n=1$, ακτινοβολία 1000 W/m^2 για διάφορες τιμές θερμοκρασίας κυψέλης.

P-V characteristics of PV module



Διάγραμμα 5.6 P-V καμπύλες για ιδανική κυψέλη με $V_{oc} = 0.596 \text{ V}$, $I_{sc} = 2 \text{ A}$, $R_s = 0 \text{ ohm}$, $R_{sh} = \infty$, συντελεστής ιδανικότητας $n=1$, ακτινοβολία 1000 W/m^2 για διάφορες τιμές θερμοκρασίας κυψέλης.

Όπως φαίνεται και από τα **διαγράμματα 5.5 και 5.6** το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν ανεξάρτητο της θερμοκρασίας (λόγω των μηδαμινών τιμών του θερμοκρασιακού συντελεστή α) και άρα αποτελεί περισσότερο συνάρτηση της ακτινοβολίας G . Το I_{sc} αυξάνει αμυδρά με υψηλότερες θερμοκρασίες πράγμα το οποίο μπορεί να αποδοθεί στην αυξημένη απορρόφηση που προκαλείται η οποία μειώνει το ενεργειακό διάκενο. Η τάση ανοιχτού κύκλου (V_{oc}) είναι πολύ πιο ευαίσθητη με την θερμοκρασία και μειώνεται όπως επίσης και η απόδοση η και ο παράγοντας πλήρωσης FF. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν αποδοτικότερα στις κρύες παρά στις ζεστές ημέρες. Για τις κρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου, η V_{oc} **μειώνεται κατά 0.37%** για κάθε αύξηση 1 C° στη θερμοκρασία, και το I_{sc} **αυξάνεται κατά περίπου 0.05%**, οδηγώντας έτσι σε μια **μείωση της μέγιστης ισχύος της τάξης $0.5\% / \text{C}^\circ$** [5].

5.2.1 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της εξάρτησης του ρεύματος κόρου I_0 από την θερμοκρασία. Η εξίσωση για το I_0 από μια πλευρά της διόδου p-n δίνεται από τον τύπο^[5]:

$$I_0 = qA \frac{Dn_i^2}{LN_D} \quad (5.1)$$

όπου:

I_0 : είναι το ρεύμα κόρου της διόδου

q : είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου 1.602×10^{-19} C

D : είναι η διάχυση του φορέα μειονότητας που δίνεται για το πυρίτιο συναρτήσει της νόθευσης μ του φορέα μειονότητας $D = \frac{kT}{q\mu}$.

L : είναι το μήκος διάχυσης του φορέα μειονότητας

N_D : είναι η νόθευση και

n_i : είναι η εγγενής συγκέντρωση φορέων που δίνεται για το πυρίτιο $8.6 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$.

Στην ανωτέρω εξίσωση, πολλές από τις παραμέτρους έχουν κάποια εξάρτηση από την θερμοκρασία, αλλά την σημαντικότερη επιρροή ασκεί η εγγενής συγκέντρωση φορέων, n_i . Η εγγενής συγκέντρωση φορέων εξαρτάται από την ενέργεια διακένου (με τα χαμηλότερα ενεργειακά διάκενα να δίνουν υψηλότερη συγκέντρωση εγγενών φορέων), και από την ενέργεια των φορέων (όπου υψηλότερες θερμοκρασίες δίνουν υψηλότερες συγκεντρώσεις εγγενών φορέων). Η εξίσωση για την εγγενή συγκέντρωση φορέων είναι :

$$n_i^2 = 4 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 \cdot (m_e^* m_h^*)^{3/2} \cdot e^{-\frac{E_{G0}}{kT}} = BT^3 \cdot e^{-\frac{E_{G0}}{kT}} \quad (5.2)$$

όπου:

T : είναι η θερμοκρασία.

h : είναι η σταθερά Planck 6.626×10^{-34} joule·s

K : είναι η σταθερά Boltzmann 1.380×10^{-23} joule/K.

m_e : είναι η ενεργός μάζα των ηλεκτρονίων

m_h : είναι η ενεργός μάζα των οπών

E_{G0} : είναι το ενεργειακό διάκενο γραμμικά προσεγγισμένο στο απόλυτο μηδέν και

B : είναι μια σταθερά ουσιαστικά ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία.

Αντικαθιστώντας αυτές τις εξισώσεις πίσω στην εξίσωση για το I_0 , και υποθέτοντας ότι η εξάρτηση από την θερμοκρασία για τις άλλες παραμέτρους μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, παίρνουμε:

$$I_0 = qA \frac{D}{LN_D} B T^3 \cdot e^{-\frac{E_{G0}}{kT}} \approx B' T^\gamma \cdot e^{-\frac{E_{G0}}{kT}} \quad (5.3)$$

όπου

B' : είναι μια σταθερά ανεξάρτητη της θερμοκρασίας.

γ : είναι μια σταθερά που χρησιμοποιείται αντί του αριθμού 3 για να περιλάβει τις πιθανές εξαρτήσεις από θερμοκρασία των παραμέτρων των άλλων υλικών.

• Για ηλιακές κυψέλες πυριτίου κοντά σε θερμοκρασία δωματίου, το I_0 κατά προσέγγιση διπλασιάζεται για κάθε αύξηση 10°C στη θερμοκρασία.

Ο αντίκτυπος του I_0 στην τάση ανοιχτοκύκλωσης μπορεί να υπολογιστεί αντικαθιστώντας την εξίσωση για το I_0 στην εξίσωση για τη V_{oc} όπως φαίνεται παρακάτω

$$\begin{aligned} V_{oc} &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right) = \frac{kT}{q} [\ln I_{sc} - \ln I_0] = \frac{kT}{q} \ln I_{sc} - \frac{kT}{q} \ln \left[B' T^\gamma \exp \left(-\frac{qV_{G0}}{kT} \right) \right] \\ &= \frac{kT}{q} \left(\ln I_{sc} - \ln B' - \gamma \ln T + \frac{qV_{G0}}{kT} \right) \end{aligned} \quad (5.4)$$

όπου $E_{G0} = qV_{G0}$.

Υποθέτοντας ότι το dV_{oc}/dT είναι ανεξάρτητο των dI_{sc}/dT και dV_{oc}/dT , τότε μπορεί να βρεθεί ως:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{V_{oc} - V_{G0}}{T} - \gamma \frac{k}{q} \quad (5.5)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι η ευαισθησία μιας ηλιακής κυψέλης από τη θερμοκρασία εξαρτάται από την τάση ανοιχτοκύκλωσης της ηλιακής κυψέλης, με τις κυψέλες υψηλότερης τάσης να επηρεάζονται λιγότερο από τη θερμοκρασία.

Για το πυρίτιο, η E_{G0} είναι 1,2, και αντικαθιστώντας το γ με 3 παίρνουμε μια μείωση της τάσης ανοικτού κυκλώματος

$$\frac{dV_{OC}}{dT} = \frac{V_{G0} - V_{OC} + \gamma \frac{kT}{q}}{T} \approx -2.2mV \text{ ανά } ^\circ C \text{ για το Si} \quad (5.6)$$

- **Η τάση ανοιχτοκύκλωσης μειώνεται περίπου 2.2 mV για κάθε $^\circ C$**

Το ρεύμα βραχυκυκλώματος, I_{sc} , αυξάνεται ελαφρώς με τη θερμοκρασία, δεδομένου ότι η ενέργεια διακένου, E_G , μειώνεται και περισσότερα φωτόνια έχουν αρκετή ενέργεια για να δημιουργήσουν τα ζευγάρια οπών-ηλεκτρονίων (e-h). Εντούτοις, η επίδραση αυτή είναι μικρή και η εξάρτηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης μιας ηλιακής κυψέλης από τη θερμοκρασία είναι:

$$\frac{1}{I_{sc}} \frac{dI_{sc}}{dT} \approx 0.0006 \text{ ανά } ^\circ C \text{ για το Si} \quad (5.7)$$

- **Το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται περίπου 0.06% για κάθε $^\circ C$**

Η εξάρτησης του παράγοντα πλήρωσης FF από τη θερμοκρασία για το πυρίτιο προσεγγίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$\frac{1}{FF} \frac{dFF}{dT} \approx \left(\frac{1}{V_{OC}} \frac{dV_{OC}}{dT} - \frac{1}{T} \right) \approx -0.0015 \text{ ανά } ^\circ C \text{ για το Si} \quad (5.8)$$

- **Ο παράγοντας πλήρωσης μειώνεται περίπου 0.15% για κάθε $^\circ C$**

Η επίδραση της θερμοκρασίας στη μέγιστη ισχύ εξόδου, P_m , είναι

$$P_{M,var} = \frac{1}{P_M} \frac{dP_M}{dT} = \frac{1}{V_{OC}} \frac{dV_{OC}}{dT} + \frac{1}{FF} \frac{dFF}{dT} + \frac{1}{I_{sc}} \frac{dI_{sc}}{dT} \quad (5.9)$$

$$\frac{1}{P_M} \frac{dP_M}{dT} \approx -(0.004 \div 0.005) \text{ ανά } ^\circ C \text{ για το Si}$$

- **Τέλος η μέγιστη ισχύς εξόδου μειώνεται περίπου 0.4÷0.5% για κάθε $^\circ C$**

5.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ

Η εμπειρική μέθοδος για τον προσδιορισμό της σχετικής θερμοκρασίας του πλαισίου (ή καλύτερα της θερμοκρασίας της διόδου p-n) βασίζεται στην θερμοκρασία κυψέλης ομαλής λειτουργίας **NOCT** (Normal Operating Cell Temperature). Η NOCT ορίζεται ως η θερμοκρασία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες περιβάλλοντος **SRE** (Standard Reference Environment): Ακτινοβολία 800 W/m^2 , θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C , ταχύτητα ανέμου 1m/s , λειτουργία σε κενό φορτίο, προσανατολισμός στο νότο και κλίση γωνίας 45° .

Μια υπολογιστική μέθοδο για τον προσδιορισμό της NOCT είναι η διαφορά της θερμοκρασίας του μοντέλου (**Tc**) μείον τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος (**Ta**), η οποία δίνει μια εκτίμηση για ένα ελάχιστο εύρος ακτινοβολίας από 300 W/m^2 μέχρι 400 W/m^2 .

$$NOCT = (T_c - T_a)_{SRE} + 20^\circ\text{C} \quad (5.10)$$

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην αποτελεσματικότητα της λειτουργίας ενός μοντέλου, καθώς επίσης και στην ηλεκτρική απόδοσή του εξαρτάται από τους απόλυτους θερμοκρασιακούς συντελεστές κυρίως της τάσης β και λιγότερο του ρεύματος α .

$$\begin{aligned} I_{sc,corr} &= I_{sc} + \alpha(T_2 - T_1) \\ V_{oc,corr} &= V_{oc} + \beta(T_2 - T_1) \end{aligned} \quad (5.11)$$

Αυτοί οι συντελεστές έχουν μετρηθεί σε προσομοιωτή ενός ήλιου υπό εργαστηριακές συνθήκες. Οι I-V καμπύλες των θερμαινόμενων μοντέλων μετριοούνται για θερμοκρασίες εγγύτητας 50°C . Οι τιμές των συντελεστών β , α που έχουν εξαχθεί από αυτήν την μέτρηση παρατίθενται στον πίνακα 5.1^[15].

| Τεχνολογία | β TC σε V/K | α TC σε A/K |
|-------------|-------------------|--------------------|
| c-Si (mono) | -0.00364512 | 0.00046915 |
| c-Si (poly) | -0.0037199 | 0.00047709 |
| a-Si | -0.00327806 | 0.00074003 |

Πίνακας 5.1 Συντελεστές α , β ανάλογα με την τεχνολογία της κυψέλης.

Η ισχύς εξόδου P, αγνοώντας την φασματική επίδραση, είναι κυρίως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας P(T,G) . Επομένως είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η θερμική ισορροπία ενός μοντέλου σε πραγματικές συνθήκες. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει αρκετά περίπλοκο, αφού οι συναρτήσεις μεταφοράς έμμεσης θερμότητας περιγράφουν μηχανισμούς όπως ψύξη από τον αέρα, φυσική μεταφορά θερμότητας καθώς επίσης και την επίδραση της ακτινοβολίας. Είναι απαραίτητο να είναι γνωστές οι φυσικές παράμετροι του υλικού των στρωμάτων του μοντέλου καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά της τοποθέτησης του δείγματος δοκιμής.

Υπάρχει και η εμπειρική προσέγγιση, ώστε να υπολογιστεί η θερμοκρασία του μοντέλου από τα δεδομένα των μετρήσεων. Ο απλούστερος τύπος για να υπολογίσει η θερμοκρασία κυψέλης ερευνήθηκε από το Ross ^[15]:

$$T_c = T_a + k \cdot G \quad (5.12)$$

Αυτή η απλή γραμμική σχέση της θερμοκρασίας κυψέλης, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, της ακτινοβολίας αντίστοιχα και μιας σταθεράς (k : Συντελεστής του Ross) η οποία εξαρτάται από την δομή της τοποθέτησης δίνει ένα πρώτο προσανατολισμό. Αλλά το να καθοριστεί ο συντελεστής Ross από πριν είναι σχεδόν αδύνατο, γι' αυτό υπάρχουν κάποιες εμετρημένες τιμές καταχωρημένες στον **πίνακα 5.2**.

| Είδος Τοποθέτησης | k (K·m ² /W) |
|-------------------------------|-------------------------|
| Ελεύθερη τοποθέτηση | 0.021 |
| Επίπεδη οροφή | 0.026 |
| Επικλινής οροφή: επαρκής ψύξη | 0.020 |
| Επικλινής οροφή: αεροστεγής | 0.056 |

Πίνακας 5.2 Συντελεστής Ross ανάλογα με το είδος της τοποθέτησης του πλαισίου.

Η σχέση που μπορεί να εξάγει την θερμοκρασία κυψέλης κάνοντας χρήση της NOCT προέρχεται από μια απλή προσέγγιση πρόβλεψης της ηλεκτρικής απόδοσης σε σταθερή λειτουργία.

$$n \cdot G = (\tau \cdot a) \cdot G - U(T_c - T_a) \quad (5.13)$$

$$T_c = T_a + \left(\frac{G}{G_{NOCT}} \right) \left(\frac{U}{U_{NOCT}} \right) (T_{NOCT} - T_a) \left(1 - \frac{n}{\alpha \tau} \right) \quad (5.14)$$

Όπου

G : είναι η ακτινοβολία στην επιφάνεια του μοντέλου

n : είναι η απόδοση στην φωτοβολταϊκή μετατροπή

U : είναι μια σταθερά για τις θερμικές απώλειες η οποία εξαρτάται από την ακτινοβολία και δεν βασίζεται π.χ στην ταχύτητα ανέμου

τ : είναι η μεταδοτικότητα του γυαλιού

α : είναι η απορροφητικότητα του φωτοβολταϊκού στρώματος

Για να υπολογιστεί η θερμοκρασία από την NOCT έχουν γίνει κάποιες περεταίρω εικασίες: $n=0$ και για λόγους απλότητας η U θεωρήθηκε σταθερή, έτσι προκύπτει τελικά:

$$T_C = T_a + \left(\frac{T_{NOCT} - T_a}{G_{NOCT}} \right) \cdot G \quad (5.15)$$

Για να υπερνικηθεί το πρόβλημα της μεταφοράς θερμότητας το βασικό θέμα είναι να ληφθεί υπ'όψιν η επίδραση του ανέμου, έτσι εισάγεται μια εξίσου απλή αλλά εξαρτώμενη αυτή τη φορά από τον άνεμο εξίσωση:

$$T_C = T_a + \left(\frac{0.32}{8.91 + 2 \cdot V_w} \right) \cdot G, \quad \text{όπου } V_w > 0 \quad (5.16)$$

Αυτή η εξίσωση προέρχεται από μια εικασία ότι η ακτινοβολία καθώς και η φυσική μεταφορά θερμότητας έχουν μικρή επιρροή και μπορούν να ληφθούν αμελητέες, και ότι μια πρότυπη τιμή NOCT είναι περίπου 46° C.

Τέλος μία άλλη εμπειρική γραμμική σχέση που συνδέει την θερμοκρασία του πλαισίου με τις συνθήκες του περιβάλλοντος (θερμοκρασία περιβάλλοντος, ακτινοβολία, υγρασία, ταχύτητα ανέμου και κατεύθυνση ανέμου) είναι η παρακάτω ^[16]:

$$T_C (^{\circ}C) = 0.943 \cdot T_a + 0.028 \cdot G - 1.528 \cdot V_w + 4.3 \quad (5.17)$$

5.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Η απορροφούμενη ακτινοβολία είναι μέγιστη όταν οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν κάθετα στο επίπεδο του συλλέκτη. Συνεπώς για να επιτευχθεί η λήψη της μέγιστης ποσότητας ηλιακής ενέργειας θα έπρεπε ο συλλέκτης να στρέφεται συνεχώς ώστε να παρακολουθεί την πορεία του ήλιου, πράγμα όμως που κατά κανόνα αυξάνει αδικαιολόγητα το κόστος της εγκατάστασης και εφαρμόζεται σε ειδικές μόνο περιπτώσεις.

Στην πράξη, κατά γενικό κανόνα, η θέση των συλλεκτών, δηλαδή ο προσανατολισμός και η κλίση τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο, παραμένει αμετάβλητη ή το πολύ προβλέπεται η χειροκίνητη μεταβολή της κλίσης τους μία ή δύο φορές το έτος.

Στη γενικότερη περίπτωση, η θέση του συλλέκτη προσδιορίζεται από τη γωνία β που σχηματίζει με τον οριζόντιο επίπεδο, (ονομάζεται κλίση του συλλέκτη), και την γωνία γ που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνειά του και την κατεύθυνση προς το νότο (ονομάζεται αζιμούθια γωνία του συλλέκτη).

Για μία τυχούσα θέση του συλλέκτη ισχύουν τα παρακάτω:

- θ η γωνία πρόσπτωσης της ακτινικής (ή άμεσης) ακτινοβολίας του ήλιου, δηλαδή η γωνία των ηλιακών ακτινών με την κάθετο στην επιφάνεια του συλλέκτη.
- φ το γεωγραφικό πλάτος της θέσης ($-90^\circ < \varphi < 90^\circ$) και
- ω η ωριαία γωνία του ήλιου.

Αποδεικνύεται ότι για το **βόρειο ημισφαίριο** ισχύει η σχέση^{[17],[18]}

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega \\ & + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (5.18)$$

Ενώ, δεν υπάρχει νόημα υπολογισμού της παραπάνω σχέσης για $\theta > 90^\circ$.

Για το νότιο ημισφαίριο ισχύει αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta + \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega \\ & - \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (5.19)$$

Για κάθετη επιφάνεια, αρκεί να τεθεί $\beta=90^\circ$. Για οριζόντιες επιφάνειες, αρκεί να τεθεί $\beta=0^\circ$, οπότε η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται με το ζενίθ, ώστε $\theta=\theta_z$. Επίσης για $\omega=0$, προκύπτει η γωνία πρόσπτωσης κατά το μεσημέρι.

Για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο και είναι στραμμένες στο νότο, οπότε $\gamma=0^\circ$, προκύπτει:

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \omega \quad (5.20)$$

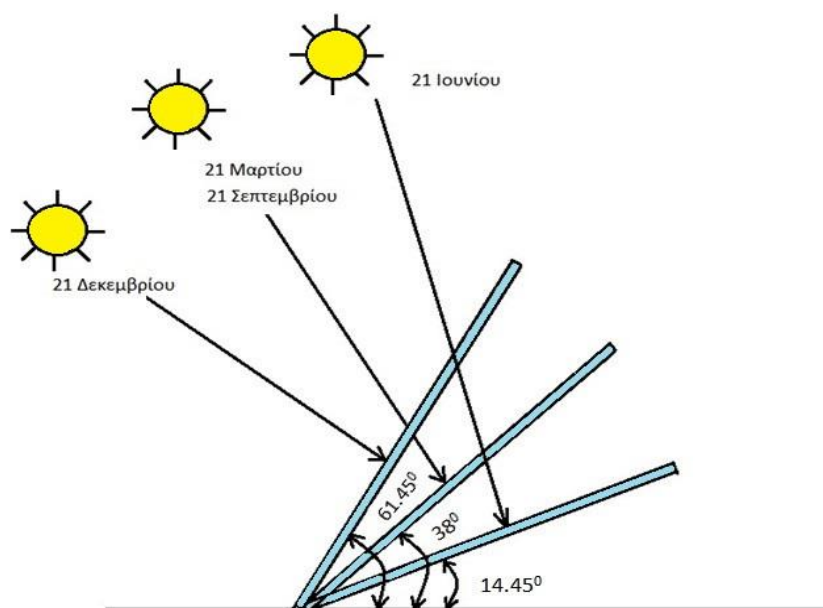
Ενώ, δεν υπάρχει νόημα υπολογισμού της παραπάνω σχέσης για $\theta > 90^\circ$.

Για το νότιο ημισφαίριο αρκεί να τεθεί η αρνητική τιμή της γωνίας φ οπότε:

$$\cos \theta = -\sin \delta \cdot \sin(\varphi + \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\varphi + \beta) \cdot \cos \omega \quad (5.21)$$

Συχνά οι ηλιακοί συλλέκτες εγκαθίστανται ώστε να στρέφονται προς το νότο, εκτός βέβαια αν ο προσανατολισμός τους επιβάλλεται από τον τρόπο εγκατάστασης. Για εγκαταστάσεις στο βόρειο ημισφαίριο η μέγιστη απολαβή επιτυγχάνεται όταν ο συλλέκτης προσανατολίζεται στο νότο και η κλίση του συλλέκτη είναι ίση με την γεωγραφική παράλληλο του τόπου, ενώ εάν η κλίση μπορεί να μεταβάλλεται χειροκίνητα (σε χρονικά διαστήματα μηνών, π.χ. ανά εποχή του έτους) ενδείκνυται η κλίση να μειώνεται κατά 10° με 15° κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και να αυξάνεται κατά το ίδιο ποσοστό κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή.

Τα παραπάνω αποτελούν προσεγγίσεις που εφαρμόζονται σε μικρές εγκαταστάσεις, ενώ για μεγάλες πρέπει να γίνεται αναλυτική μελέτη. Παρακάτω, δίνεται ένα παράδειγμα της βέλτιστης κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη στο θερινό (21 Ιουνίου) και το χειμερινό (21 Δεκεμβρίου) ηλιοστάσιο και την εαρινή (21 Μαρτίου) και φθινοπωρινή (21 Σεπτεμβρίου) ισημερία, σε μία τοποθεσία με Γεωγραφικό Πλάτος 38° όπως η Αθήνα. Τα ύψη ηλίου που απεικονίζονται αφορούν αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια.



Σχήμα 5.1 Βέλτιστη κλίση συλλέκτη κατά τη διάρκεια των ισημεριών και των ηλιοστασίων^[18].

Για να εξουδετερωθεί η διαφορά αυτή, βρέθηκε ότι αν τα φωτοβολταϊκά τοποθετηθούν ώστε να σχηματίζουν γωνία με το οριζόντιο επίπεδο ίση με $(\Phi+15)$ μοίρες (Φ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου), η συνολική ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από τα πλαίσια γίνεται μεγαλύτερη το χειμώνα και μικρότερη το καλοκαίρι με αποτέλεσμα να υπάρχει σταθερότητα κατά τη διάρκεια του έτους. Δηλαδή, η μικρότερη ηλιοφάνεια κατά τις χειμερινές μέρες αντισταθμίζεται με την πιο κάθετη τοποθέτηση των πλαισίων προς τις ηλιακές ακτίνες και η μεγάλη ηλιοφάνεια κατά τις καλοκαιρινές μέρες δίνει λιγότερη ηλιακή ενέργεια με την πιο πλάγια τοποθέτησή τους στις ηλιακές ακτίνες.

Έτσι πρακτικά η ηλιακή ενέργεια που δέχονται τα πλαίσια το χειμώνα είναι ίση περίπου με αυτή που δέχονται το καλοκαίρι. Επί πλέον, η ενέργεια αυτή είναι ίση περίπου με εκείνη που δέχονται τα πλαίσια την άνοιξη και το φθινόπωρο και έτσι διατηρείται σταθερότητα για όλο το χρόνο.

Οι τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κατά μέσο όρο κάθε μέρα για τις διάφορες εποχές του έτους, καταγράφονται στους διεθνείς χάρτες. Σημειώνεται ότι οι τιμές που αναγράφονται στους πίνακες αποτελούν μέσο όρο και καλύπτουν γενικά όλη την Ελλάδα. Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία για την περιοχή που θα εγκατασταθεί το φωτοβολταϊκό σύστημα. Τέτοια στοιχεία παρέχονται από τους κοντινούς μετεωρολογικούς σταθμούς.

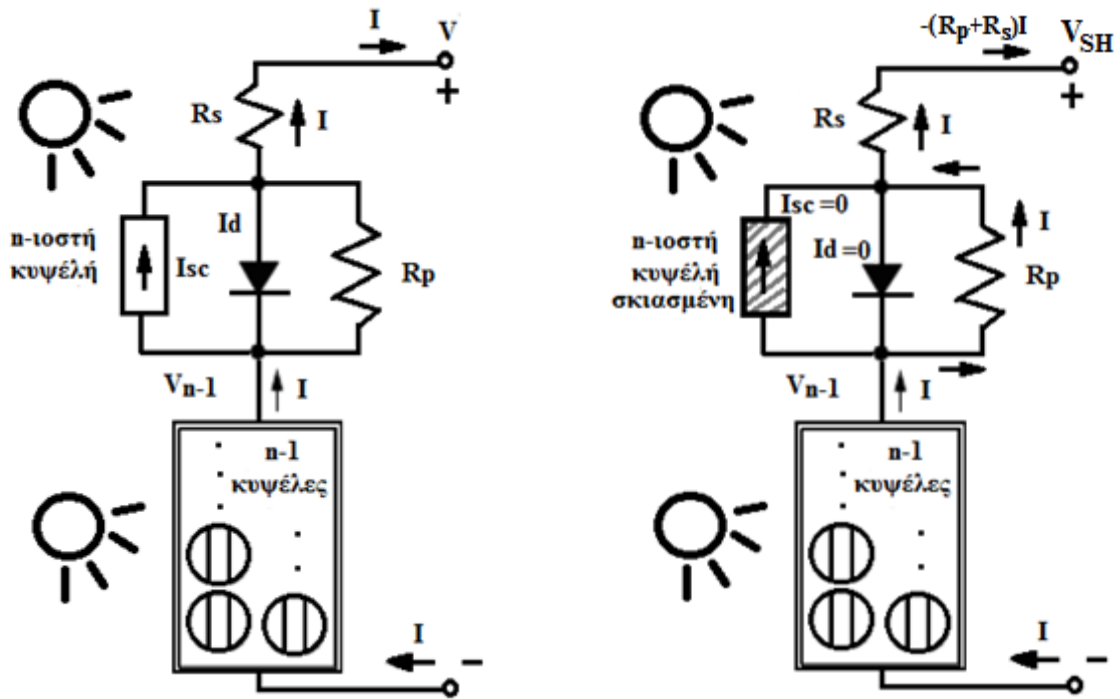
Χαρακτηριστικό μέγεθος αποτελεί η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που μετράται στο ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος του ορίζοντα, το οποίο δεν είναι αναγκαστικό να συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι. Στη Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολόι δείχνει 12:25 το χειμώνα και 13:25 το καλοκαίρι.

5.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ

Ένας άλλος παράγοντας επίδρασης της ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η σκίαση. Το φαινόμενο της σκίασης εμφανίζεται είτε σε περιπτώσεις που συναντώνται εμπόδια στον ορίζοντα των πλαισίων όπως παρακείμενα κτήρια, βλάστηση κλπ. , είτε σε περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης όπως για παράδειγμα στις στέγες κτηρίων όπου προκαλείται σκίαση από τη μία σειρά στην επόμενη. Ιδιαίτερα στη δεύτερη περίπτωση, οι επιπτώσεις της σκίασης μπορεί να είναι σημαντικές και για το λόγο αυτό είναι αναγκαίος ο λεπτομερής προσδιορισμός των απωλειών που προκαλούν.

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αποτελείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία ίδιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών συνδεδεμένων σε σειρά. Συνεπώς, η σκίαση ή η βλάβη ενός και μόνο φωτοβολταϊκού στοιχείου, θα μπορούσε να επιφέρει ολική αχρήστευση του πλαισίου. Μια σκιασμένη κυψέλη, συμπεριφέρεται κατά βάση όπως η απλή διάδος p-n, η οποία, όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, δέχεται από τις υπόλοιπες υγιείς κυψέλες μία υψηλή ανάστροφη τάση. Αν τα υπόλοιπα φωτιζόμενα ηλιακά στοιχεία του πλαισίου είναι μεγάλου πλήθους, αυτή η τάση μπορεί να φτάσει την τάση διάσπασης της σκιασμένης διόδου, προκαλώντας ακόμα και την ολική καταστροφή της.

Στην πράξη, για τα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, η σκιασμένη κυψέλη λειτουργεί ως μία μεγάλη αντίσταση, όπου της αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν οι υπόλοιπες κυψέλες. Παρατεταμένος σκιασμός ενός στοιχείου σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπολοίπων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του στοιχείου αυτού και κατά συνέπεια στην αχρήστευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης του κατεστραμμένου στοιχείου. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως φαινόμενο “θερμής κηλίδας” (hot spot). Για να αποτραπεί μία τέτοια εξέλιξη, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο εφοδιάζεται με διόδους (διόδοι παράκαμψης), οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των κυττάρων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά, επιτρέποντας έτσι την χρησιμοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ακόμα και αν κάποιο φωτοβολταϊκό στοιχείο του υστερεί ή καταστραφεί ^[19].



Σχήμα 5.2 α) Λειτουργία n εν σειρά συνδεδεμένων κυψελών στο φως.

β) Λειτουργία n-1 κυψελών στο φως με την n-ιστή κυψέλη σκιασμένη.

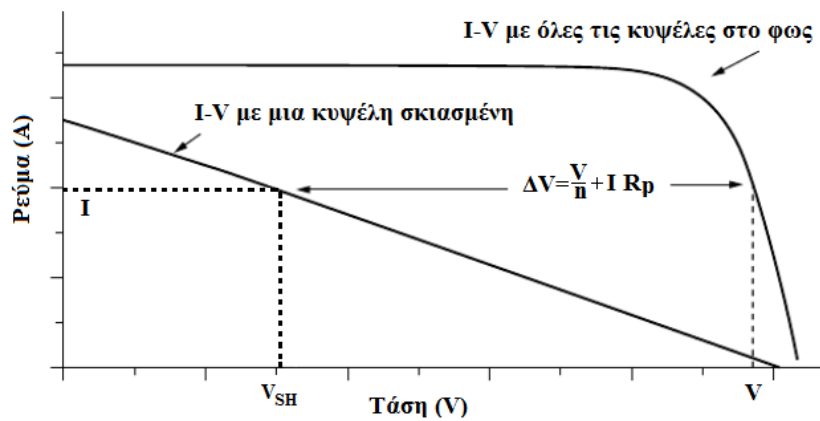
Όπως φαίνεται και από το **σχήμα 5.2** όταν μια κυψέλη του πλαισίου είναι πλήρως σκιασμένη ($I_{sc}=0$), το ρεύμα των υπολοίπων κυψελών θα περάσει από το παράλληλο μονοπάτι αντίστασης R_p της σκιασμένης κυψέλης, με αποτέλεσμα η κυψέλη αυτή να πολωθεί ανάστροφα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Η τάση της κυψέλης στα άκρα της θα είναι τώρα $-(R_s+R_p)I$. Η τάση ενός πλαισίου με n κυψέλες, όπου η n-ιστή κυψέλη είναι σκιασμένη, δίνεται από τον τύπο^[20]:

$$V_{SH} = V_{n-1} + V_n = \left(\frac{n-1}{n} \right) V - I(R_p + R_s) \quad (5.22)$$

Ενώ η πτώση τάσης στα άκρα του πλαισίου θα είναι :

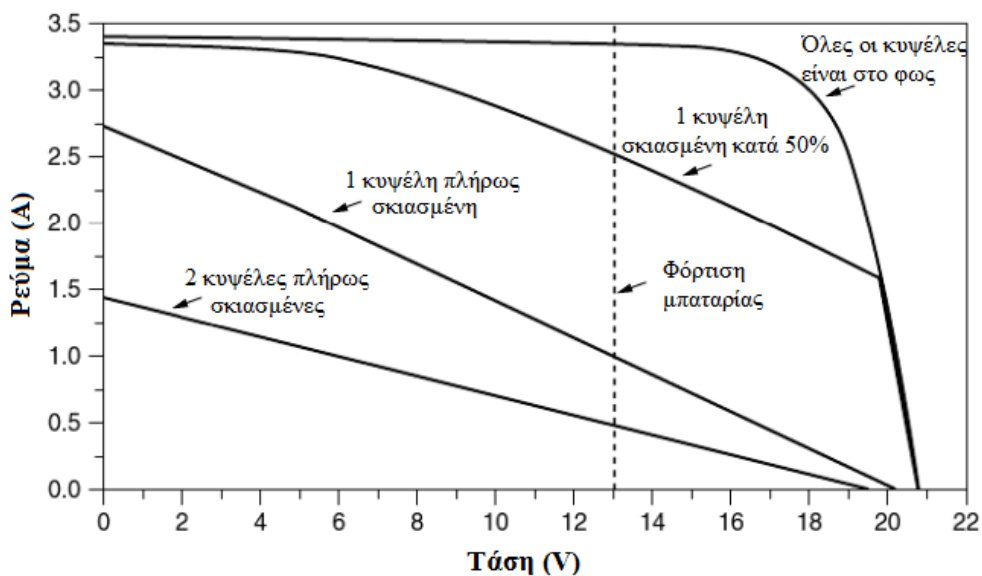
$$\Delta V = V - V_{SH} = V - \left(\frac{n-1}{n} \right) V + I(R_p + R_s) \cong \frac{V}{n} + IR_p \quad (5.23)$$

Οι παραπάνω σχέσεις φαίνονται και σχηματικά :



Σχήμα 5.3 Πτώση τάσης κατά την σκίαση μιας κυψέλης^[20].

Ενώ στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η επίδραση της μερικής και ολικής σκίασης σε μια κυψέλη:

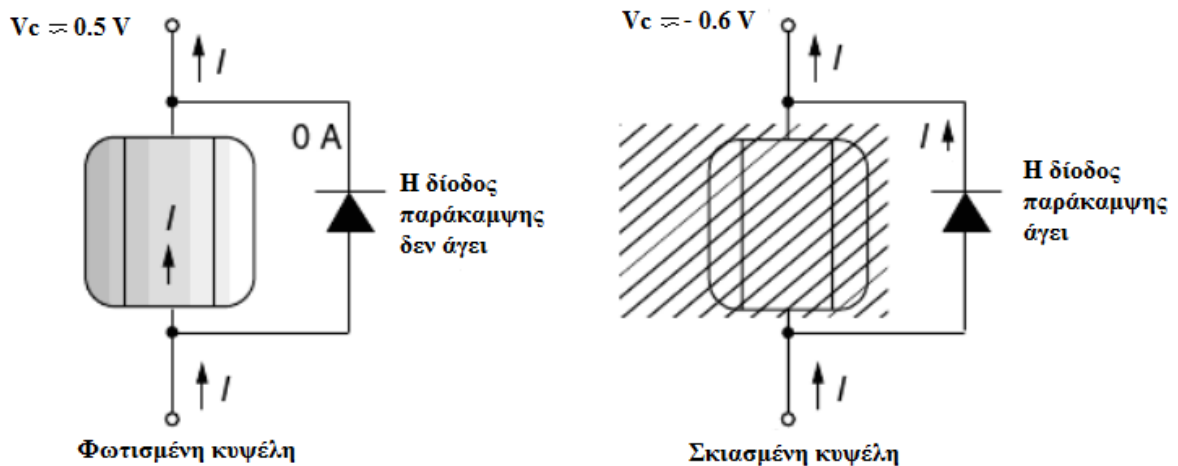


Σχήμα 5.4 I-V καμπύλες πλαισίου σε συνθήκες φωτισμού, μερικής σκίασης κατά 50% και πλήρους σκίασης. Η διακεκομμένη γραμμή στα 13V αντιπροσωπεύει την τάση φόρτισης μιας μπαταρίας 12V^[20].

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερό πως ακόμα και με ελάχιστη σκίαση μιας κυψέλης το παραγόμενο ρεύμα του πλαισίου, μειώνεται δραματικά, με αποτέλεσμα να γίνεται δύσκολη ακόμα και η φόρτιση μιας συμβατικής μπαταρίας.

5.4.1 ΔΙΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ

Για να διατηρηθεί η απόδοση του πλαισίου σε υψηλά επίπεδα ακόμα και σε φαινόμενα σκίασης όπως αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, συνηθίζεται να προστίθενται στις κυψέλες του πλαισίου εξωτερικές διόδους, οι οποίες ονομάζονται ‘δίοδοι παράκαμψης’. Η δίοδος παράκαμψης είναι μια ανάστροφα πολωμένη δίοδος (ως προς την κυψέλη), η οποία συνδέεται στα άκρα της κυψέλης. Όταν η κυψέλη φωτίζεται, παράγει τάση, οπότε η δίοδος δέχεται στα άκρα της αντίθετη τάση και πολώνεται αρνητικά, με αποτέλεσμα να μην άγει, άρα δεν επεμβαίνει καθόλου στο κύκλωμα. Όταν, όμως, η κυψέλη βρίσκεται σε συνθήκες σκίασης, τότε θα αρχίσει να πολώνεται αρνητικά με αποτέλεσμα να φτάνει πλέον στα άκρα της δίοδου θετική ως προς αυτήν τάση. Σε αυτήν την περίπτωση η δίοδος θα ξεκινήσει να άγει, προσφέροντας ένα μονοπάτι παράκαμψης στο ρεύμα της κυψέλης και δίνοντας στα άκρα της κυψέλης μια πτώση τάσης περίπου $V \approx 0.6V$ όπως φαίνεται και στο **σχήμα 5.5** παρακάτω.



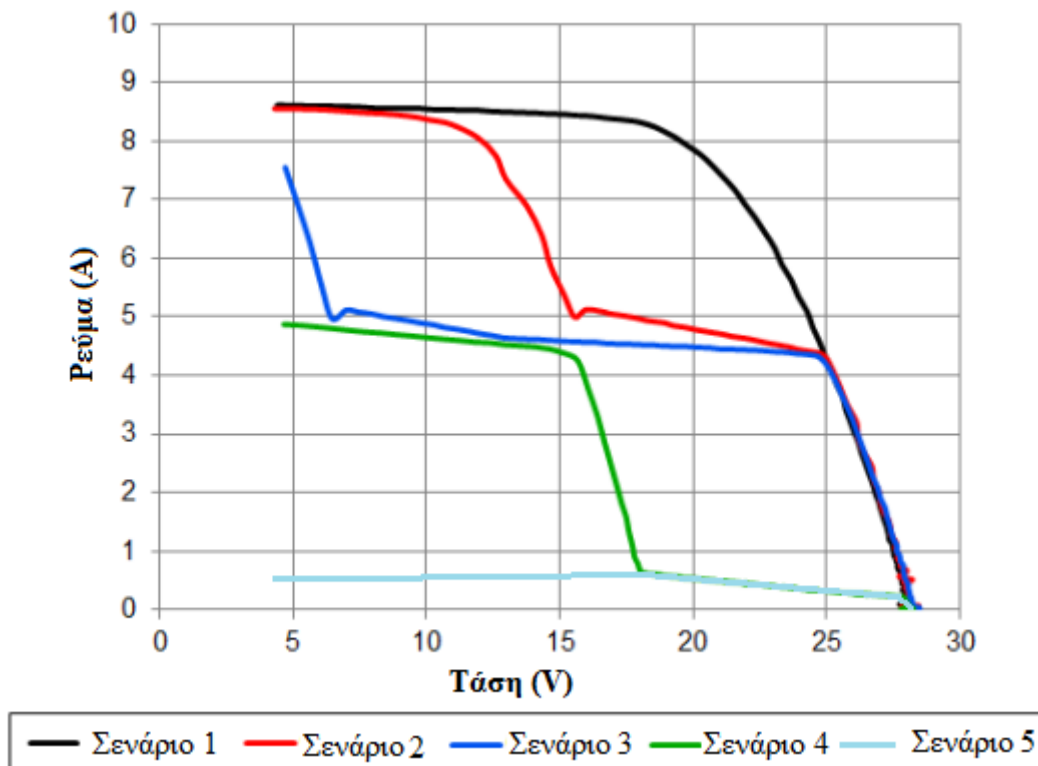
Σχήμα 5.5 α) κυψέλη με δίοδο παράκαμψης σε συνθήκες φωτισμού.

β) κυψέλη με δίοδο παράκαμψης κυψέλη σε συνθήκες σκίασης.

Στην πράξη, επειδή η τοποθέτηση διόδων παράκαμψης σε κάθε κυψέλη ενός πλαισίου είναι μια πολύ δαπανηρή διαδικασία, συνηθίζεται να τοποθετούνται διόδους παράκαμψης σε ομάδες (ή strings) κυψελών σε σειρά, συνήθως ανά 16 με 18 κυψέλες.

Παρακάτω φαίνεται η επίδραση που έχουν οι διόδους παράκαμψης στο πλαίσιο της Kyocera KD205GX-LPU, το οποίο διαθέτει συνολικά 48 κυψέλες και 3 διόδους παράκαμψης σε 3 strings των 16 κυψελών, σε κάθεμια από τις παρακάτω περιπτώσεις:

- **Σενάριο 1:** Πλήρης έκθεση του πλαισίου στο φως
- **Σενάριο 2:** Μερική σκίαση μιας κυψέλης από ένα string.
- **Σενάριο 3:** Μερική σκίαση δύο κυψελών από διαφορετικά strings.
- **Σενάριο 4:** Πλήρης σκίαση μιας κυψέλης ενός string με παράλληλη μερική σκίαση μιας δεύτερης κυψέλης από άλλο string.
- **Σενάριο 5:** Μερική σκίαση 3 κυψελών από τα 3 διαφορετικά strings του πλαισίου.



Διάγραμμα 5.7 Καμπύλες I-V του πλαισίου KD205GX-LPU για διάφορες συνθήκες σκίασης ^[20].

5.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΑΘΑΡΣΙΩΝ

Με τον όρο «ακαθαρότητα» του φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να γίνει αναφορά σε δύο τελείως διαφορετικούς τομείς. Ο ένας είναι οι προσμίξεις του κρυστάλλου του πυριτίου οι οποίες δημιουργούνται κατά την επεξεργασία και την κατασκευή του ηλιακού πυριτίου και ο άλλος είναι οι ακαθαρσίες που προκύπτουν κατά την λειτουργία του πλαισίου σε εξωτερικό περιβάλλον-ρύποι-και μειώνουν την απόδοση του πλαισίου. Παρακάτω εξετάζονται και οι δύο αυτές περιπτώσεις

5.5.1 ΑΚΑΘΑΡΣΙΕΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥ

Το επίπεδο της ακαθαρσίας είναι βασικός παράγοντας για την ρύθμιση του κόστους αλλά και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός φ/β πλαισίου. Οι ακαθαρσίες του μετάλλου είναι οι επικρατέστεροι μολυσματικοί παράγοντες στο φ/β πυρίτιο και μπορούν να υποβιβάσουν σοβαρά την απόδοση των τελικών συσκευών είτε με τη δημιουργία μεταλλικών ενώσεων πυριτίου ή/και δρώντας ως κέντρα επανασύνδεσης.

Οι κατασκευαστές φ/β πυριτίου χρησιμοποιούν χαμηλής ποιότητας πρώτη ύλη που αποτελείται από παλιοσίδερα, χωρίς κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, τα οποία έχουν λιωθεί ξανά. Ένα μεγάλο μέρος αυτού του υλικού είναι απορρίμματα από τη βιομηχανία της μικροηλεκτρονικής. Οι ακαθαρσίες που υπάρχουν στην πρώτη ύλη μεταφέρονται στο λειωμένο μέταλλο και στον ανεπτυγμένο κρύσταλλο όπως επιβάλλεται από τους συντελεστές διαχωρισμού. Ως εκ τούτου, γενικά, το αρχικό φ/β υλικό έχει μια υψηλή περιεκτικότητα σε ακαθαρσίες. Τυπικά αυτά τα υποστρώματα περιέχουν άνθρακα (C) και/ή οξυγόνο (O) σε επίπεδα κοντά στον κορεσμό, μεταβατικά μέταλλα σε κλίμακα 10^{12} - 10^{14} cm⁻³, και έναν πλήθος άλλων ακαθαρσιών όπως τιτάνιο (Ti) και βάριο (Ba)^[21].

Λόγω των υψηλών συγκεντρώσεών τους, σε πολλές περιπτώσεις οι ακαθαρσίες μπορούν να σχηματίσουν ιζήματα σε συγκεκριμένα μέρη όπως σε εκτεταμένες ατέλειες, στα όρια κρυστάλλων, και σε συγκροτήματα ατελειών. Η χημική δομή τέτοιων ιζημάτων μπορεί να είναι αρκετά σύνθετη. Παραδείγματος χάριν, αναλύσεις μικρο-ακτινών X έχουν δείξει ότι μερικά ιζήματα είναι κυρίως μεταλλικά αλλά περιέχουν σημαντικά ποσά οξυγόνου ή και άνθρακα.

Κάτι τέτοιο μπορεί να υποδηλώνει ότι τα ιζήματα μετάλλων είναι μεταλλικές ενώσεις πυριτίου, καρβίδια, και οξειδία. Από την άλλη, μπορεί να σημάνει ότι η καθίζηση των μετάλλων είναι μια δευτερεύουσα διαδικασία που πραγματοποιείται στην εγγύτητα των προϋπαρχόντων ιζημάτων οξυγόνου/άνθρακα. Ένα τέτοιο φαινόμενο μπορεί να εμφανιστεί σαν ένας μηχανισμός τοπικής χαλάρωσης.

Οι μονοκρυσταλλικές ράβδοι CZ (Czochralski) για τα φ/β αναπτύσσονται σε τόσο μεγάλα ποσοστά που μπορεί να είναι πολλές φορές γρηγορότερα από αυτά της συμβατικής ανάπτυξης για τη μικροηλεκτρονική. Αυτοί οι γρήγοροι ρυθμοί ψύξης συνοδεύονται από υπερβολικές θερμικές πιέσεις που οδηγούν στην παραγωγή ατελειών. Συνεπώς, το μονοκρυσταλλικό υλικό αναμένεται να έχει υψηλές συγκεντρώσεις εσωτερικά-αποσβησμένων, εκτός ισορροπίας, σημειακών ατελειών. Σε μερικές περιπτώσεις, ένα μέρος της ράβδου μπορεί να αποκτήσει υψηλή πυκνότητα κρυσταλλικών ατελειών (κυρίως παραμορφώσεις) ή να χάσει ακόμη και τη κρυσταλλικότητά του και να γίνει πολυκρυσταλλικό^[22].

Οι ακαθαρσίες και οι ατέλειες εισάγουν ενεργειακά επίπεδα στο διάκενο με μια συνακόλουθη αύξηση στην επανασύνδεση των φορέων μειονότητας. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στα φ/β - πυριτίου (**PV-Si**) παρουσιάζουν οι ακαθαρσίες των μεταβατικών μετάλλων (**Transition Metals-TM**), ιδιαίτερα ο σίδηρος(**Fe**), το χρώμιο(**Cr**) και το νικέλιο(**Ni**). Στη διαλυμένη μορφή, αυτές οι ακαθαρσίες είναι ιδιαίτερα κινητικές με διαχυτικότητες κοντά σε $10^{-6}\text{cm}^2\text{s}^{-1}$, και παράγουν βαθιά επίπεδα. Τυπικά, η συνολική συγκέντρωση των TM είναι αρκετά υψηλή, κοντά στο 10^{14}cm^{-3} .

Προσδιορισμός καθαρότητας κρυστάλλου^[21]

Όλες οι ηλιακές τεχνολογίες μπορούν να ωφεληθούν από τον έλεγχο των μολύνσεων. Γενικότερα, όσο χαμηλότερο είναι το επίπεδο των μολύνσεων, τόσο καλύτερη είναι και η απόδοση. Αυτό το μοτίβο εκφράζεται στις προδιαγραφές του <<Πυριτίου-Ηλιακής-Κατηγορίας>> (Solar Grade Silicon) και αναφέρεται σαν <<αριθμός των εννιαριών>> (number of nines) ή καθαρότητα των N. Έτσι, ένα υλικό καθαρότητας εννιά εννιαριών (9N) πρόκειται να είναι 10 φορές καλύτερο από ένα άλλο καθαρότητας 8N. Ωστόσο, υπάρχουν μερικά προβλήματα με αυτή τη μέθοδο εξακρίβωσης της καθαρότητας. Καταρχάς, δεν υπάρχει κάποια συμφωνία σχετικά με το ποιά στοιχεία θα πρέπει ή δεν θα πρέπει να συμπεριληφθούν στην αναφορά καθαρότητας. Συχνά οι αναφερόμενες ακαθαρσίες αντανακλούν στο τι μπορεί και τι δεν μπορεί να καταγραφεί από την τεχνική μέτρησης. Ωστόσο, η μέτρηση καθαρότητας μπορεί να «διαμορφωθεί» ώστε να επιλέγονται ποια στοιχεία θα συμπεριληφθούν και ποια θα αποκλειστούν. Ένα παράδειγμα φαίνεται στον παρακάτω **πίνακα 5.3** όπου προσθέτοντας όλες τις μετρημένες μολύνσεις αλλά και τα όρια ανίχνευσης όπου τα στοιχεία δεν μπορούσαν να εντοπιστούν προκύπτει μία αναφορά καθαρότητας 7N. Αν επιλεγεί, όμως, να μην αναφερθεί το επίπεδο άνθρακα (με το κόκκινο περίγραμμα), ή αν η μέθοδος ανάλυσης δεν μπορεί να μετρήσει τον άνθρακα (ένας σύνηθες περιορισμός) τότε η καθαρότητα μπορεί να αναφερθεί σαν 8N. Θα μπορούσε να γίνει και περαιτέρω βελτίωση της αναφοράς καθαρότητας αποκλείοντας το Sb από την μέτρηση. Έτσι γίνεται σημαντικό να υπάρχει γνώση των στοιχείων τα οποία αναφέρονται ή όχι κάθε φορά στην αναφορά καθαρότητας.

| SIMS Bulk Analysis results | | | | Detection limits |
|----------------------------|----------------------------|--------------|--------------|----------------------------|
| Elements | Conc.(at/cm ³) | Conc.(ppbat) | Conc.(ppbwt) | Conc.(at/cm ³) |
| B | 4.9E+13 | 0.98 | 0.38 | 5E+12 |
| Na | <4.0E+11 | <0.008 | <0.006 | 4E+11 |
| Al | <6.0E+12 | <0.12 | <0.1 | 6E+12 |
| P | 7.2E+13 | 1.44 | 1.59 | 5E+12 |
| Cr | <3.0E+11 | <0.006 | <0.01 | 3E+11 |
| Fe | <1.0E+13 | <0.20 | <0.4 | 1E+13 |
| Ni | <1.0E+14 | <2.00 | <4 | 1E+14 |
| Cu | <1.0E+14 | <2.00 | <4 | 1E+14 |
| Zn | <2.0E+14 | <4.00 | <9 | 2E+14 |
| K | <4.0E+11 | <0.01 | <0.01 | 4E+11 |
| C | <3.0E+15 | <60 | <25 | 3E+15 |
| As | 8.4E+13 | 1.68 | 4.54 | 5E+12 |
| Sb | 7.8E+13 | 1.56 | 6.76 | 1E+13 |

Πίνακας 5.3 Ακαθαρσίες στο ηλιακό πυρίτιο μετρημένες με φασματοσκοπία SIMS^[21].

Μέθοδοι μέτρησης καθαρότητας ηλιακού πυριτίου

- 1. ICP-MS:** Απαιτεί την διάλυση του δείγματος σε υγρή μορφή για ανάλυση. Το διάλυμα εξατμίζεται, ιονίζεται σε καμινέτο πλάσματος και αναλύεται σε ένα τετραπολικό φασματοσκόπιο μάζας.
- 2. GDMS:** Το δείγμα μπορεί να είναι στην πρωταρχική του μορφή για αυτή την ανάλυση. Το δείγμα εκτίθεται σε πλάσμα όπου βάλλεται από ιονισμένα άτομα, ιονίζεται, και αναλύεται σε ένα φασματοσκόπιο μάζας μαγνητικού τομέα.
- 3. SIMS:** Για ανάλυση πυριτίου σαν η τα δείγματα χρειάζεται να τμηθούν εγκάρσια πριν υποβληθούν στην διαδικασία ανάλυσης. Έπειτα χαράσσονται με ιοντοβολή προκαλώντας έτσι ιονισμό στο δειγματικό υλικό. Τέλος, απομονώνονται τα ιόντα, τα οποία αναλύονται σε φασματοσκόπιο μάζας.

5.5.2 ΑΚΑΘΑΡΣΙΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

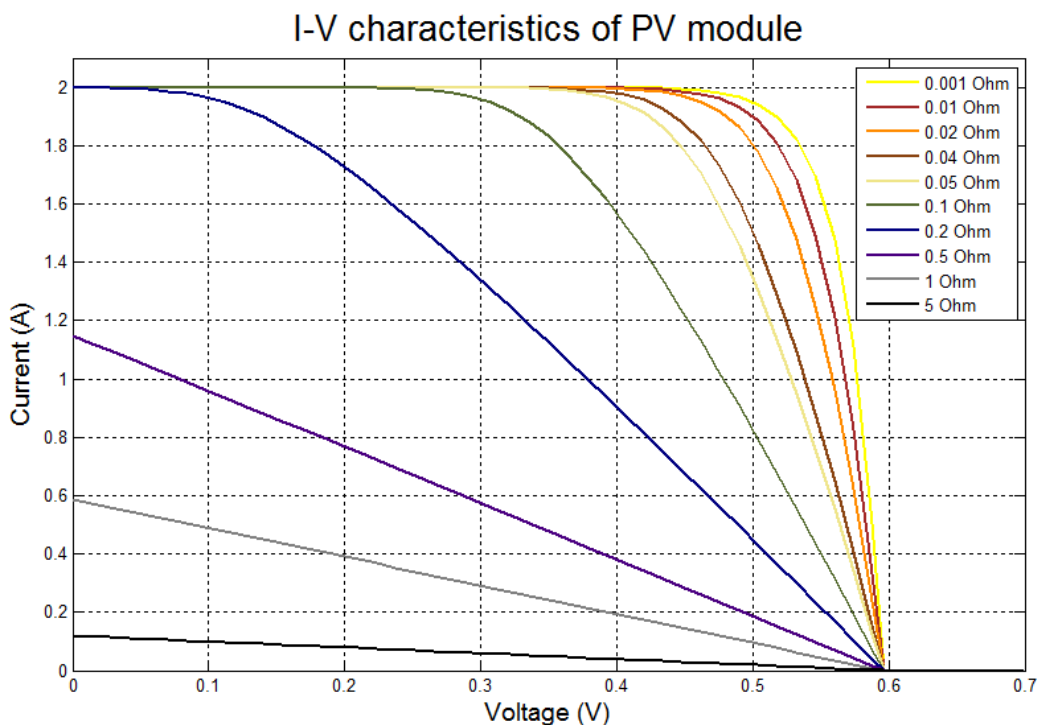
Οι ακαθαρσίες στην επιφάνεια του πλαισίου μπορούν να προκαλέσουν προσωρινή σκίαση και οφείλονται συνήθως σε παράγοντες όπως το χιόνι, τα φύλλα, τα περιττώματα των πουλιών αλλά και σε άλλα είδη ακαθαρσιών. Το χιόνι είναι ένας σημαντικός παράγοντας ιδιαίτερα στις ορεινές περιοχές. Το χιόνι βέβαια σε μια συστοιχία φωτοβολταϊκών λιώνει πιο γρήγορα από το γύρω χιόνι, με αποτέλεσμα η σκίαση να εμφανίζεται μόνο για λίγες μέρες^[18].

Η σκόνη και οι ακαθαρσίες αιθάλης σε βιομηχανικές περιοχές ή τα πεσμένα φύλλα σε δασικές περιοχές είναι επίσης σημαντικοί παράγοντες που μαζεύονται πάνω στη συστοιχία των φωτοβολταϊκών και προκαλούν σκίαση. Το αποτέλεσμα αυτό της σκίασης είναι λιγότερο επιβαρυντικό αν η συστοιχία αυτοκαθαρίζεται (δηλαδή αν παρασύρονται οι ακαθαρσίες από τη ροή του βρόχινου νερού). Αυτό εξασφαλίζεται από τη γωνία κλίσης στο σύστημα με κλίση 12 μοίρες ή και περισσότερο. Οι γωνίες με μεγαλύτερη κλίση αυξάνουν την ταχύτητα ροής του νερού της βροχής με αποτέλεσμα να απομακρύνουν μακριά τα βρώμικα σωματίδια. Έτσι αυξάνοντας την κλίση της συστοιχίας μειώνεται αυτό το είδος της σκίασης. Στις χιονισμένες περιοχές η τοποθέτηση των συστημάτων σε οριζόντια διάταξη μειώνει τις απώλειες που προκαλούνται κατά το ήμισυ. Με τον τρόπο αυτό, η σκίαση που προκαλείται από το χιόνι γενικά επηρεάζει μόνο δυο και όχι τέσσερις σειρές κυψελών σε κάθε πλαίσιο σε αντίθεση με αυτό που συμβαίνει στην κάθετη τοποθέτηση. Η σκίαση που προκαλείται από τα φύλλα, τα περιττώματα των πουλιών, την ατμοσφαιρική ρύπανση και από τους άλλους ρύπους έχει μια ισχυρότερη και μεγαλύτερη σε διάρκεια επίδραση. Σε αυτό το σύστημα ο τακτικός καθαρισμός των φωτοβολταϊκών μονάδων θα αυξήσει σημαντικά την ηλιακή απόδοση. Σε μια κανονική θέση και με αρκετή κλίση μπορεί να θεωρηθεί πως η απώλεια που οφείλεται σε ακαθαρσίες πουλιών ανέρχεται στο 2% -5%. Σε γενικές γραμμές, η απώλεια αυτή είναι αποδεκτή (Quaschnig, 1996). Αν υπάρχει μεγάλη ρύπανση, τα μοντέλα θα πρέπει να καθαρίζονται με νερό και με χρήση σφουγγαριού χωρίς να χρησιμοποιηθεί απορρυπαντικό. Για να αποφεύγετε το γρατζούνισμα των επιφανειών δε θα πρέπει να βουρτσίζονται ή να καθαρίζονται με στεγνή επιφάνεια^[23].

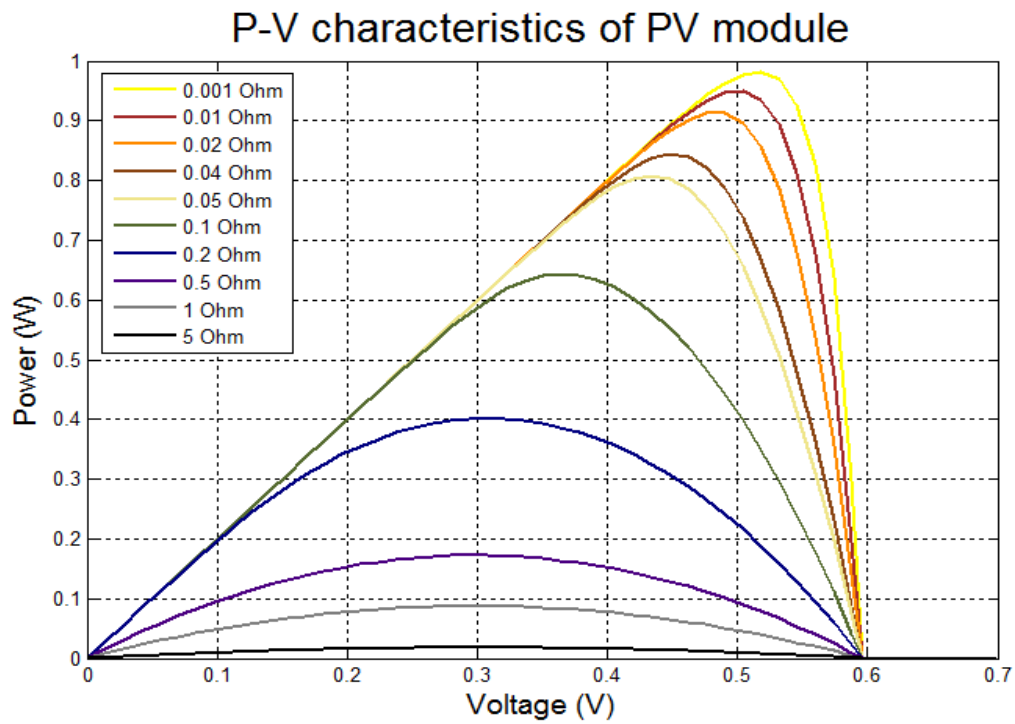
5.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ R_s

Η αντίσταση σειράς R_s όπως έχει αναφερθεί και στο **κεφάλαιο 4.12** αποτελείται από τα μεταλλικά μέρη της κυψέλης καθώς και από τις αντιστάσεις του εκπομπού και της βάσης. Αυξημένες τιμές στην R_s υποβαθμίζουν την κυψέλη και οδηγούν σε πολύ χαμηλές αποδόσεις. Η επίδραση της R_s , ωστόσο, είναι καθοριστική σε υψηλές κυρίως ακτινοβολίες. Για να φανεί η επίδραση της R_s στη συμπεριφορά της κυψέλης, έγινε προσομοίωση μιας ιδανικής κυψέλης σε συνθήκες STC αλλά και συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας για διάφορες τιμές R_s .

Η επίδραση της R_s σε υψηλή ακτινοβολία φαίνεται στις παρακάτω χαρακτηριστικές:

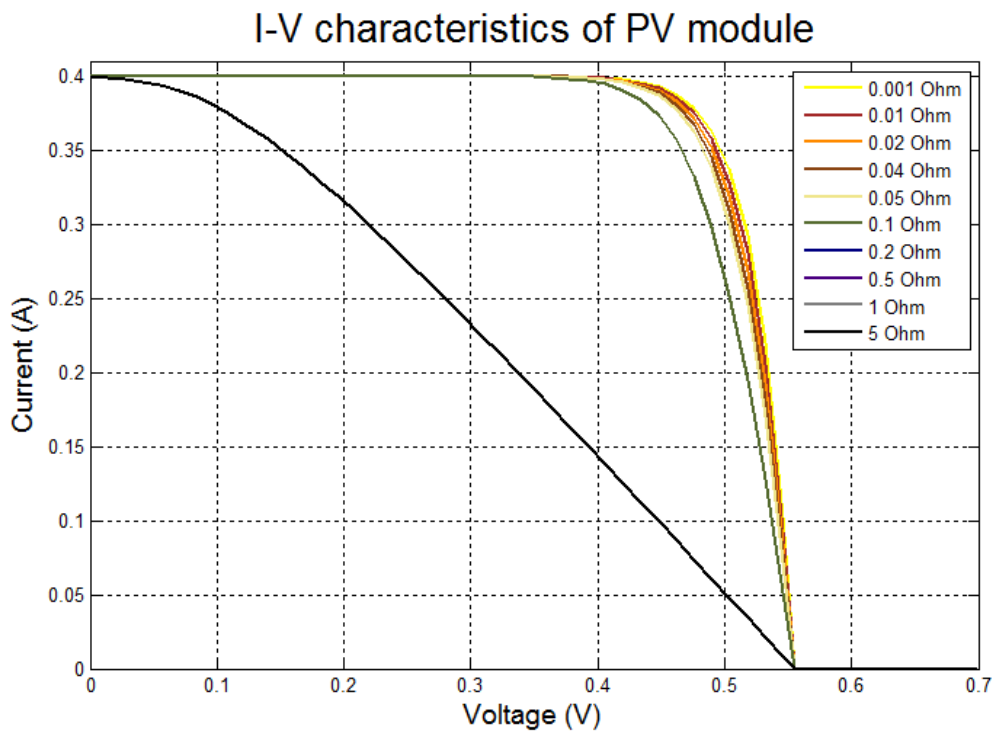


Διάγραμμα 5.8 I-V καμπύλες για ιδανική κυψέλη με $V_{oc} = 0.596$ V , $I_{sc} = 2$ A, $R_{sh} = \infty$ ohm, συντελεστής ιδανικότητας $n=1$, σε συνθήκες STC για διάφορες τιμές R_s .

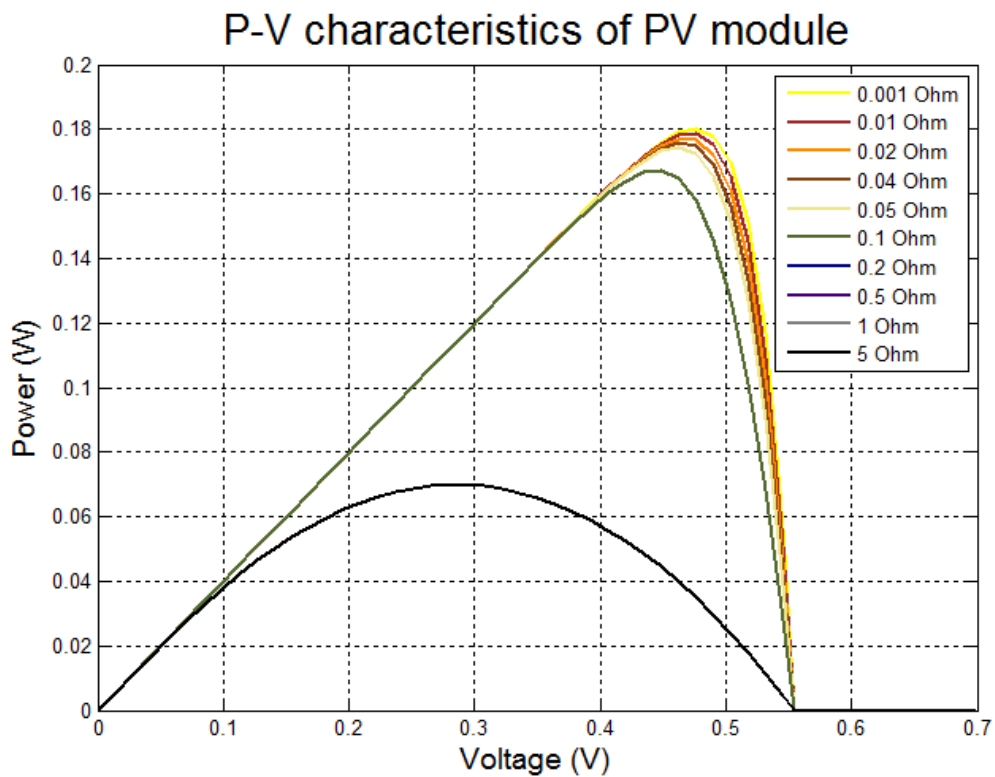


Διάγραμμα 5.9 P-V καμπύλες για ιδανική κυψέλη με $V_{oc} = 0.596$ V , $I_{sc} = 2$ A, $R_{sh} = \infty$ ohm, συντελεστής ιδανικότητας $n=1$, σε συνθήκες STC για διάφορες τιμές R_s .

Ενώ αντίστοιχα για χαμηλή ακτινοβολία προκύπτουν οι παρακάτω χαρακτηριστικές:



Διάγραμμα 5.10 I-V καμπύλες για ιδανική κυψέλη με $V_{oc} = 0.596$ V , $I_{sc} = 2$ A, $R_{sh} = \infty$ ohm, συντελεστής ιδανικότητας $n=1$, θερμοκρασία κυψέλης 25°C , ακτινοβολία 200 W/m² για διάφορες τιμές R_s .



Διάγραμμα 5.11 P-V καμπύλες για ιδανική κυψέλη με $V_{oc} = 0.596$ V , $I_{sc} = 2$ A, $R_{sh} = \infty$ ohm, συντελεστής ιδανικότητας $n=1$, θερμοκρασία κυψέλης 25°C , ακτινοβολία 200 W/m² για διάφορες τιμές R_s .

5.7 ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Παρακάτω αναλύονται οι διάφοροι τύποι υποβάθμισης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου:

A. Ρύπανση Εμπρόσθιας Επιφάνειας (Front Surface Soiling)

Αυτός ο τύπος υποβάθμισης μπορεί να εμφανιστεί λόγω συσσώρευσης σκόνης στην εμπρόσθια επιφάνεια του πλαισίου. Τέτοιες απώλειες παραμένουν κάτω του 10% για πλαίσια με επιφάνεια από γυαλί λόγω του φυσικού καθαρισμού που γίνεται από τον αέρα και τη βροχή. Η συσσωρευμένη σκόνη ωστόσο, μπορεί να σκιάσει μερικώς μια κυψέλη στο πλαίσιο αναγκάζοντάς το να παράγει λιγότερο ρεύμα από τα άλλα πλαίσια της σειράς. Εάν υπάρχει ανεπαρκής ηλεκτρική προστασία, η μερική σκίαση της κυψέλης μπορεί να οδηγήσει στη μη αναστρέψιμη κατάσταση της θερμής κηλίδας (hot spot) και ακόμη και στην καταστροφή του πλαισίου. Η ακαθαρσία της εμπρόσθιας επιφάνειας μπορεί να ανιχνευθεί από την οπτική επιθεώρηση του πλαισίου^[24].

B. Οπτική Υποβάθμιση (Optical Degradation)

Η οπτική υποβάθμιση μπορεί να προκληθεί από τον αποχρωματισμό του υλικού ενθυλάκωσης. Εξαιτίας της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV), της θερμοκρασίας, ή της υγρασίας μπορεί να προκληθεί κιτρίνισμα του υλικού ενθυλάκωσης έπειτα από παρατεταμένες περιόδους έκθεσης. Μπορεί επίσης να εμφανιστεί λόγω της εξάπλωσης της σκόνης από τις ακαθαρσίες της εμπρόσθιας επιφάνειας ή από την είσοδο υγρασίας στις ενώσεις των ακρών του πλαισίου. Κατά τη χρήση πολυαιθυλενίου (EVA) ως υλικού ενθυλάκωσης, ο χρόνος ζωής του μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας UV σταθεροποιητές και αντιοξειδωτικά. Η συγκέντρωση των σταθεροποιητών, ωστόσο, μειώνεται βαθμιαία σε υψηλές θερμοκρασίες και κατά την έκθεση σε UV ακτινοβολίες. Όταν η συγκέντρωση αυτού του σταθεροποιητή πέσει κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή, τότε εμφανίζεται ραγδαία υποβάθμιση του υλικού ενθυλάκωσης. Αυτή η υποβάθμιση συνδέεται με το κιτρίνισμα του EVA, το οποίο συνοδεύεται από το σχηματισμό οξικού οξέος. Το τελευταίο κάνει το EVA καφετί. Το καφετί EVA απορροφά ένα σημαντικό μέρος ηλιακού φωτός στην UV και την

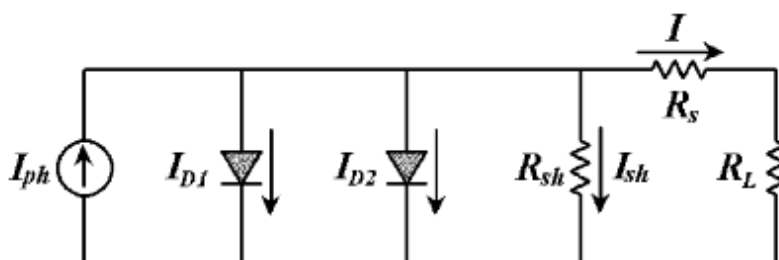
ορατή περιοχή μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την διαθεσιμότητα των φωτονίων που απαιτείται για την παραγωγή ρεύματος. Η αμαύρωση του υλικού ενθυλάκωσης μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απόδοσης του πλαισίου **έως και 50%**. Η υποβάθμιση του EVA μπορεί να ανιχνευθεί οπτικά φωτίζοντας το πλαίσιο με λαμπτήρα υπεριώδους ακτινοβολίας 375-nm. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, οι περιοχές του EVA που έχουν αρχίσει να υποβιβάζονται θα παραγάγουν ένα σχεδόν άσπρο χρώμα.

Γ. Υποβάθμιση Κυψελών (Cell Degradation)

Η υποβάθμιση ηλιακών κυψελών μπορεί να προκληθεί από τρεις παράγοντες οδηγώντας σε βαθμιαία υποβάθμιση της απόδοσης του πλαισίου. Αυτοί οι παράγοντες είναι αύξηση της αντίστασης σειράς της κυψέλης R_s , μείωση της παράλληλης αντίστασης της κυψέλης R_{sh} , και φθορά της αντιανακλαστικής επίστρωσης.

- **Αντίσταση σειράς:** Η αντίσταση σειράς, R_s ενός ΦΒ πλαισίου προκύπτει από τις αντιστάσεις των κολλήσεων με καλάνι των κυψελών, από τις περιοχές εκπομπού και βάσης, από τις επιμεταλλώσεις των κυψελών, από τις μπάρες τροφοδότησης στην διασυνδεδεμένη κυψέλη και τις αντιστάσεις στα τερματικά των διόδων. Η αντίσταση σειράς μειώνει την παραγόμενη τάση από την κυψέλη, που με τη σειρά της μειώνει την απόδοση της ΦΒ κυψέλης, και κατ'επέκταση του πλαισίου. Παρόλο που οι κατασκευαστές κυψελών και πλαισίων ελαχιστοποιούν τις απώλειες της αντίστασης σειράς, η καθημερινή θερμική έκθεση των πλαισίων στο εξωτερικό περιβάλλον οδηγεί σε σταδιακή αύξησή της.

- **Παράλληλη αντίσταση:** Η παράλληλη αντίσταση, R_{sh} , αντιπροσωπεύει οποιαδήποτε παράλληλα μονοπάτια υψηλής-αγωγιμότητας (διακλαδώσεις) δημιουργούνται δια μέσου της ηλιακής κυψέλης ή στις άκρες της κυψέλης. Κάτι τέτοιο θα οφείλονταν σε φθορά του κρυστάλλου και σε ακαθαρσίες μέσα ή κοντά στη δίοδο, που θα οδηγούσαν σε αύξηση του παράλληλου ρεύματος I_{sh} , το οποίο φαίνεται στο **σχήμα 5.6**. Αυτά τα παράλληλα μονοπάτια οδηγούν το ρεύμα μακριά από το προοριζόμενο φορτίο και οι επιπτώσεις τους είναι καταστρεπτικές όσον αφορά την απόδοση του πλαισίου ειδικά σε επίπεδα χαμηλής ακτινοβολίας, όπως αναλύθηκε και στο **κεφάλαιο 5.1.1**. Η αύξηση στον αριθμό των διακλαδώσεων αυξάνει το ισοδύναμο ρεύμα διακλάδωσης στην κυψέλη, και ως εκ τούτου μειώνει την R_{sh} .



Σχήμα 5.6 Ισοδύναμο-κύκλωμα μιας ηλιακής κυψέλης. I_{ph} είναι το φωτο-παραγόμενο ρεύμα, I_D το ρεύμα κόρου, R_{sh} η παράλληλη αντίσταση, R_s αντίσταση σειράς και R_L το φορτίο^[24].

- Αντιανακλαστική επίστρωση:** Η ανακλαστικότητα του κρυσταλλικού πυριτίου είναι περίπου 35% στη μέγιστη ένταση του ηλιακού φάσματος, η όποια εμφανίζεται σε μήκος κύματος 600 nm. Αυτό το ποσοστό μπορεί να μειωθεί περίπου στο 20% με τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας και περίπου 3% με την προσθήκη ενός αντιανακλαστικού (AR) επιστρώματος. Η χαμηλή ανακλαστικότητα βελτιώνει τόσο το ρεύμα βραχυκύκλωσης όσο και την τάση ανοιχτοκύκλωσης, τα οποία με τη σειρά τους ενισχύουν την αποδοτικότητα μετατροπής της ΦΒ κυψέλης. Τα AR επιστρώματα πρέπει για προφανείς λόγους να είναι διαφανή και είναι, επομένως, συνήθως οξείδια. Η υποβάθμιση αυτών των επιστρωμάτων με τον χρόνο μπορεί να αποδοθεί στην ενδοδιάχυση από την περιοχή εκπομπής της κυψέλης προς το AR επίστρωμα και το αντίθετο. Η επίδραση της υποβάθμισης του AR επιστρώματος μιας κυψέλης σε ένα εν σειρά συνδεδεμένο string, είναι ότι η κυψέλη θα απορροφήσει τώρα λιγότερα εισερχόμενα φωτόνια και ως εκ τούτου θα παραγάγει λιγότερο ρεύμα από τις άλλες κυψέλες του string. Το αποτέλεσμα θα είναι μια αταίριαστη κυψέλη, η οποία αναλύεται παρακάτω. Η υποβάθμιση των AR επιστρωμάτων παρατηρείται σαν ένα λαμπύρισμα στο χρώμα της κυψέλης. Μπορεί επίσης να ανιχνευθεί από την παρακολούθηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης του πλαισίου σε διάρκεια χρόνου.

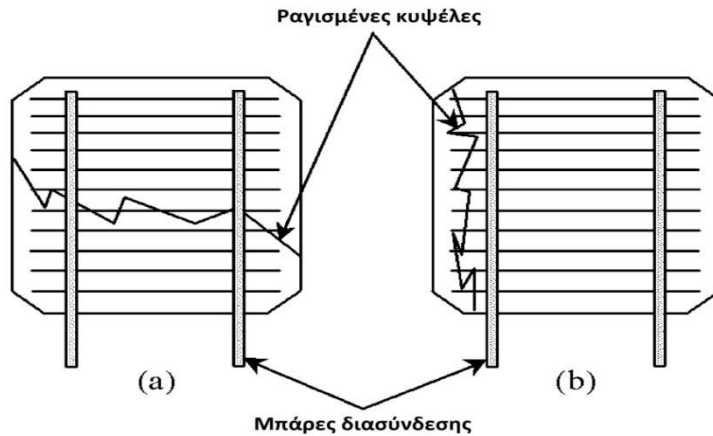
Δ. Αναντιστοιχία Κυψελών (Mismatched Cells)

Η αναντιστοιχία των κυψελών προκαλείται από την ακαθαρσία της εμπρόσθιας επιφάνειας, την υποβάθμιση του υλικού ενθυλάκωσης, τη φθορά του AR επιστρώματος, τις κατασκευαστικές ατέλειες, το ράγισμα, και τη μερική σκίαση της ΦΒ κυψέλης. Οι προβληματικές κυψέλες υποβιβάζουν την απόδοση ολόκληρου του πλαισίου και είναι επιβλαβείς, ειδικά όταν οι κυψέλες είναι συνδεδεμένες όλες εν σειρά σε strings στο πλαίσιο.

Όταν μια κυψέλη ενός πλαισίου παράγει λιγότερο ρεύμα από τις άλλες κυψέλες του ίδιου πλαισίου, τότε οι τελευταίες λειτουργούν με αντίθετη πόλωση ως προς την ελαττωματική κυψέλη. Αυτό αναγκάζει την ελαττωματική κυψέλη να λειτουργεί στην αρνητική περιοχή τάσης με αποτέλεσμα να μετατρέπεται σε καταναλωτή ισχύος. Στο **σχήμα 5.7(a)** παρουσιάζει πως μπορούν να βοηθήσουν οι μπάρες τροφοδότησης ώστε να αποφευχθεί μια κυψέλη να παράγει λιγότερο ρεύμα εξαιτίας μιας ρωγμής όπως αυτήν της εικόνας. Η θερμική πίεση, και η φθορά λόγω χαλαζόπτωσης μπορούν να προκαλέσουν ράγισμα στις κυψέλες. Οι ρωγμές μπορούν επίσης να προκληθούν κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και της εγκατάστασης. Η ρωγμή στο **σχήμα 5.7(b)** βγάζει ένα μέρος της κυψέλης εκτός ηλεκτρικού κυκλώματος. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή μειωμένου ρεύματος από την κυψέλη. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και όταν μια κυψέλη είναι μερικώς σκιασμένη.

Οι συνθήκες αναντιστοιχίας μεταξύ των ηλιακών κυψελών οδηγούν τις κυψέλες σε υπερθέρμανση. Όταν η θερμοκρασία της αταίριαστης κυψέλης υπερβεί μια κρίσιμη τιμή ($\sim 150^\circ$), τότε μπορεί να αποκολληθεί το υλικό ενθυλάκωσης της κυψέλης. Εάν η υψηλή ανάστροφη πόλωση υπερβεί την τάση διάσπασης της κυψέλης, τότε η κυψέλη μπορεί να πληγεί ανεπανόρθωτα από θερμική διάσπαση. Το τελευταίο εμφανίζεται με τον σχηματισμό θερμής κηλίδας. Ο σχηματισμός θερμής κηλίδας σε ηλιακές κυψέλες και πλαίσια όχι μόνο χαμηλώνει την αποδοτικότητα του πλαισίου, αλλά επηρεάζει και την τάση ανοιχτοκύκλωσης (V_{oc}), το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) τη μέγιστη ισχύ (P_{max}) και τον παράγοντα πλήρωσης ($FF = P_{max} / V_{oc} I_{sc}$).

Αν ένα πλαίσιο το οποίο περιέχει μια αταίριαστη κυψέλη δεν διαθέτει ολοκληρωμένη δίοδο παράκαμψης στο κύκλωμά του, τότε αυτή η αναντιστοιχία μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία θερμής κηλίδας. Οι αναντιστοιχίες στις κυψέλες μπορούν συνήθως να εντοπιστούν από οπτική επιθεώρηση, από τις I-V μετρήσεις, από τεστ αντοχής σε θερμή κηλίδα και/ή έλεγχο της θερμοκρασίας της κάθε κυψέλης ξεχωριστά όταν το πλαίσιο είναι ορθά πολωμένο.



Σχήμα 5.7 Επίδειξη του πως μπορούν να βοηθήσουν οι μπάρες διασύνδεσης να αποφευχθούν σφάλματα όταν υπάρχει ανοιχτό κύκλωμα^[24].

Ε. Υποβάθμιση Μειωμένου-Φωτός

Γνωστή επίσης και σαν φαινόμενο Staebler- Wronski, η υποβάθμιση μειωμένου-φωτός είναι η κυρίαρχη μορφή υποβάθμισης στα a-Si και στα κράματα a-Si. Όταν οι ΦΒ κυψέλες εκτίθενται στο φως, παρατηρείται παραγωγή και επανασύνδεση των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών (e-h). Θεωρείται ότι η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της επανασύνδεσης μπορεί να σπάσει μερικούς από τους χαλαρούς δεσμούς Si-Si στην περιοχή απογύμνωσης της κυψέλης. Αυτοί οι σπασμένοι δεσμοί διαμορφώνουν τις μετασταθείς ατέλειες, οι οποίες ενεργούν στη συνέχεια ως κέντρα επανασύνδεσης. Αυτά τα κέντρα ενισχύουν την επανασύνδεση των ζευγών e-h και, ως εκ τούτου, το σχηματισμό περισσότερων μετασταθών ατελειών. Η αύξηση στις ατέλειες αλλοιώνει την ποιότητα του υλικού. Η χαμηλότερη αυτή ποιότητα μεταφράζεται κατά συνέπεια σε υποβάθμιση στην απόδοση των ηλιακών κυψελών. Η υποβάθμιση μειωμένου-φωτός μπορεί να ανιχνευθεί με συνεχή να έλεγχο της V_{oc} και I_{sc} ή/και από την περιοδική μέτρηση των I-V χαρακτηριστικών.

Z. Υποβάθμιση Μειωμένης-Θερμοκρασίας

Τα ΦΒ πλαίσια αξιολογούνται από την ισχύ τους όπως μετρήθηκε στις πρότυπες συνθήκες δοκιμής (STC: 1000 W/m² ακτινοβολία, 25°C θερμοκρασία κυψέλης και αέριος μάζα 1,5 ολικό φάσμα). Ωστόσο, όταν ένα πλαίσιο λειτουργεί σε εξωτερικές συνθήκες, μόνο το 15% περίπου της προσπίπτουσας ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα μεγάλο μέρος του υπόλοιπου 85% μετασχηματίζεται σε θερμότητα ενώ το υπόλοιπο μπορεί να ανακλαστεί εσωτερικά ή να ανακλαστεί στην επιφάνεια του γυαλιού. Είναι επομένως προφανές ότι ένα πλαίσιο, που λειτουργεί υπαίθρια, σχεδόν πάντα θα έχει θερμοκρασία άνω των 25°C. Σε αυτές τις ανυψωμένες θερμοκρασίες, το διάκενο των κυψελών συνήθως μειώνεται, με συνέπεια τα φωτόνια με μεγαλύτερα μήκη κύματος να μπορούν πλέον να απορροφηθούν. Επίσης, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, η διάρκεια ζωής των φορέων μειονότητας γενικά αυξάνεται. Και οι δύο αυτοί οι παράγοντες θα αυξήσουν ελαφρώς το παραγμένο φωτόρευμα και συνεπώς το I_{sc} . Το ρεύμα κόρου, εντούτοις, μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει για να μειωθεί η V_{oc} της κυψέλης καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Η μείωση στην V_{oc} είναι πιο γρήγορη από την αύξηση στο I_{sc} , καταλήγοντας έτσι σε μια συνολική μείωση στον παράγοντα πλήρωσης της κυψέλης, και κατ'επέκταση, στην απόδοση με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Οι ανυψωμένες θερμοκρασίες επηρεάζουν την επίδοση όλων των πλαισίων, σε μερικά περισσότερο από άλλα. Γι αυτό το λόγο, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την εξάρτηση από την θερμοκρασία για το κάθε πλαίσιο. Με την μέτρηση της θερμοκρασιακής εξάρτησης των πλαισίων, μπορεί να εντοπιστεί μια αλλαγή στον θερμοκρασιακό συντελεστή. Αυτοί οι συντελεστές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να εξηγήσουν την συμπεριφορά των πλαισίων όταν αυτά λειτουργούν σε εξωτερικές συνθήκες.

5.7.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ

Για να αναλυθεί η υποβάθμιση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, είναι απαραίτητο ένα πλήρες σύνολο από μεθόδους αξιολόγησης. Η διαδικασία αυτή θα πρέπει να εφαρμόζεται στα πλαίσια προτού υποβληθούν σε συνθήκες υπαίθριας λειτουργίας και σε τακτά χρονικά διαστήματα αφότου έχουν τοποθετηθεί υπαίθρια. Για την αξιολόγηση των ΦΒ πλαισίων χρησιμοποιείται μια διαδικασία αξιολόγησης που καθιερώθηκε στο πανεπιστήμιο του Port Elizabeth, στη Νότια Αφρική. Η διαδικασία παρουσιάζεται παρακάτω^[24].

A. Περιεκτική Οπτική Επιθεώρηση

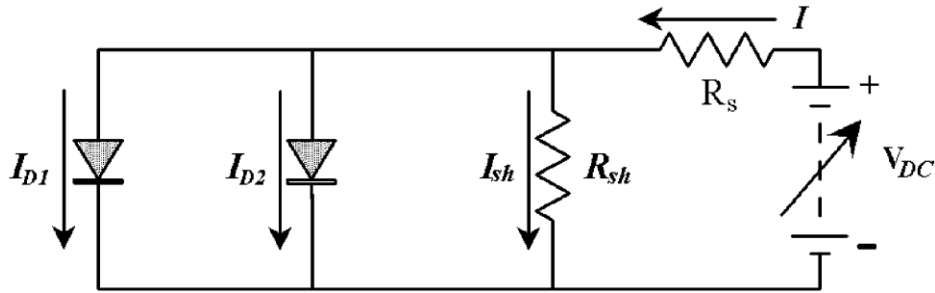
Τα πλαίσια επιθεωρούνται λεπτομερώς για οπτικές ατέλειες σε ελαφριά μεγέθυνση. Λαμβάνονται φωτογραφίες από τις παρατηρηθείσες ατέλειες ώστε να εξασφαλιστεί ότι αυτές οι ατέλειες έχουν προσδιοριστεί απόλυτα για μελλοντική αναφορά. Η οπτική επιθεώρηση θα αποκαλύψει ατέλειες όπως ραγισμένες ή μερικώς σκιασμένες κυψέλες, ατέλειες στις διασυνδέσεις, "καφέτισμα" του υλικού ενθυλάκωσης, και σχηματισμό θερμών κηλίδων.

B. I-V – Μετρήσεις Στο Φως

Οι I-V χαρακτηριστικές των ΦΒ πλαισίων μετριοούνται σε STC πριν από την υπαίθρια εγκατάσταση και χρησιμοποιούνται ως γραμμή βάσης για μελλοντική σύγκριση. Αυτές οι χαρακτηριστικές είναι απαραίτητες για να ανιχνευθεί οποιαδήποτε υποβάθμιση στις παραμέτρους της απόδοσης του πλαισίου καθώς η μέτρηση επαναλαμβάνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Γ. I-V – Μετρήσεις Στο Σκοτάδι

Οι I-V χαρακτηριστικές των ΦΒ πλαισίων στο σκοτάδι μετριοούνται πολώνοντας ορθά το πλαίσιο χωρίς την παρουσία φωτός. Παρόλο που η κατεύθυνση του ρεύματος του πλαισίου στο σκοτάδι είναι αντίθετη από αυτήν ενός πλαισίου το οποίο λειτουργεί στο φως, η κατεύθυνση του ρεύματος διόδου I_D , και του ρεύματος διακλαδώσεως I_{sh} , είναι η ίδια και για τις δύο μετρήσεις I-V. Η εικόνα 5.8 απεικονίζει τις R_s, R_{sh} και I_D στο ισοδύναμο κύκλωμα δύο-διόδων μίας ηλιακής κυψέλης επαφής p-n στο σκοτάδι.



Σχήμα 5.8 Ισοδύναμο κύκλωμα δύο-διόδων ηλιακής κυψέλης στο σκοτάδι.

Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης στο σκοτάδι του ισοδυνάμου κυκλώματος δίνεται από :

$$I = I_{D1} + I_{D2} + I_{sh} \quad (5.23)$$

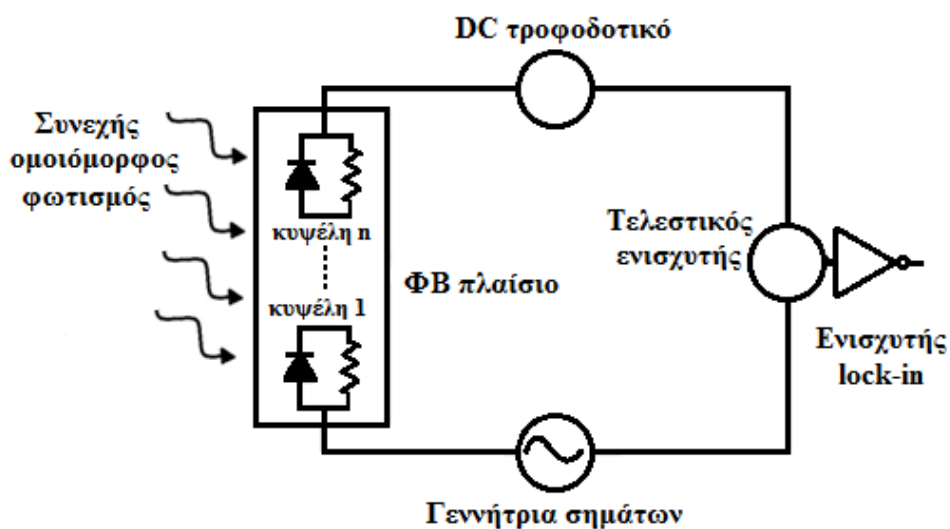
$$I = I_{01} \left[e^{qV_i/n_1KT} - 1 \right] + I_{02} \left[e^{qV_i/n_2KT} - 1 \right] + \frac{V_i}{R_{sh}} \quad (5.24)$$

Επομένως, οι παράμετροι μιας κυψέλης όπως οι R_s , R_{sh} , I_0 και n_2 μπορούν να ληφθούν προσαρμόζοντας την (5.24) σε ένα σύνολο από πειραματικά δεδομένα. Αυτή η προσαρμογή λαμβάνεται με μη γραμμική ανάλυση οπισθοδρόμησης στα δεδομένα των I-V μετρήσεων στο σκοτάδι. Με τακτική χρήση, μπορεί να παρακολουθείται η R_s ενός πλαισίου για να διαπιστωθεί εάν έχει αυξηθεί λόγω της κακής κατάληξης των επαφών από τη διάβρωση, παραδείγματος χάριν.

Δ. Μέτρηση Παράλληλης Αντίστασης

Για μια καλή ηλιακή κυψέλη, το ρεύμα διακλάδωσης πρέπει να είναι αμελητέα μικρό επειδή αυτό το ρεύμα μειώνει το παραγμένο φωτόρευμα όταν η κυψέλη φωτίζεται. Μια χαμηλή αντίσταση διακλάδωσης μπορεί να μειώσει σημαντικά την απόδοση της κυψέλης. Ιδανικά, θα πρέπει η R_{sh} να είναι απείρως μεγάλη. Αυτή η παράμετρος είναι κρίσιμη για την απόδοση του ΦΒ, ειδικά σε μειωμένα επίπεδα ακτινοβολίας. Για αυτόν τον λόγο, είναι σημαντικό να είναι γνωστό ποια κυψέλη θα σταματήσει να συνεισφέρει στην έξοδο του πλαισίου λόγω της χαμηλής αντίστασης διακλαδώσεων. Σε αυτήν την δοκιμή, χρησιμοποιείται μια απλή τεχνική για να μετρηθούν οι μεμονωμένες αντιστάσεις διακλαδώσεων των κυψελών που είναι ενθυλακωμένες στο πλαίσιο. Μια σχηματική αναπαράσταση του μετρητικού συστήματος της παράλληλης αντίστασης παρουσιάζεται στην **σχήμα 5.9**. Κάνοντας τακτική χρήση αυτής της μεθόδου, μπορεί να ελεγχθεί η R_{sh} μιας κυψέλης για να διαπιστωθεί εάν έχει μειωθεί λόγω αύξησης στον αριθμό των παράλληλων μονοπατιών.

Σε αυτήν την μέθοδο, το πλαίσιο τίθεται σε μηδενική DC πόλωση. Έπειτα μεταδίδεται ένα μικρό AC σήμα μέσω του μοντέλου, η μόνη πορεία είναι μέσω των παράλληλων μονοπατιών των μεμονωμένων κυψελών. Το μέγεθος του AC σήματος όταν οι κυψέλες σκιάζονται διαδοχικά, είναι άμεσα ανάλογο της αγωγιμότητας του πλαισίου στο σκοτάδι, δηλ., με το ρεύμα διακλάδωσης. Κατά συνέπεια, καλιμπράροντας το σύστημα έτσι ώστε η γνωστή αντίσταση να δίνει μια συγκεκριμένη τάση έξοδο σε milli-volt, είναι δυνατό να μετρηθεί η μεμονωμένη αντίσταση διακλάδωσης της κάθε κυψέλης. Επί προσθέτως, ο χαρακτηρισμός της αποδοτικότητας ενός πλαισίου συναρτήσει της έντασης του φωτός μπορεί επίσης να είναι μια ένδειξη της αντίστασης διακλάδωσης ενός πλαισίου.

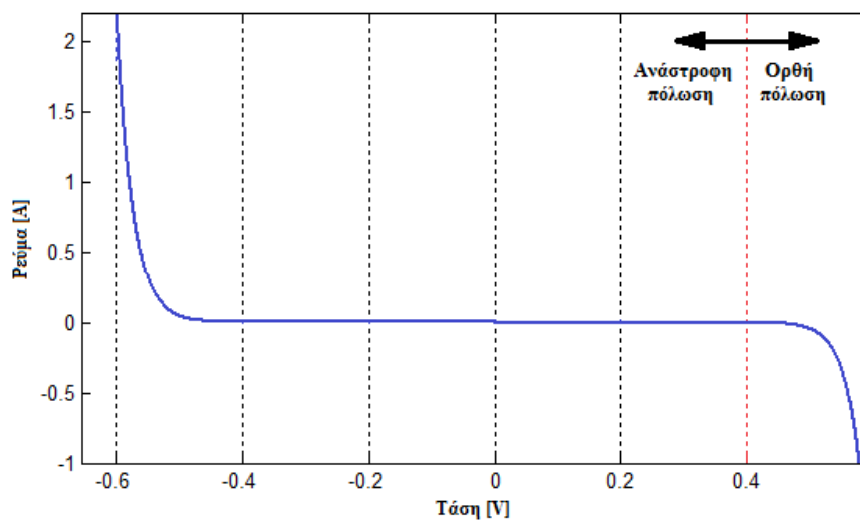


Σχήμα 5.9 Εικονική αναπαράσταση του μετρητικού συστήματος της παράλληλης αντίστασης που χρησιμοποιείται για να μετρηθεί η παράλληλη αντίσταση για κάθε κυψέλη ενθυλακωμένη στο πλαίσιο^[24].

Ε. Διερεύνηση Θερμής-Κηλίδας

Αυτή η δοκιμή εντοπίζει την κυψέλη ενός πλαισίου στην οποία θα εμφανιστεί η χειρότερη μορφή θερμής κηλίδας. Η χειρότερη μορφή θερμής κηλίδας μπορεί να εντοπιστεί από τις I-V καμπύλες στο φως αλλά και από θερμική δοκιμή. Στην θερμική δοκιμή, χρησιμοποιούνται υγρά φύλλα κρυστάλλου (LCS), και θερμοζεύγη για να ελεγχθεί η θερμοκρασία της κυψέλης καθώς στέλνεται ένα ρεύμα τουλάχιστον $2 \times I_{sc}$ μέσω του πλαισίου.

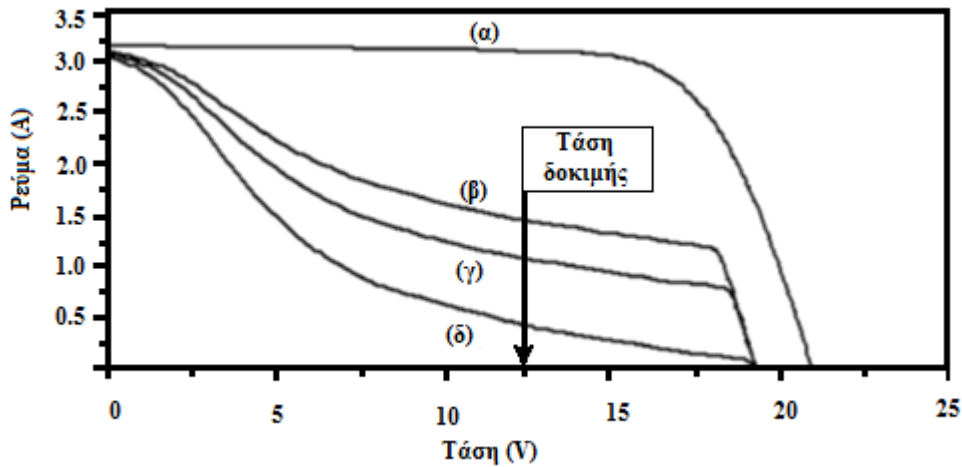
Το **σχήμα 5.10** παρουσιάζει την I-V καμπύλη υπό φως μιας μόνο κυψέλης στην ορθή και την ανάστροφη περιοχή τάσης. Εάν αυτή η κυψέλη συνδέεται σε σειρά με άλλες κυψέλες του string, και παράγει λιγότερο ρεύμα, τότε πολώνεται ανάστροφα από την παραγόμενη τάση των άλλων κυψελών σειράς. Αυτό αναγκάζει την ελαττωματική κυψέλη να λειτουργήσει στην αρνητική περιοχή τάσης όπου σπαταλά ισχύ σε μορφή θερμότητας. Κατά συνέπεια, όσο υψηλότερη είναι η ανάστροφη πόλωση, τόσο περισσότερη ισχύς κατασπαταλείται και ως εκ τούτου, τόσο υψηλότερη θα είναι η θερμοκρασία κυψέλης. Εάν η ανάστροφη πόλωση υπερβεί την τάση διακένωσης της κυψέλης, τότε η κυψέλη βλάπτεται ανεπανόρθωτα από, παραδείγματος χάριν, σχηματισμό θερμών κηλίδων, ράγισμα της κυψέλης και λιώσιμο του καλαί (του υλικού συγκολλήσεως).



Σχήμα 5.10 Η I-V χαρακτηριστική ιδανικής ΦΒ κυψέλης σε ορθή και ανάστροφη πόλωση, όπως προέκυψε από την προσομοίωση του matlab.

Η κυψέλη με τη χειρότερη μορφή θερμής κηλίδας εντοπίζεται συγκρίνοντας τις I-V καμπύλες ενός πλαισίου με τις μεμονωμένες κυψέλες να σκιάζονται διαδοχικά. Αυτή η μέθοδος απεικονίζεται στο **σχήμα 5.11**. Σαν τάση δοκιμής μπορεί να επιλεγθεί, η τάση λειτουργίας ενός τυπικού 12 V αυτόνομο ΦΒ συστήματος. Η καμπύλη **5.11 (α)** είναι η I-V χαρακτηριστική ενός πλήρως φωτισμένου ΦΒ πλαισίου 36-κυψελών. Όταν μια κυψέλη είναι πλήρως σκιασμένη, η προκύπτουσα I -V καμπύλη του πλαισίου καθορίζεται από την ανάστροφη I-V χαρακτηριστική της σκιασμένης κυψέλης όπως φαίνεται στην καμπύλη **5.11 (β)**. Αυτή η σκιασμένη κυψέλη οδηγεί στο υψηλότερο ρεύμα του πλαισίου στην δοκιμή τάσης, που υπονοεί ότι αυτή η κυψέλη καταναλώνει περισσότερη ισχύ σε σύγκριση με τις καμπύλες από τις σκιασμένες κυψέλες **5.11 (γ)** και **5.11 (δ)**. Η κυψέλη της καμπύλης **5.11 (β)**

έχει την υψηλότερη πιθανότητα να σχηματίσει θερμή κηλίδα και είναι, επομένως, η κυψέλη στην οποία θα εμφανιστεί η χειρότερη μορφή θερμής κηλίδας.



Σχήμα 5.11 Εντοπισμός της κυψέλης ενός πλαισίου στην οποία θα συμβεί η χειρότερης μορφής θερμή κηλίδα. Η κυψέλη η οποία καταλήγει στο υψηλότερο ρεύμα του πλαισίου κατά τη δοκιμή τάσης είναι η χειρότερη κυψέλη^[24].

Z. Μετρήσεις Εξάρτησης Θερμοκρασίας

Η επίδραση της θερμοκρασίας στις παραμέτρους απόδοσης του πλαισίου ερευνάται θερμαίνοντας τα πλαίσια σε μια προκαθορισμένη θερμοκρασία (~ 80°C) και έπειτα μετρώντας τις I-V χαρακτηριστικές καθώς τα πλαίσια αφήνονταν ελεύθερα για να δροσιστούν ομοιόμορφα μέσα στον προσομοιωτή. Αυτές οι χαρακτηριστικές μπορούν να χρησιμοποιήθηκαν έπειτα για να καθοριστεί η εξάρτηση του I_{sc} , V_{oc} και P_{max} από την θερμοκρασία.

H. Υπαίθριος έλεγχος

Οι περισσότερες μορφές υποβάθμισης οδηγούν σε μείωση είτε στο I_{sc} του πλαισίου είτε στην V_{oc} ή και στα δύο. Επομένως, ελέγχοντας συνεχώς αυτές τις δύο παραμέτρους, η υποβάθμιση στην απόδοση του πλαισίου μπορεί να παρατηρηθεί άμεσα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΣΤΟ MATLAB SIMULINK

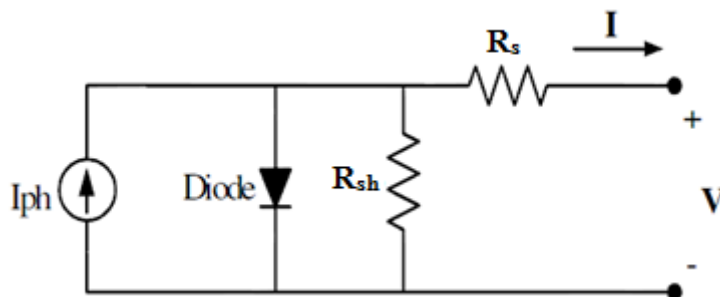
6.1 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΟΥ ΤΟ ΠΕΡΙΓΡΑΦΟΥΝ

Η γενική μαθηματική περιγραφή της I-V χαρακτηριστικής των ηλιακών κυψελών έχει μελετηθεί εκτενώς τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες. Το ισοδύναμο κύκλωμα της ηλιακής κυψέλης το οποίο αποτελείται από ένα φωτόρευμα, μια δίοδο, μια παράλληλη αντίσταση και μια αντίσταση σειράς ονομάζεται ισοδύναμο μοντέλο μιας δίοδου και παρουσιάζεται στο **σχήμα 6.1**. Η εξίσωση της χαρακτηριστικής τάσης-ρεύματος για μια κυψέλη δίνεται από τη σχέση^[25]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}}, \quad V_T = \frac{nkT_C}{q} \quad (6.1)$$

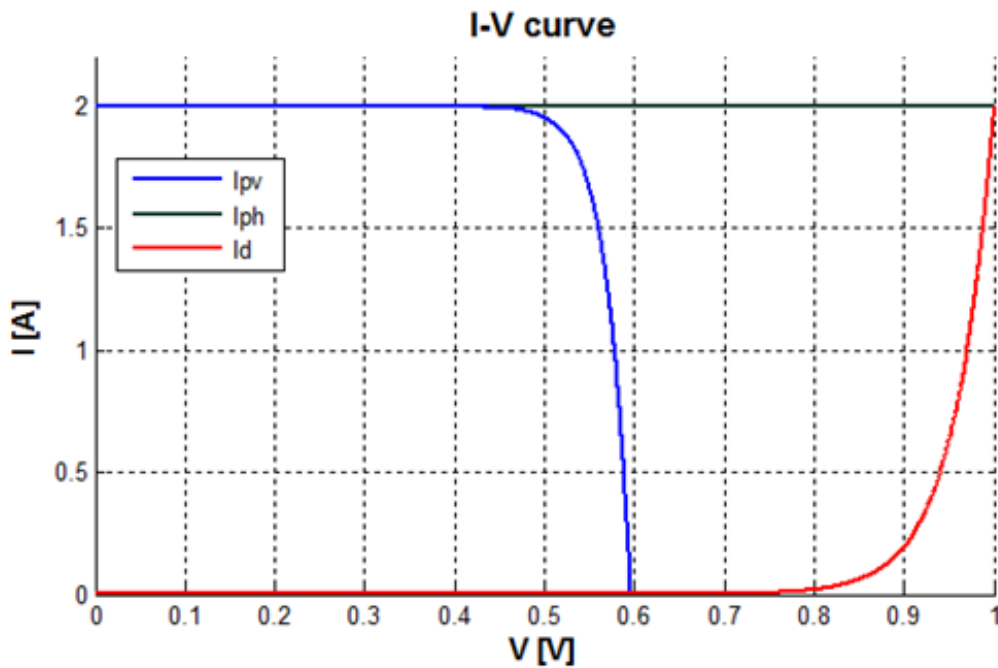
Όπου:

- I_{ph} είναι το φωτο-παραγόμενο ρεύμα ή φωτόρευμα,
- I_0 είναι το ρεύμα κόρου της κυψέλης ή ρεύμα σκότους,
- $q(=1,6 \cdot 10^{-9} \text{ C})$ είναι το φορτίο ηλεκτρονίου,
- $k(=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K})$ είναι η σταθερά Boltzmann,
- T_C είναι η θερμοκρασία κυψέλης,
- n είναι ο παράγοντας ιδανικότητας,
- R_{sh} η παράλληλη αντίσταση και R_s η αντίσταση σειράς



Σχήμα 6.1 Αναπαράσταση φωτοβολταϊκής κυψέλης με το μοντέλο μιας δίοδου.

Στο **διάγραμμα 6.1** αναπαρίσταται γραφικά η σύνθεση του ρεύματος I_{pv} της κυψέλης όπως αυτό προκύπτει από το ισοδύναμο κύκλωμα μιας διόδου βάσει της σχέσης $I_{pv}=I_{ph}-I_d$.

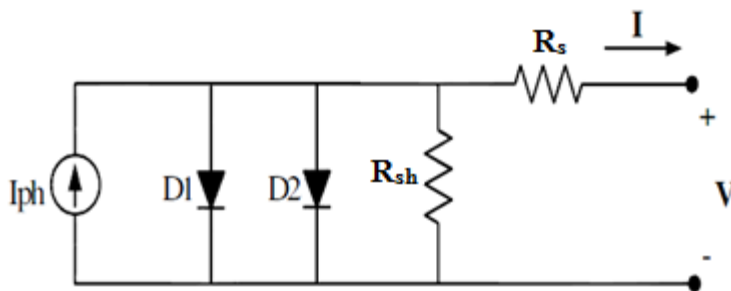


Διάγραμμα 6.1 Γραφική αναπαράσταση του ρεύματος κόρου της διόδου (I_d), του φωτορεύματος (I_{ph}) και του ρεύματος της κυψέλης (I_{pv}), για ιδανική κυψέλη.

Ένα δεύτερο μοντέλο αναπαράστασης της ηλιακής κυψέλης είναι το ισοδύναμο μοντέλο δύο διόδων, το οποίο φαίνεται στο **σχήμα 6.2** ενώ η εξίσωσή του είναι:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{V_{T1}}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_s}{V_{T2}}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}}, \quad V_{Ti} = \frac{n_i kT}{q} \quad i=1,2 \quad (6.2)$$

Όπου n_1 είναι ο συντελεστής ιδανικότητας της πρώτης διόδου και n_2 ο συντελεστής ιδανικότητας της δεύτερης με $n_1=1$ και $n_2=2$.



Σχήμα 6.2 Αναπαράσταση φωτοβολταϊκής κυψέλης με το μοντέλο δύο διόδων.

Η εξίσωση του φωτορεύματος εξαρτάται κυρίως από την προσπίπτουσα ακτινοβολία και τη θερμοκρασία της κυψέλης, έτσι προκύπτει η παρακάτω σχέση ^[26] :

$$I_{ph} = \left[I_{sc} \left(\frac{R_s + R_{sh}}{R_{sh}} \right) + K_i (T_c - T_{ref}) \right] \lambda \quad (6.3)$$

Όπου:

- I_{sc} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης της κυψέλης
- K_i είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής του ρεύματος βραχυκύκλωσης
- T_{ref} είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος
- λ είναι η ηλιακή ακτινοβολία σε kW/m²
- R_s η αντίσταση σειράς
- R_{sh} η παράλληλη αντίσταση

Το ρεύμα κόρου, από την άλλη, εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία κυψέλης, οπότε:

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[qE_g \left(1/T_{ref} - 1/T_c \right) / kA \right] \quad (6.4)$$

Όπου:

- I_{rs} είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου
- E_g είναι η ενέργεια διακένου του ημιαγωγού της κυψέλης.

Αν θεωρηθεί τώρα ότι στην κυψέλη δεν υπάρχει κάποια διαρροή ρεύματος, οπότε θεωρητικά $R_{sh}=\infty$, τότε η **6.1** γίνεται:

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp(q(V+IR_s)/kT_c A) - 1 \right] \quad (6.5)$$

Ενώ για ιδανική κυψέλη όπου $R_{sh}=\infty$ και $R_s=0$ προκύπτει:

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp(qV/kT_c A) - 1 \right] \quad (6.6)$$

Για $N_{ser} \times N_{par}$ όμοια συνδεδεμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούμενα από N_s σε σειρά συνδεδεμένες κυψέλες, η εξίσωση 6.1 γίνεται:

$$I = N_{par} I_{ph} - N_{par} I_0 \left(e^{\frac{V + I R_s \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right)}{V_T N_{ser}}} - 1 \right) - \frac{V + I R_s \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right)}{R_{sh} \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right)}, \quad V_T = \frac{N_s n k T_C}{q} \quad (6.7)$$

Ενώ για ιδανική κυψέλη ισχύει αντίστοιχα:

$$I = N_{par} I_{ph} - N_{par} I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T N_{ser}}} - 1 \right), \quad V_T = \frac{N_s n k T_C}{q} \quad (6.8)$$

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης προκύπτει από τη σχέση

$$I_{sc} = I_{sc,n} \left(\frac{R_s + R_{sh}}{R_{sh}} \right) + K_i (T_c - T_{ref}) \quad (6.9)$$

Η τάση ανοιχτοκύκλωσης προκύπτει από την σχέση

$$V_{oc} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right), \quad V_T = \frac{N_s n k T_C}{q} \quad (6.10)$$

Τέλος, γνωρίζοντας την τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} της κυψέλης και αγνοώντας το ρεύμα διαρροής, το ανάστροφο ρεύμα κόρου δίνεται από την εξίσωση:

$$I_{rs} = I_{sc} / \exp \left[\left(q V_{oc} / N_s k A T_{ref} \right) - 1 \right] \quad (6.11)$$

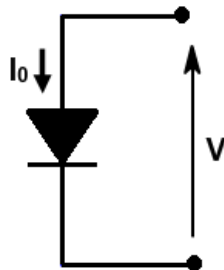
6.2 ΜΕΛΕΤΗ I-V ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για να μελετηθεί η μορφή της I-V χαρακτηριστική μιας κυψέλης, επιλέχθηκε από την προσομοίωση (η οποία θα αναλυθεί παρακάτω) η ιδανική κυψέλη με χαρακτηριστικά $I_{sc}=2\text{ A}$, $V_{oc}=0.596\text{ V}$, $R_s=0\ \Omega$ και $R_{sh}=\infty\ \Omega$ και υποβλήθηκε σε συνθήκες σκότους αλλά και φωτισμού.

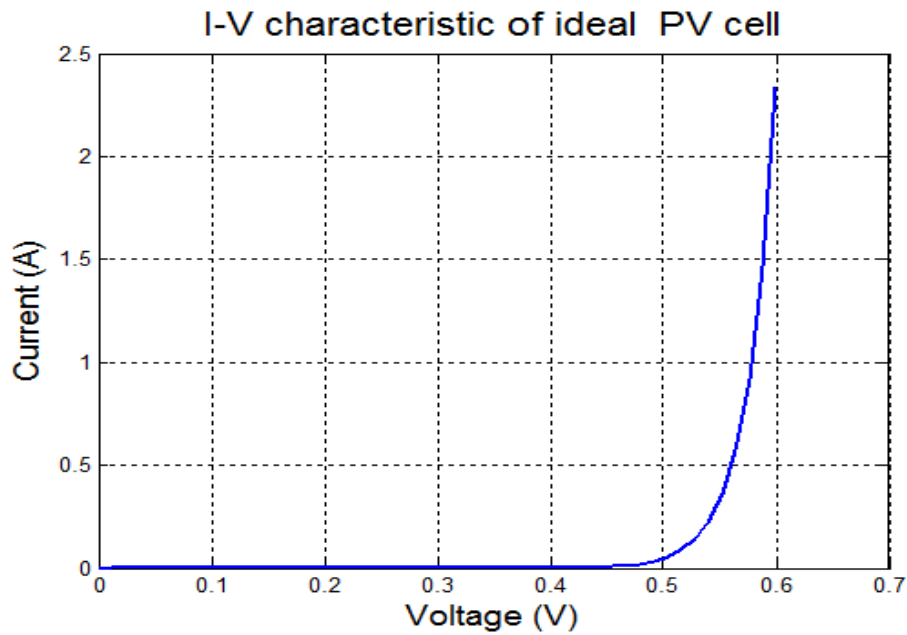
Αρχικά, σε συνθήκες σκότους η κυψέλη θα λειτουργήσει σαν μια μεγάλη δίοδος. Το ισοδύναμο κύκλωμα της κυψέλης φαίνεται στο **σχήμα 6.3** και η εξίσωση περιγραφής του

ρεύματος είναι $I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right]$, οπότε προκύπτει η χαρακτηριστική I-V του

διαγράμματος 6.2.

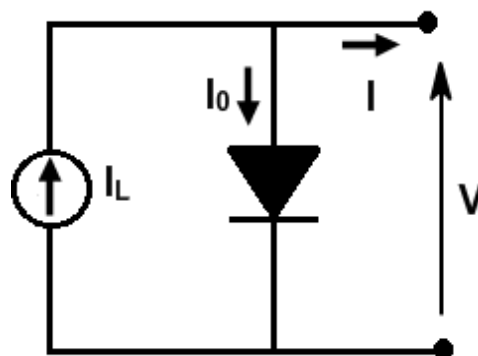


Σχήμα 6.3 Ισοδύναμο κύκλωμα κυψέλης σε συνθήκες σκότους

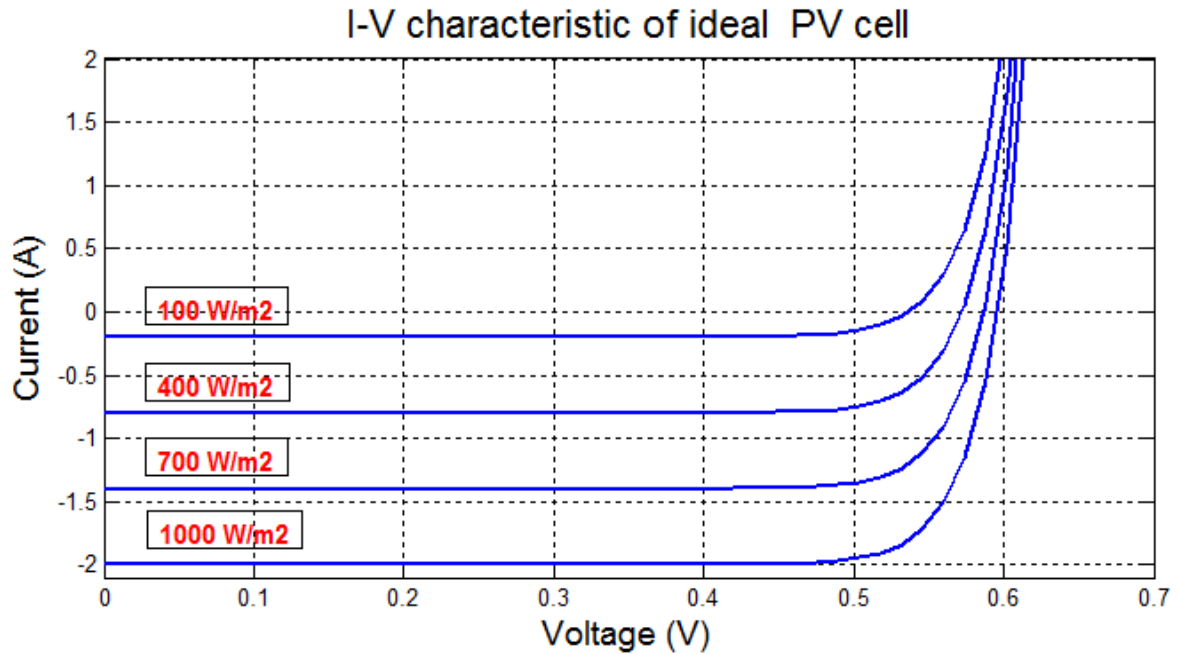


Διάγραμμα 6.2 I-V χαρακτηριστική κυψέλης στο σκοτάδι.

Σε συνθήκες φωτισμού θα συμβάλει και το παραγόμενο φωτόρρευμα στο συνολικό ρεύμα, οπότε η αντίστοιχη εξίσωση ρεύματος γίνεται $I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] - I_L$, όπου I_L το φωτόρρευμα. Άρα, με την αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και κατά συνέπεια του παραγόμενου φωτορεύματος, η I-V χαρακτηριστική θα αρχίσει να μετατοπίζεται αρνητικά ως προς τον άξονα y (του ρεύματος). Το ισοδύναμο κύκλωμα καθώς και τα διαγράμματα φαίνονται παρακάτω



Σχήμα 6.5 Ισοδύναμο κύκλωμα κυψέλης στο φως.



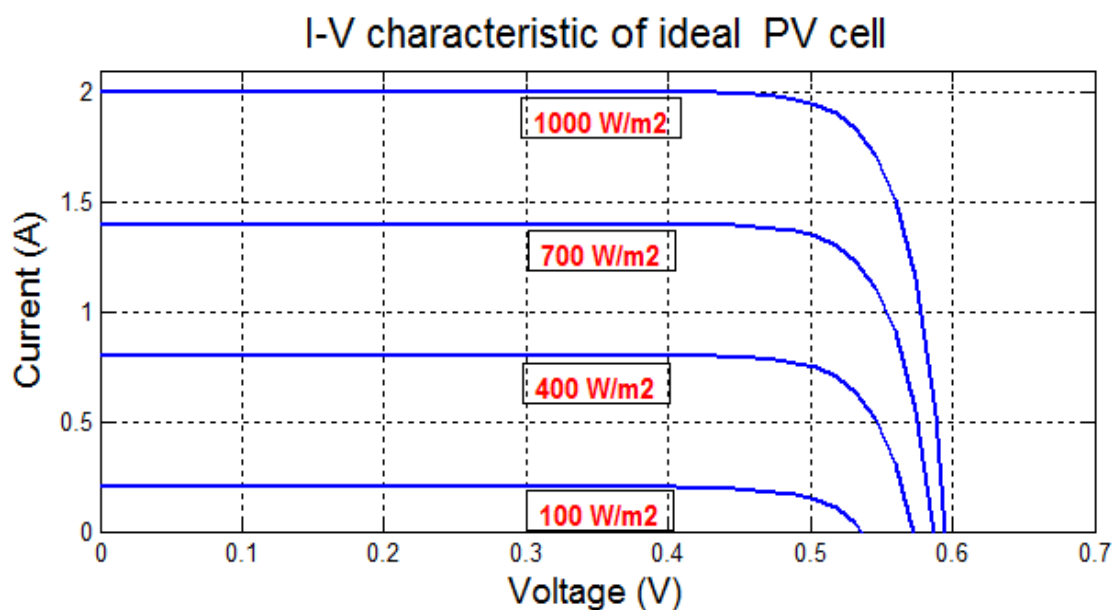
Διάγραμμα 6.3 I-V χαρακτηριστική της ιδανικής κυψέλης για διάφορες τιμές ακτινοβολίας.

Λόγω σύμβασης, όμως, επειδή η κυψέλη είναι παραγωγός ισχύος και όχι καταναλωτής θα πρέπει το γινόμενο $I \cdot V > 0$, οπότε τελικά η σχέση του ρεύματος είναι

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right]$$

και οι αντίστοιχες I-V χαρακτηριστικές θα είναι οι ανάστροφες

αυτών που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, οπότε καταλήγουμε στις γνωστές I-V χαρακτηριστικές:



Διάγραμμα 6.4 Αναστροφή της I-V χαρακτηριστική της ιδανικής κυψέλης για διάφορες τιμές ακτινοβολίας.

6.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ MATLAB-SIMULINK

Σκοπός της προσομοίωσης ήταν να δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα το οποίο θα αναπαριστά τις χαρακτηριστικές I-V και P-V ενός οποιουδήποτε φωτοβολταϊκού πλαισίου, για διάφορες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας με μόνα δεδομένα τα χαρακτηριστικά του πλαισίου που παρέχονται από τον κατασκευαστή. Ωστόσο, κάποια χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα για την δημιουργία μιας τέτοιας προσομοίωσης δεν δίνονται από τους κατασκευαστές, όπως το παραγόμενο φωτόρρευμα, οι αντιστάσεις σειράς και παράλληλη των κυψελών, η σταθερά ιδανικότητας της διόδου, το ανάστροφο ρεύμα κόρου και η ενέργεια διακένου του ημιαγωγού. Τα έντυπα των φωτοβολταϊκών πλαισίων περιέχουν συνήθως, την τάση ανοιχτοκύκλωσης του πλαισίου (V_{oc}), το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}), την τάση σε MPP (V_{mp}), το ρεύμα σε MPP (I_{mp}), τους θερμοκρασιακούς συντελεστές τάσης ανοιχτοκύκλωσης και ρεύματος βραχυκύκλωσης (K_v, K_i) και την μέγιστη τάση λειτουργίας (P_{max}). Όλες οι παραπάνω τιμές δίνονται σε συνθήκες STC αλλά και σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας NOCT.

Με χρήση των μαθηματικών σχέσεων, που αναφέρθηκαν στο **κεφάλαιο 6.1** και των κατασκευαστικών δεδομένων που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορεί να σχεδιαστεί στο περιβάλλον του matlab-simulink μια προσομοίωση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου (ή κυψέλης). Οι μόνοι παράγοντες που παραμένουν άγνωστοι για την κατασκευή του μοντέλου είναι οι αντιστάσεις σειράς και παράλληλη (R_s, R_{sh}) καθώς και ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου. Ο συντελεστής ιδανικότητας, ωστόσο, μπορεί να θεωρηθεί σταθερός και ανάλογος της τεχνολογίας με την οποία είναι κατασκευασμένη κάθε κυψέλη, αφού γενικά όσο καθαρότερος είναι ο κρύσταλλος τόσο μικρότερος θα είναι και ο συντελεστής ιδανικότητας, ενώ πάντα για τις κυψέλες μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου οι οποίες είναι πιο ευρέως διαδεδομένες θα ισχύει: $1 < n < 2$.

Η εύρεση των αντιστάσεων R_s και R_{sh} από την άλλη, είναι μια πιο περίπλοκη διαδικασία και ο προσδιορισμός τους βασίστηκε στο γεγονός ότι θα υπάρχει ένα μοναδικό ζεύγος τιμών $\{R_s, R_{sh}\}$ για το οποίο η μέγιστη τιμή ισχύος που θα βρεθεί στην προσομοίωση (σε συνθήκες STC) θα συμπίπτει με αυτήν που δίνει ο κατασκευαστής. Ωστόσο, για την παραπάνω διαδικασία χρειάζεται να ληφθούν υπ' όψιν οι καμπύλες I-V παράλληλα με τις καμπύλες P-V για να επιτευχθούν όσο το δυνατόν ακριβέστερα αποτελέσματα. Έτσι, ξεκινώντας από τη σχέση της μέγιστης ισχύος :

$$P_{mp} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (6.10)$$

Και αντικαθιστώντας το μέγιστο ρεύμα I_{mp} από την **σχέση 6.1** προκύπτει:

$$P_{mp} = V_{mp} \left(I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{R_{sh}} \right) \quad (6.11)$$

Λύνοντας τώρα ως προς την παράλληλη αντίσταση R_{sh} προκύπτει τελικά:

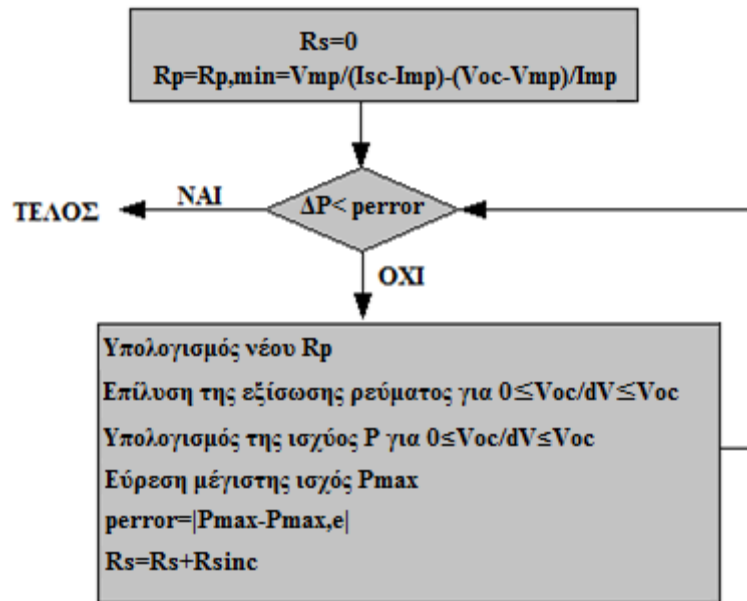
$$R_{sh} = V_{mp} (V_{mp} + I_{mp} R_s) / \left\{ V_{mp} I_{ph} - V_{mp} I_0 \exp \left[\frac{(V_{mp} + I_{mp} R_s)}{V_T} \right] + V_{mp} I_0 - P_{mp} \right\} \quad (6.12)$$

Στη συνέχεια δίνονται τιμές στην αντίσταση σειράς ξεκινώντας από $R_s=0$ και αυξάνοντας με μικρά διακριτά βήματα, ενώ παράλληλα για κάθε τιμή της R_s υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή της R_{sh} από τον **τύπο 6.12**. Για να εντοπιστεί το κατάλληλο ζεύγος τιμών $\{R_s, R_{sh}\}$ θα πρέπει να υπολογιστεί η αντίστοιχη τιμή της ισχύος και να συγκριθεί με την ονομαστική. Κάτι τέτοιο δεν απαιτεί τον πλήρη σχεδιασμό της καμπύλης I-V και P-V αλλά μόνο την εύρεση της μέγιστης τιμής ισχύος. Για να βρεθεί η τιμή του ρεύματος για κάθε ζεύγος τιμών R_s και R_{sh} λύνεται η **εξίσωση 6.1** για $I \in [0, I_{sc}]$ και $V \in [0, V_{oc}]$. Η εξίσωση όμως αυτή δεν είναι γραμμική αφού $I = f(V, I)$ και $V = f(I, V)$, οπότε για την επίλυσή της δημιουργήθηκε η εξίσωση $g(V, I) = I - f(V, I) = 0$, η οποία επιλύονταν για κάθε τιμή R_s και R_{sh} με την μέθοδο Newton-Raphson.

Η μέθοδος Newton-Raphson προτείνει ότι αν είναι γνωστό ένα αρχικό σημείο x_0 το οποίο προσεγγίζει τη ρίζα της εξίσωσης, τότε μπορεί να προσδιοριστεί ένα νέο σημείο x_1 το οποίο θα προσεγγίζει ακόμα περισσότερο τη ρίζα, με την αναδρομική σχέση:

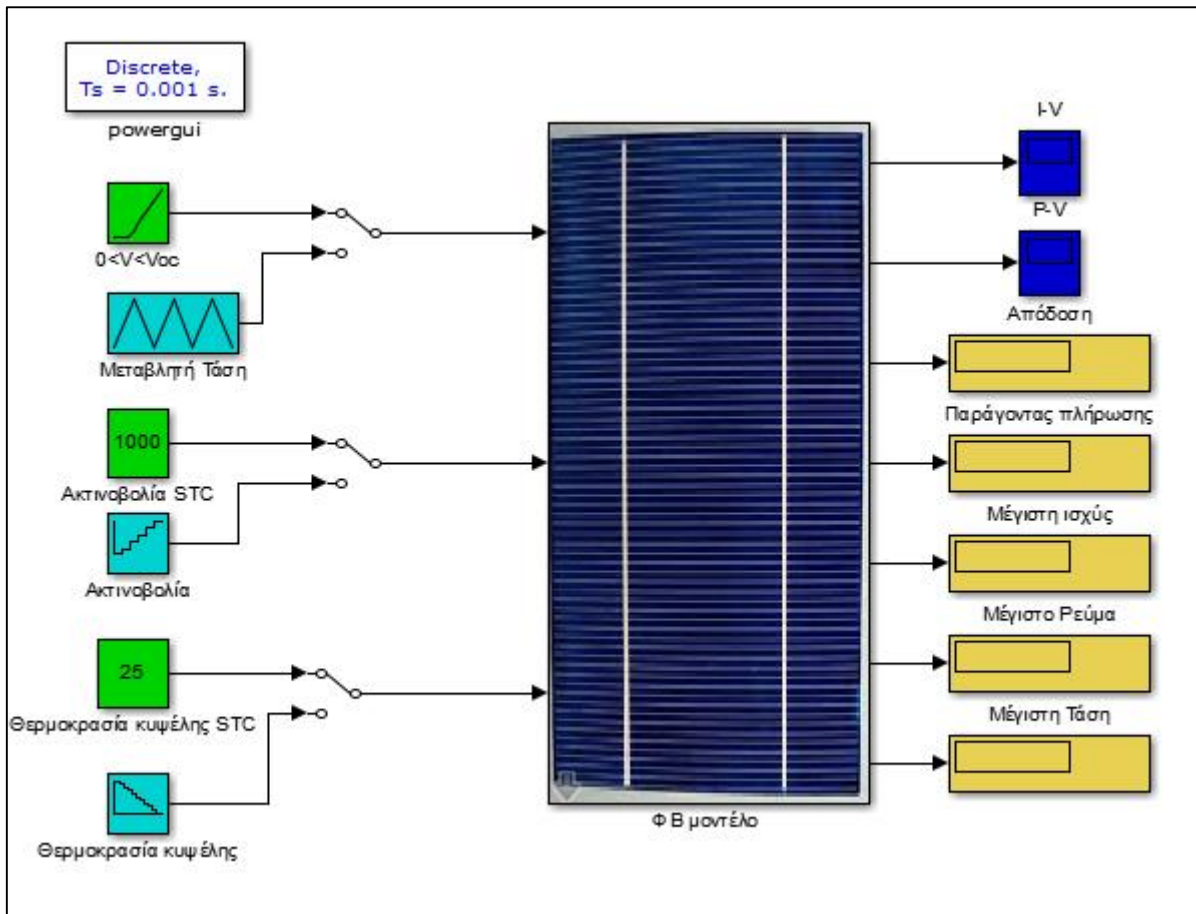
$$f(x_1) = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε δέχονταν σαν είσοδο από τον χρήστη τα ονομαστικά στοιχεία του πλαισίου, την μέγιστη αποδεκτή απόκλιση της ισχύος από την ονομαστική (error), τη βηματική αύξηση της αντίστασης σειράς (R_{sinc}) καθώς και το πλάτος της τάσης (dV), για το οποίο θα υπολογίζονταν κάθε φορά το αντίστοιχο ρεύμα, και έδινε σαν έξοδο τις βέλτιστες τιμές R_s και R_{shunt} για το συγκεκριμένο πλαίσιο. Παρακάτω φαίνεται ο αλγόριθμος εκτέλεσης:



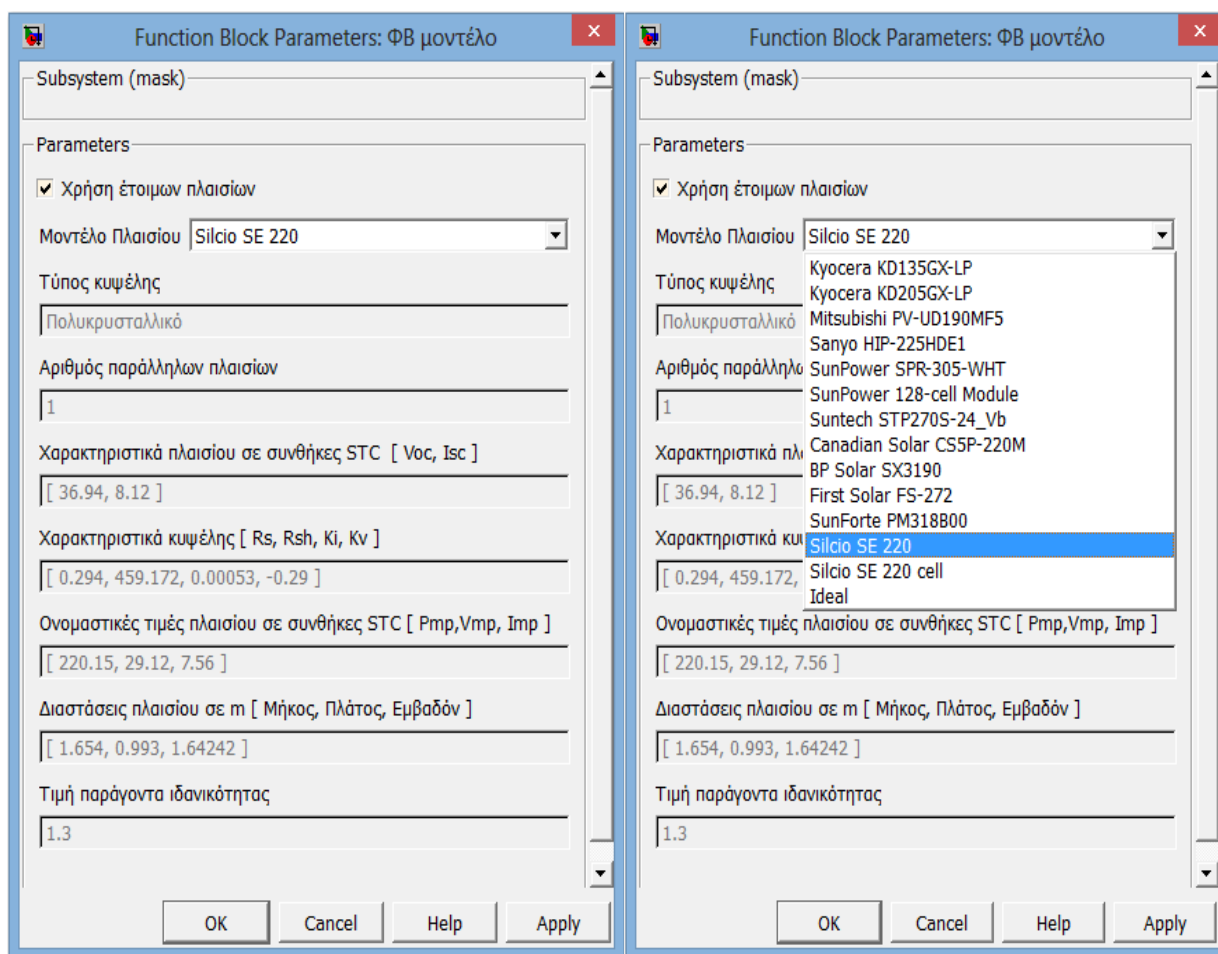
Σχήμα 6.6 Αλγόριθμος εύρεσης αντιστάσεων Rs και Rshunt.

Παρακάτω αναλύονται βήμα προς βήμα τα στάδια κατασκευής ολόκληρου του μοντέλου. Το κύκλωμα της προσομοίωσης θα αναλυθεί από έξω προς τα μέσα. Έτσι αρχικά παρουσιάζεται το εξωτερικό κομμάτι του μοντέλου (σχήμα 6.7) όπου ο χρήστης εισάγει τιμές τάσης, ακτινοβολίας και θερμοκρασίας κυψέλης και παίρνει σαν έξοδο την PV χαρακτηριστική, την IV χαρακτηριστική, την απόδοση, την μέγιστη ισχύ καθώς και τον παράγοντα πλήρωσης του πλαισίου στις εισαχθέντες συνθήκες λειτουργίας. Παράλληλα, κάνοντας διπλό κλικ στο μοντέλο, παρουσιάζεται η μάσκα με τις παραμέτρους, η οποία δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα είτε να εισάγει τα δεδομένα οποιουδήποτε μοντέλου επιθυμεί, είτε, μαρκάροντας την επιλογή 'έτοιμα πλαίσια' να επιλέξει μέσα από μια λίστα έτοιμων πλαισίων των οποίων τα χαρακτηριστικά είναι είδη καταχωρημένα, όπως φαίνεται στα σχήματα 6.8, 6.9 και 6.10.



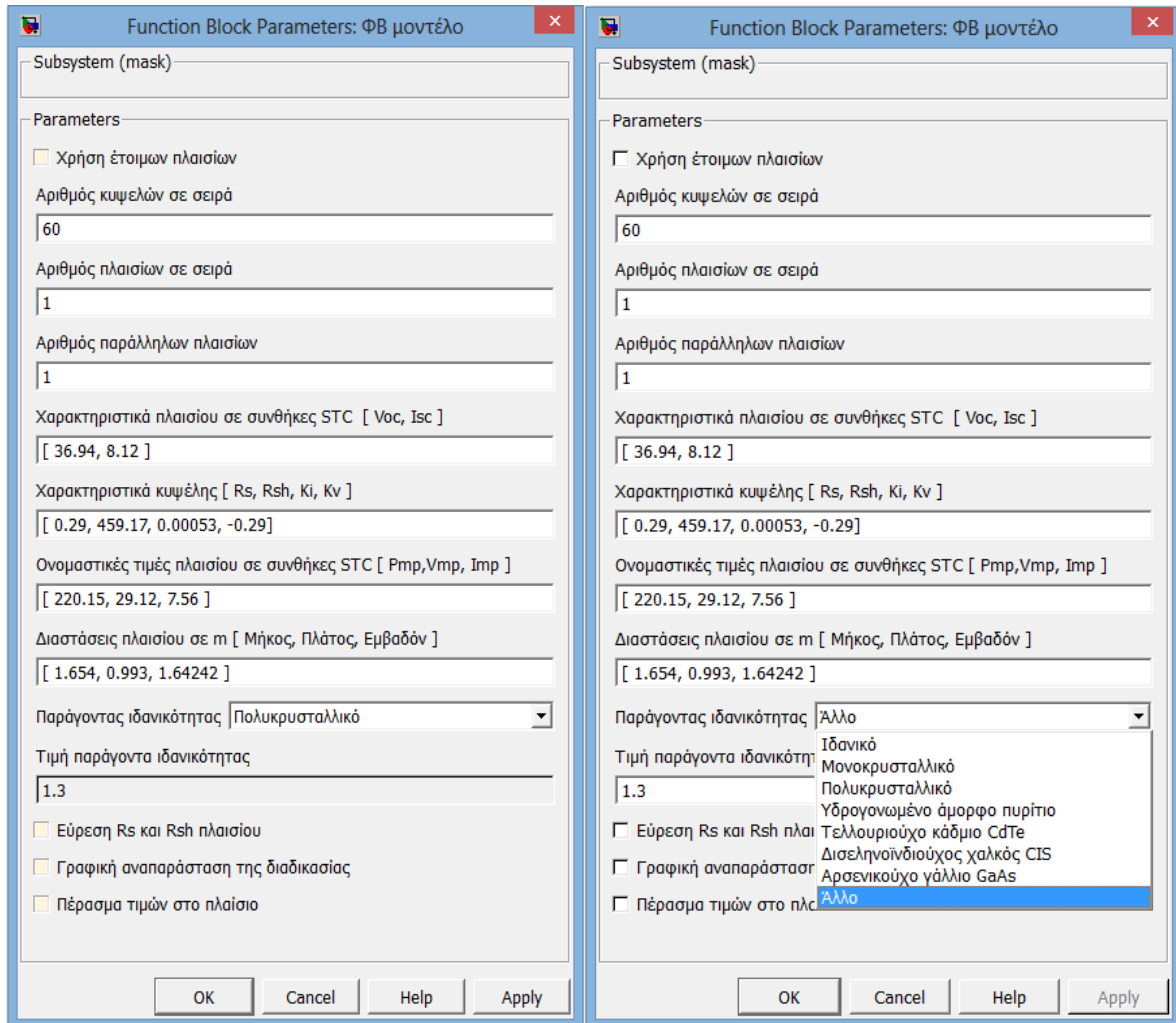
Σχήμα 6.7 Εξωτερικό τμήμα του ΦΒ μοντέλου στο simulink.

Σε όλες τις εισόδους έχει εφαρμοστεί χειροκίνητος διακόπτης, ώστε ο χρήστης να επιλέγει μεταξύ σταθερών και μεταβλητών τιμών εισόδου.



Σχήμα 6.8 Μάσκα παραμέτρων με επιλεγμένο το πεδίο ‘Χρήση έτοιμων πλαισίων’.

Εδώ φαίνεται το περιβάλλον της μάσκας, όταν είναι ενεργοποιημένη η επιλογή ‘Χρήση έτοιμων πλαισίων’. Οπότε, όλες οι μεταβλητές είναι κλειδωμένες και η μόνη δυνατότητα που δίνεται στο χρήστη είναι να επιλέξει μέσα από την αναδυόμενη λίστα έτοιμων πλαισίων που φαίνεται στο **σχήμα 6.8**. Όταν ο χρήστης επιλέξει ένα νέο πλαίσιο και πατήσει ‘Apply’ τότε θα περαστούν αυτόματα οι παράμετροί του στην προσομοίωση.



Σχήμα 6.9 Μάσκα παραμέτρων χωρίς επιλογή του πεδίου ‘Χρήση έτοιμων πλαισίων’.

Εδώ η επιλογή ‘Χρήση έτοιμων πλαισίων’ δεν είναι επιλεγμένη, οπότε το πρόγραμμα δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να εισάγει ο ίδιος τα στοιχεία που επιθυμεί ώστε να πάρει τις αντίστοιχες τιμές εξόδου του πλαισίου. Η μόνη παράμετρος που είναι κλειδωμένη είναι η ‘Τιμή του παράγοντα ιδανικότητας’, όπως φαίνεται από το **σχήμα 6.9**, η οποία μεταβάλλεται (για ευκολία) ανάλογα με την επιλογή της τεχνολογίας του ‘παράγοντα ιδανικότητας’ που θα γίνει από το χρήστη. Παρ’όλα αυτά, εάν ο χρήστης επιθυμεί να εισάγει μια δική του τιμή και στον παράγοντα ιδανικότητας, μπορεί να διαλέξει την επιλογή ‘Άλλο’, όπως φαίνεται στο **σχήμα 6.9**, με αποτέλεσμα να ξεκλειδώσει την αντίστοιχη επιλογή και να εισάγει χειροκίνητα την επιθυμητή τιμή.

Οι προκαθορισμένες τιμές του παράγοντα ιδανικότητας που είναι περασμένες στην προσομοίωση φαίνονται στον **πίνακα 6.1**

| Τεχνολογία | Ιδανικό | Mono-Si | Poly-Si | a-Si:H | CdTe | CIS | GaAs |
|---------------------------------|---------|---------|---------|--------|------|-----|------|
| Τιμή παράγοντα ιδανικότητας (n) | 1 | 1.2 | 1.5 | 3.3 | 2 | 1.5 | 1.3 |

Πίνακας 6.1 Οι τιμές του παράγοντα ιδανικότητας ανάλογα με την φωτοβολταϊκή τεχνολογία.

Τέλος, επιλέγοντας το πεδίο ‘Εύρεση Rs και Rsh του πλαισίου’ ξεκλειδώνουν οι παρακάτω επιπλέον επιλογές:

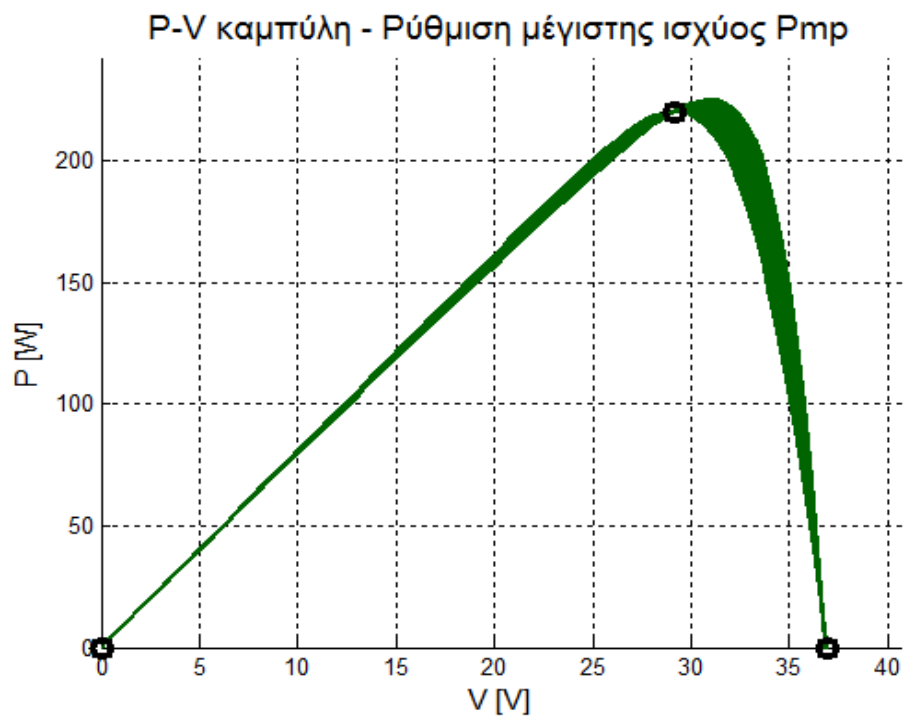
The screenshot shows a dialog box titled "Function Block Parameters: ΦΒ μοντέλο". It contains several sections:

- Subsystem (mask):** An empty text field.
- Parameters:**
 - Χρήση έτοιμων πλαισίων
 - Αριθμός κυψελών σε σειρά: 60
 - Αριθμός πλαισίων σε σειρά: 1
 - Αριθμός παράλληλων πλαισίων: 1
 - Χαρακτηριστικά πλαισίου σε συνθήκες STC [Voc, Isc]: [36.94, 8.12]
 - Χαρακτηριστικά κυψέλης [Rs, Rsh, Ki, Kv]: [0.294, 460.064, 0.00053, -0.29]
 - Ονομαστικές τιμές πλαισίου σε συνθήκες STC [Pmp, Vmp, Imp]: [220.15, 29.12, 7.56]
 - Διαστάσεις πλαισίου σε m [Μήκος, Πλάτος, Εμβαδόν]: [1.654, 0.993, 1.64242]
 - Παράγοντας ιδανικότητας: Άλλο (dropdown menu)
 - Τιμή παράγοντα ιδανικότητας: 1.3
 - Εύρεση Rs και Rsh πλαισίου
 - Απόκλιση αναζήτησης [Rs, Pmp, V]: [0.0001, 1e-05, 50]
 - Νέες τιμές Rs και Rp: [0.294, 460.064]
 - Απόκλιση υπολογισμένης ισχύος από την εργοστασιακή: -0.00075236
 - Γραφική αναπαράσταση της διαδικασίας
 - Πέρασμα τιμών στο πλαίσιο

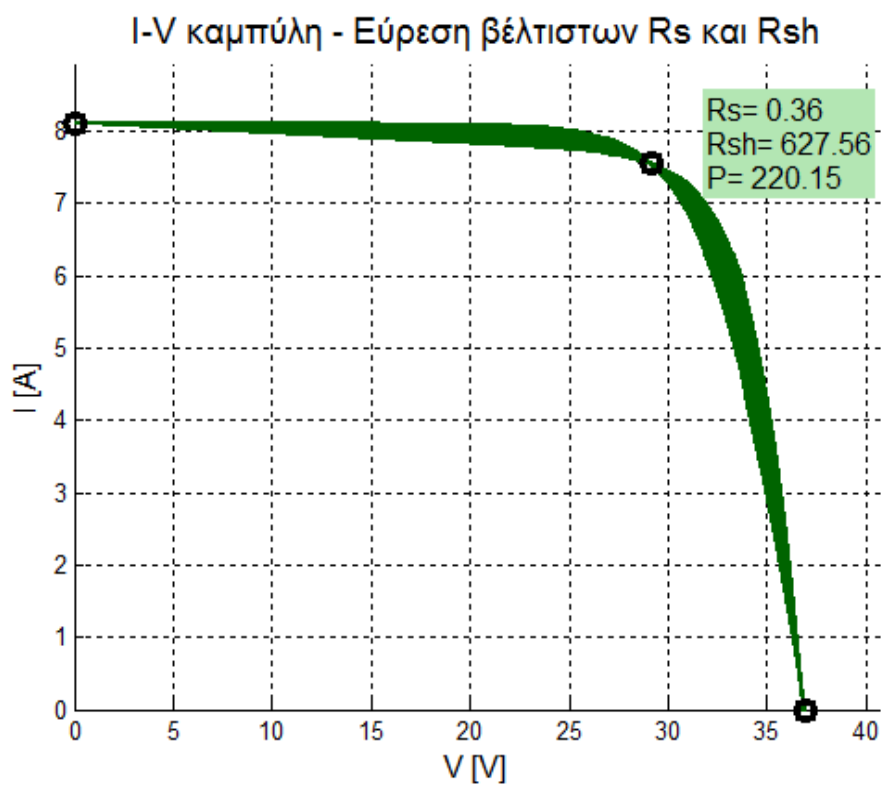
At the bottom, there are buttons for OK, Cancel, Help, and Apply.

Σχήμα 6.10 Μάσκα παραμέτρων με επιλογή του πεδίου ‘Εύρεση Rs και Rsh πλαισίου’.

Έτσι, για το πλαίσιο SE220 της SILCIO το οποίο θα μελετηθεί στο επόμενο κεφάλαιο με $I_{sc}=8.12A$ και $V_{oc}=36.94V$, επιλέγοντας αποκλίσεις $dR_s=10^{-3}$, $dP=10^{-5}$ και $dV=50$ προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:



Διάγραμμα 6.5 P-V χαρακτηριστικές που χαράχτηκαν για το πλαίσιο SE220 κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου εύρεσης R_s και R_{sh} .

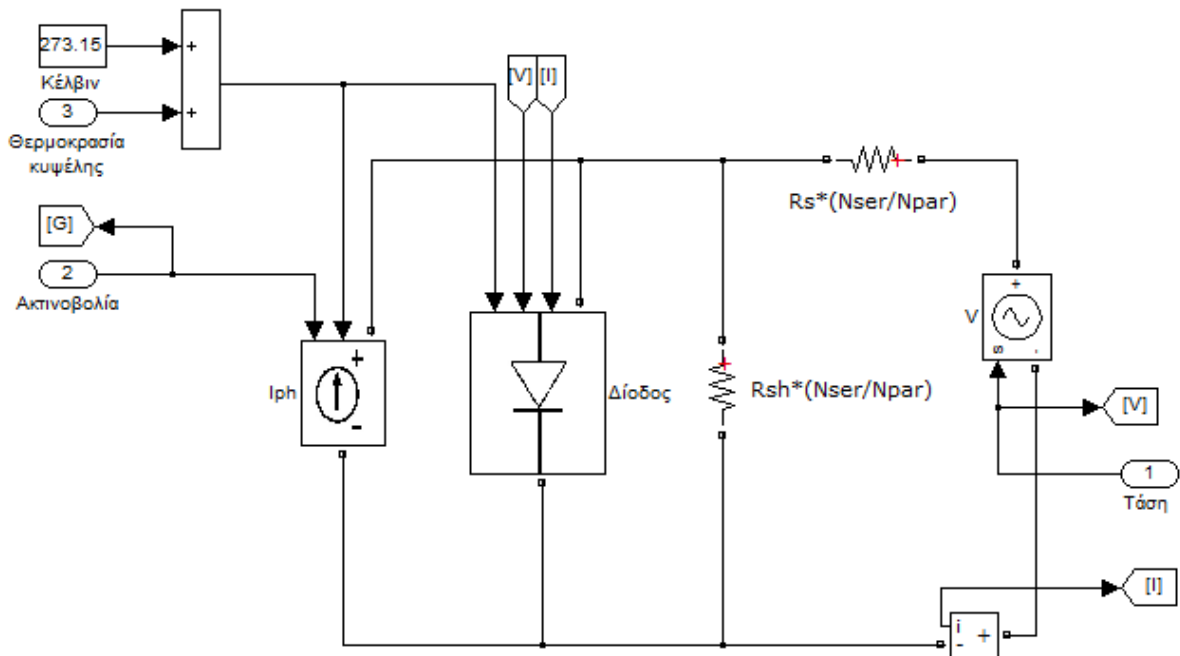


Διάγραμμα 6.6 I-V χαρακτηριστικές που χαράχτηκαν για το πλαίσιο SE220 κατά την εκτέλεση του αλγόριθμου εύρεσης R_s και R_{sh} .

Άρα η αντίσταση σειράς για το πλαίσιο SE220 προέκυψε $R_s=0.36 \Omega$ και η παράλληλη αντίσταση $R_{sh}=627.56 \Omega$.

Έπειτα γίνεται ανάλυση του εσωτερικού μοντέλου. Ανοίγοντας το δομικό διάγραμμα του φ/β πλαισίου, παρουσιάζεται το παρακάτω κύκλωμα, το οποίο αντιστοιχεί στο φωτοβολταϊκό μοντέλο μιας διόδου και βασίζεται στην **σχέση 6.7**

$$N_{par} I_{ph} - N_{par} I_0 \left(e^{\frac{V + IR_s \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right)}{V_T N_{ser}} - 1} - \frac{V + IR_s \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right)}{R_{sh} \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right)} \right)$$

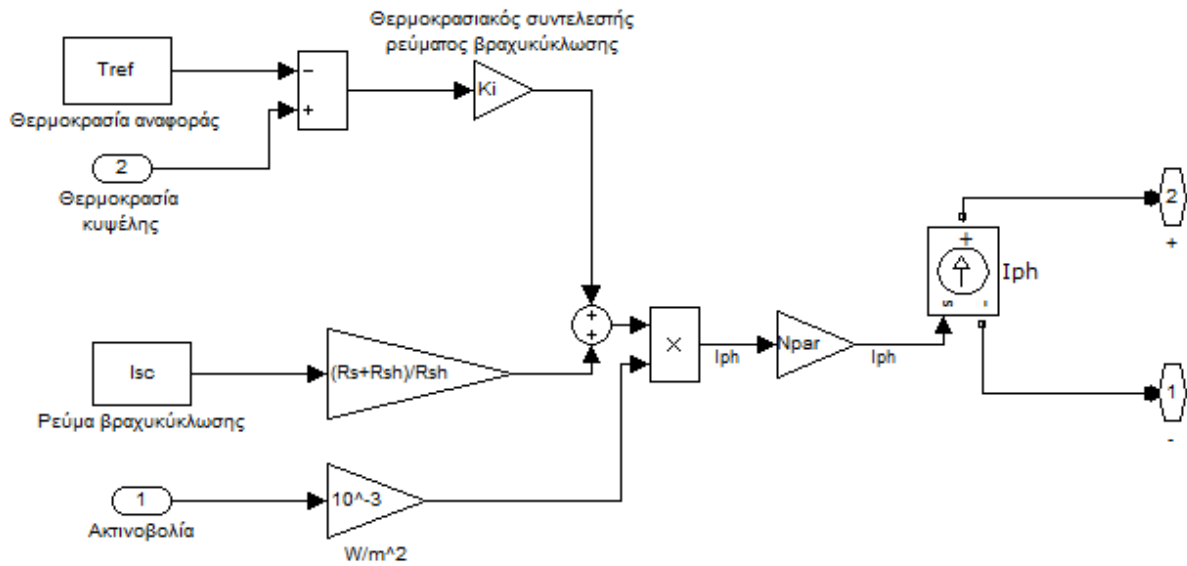


Σχήμα 6.11 Δομικό διάγραμμα φωτοβολταϊκού μοντέλου μιας διόδου.

Ενώ παρακάτω γίνεται η ανάλυση των υποσυστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν:

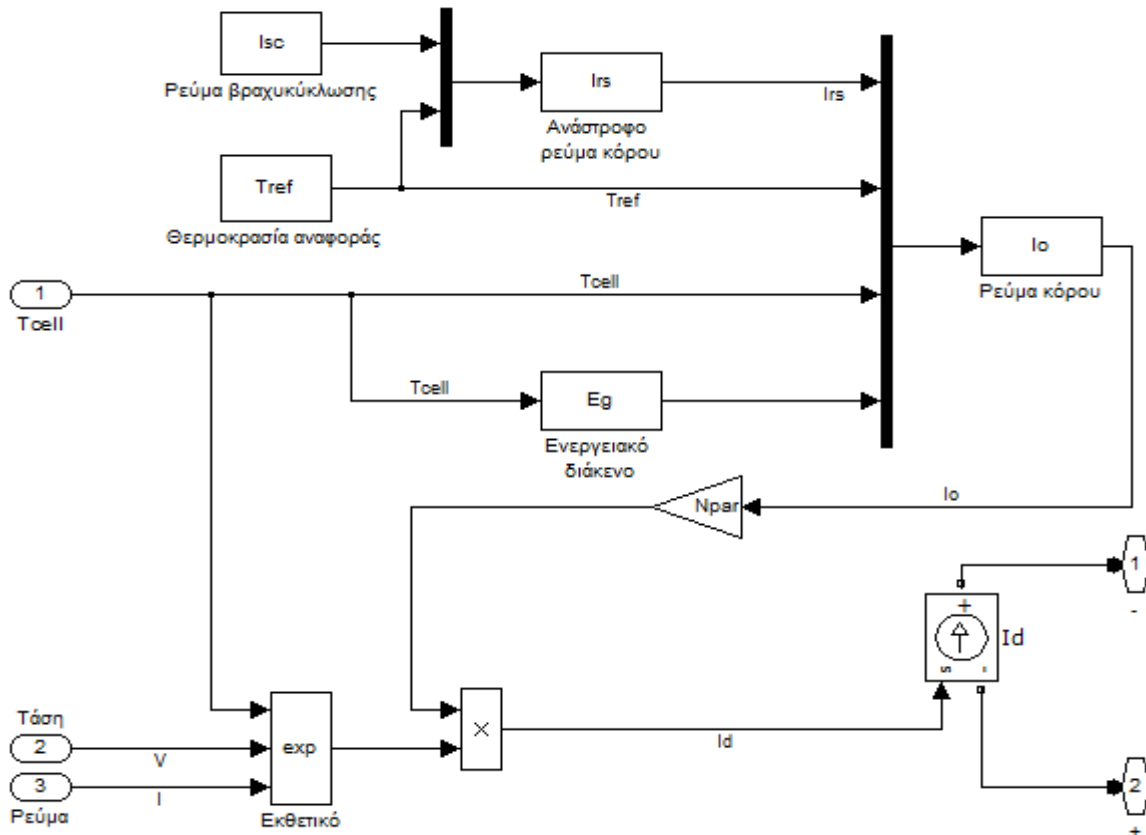
Για το φωτόρευμα, βάσει της **σχέσης 6.3** $I_{ph} = \left[I_{sc} [(R_s + R_{sh}) / R_{sh}] + K_i (T_c - T_{ref}) \right] \lambda$,

δημιουργήθηκε το υποσύστημα 'Iph' του **σχήματος 6.12**:



Σχήμα 6.12 Ανάλυση του δομικού υποσυστήματος 'Iph'

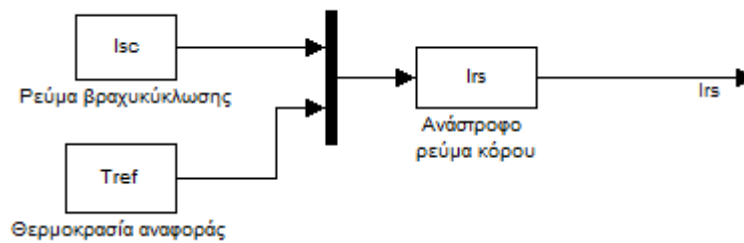
Ενώ το υποσύστημα του δομικού διαγράμματος ‘Δίοδος’ αναλύεται παρακάτω



Σχήμα 6.13 Ανάλυση του δομικού υποσυστήματος ‘Δίοδος’

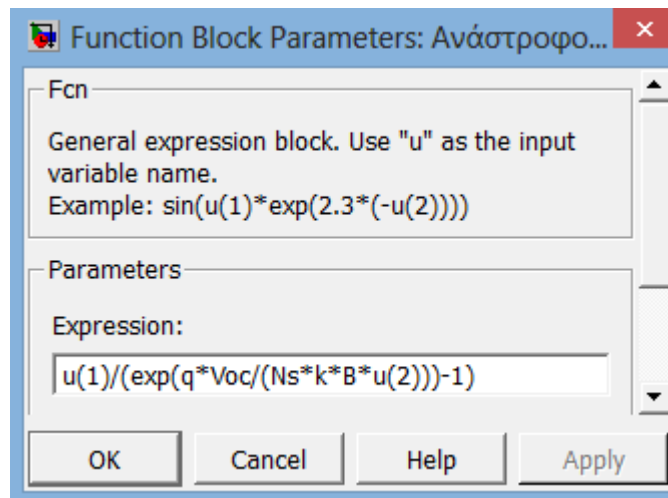
Για τον υπολογισμό του ανάστροφου ρεύματος κόρου έγινε χρήση της σχέσης 6.11

$$I_{rs} = I_{sc} / \exp\left[\left(qV_{oc} / N_s kAT_{ref}\right) - 1\right]$$



Σχήμα 6.14 Υπολογισμός ανάστροφου ρεύματος κόρου .

Όπου το I_{rs} φαίνεται παρακάτω:

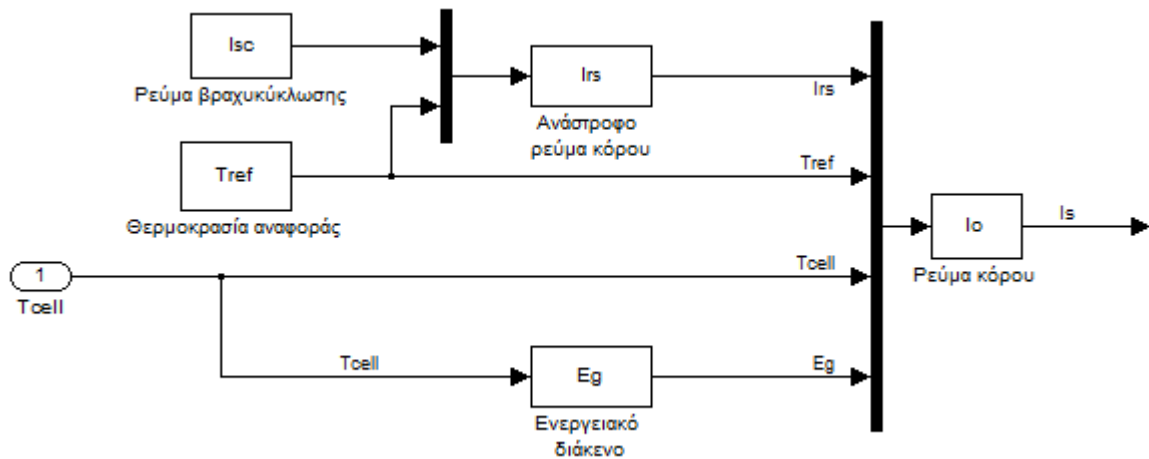


Σχήμα 6.15 Συνάρτηση I_{rs} .

Για το ρεύμα κόρου χρησιμοποιήθηκε η **σχέση 6.4**:

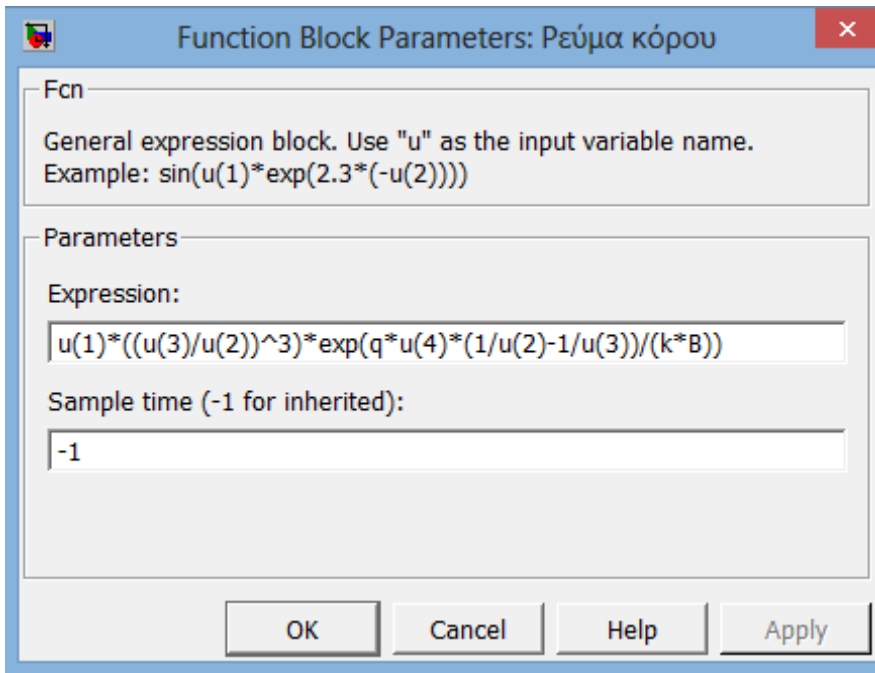
$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[qE_g \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) / kA \right]$$

Οπότε προέκυψε το **σχήμα 6.16**



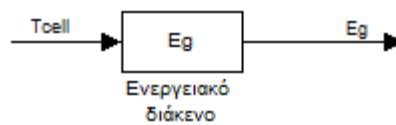
Σχήμα 6.16 Υπολογισμός ρεύματος κόρου.

Με το I_o να είναι:

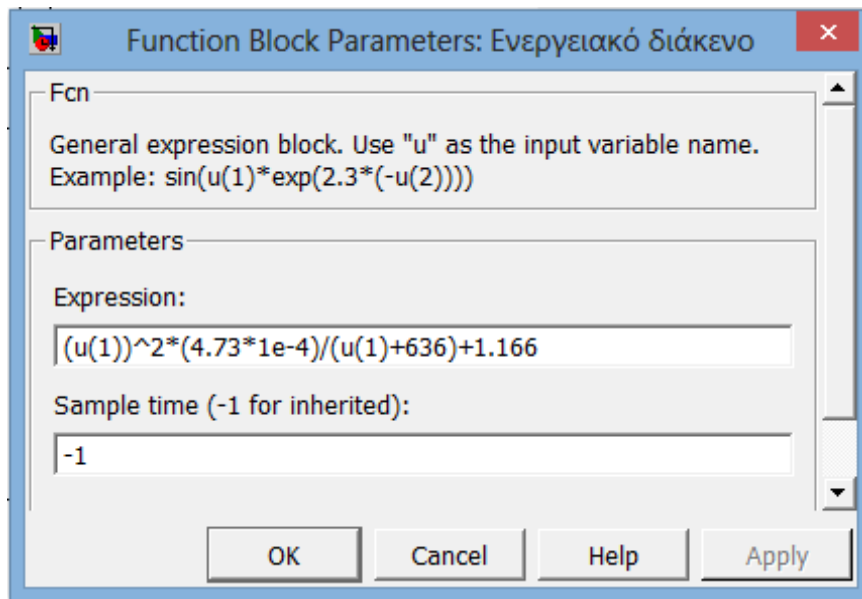


Σχήμα 6.17 Συνάρτηση I_o.

Για τον υπολογισμό της ενέργειας διακένου E_g έγινε χρήση της **σχέσης 3.1** που παρουσιάστηκε στο **κεφάλαιο 3.1.1**: $E_g(T) = 1.166 - (4.73 \times 10^{-4} T_C)/(T_C + 636)$. Οπότε προέκυψε:

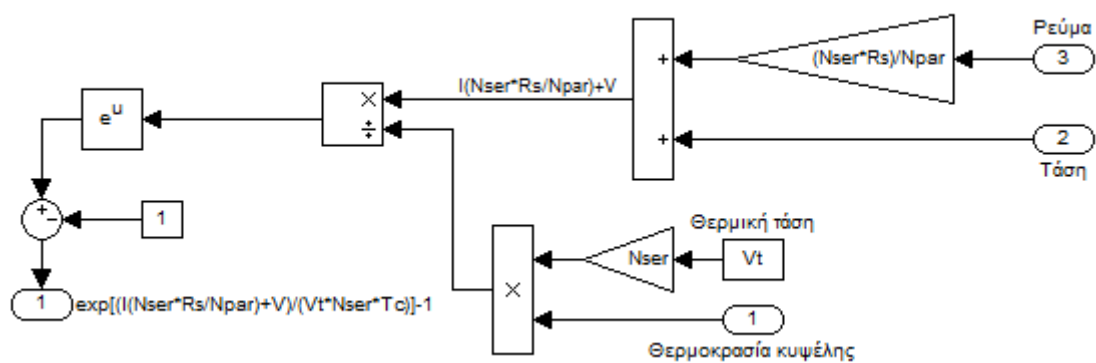


Σχήμα 6.18 Υπολογισμός ενέργειας διακένου.



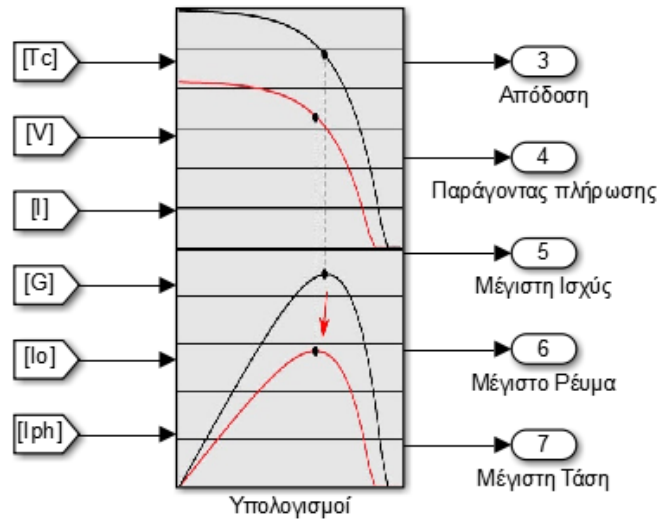
Σχήμα 6.19 Συνάρτηση ενέργειας διακένου Eg.

Το δομικό υποσύστημα ‘Εκθετικό’ παρουσιάζεται στο **σχήμα 6.20**

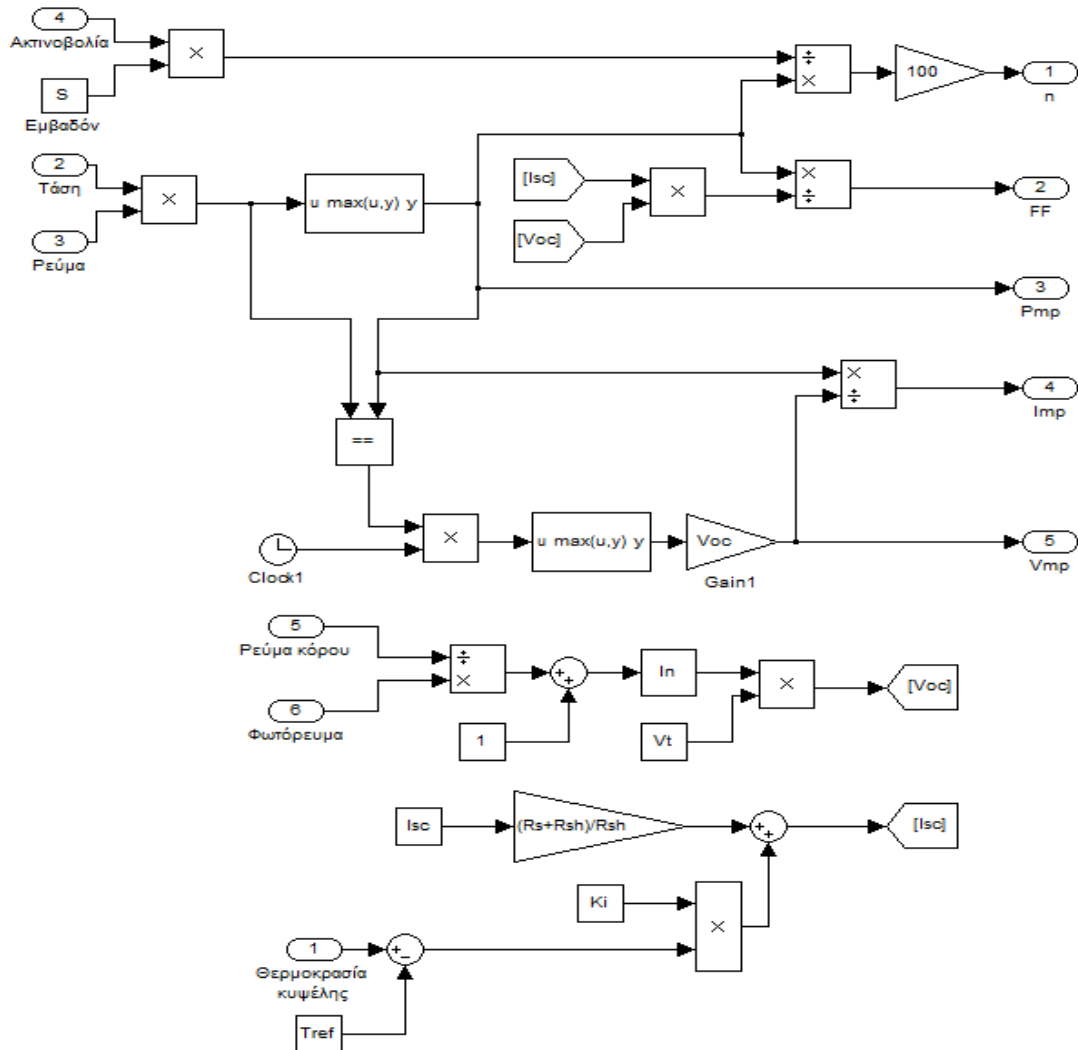


Σχήμα 6.20 Υπολογισμός εκθετικού “exp”.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων (ρεύμα, ισχύς, απόδοση, παράγοντας πλήρωσης, μέγιστο ρεύμα, μέγιστη τάση) που δίνονται σαν έξοδος στο μοντέλο χρησιμοποιείται το παρακάτω μαθηματικό υποσύστημα με όνομα ‘Υπολογισμοί’



Σχήμα 6.21 Εξωτερικό τμήμα υποσυστήματος 'Υπολογισμοί.



Σχήμα 6.22 Εσωτερικό τμήμα υποσυστήματος 'Υπολογισμοί.

Ο υπολογισμός της απόδοσης βασίζεται στη σχέση $n = \frac{S \cdot G}{P_{mp}}$, όπου S είναι το εμβαδόν του εκάστοτε πλαισίου σε m^2 , G η ακτινοβολία W/m^2 και P_{mp} η μέγιστη ισχύς του πλαισίου στις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.

Ο υπολογισμός του παράγοντα πλήρωσης βασίστηκε στη **σχέση 4.8** $FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{P_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$

Χρησιμοποιήθηκε, λοιπόν, ένα block διαίρεσης του P_{mp} με το γινόμενο των V_{oc} και I_{sc} . Όπου, για τον υπολογισμό των V_{oc} και I_{sc} χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι **6.9** και **6.10**.

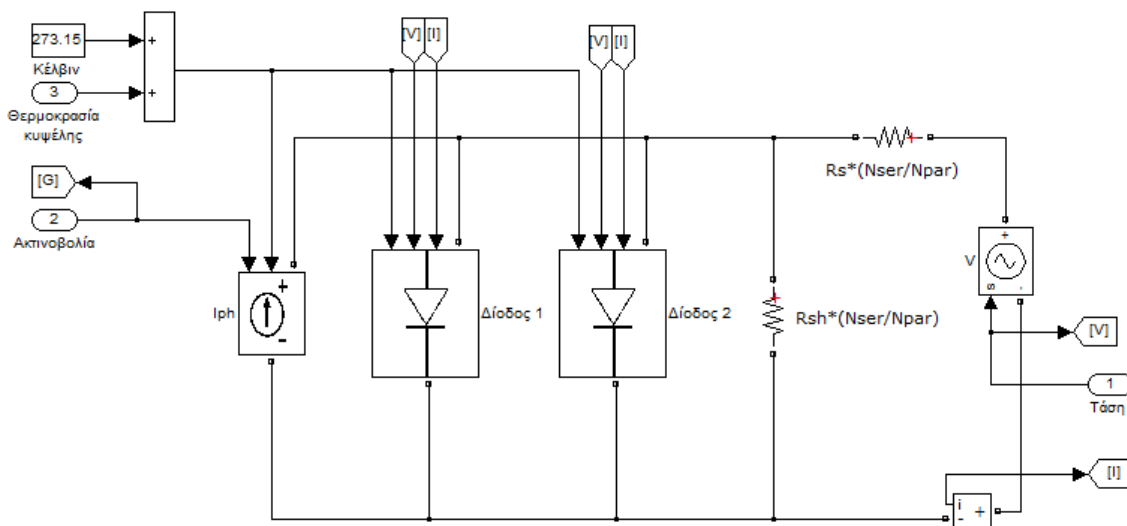
Ενώ για τον υπολογισμό της μέγιστης ισχύος P_{mp} χρησιμοποιήθηκε το block του Simulink 'MinMax Running Resettable' όπου κρατάει τη μεγαλύτερη τιμή που αποκτά το σήμα εισόδου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Έτσι, δίνει σαν έξοδο κάθε φορά τη μέγιστη τιμή ισχύος του πλαισίου στις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας.

Τέλος, όπως φαίνεται και στο **σχήμα 6.20**, για τον υπολογισμό του V_{mp} συγκρίνονταν κάθε φορά το σήμα P με το σήμα P_{max} και εξάγονταν το χρονικό διάστημα για το οποίο αυτά τα δύο σήματα ήταν ίσα. Έπειτα αυτό το σήμα πολλαπλασιάζονταν με τον χρόνο της προσομοίωσης και από το γινόμενο εξάγονταν το μέγιστο. Άρα, με αυτόν τον τρόπο προέκυπτε ο χρόνος για τον οποίο η ισχύς γίνεται μέγιστη και ο οποίος αν πολλαπλασιαστεί με την τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} , θα δώσει την μέγιστη τάση V_{mp} . Διαιρώντας, τώρα την μέγιστη ισχύ P_{mp} με την μέγιστη τάση V_{mp} θα προκύψει το μέγιστο ρεύμα I_{mp} .

6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΙΑΣ ΚΑΙ ΔΥΟ ΔΙΟΔΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Το μοντέλο μιας διόδου, το οποίο χρησιμοποιήθηκε μέχρι τώρα, προϋποθέτει σταθερή τιμή του παράγοντα ιδανικότητας n . Στην πραγματικότητα, όμως ο παράγοντας ιδανικότητας είναι μια συνάρτηση της τάσεως της διάταξης. Σε υψηλές τάσεις, καθώς οι επανασυνδέσεις περιορίζονται κυρίως στις επανασυνδέσεις επιφανείας και όγκου, ο παράγοντας ιδανικότητας προσεγγίζει τη μονάδα. Ωστόσο, σε χαμηλότερες τάσεις, κυριαρχούν οι επανασυνδέσεις στην επαφή και ο παράγοντας ιδανικότητας προσεγγίζει την τιμή 2. Άρα όταν υπάρχει έντονη επανασύνδεση στην επαφή, δηλαδή σε χαμηλές τάσεις, το μοντέλο που αναπαριστά καλύτερα την κυψέλη είναι αυτό των δύο διόδων, με την μία διόδο να έχει παράγοντα ιδανικότητας $n=1$ και την άλλη $n=2$ [27].

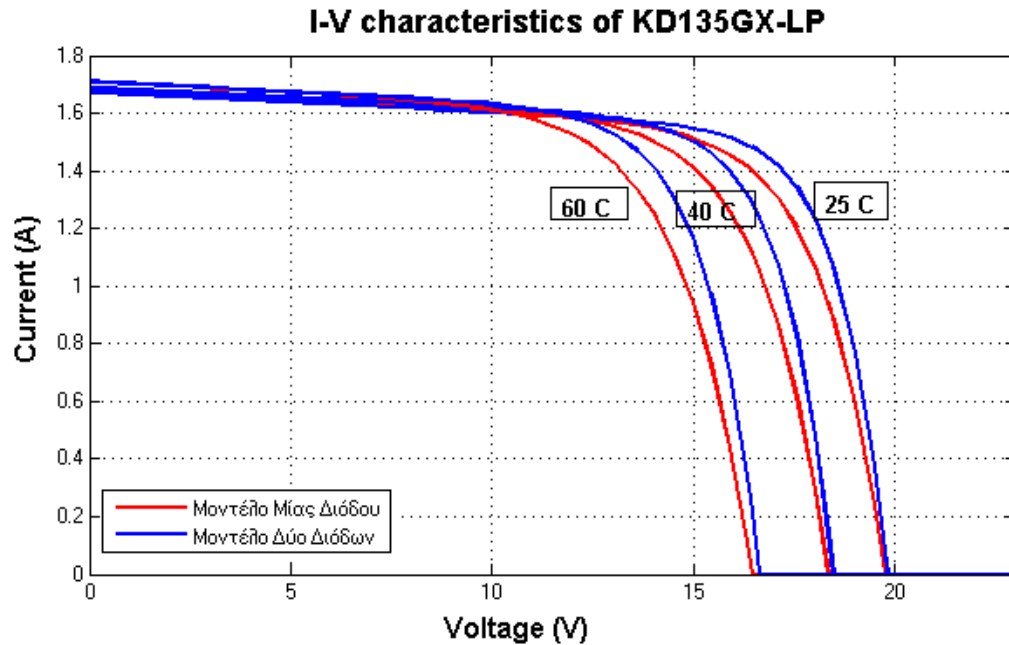
Εδώ παρουσιάζεται το μοντέλο δύο διόδων όπως αυτό κατασκευάστηκε στο simulink:



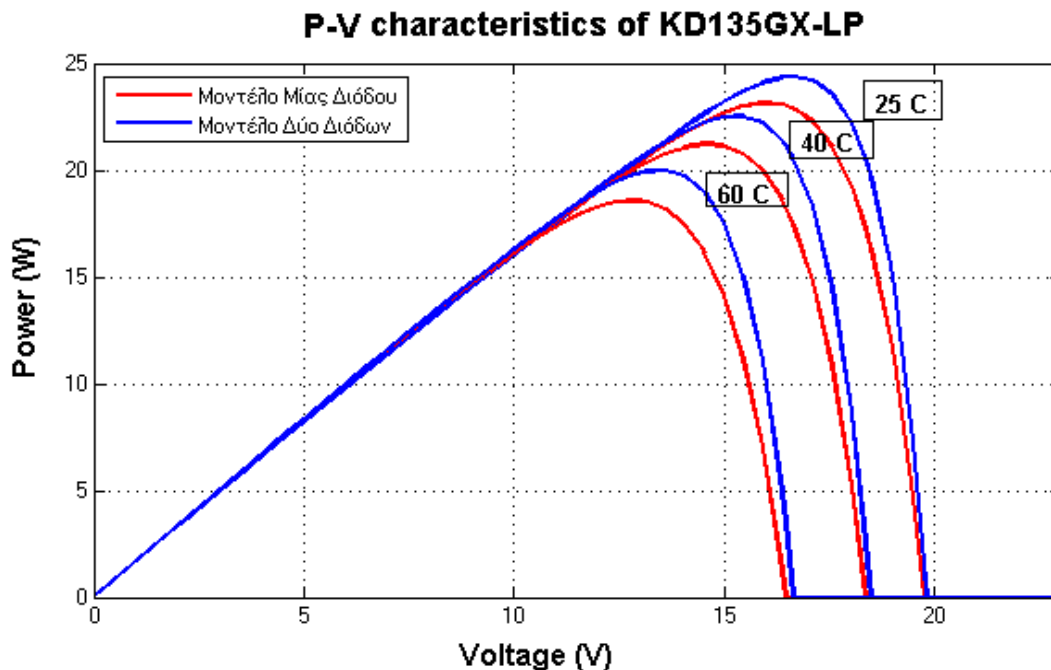
Σχήμα 6.23 Φωτοβολταϊκό μοντέλο δύο διόδων.

Επιλέγοντας σαν δείγμα το πλαίσιο KD135GX-LP, έγινε σύγκριση των χαρακτηριστικών που προκύπτουν από το μοντέλο μιας και δύο διόδων για διάφορες τιμές θερμοκρασίας κυψέλης σε χαμηλές και υψηλές ακτινοβολίες. Έτσι προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα:

- Ακτινοβολία 200 W/m²

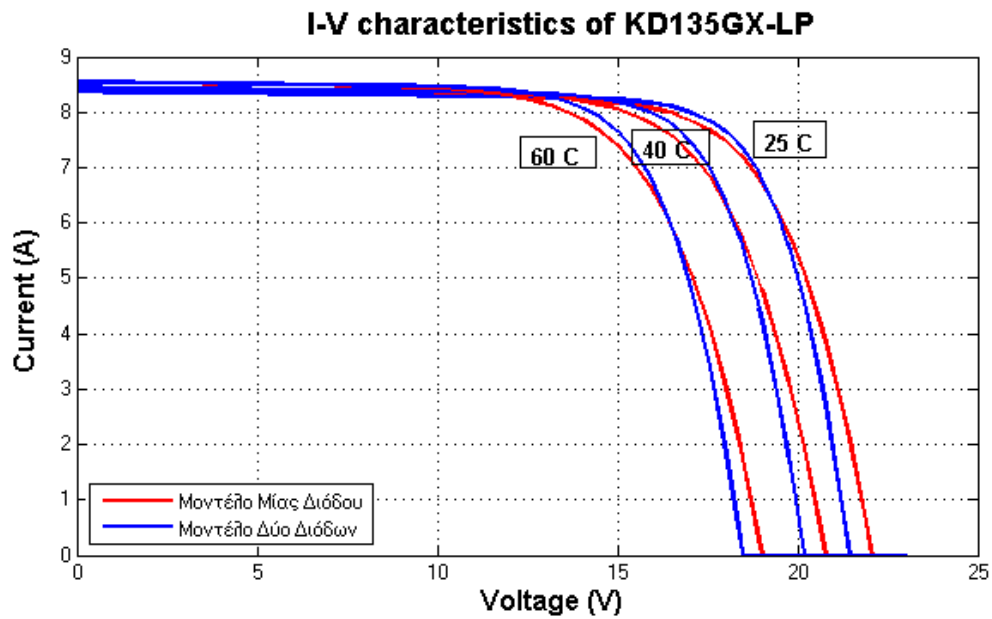


Διάγραμμα 6.7 I-V χαρακτηριστικές του πλαισίου KD135GX-LP με το μοντέλο μίας και δύο διόδων, για διάφορες τιμές θερμοκρασίας κυψέλης σε ακτινοβολία 200 W/m².

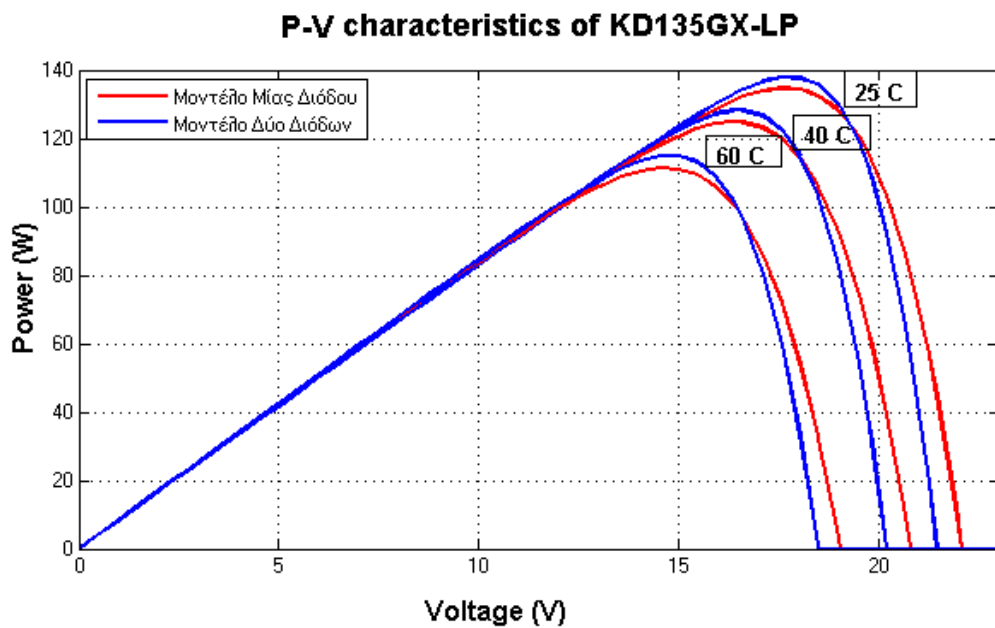


Διάγραμμα 6.8 P-V χαρακτηριστικές του πλαισίου KD135GX-LP με το μοντέλο μίας και δύο διόδων, για διάφορες τιμές θερμοκρασίας κυψέλης σε ακτινοβολία 200 W/m².

- Ακτινοβολία 1000 W/m²



Διάγραμμα 6.9 I-V χαρακτηριστικές του πλαισίου KD135GX-LP με το μοντέλο μίας και δύο διόδων, για διάφορες τιμές θερμοκρασίας κυψέλης σε ακτινοβολία 1000 W/m².

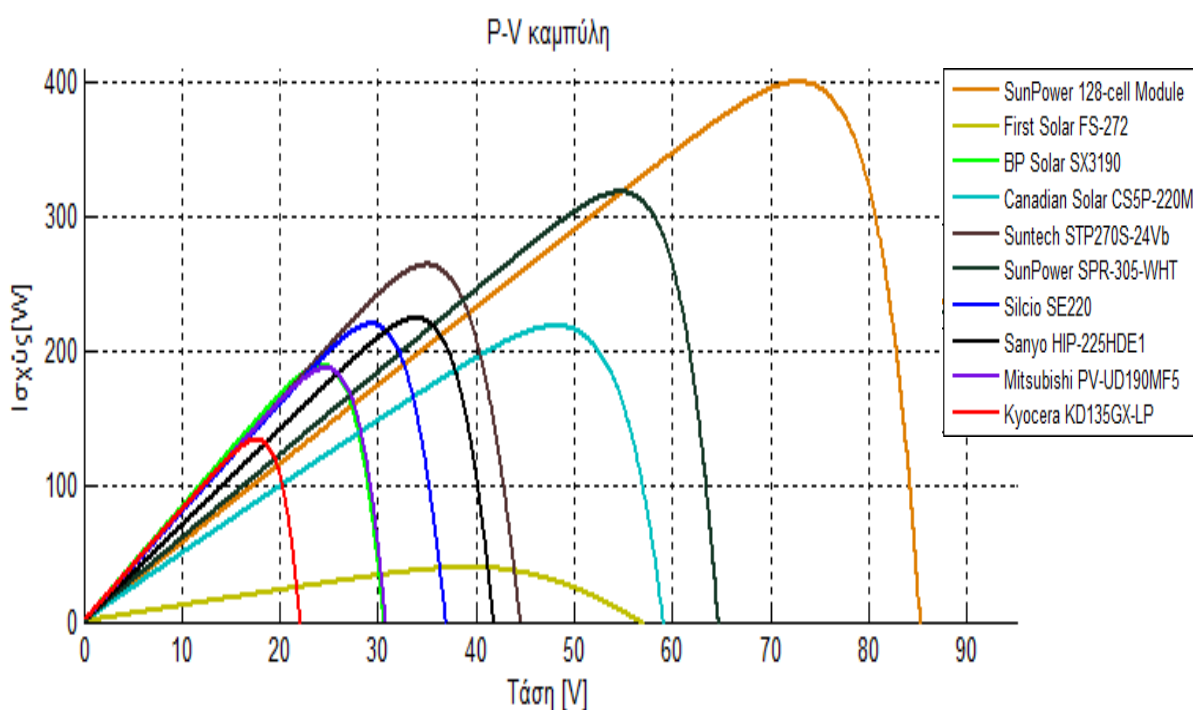


Διάγραμμα 6.10 I-V χαρακτηριστικές του πλαισίου KD135GX-LP με το μοντέλο μίας και δύο διόδων, για διάφορες τιμές θερμοκρασίας κυψέλης σε ακτινοβολία 1000 W/m².

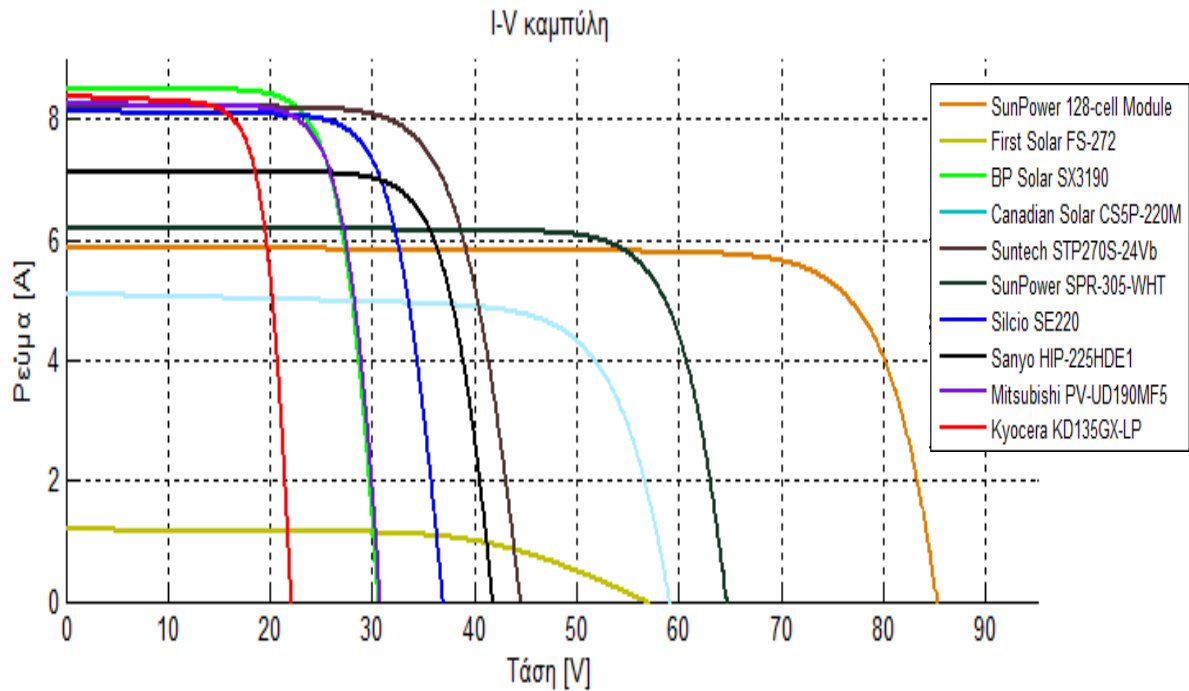
Γίνεται, λοιπόν, φανερό ότι το μοντέλο δύο διόδων αποδίδει καλύτερα σε χαμηλές ακτινοβολίες και θερμοκρασίες, όταν δηλαδή το πλαίσιο λειτουργεί σε χαμηλές τάσεις, όπως ήταν αναμενόμενο. Έτσι, στις υψηλές ακτινοβολίες η τάση βραχυκύκλωσης του μοντέλου δύο διόδων προκύπτει μικρότερη από την κανονική και η παραγόμενη ισχύς ελαφρώς αυξημένη. Ενώ, όταν η ακτινοβολία είναι μειωμένη το μοντέλο δύο διόδων γίνεται πιο ακριβές, με τις τιμές της τάσης ανοιχτοκύκλωσης να είναι οι επιθυμητές και οι χαρακτηριστικές P-V και I-V να είναι ομαλότερες.

6.5 ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ

Αρχικά επιλέγονται όλα τα μοντέλα των πλαισίων που είναι περασμένα στην προσομοίωση και γίνεται χάραξη των I-V και P-V χαρακτηριστικών τους σε συνθήκες STC.



Διάγραμμα 6.11 P-V χαρακτηριστικές διαφόρων εργοστασιακών πλαισίων σε STC.

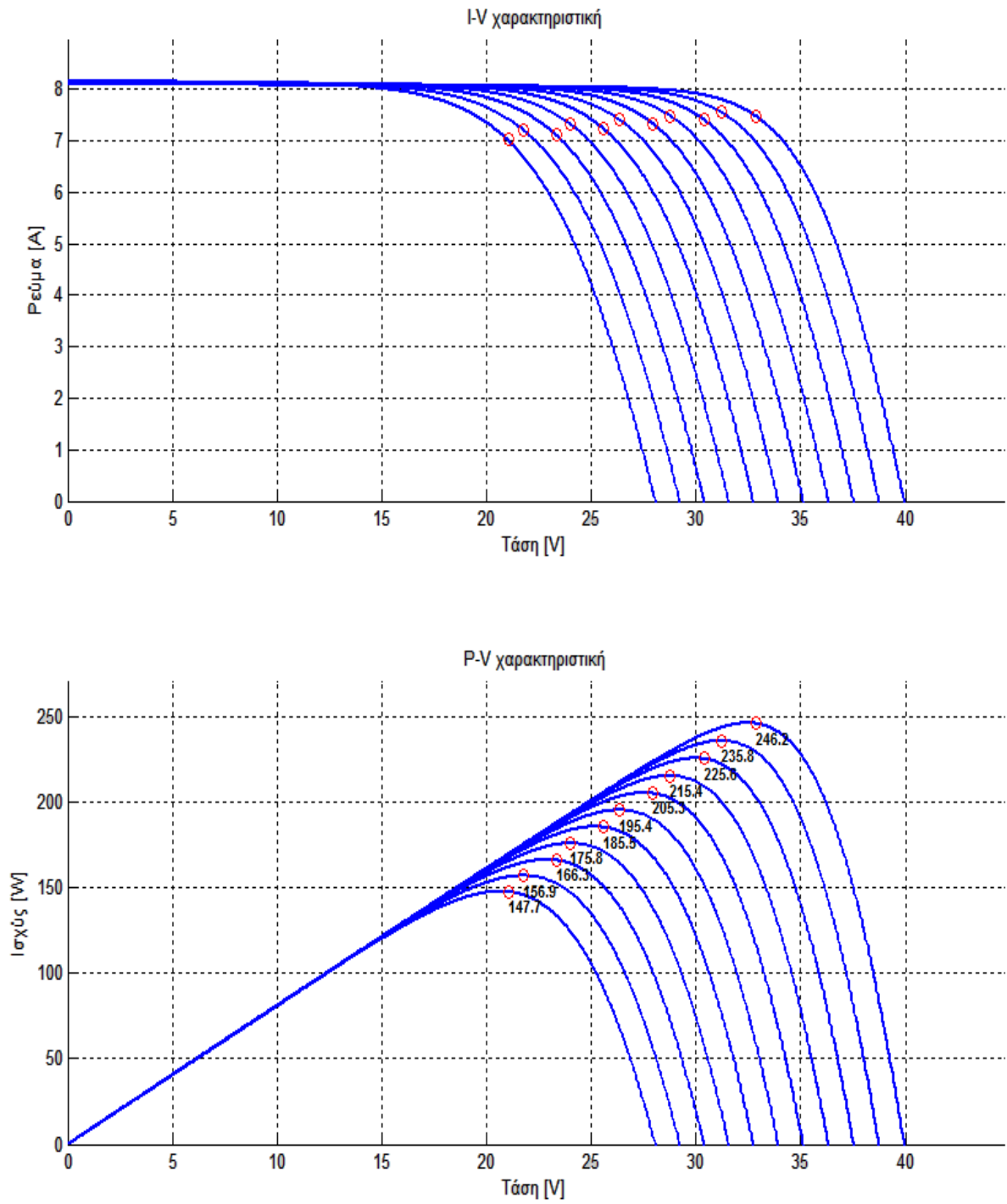


Διάγραμμα 6.12 I-V χαρακτηριστικές διαφόρων εργοστασιακών πλαισίων σε STC.

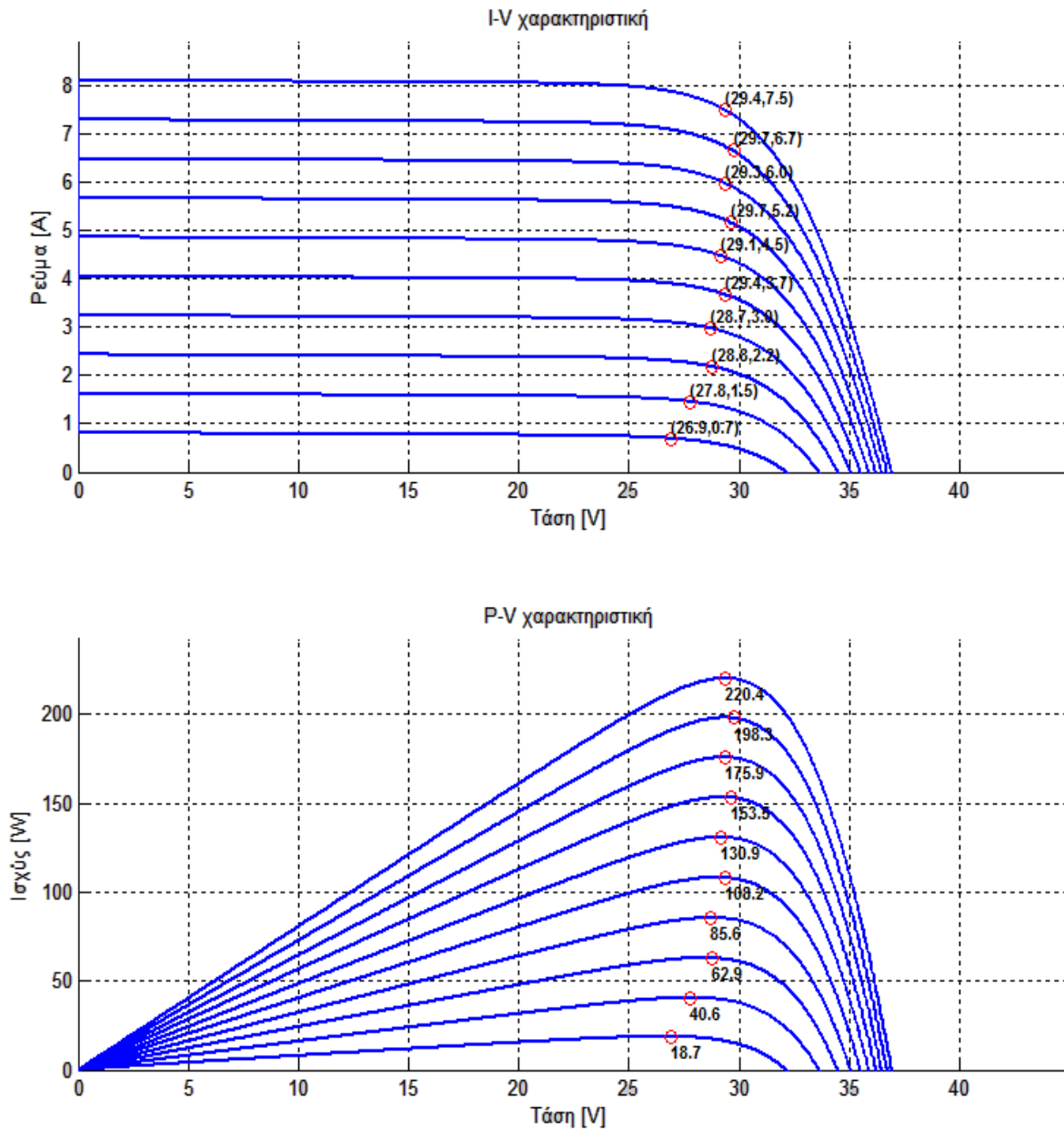
Οι γραφικές που προκύπτουν ταυτίζονται απόλυτα με αυτές που παρέχουν οι κατασκευαστές.

Έπειτα επιλέγεται στην προσομοίωση το πλαίσιο SE220 και υποβάλλεται σε διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι διότι θα μελετηθεί στο επόμενο κεφάλαιο και σε πραγματικές συνθήκες.

Έτσι για ακτινοβολία $1000\text{W}/\text{m}^2$ και αυξάνοντας την θερμοκρασία του πλαισίου από $0-100^\circ\text{C}$ με βήμα 10°C προκύπτει το **διάγραμμα 6.13**. Ενώ, για σταθερή θερμοκρασία κυνέλης 25°C και αυξάνοντας την ακτινοβολία από $100-1000\text{ W}/\text{m}^2$ με βήμα $100\text{ W}/\text{m}^2$ προκύπτει το **διάγραμμα 6.14**. Και στα δύο διαγράμματα γίνεται ανίχνευση του σημείου MPP, το οποίο συμβολίζεται με έναν κόκκινο κύκλο στην παράσταση. Όμως, λόγω έλλειψης χώρου οι αντίστοιχες τιμές V_{mpp} , I_{mpp} δεν παρουσιάζονται στην I-V χαρακτηριστική του **διαγράμματος 6.13**.



Διάγραμμα 6.13 I-V και P-V χαρακτηριστικές του πλαισίου Silcio SE220 για ακτινοβολία 1000W/m² και θερμοκρασίες κυψέλης 0-100°C.



Διάγραμμα 6.14 I-V και P-V χαρακτηριστικές του πλαισίου Silcio SE220 για θερμοκρασία κυψέλης 25°C και ακτινοβολία 0-1000W/m².

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ SE220 ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΕΝΑ ΕΤΟΣ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κύριος σκοπός των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν ήταν η συνεχής παρακολούθηση και καταγραφή των ηλεκτρικών αλλά και μετεωρολογικών δεδομένων ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου επί ένα ολόκληρο έτος στις εγκαταστάσεις του Πολυτεχνείου. Η παραπάνω καταγραφή ήταν απαραίτητη για τον έλεγχο της λειτουργίας του πλαισίου αλλά και της ενεργειακής του παραγωγής σε πραγματικές συνθήκες. Παράλληλα, παρέχονται πληροφορίες τόσο για την κλιματική και γεωλογική συμπεριφορά της περιοχής, όσο και για τις διαδικασίες συντήρησης και δοκιμής του πλαισίου.

7.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Το πείραμα που θα περιγραφεί παρακάτω εκτελέστηκε στα πλαίσια ενός προγράμματος που πραγματοποιεί το DERlab (Distributed Energy Resources Laboratories and PreStandardisation), το οποίο υποστηρίζεται και από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Στο πρόγραμμα αυτό συμμετέχουν, παράλληλα, ερευνητικά κέντρα από 11 χώρες τα οποία πληρούν τα απαιτούμενα κριτήρια και τους ποιοτικούς πόρους για την λειτουργία και διασύνδεση διεσπαρμένων ενεργειακών πηγών (DER). Σκοπός του πειράματος που προτάθηκε από το DERlab είναι η μακροχρόνια δοκιμή φωτοβολταϊκών πλαισίων σε εξωτερικές πραγματικές συνθήκες, αλλά κάτω από συγκεκριμένες διαδικασίες, οι οποίες θα είναι κοινές για όλους τους συμμετέχοντες. Οι διαδικασίες αυτές ισχύουν τόσο για την εγκατάσταση και την δοκιμή του πλαισίου, όσο και για τον τρόπο που θα ληφθούν μετέπειτα οι μετρήσεις. Παρακάτω, παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι πρότυπες διαδικασίες που ακολουθήθηκαν κατά την εκτέλεση του πειράματος.

- Αρχικά, επιλέγονται τρία όμοια πλαίσια από τον ίδιο κατασκευαστή και την ίδια γραμμή παραγωγής.
- Δύο από τα πλαίσια με ονομαστική ισχύ έως 250W μετριοούνται παράλληλα σε εξωτερικές συνθήκες, ενώ το τρίτο πλαίσιο λειτουργεί ως μέτρο σύγκρισης και φυλάσσεται στο σκοτάδι.
- Ανάλογα με την περιοχή, τα υπό εξέταση πλαίσια τοποθετούνται στη βέλτιστη δυνατή κλίση, λαμβάνοντας υπόψιν το γεωγραφικό της πλάτος.
- Γίνεται συνεχής καταγραφή των I-V χαρακτηριστικών των πλαισίων καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων.
- Παράλληλα, γίνεται έλεγχος για εμφανείς φθορές και ακαθαρσίες.
- Τέλος, η περίοδος των μετρήσεων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ένα έτος.

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την διεξαγωγή του πειράματος είναι :

- Βάσεις στήριξης για την τοποθέτηση τόσο των πλαισίων όσο και του μετρητικού εξοπλισμού.
- Όργανα για την μέτρηση των μετεωρολογικών δεδομένων.
- Όργανα για την μέτρηση των ηλεκτρικών δεδομένων.
- Υποδομή για την καταγραφή και επεξεργασία των παραπάνω μετρούμενων δεδομένων.

7.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ

7.3.1 ΜΕΤΡΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Για την καταγραφή των μετεωρολογικών και ηλεκτρικών δεδομένων έγινε χρήση του συστήματος λήψης δεδομένων 'SOL.Connect', το οποίο αναπτύχθηκε από την Papendorf Software Engineering και χρησιμοποιεί μια μετρητική κάρτα 'ISET-mpp meter' ξεχωριστά για κάθε δοκιμαστικό πλαίσιο βλ. **σχήμα 7.1**.

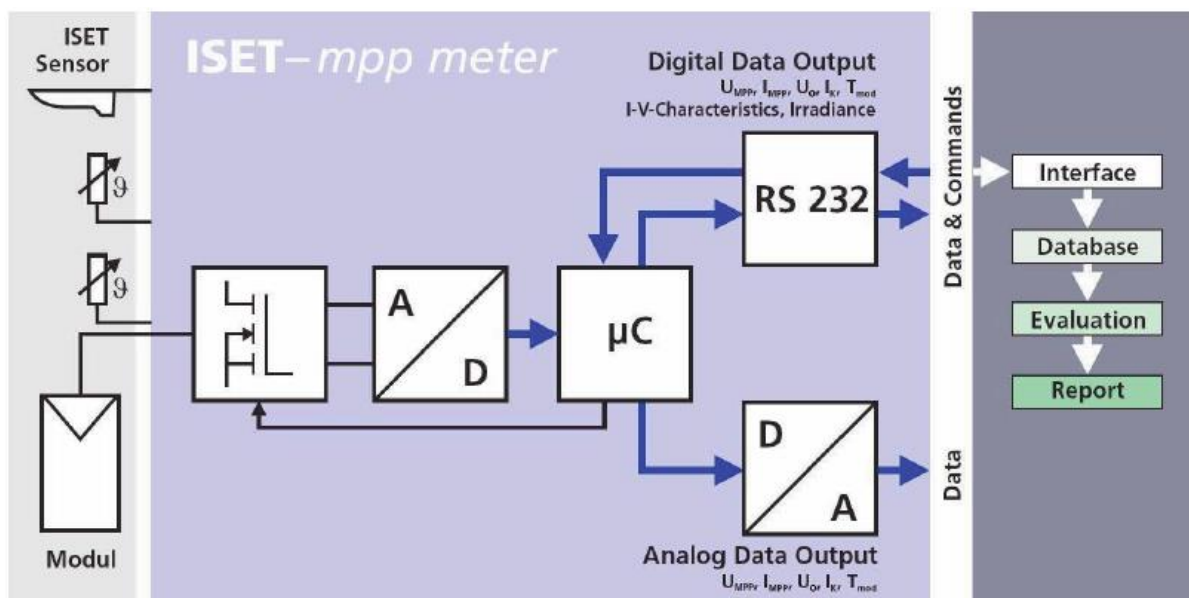


Σχήμα 7.1 Η μετρητική κάρτα ISET-mpp meter

Παρακάτω αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας του ‘ISET-mpp meter’. Μια πηγή ρεύματος, η οποία ελέγχεται από τον μικροεπεξεργαστή, οδηγεί τα υπό εξέταση πλαίσια με διακριτά βήματα από το ανοιχτοκύκλωμα στο βραχυκύκλωμα. Η τάση στα άκρα του πλαισίου μαζί με το ρεύμα του, μετριούνται με έναν 16-bit A/D μετατροπέα. Στο **σχήμα 7.2** φαίνεται η αρχή λειτουργίας της μετρητικής πλακέτας. Βάση των δεδομένων της καμπύλης του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης, που θα προκύψει, μπορούν να προσδιοριστούν το MPP-ρεύμα και η MPP-τάση. Παράλληλα, καταγράφονται και τα δεδομένα της θερμοκρασίας του πλαισίου, της ακτινοβολίας, της I-V χαρακτηριστικής και αν κριθεί απαραίτητο ακόμα και της θερμοκρασίας του αισθητήρα ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στέλνονται μέσω της διάταξης RS 232 στον υπολογιστή. Όλες οι τιμές που έχουν αναγνωσθεί εκτός της I-V χαρακτηριστικής, είναι επίσης διαθέσιμες σαν

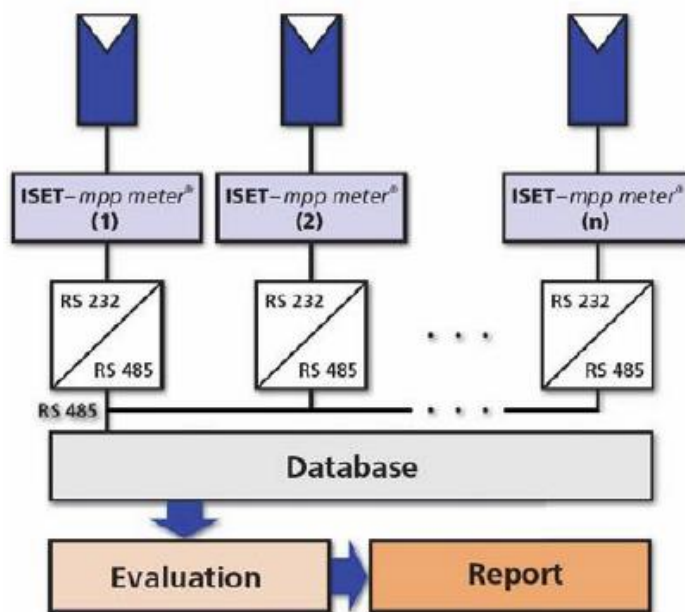
αναλογικές τάσεις (έως 8 θύρες), οι οποίες παράγονται από έναν D/A μετατροπέα και τοποθετούνται σε κλίμακα 0-2 Volts.

Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να μεταφερθούν τα δεδομένα από την μετρητική κάρτα σε κάποιο υπάρχον αναλογικό σύστημα καταγραφής. Η μετρητική πλακέτα πετυχαίνει μετρήσεις με ακρίβεια <1%. Η μέγιστη ισχύς εισόδου που μπορεί να δεχτεί η κάρτα είναι 250 Wp. Για πλαίσια με μεγαλύτερη ισχύ από αυτήν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας επιπρόσθετος αντάπτορας επέκτασης, ο οποίος επιτρέπει την σύνδεση έως και 500 Wp. Η μέτρηση των I-V χαρακτηριστικών πραγματοποιείται σε χρόνο 300ms , παρέχοντας καμπύλες I-V αποτελούμενες από 256 σημεία.



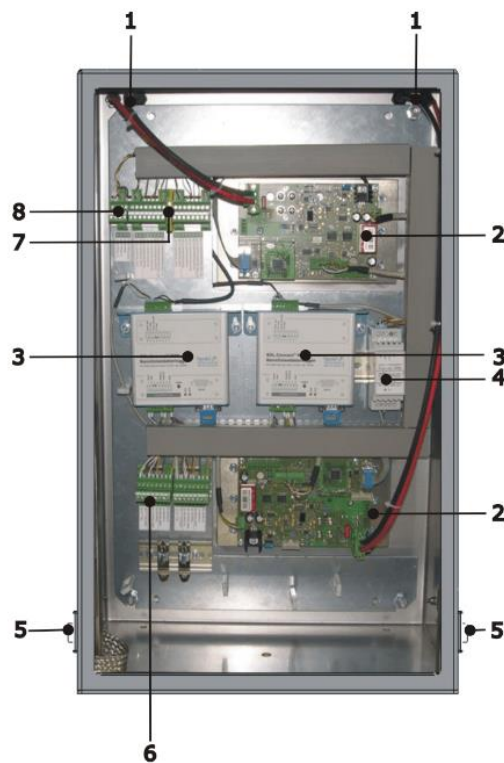
Σχήμα 7.2 Αρχές λειτουργίας του ISET-mpp meter

Η κάρτα ISET-mpp meter μπορεί να επιτύχει και ταυτόχρονη μέτρηση πολλών πλαισίων με τη χρήση ενός σήματος ενεργοποίησης. Ένα εξωτερικό σήμα διέγερσης μπορεί να ενεργοποιήσει την ταυτόχρονη έναρξη της μέτρησης σε όλες τις μετρητικές κάρτες ακόμα και αν δεν υπάρχει σειριακή επικοινωνία μεταξύ του καταγραφικού συστήματος και της κάρτας. Παρέχοντας, έτσι, τη δυνατότητα της ταυτόχρονης μέτρησης ακόμα και σε αναλογικά καταγραφικά συστήματα. Για τον ταυτόχρονο χειρισμό πολλών ISET-mpp meters απαιτείται απλά μια διπλή συρμάτινη ένωση σε συνδυασμό με μια διασύνδεση RS232/485. Ένα λογισμικό που αναπτύχθηκε από την IWES, επιτρέπει τον έλεγχο των ISET-mpp meters και αποθηκεύει όλα τα δεδομένα που προκύπτουν σε μια βάση δεδομένων SQL. Στην **εικόνα 7.3** φαίνεται η δομή ενός τέτοιου ολοκληρωμένου συστήματος δοκιμών.



Σχήμα 7.3 Σύστημα δοκιμών ISET-mpm meter

Μια πιο ολοκληρωμένη και ρεαλιστική εικόνα του ‘ISET-mpm meter’ φαίνεται στο **σχήμα 7.4**, ενώ η επεξήγηση των στοιχείων που την απαρτίζουν δίνεται στον **πίνακα 7.1**.



Σχήμα 7.4 Περιγραφή του κουτιού ‘ISET-mpm meter’

| Περιγραφή στοιχείων του ISET-mpp meter | |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Είσοδος καλωδίων DC από το πλαίσιο |
| 2 | Μετρητικές κάρτες ISET-mpp meter |
| 3 | Καταγραφή δεδομένων I-V χαρακτηριστικών |
| 4 | DC/DC μετατροπέας |
| 5 | Είσοδος καλωδίων διαύλου δεδομένων και αισθητήρων |
| 6 | Ακροδέκτης καλωδίων για σύνδεση περισσοτέρων MPP cabinets και SOL.Connect mpp Center |
| 7 | Ακροδέκτης καλωδίων για αισθητήρες |
| 8 | Ακροδέκτης καλωδίων για EasyLan (π.χ για σύνδεση μιας αισθητήριας διάταξης) |

Πίνακας 7.1 Ανάλυση δομικών στοιχείων του ISET mpp-meter.

7.3.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για τη σωστή ερμηνεία της καταγεγραμμένης ενεργειακής παραγωγής, οι μετρήσεις των μετεωρολογικών δεδομένων θα πρέπει να περιλαμβάνουν την θερμοκρασία περιβάλλοντος, την θερμοκρασία του πλαισίου καθώς και την προσπίπτουσα ακτινοβολία στο πλαίσιο. Παρακάτω αναλύονται τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μια από τις μετρήσεις αυτές.

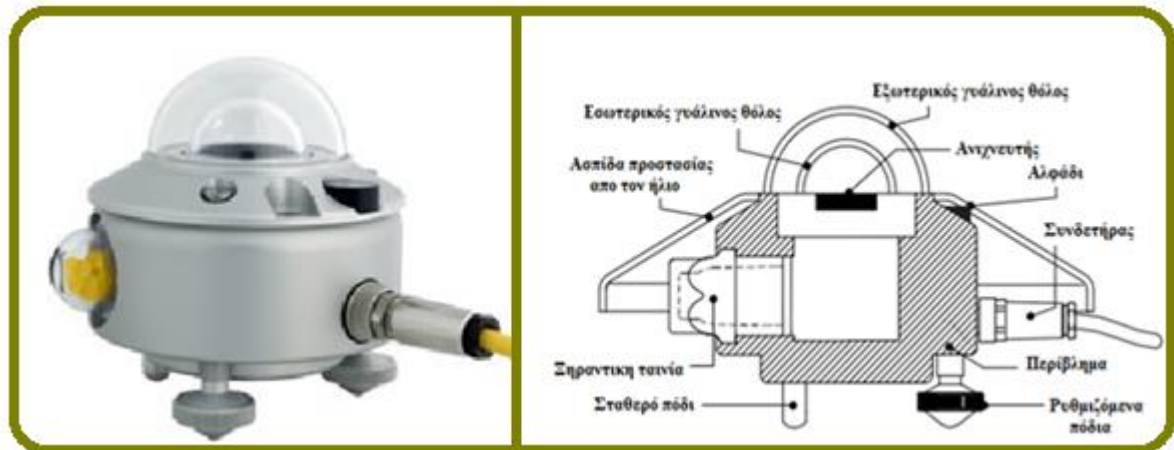
Ακτινοβολία

Για την καταγραφή της ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκαν παράλληλα δύο διαφορετικά όργανα, ένα πυρανόμετρο CMP11 της Kipp & Zonen και ένας πολυκρυσταλλικός αισθητήρας ISET sensor της IKS-Photovoltaik και έπειτα έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων του κάθε οργάνου .

α) Πυρανόμετρο

Το πυρανόμετρο είναι ένας τύπος οργάνου κατάλληλος για την μέτρηση της ημισφαιρικής (ολικής ή διάχυτης) ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα εύρος μήκους κύματος από 0.3 έως 3 μm (300 με 3000 nm). Το CMP11, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, είναι ένα υψηλής ποιότητας ραδιόμετρο, σχεδιασμένο για να μετράει την ακτινοβολία βραχέων μηκών κύματος σε επίπεδη επιφάνεια (ροή ακτινοβολίας, W/m^2) η οποία προέρχεται είτε άμεσα από τον ήλιο,

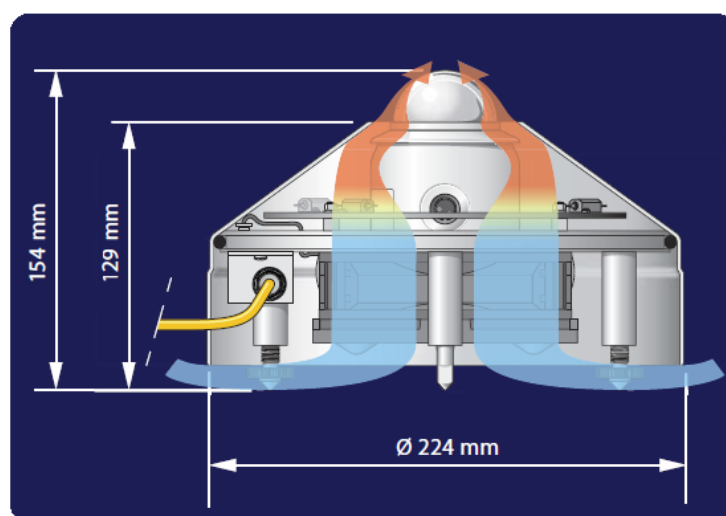
είτε διάχυτα από τον ουρανό και προσπίπτει στο ημισφαίριο πάνω από το όργανο. Για να επιτύχει τα επιθυμητά τεχνικά χαρακτηριστικά το πυρανόμετρο CMP11 χρησιμοποιεί αισθητήριες θερμοστήλες και γυάλινους θόλους. Περιέχει, επίσης ενσωματωμένο αλφάδι αλλά και ρυθμιζόμενα πόδια, ενώ οι προσκολλημένες ηλιακές ασπίδες μειώνουν την θέρμανση του περιβλήματος, όπως φαίνεται και από το **σχήμα 7.5**.



Σχήμα 7.5 Εξωτερική όψη και τεχνικά χαρακτηριστικά του CMP11 .

Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικότερα ο τρόπος λειτουργίας του πυρανομέτρου CMP11. Η θερμοστήλη του αισθητήριου στοιχείου αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό ζευγών επαφών ηλεκτρικά συνδεδεμένων σε σειρά. Η απορρόφηση θερμικής ακτινοβολίας από τη μία επαφή του θερμοζεύγους, η οποία καλείται ενεργή (ή «θερμή») επαφή, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της ενεργής επαφής και μιας επαφής αναφοράς («κρύα») η οποία διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία παράγει μια ηλεκτρεγερτική δύναμη που είναι ευθέως ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας που δημιουργήθηκε, προκαλώντας, έτσι, ένα θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Το μαύρο επίστρωμα στην επιφάνεια της θερμοστήλης έχει μια τραχιά δομή η οποία «παγιδεύει» αποτελεσματικά πάνω από το 97% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και θερμαίνει τις θερμές επαφές. Η θερμοστήλη με το μαύρο επίστρωμα αποτελεί τον ανιχνευτή, που έχει φασματική επιλεκτικότητα μικρότερη από 2%. Αυτό σημαίνει ότι μέσα στο φασματικό εύρος του πυρανομέτρου, η απορρόφηση για κάθε μήκος κύματος είναι ίση με 2%. Το μαύρο επίστρωμα απορρόφησης είναι ένα από τα πιο κρίσιμα και ευαίσθητα μέρη του πυρανομέτρου.

Παράλληλα για να είναι οι μετρήσεις πιο ακριβείς και αξιόπιστες χρησιμοποιήθηκε και μια μονάδα αερισμού της Kipp & Zonen, η “CVF 3 ventilation unit” η οποία προσαρμόζεται στο κάτω μέρος του πυρανομέτρου CMP11 και με τη χρήση ενός ανεμιστήρα και ενός εσωτερικού φίλτρου προσφέρει ροή καθαρού αέρα στον θόλο του. Επιπλέον, ενσωματωμένοι θερμοαντήρες επιτρέπουν την θέρμανση του αέρα όταν αυτό κριθεί απαραίτητο. Τέλος, η συνεχής λειτουργία του ανεμιστήρα δεν αφήνει την σκόνη να κατακάθεται στον θόλο, ενώ παράλληλα διώχνει το βρόχινο νερό και διατηρεί την θερμοκρασία του θόλου σταθερή. Στο **σχήμα 7.6** φαίνεται η μονάδα αερισμού με τις διαστάσεις τις.



Σχήμα 7.6 Μονάδα αερισμού CVF 3.

β) Πολυκρυσταλλικός αισθητήρας

Ο ISET sensor χρησιμοποιείται επίσης για την μέτρηση ακτινοβολίας, αλλά είναι κατασκευασμένος από πολυκρυσταλλικό υλικό όμοιο με αυτό του μετρούμενου πλαισίου και έχει έναν τελείως διαφορετικό τρόπο λειτουργίας από αυτόν του πυρανομέτρου. Ο ISET sensor μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα ανάλογο ποσό ρεύματος, όπως ακριβώς και μια ηλιακή κυψέλη. Έπειτα, μέσω μιας συγκεκριμένης παράλληλης αντίστασης η οποία είναι συζευγμένη θερμικά με το συμπαγές αλουμινένιο περίβλημα, υπολογίζει τη μετρούμενη τάση. Για την λήψη ακριβέστερων μετρήσεων και την σωστή παρακολούθηση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο πλαίσιο θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ίδια τεχνολογία κρυστάλλου στον αισθητήρα και το πλαίσιο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ίδια φασματική ευαισθησία αλλά και ίδια συμπεριφορά όσον αφορά τη θερμοκρασία, τις ανακλάσεις και

την υποβάθμιση μεταξύ οργάνου και πλαισίου. Ο ISET sensor που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο **σχήμα 7.7**



Σχήμα 7.7 ISET sensor

Θερμοκρασία περιβάλλοντος

Για την θερμοκρασία περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας θερμοκρασίας NRG 110S **σχήμα 7.8**, ο οποίος διαθέτει ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα αισθητήρα θερμότητας το οποίο παρέχει σαν έξοδο ένα σήμα υψηλής τάσης. Ο NRG 110S περιλαμβάνει εσωτερική αναφορά, ενισχυτές, γραμμικοποιητές και μια ασπίδα προστασίας από την UV ακτινοβολία, αποτελούμενη από έξι δίσκους.



Σχήμα 7.8 NRG 110S

Θερμοκρασία κυψέλης

Η θερμοκρασία κυψέλης μετριούνταν από δύο θερμοζεύγη PT100 τα οποία τοποθετήθηκαν ένα στο άκρο του πλαισίου και ένα στο κέντρο του αντίστοιχα. Το θερμοζεύγος PT100 προσφέρει μετρήσεις μεγάλης ακρίβειας σε ένα μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος $[-200^{\circ}\text{C}, +300^{\circ}\text{C}]$. Η αρχή λειτουργίας του θερμοζεύγους βασίζεται στη μέτρηση της αντίστασης του πλατινένιου στοιχείου **βλ σχήμα 7.9**. Η αντίστασή του είναι 100 ohms στους 0°C κα 138.4 ohms στους 100°C . Η εξίσωση μεταξύ θερμοκρασίας και αντιστάσεως είναι απόλυτα γραμμική για μικρές θερμοκρασίες, ενώ για μεγαλύτερες θερμοκρασίες γίνεται γραμμικοποίηση της αντίστασης.



Σχήμα 7.9 Θερμοζεύγος PT1000.

7.3.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

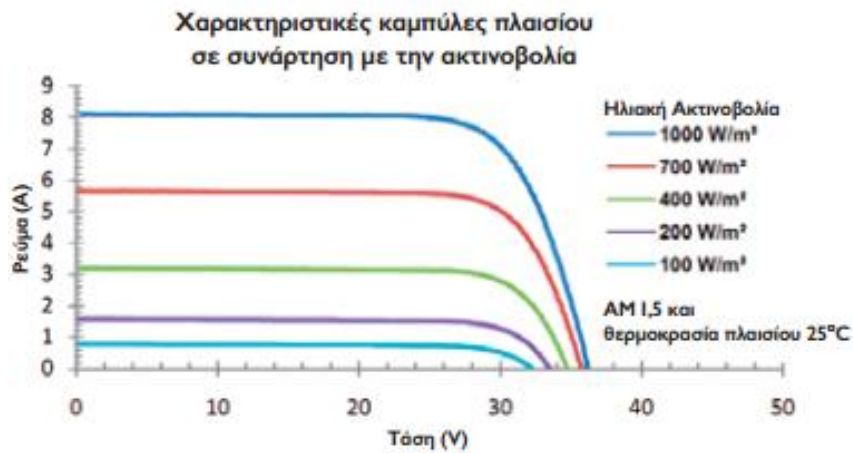
Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο που επιλέχθηκε είναι το SE220 της ελληνικής εταιρίας Silcio, το οποίο πληρούσε τις απαιτούμενες προδιαγραφές για την πραγματοποίηση του πειράματος. Τα χαρακτηριστικά του SE 220 αναφέρονται στον **πίνακα 7.2**, ενώ στα **σχήματα 7.10** και **7.11** φαίνεται η όψη του πλαισίου και οι I-V χαρακτηριστικές που παρέχονται από τον κατασκευαστή:

| Τύπος πλαισίου | | SE 220 | |
|--------------------------------------------|------|--------------|-------|
| Συνθήκες μέτρησης | | STC | NOCT |
| Όνομαστική ισχύς | (W) | 220 | 163 |
| Μέγιστη Τάση U_{mp} | (V) | 29.12 | 26.8 |
| Μέγιστο Ρεύμα I_{mp} | (I) | 7.56 | 6.1 |
| Τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} | (V) | 36.94 | 34.2 |
| Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} | (I) | 8.12 | 6.6 |
| Απόδοση πλαισίου | (%) | 13.4 | 12.4 |
| Θερμοκρασία NOCT | (°C) | - | 39.95 |
| Θερμοκρασιακός συντελεστής- V_{oc} (%/K) | | -0.29 | |
| Θερμοκρασιακός συντελεστής- I_{sc} (%/K) | | 0.053 | |
| ΦΒ κύτταρα | | 60 poly-Si | |
| Πλαστικοποίηση | | EVA | |
| Πίσω επιφάνεια | | Σύνθετο φιλμ | |
| Κυτίο συνδέσεως | | Αεριζόμενο | |
| Δίοδοι παράκαμψης | | 3 | |
| Μέγιστη τάση συστήματος | (V) | 1000 | |
| Πάχος γυαλιού | (mm) | 3.2 | |
| Διαστάσεις | (mm) | 1654x993x40 | |

Πίνακας 7.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά SE220.



Σχήμα 7.10 Εμπρόσθια και οπίσθια όψη του πλαισίου SE 220 μαζί με τις διαστάσεις του.



Σχήμα 7.11 I-V χαρακτηριστικές του SE 220 για διάφορες ακτινοβολίες.

7.3.4 ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΟΚΙΜΩΝ

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του ΕΜΠ στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας στην περιοχή του Ζωγράφου, Αθήνα (37° 58' 26''N, 23° 47' 16'' E). Τα πλαίσια τοποθετήθηκαν με προσανατολισμό στο Νότο και βέλτιστη κλίση 30°. Η εγκατάσταση έγινε στις 28/07/2011 στην ταράτσα του εργαστηρίου, η οποία είναι επιστρωμένη με χαλίκι, ενώ δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση ώστε να μην υπάρχει παρεμπόδιση από παρακείμενη βλάστηση ή γειτονικά κτίρια. Η περίοδος δοκιμών διάρκεσε ένα έτος και πραγματοποιήθηκε στο διάστημα 01/01/2012 – 31/12/2012. Ενώ η απεγκατάσταση του πλαισίου έγινε στις 17/01/2013. Τέλος, η κάτω μεριά του πλαισίου απείχε 0.5 μέτρα από το έδαφος όπως φαίνεται και στο **σχήμα 7.12**.

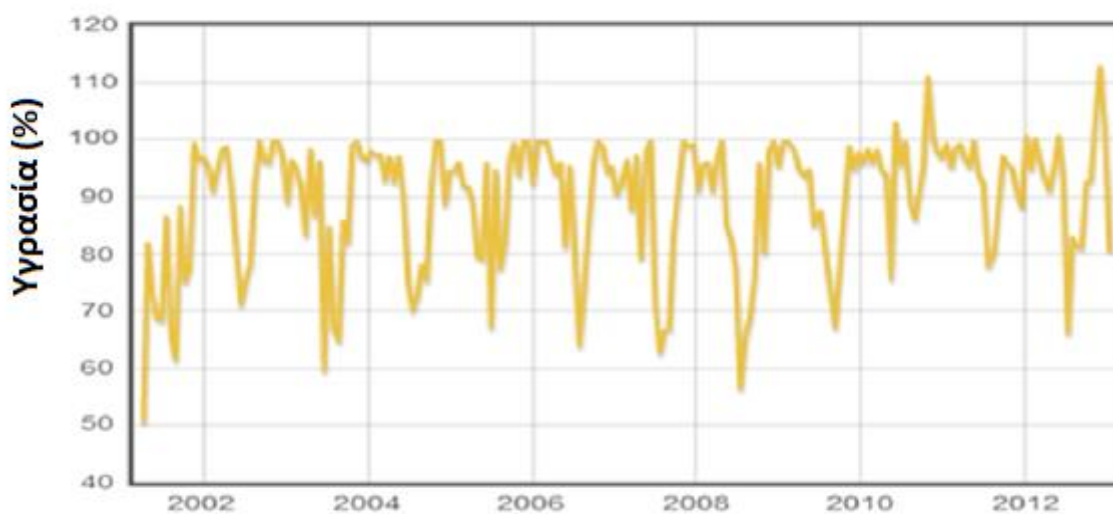


Σχήμα 7.12 Φωτογραφία από την εγκατάσταση στην οροφή του κτιρίου εργαστηρίου ΣΗΕ.

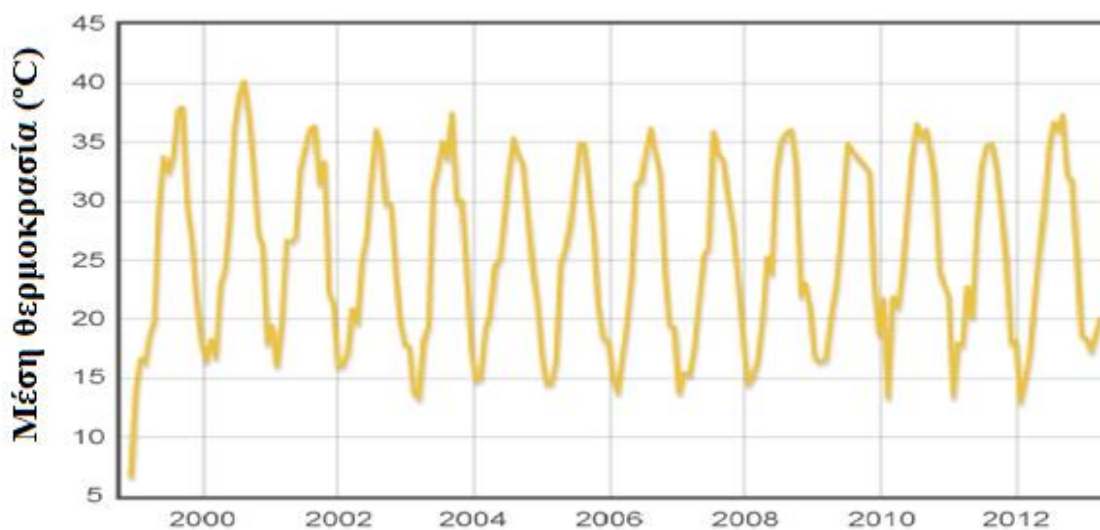
Εξαιτίας του γεγονότος ότι τα πλαίσια εγκαταστάθηκαν σε στέγη επιστρωμένη με χαλίκι δεν υπήρχε έντονη ρύπανση κατά την διάρκεια του πειράματος. Πιθανοί εποχιακοί παράγοντες που ίσως επηρέασαν τις μετρήσεις ήταν κυρίως η σκόνη που μεταφέρονταν από τον αέρα και οι ακαθαρσίες των πουλιών. Οι παράγοντες αυτοί βέβαια αξίζει να ληφθούν υπ' όψιν μόνο για τους καλοκαιρινούς μήνες καθώς τους χειμερινούς μήνες τα πλαίσια καθαρίζονταν από μόνα τους με τη βροχή. Παρόλα αυτά, ακολουθήθηκε ένα μηνιαίο πρόγραμμα καθαρισμού τόσο των πλαισίων, όσο και των οργάνων για να προκύψουν όσο το δυνατόν ακριβέστερες μετρήσεις.

7.3.5 ΚΛΙΜΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

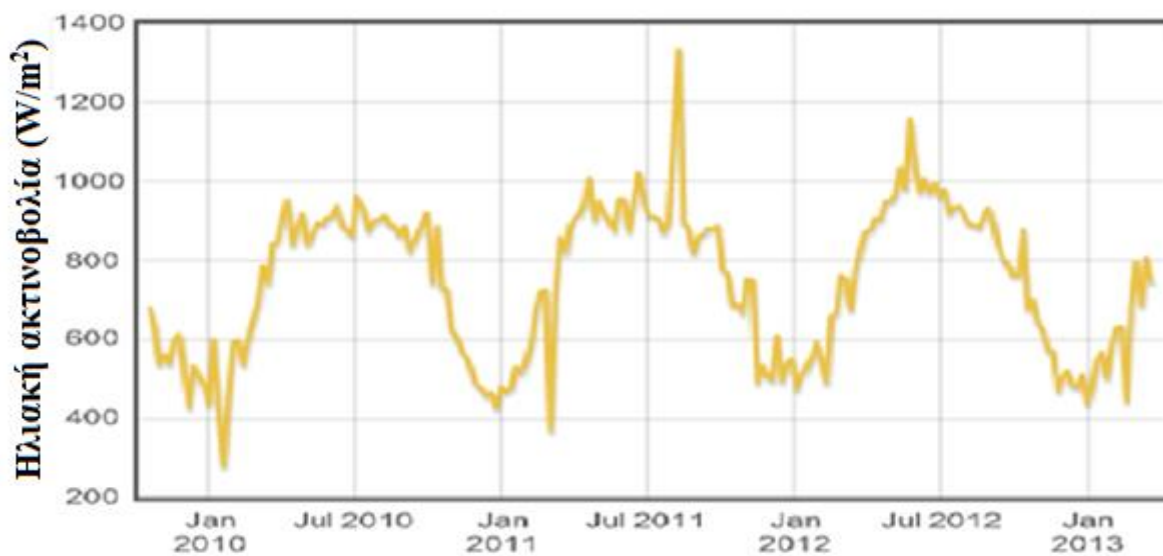
Το κλίμα της Αθήνας είναι σχετικά ξηρό και έχει ως αποτέλεσμα χαμηλά ποσοστά υγρασίας το καλοκαίρι, ενώ το χειμώνα συνηθίζονται οι βροχές. Τα ακόλουθα μετεωρολογικά δεδομένα αφορούν τις εγκαταστάσεις του ΕΜΠ όπου έγινε και η εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού πλαισίου και προέκυψαν από τον μετεωρολογικό σταθμό NTUA University Campus of Zografou.



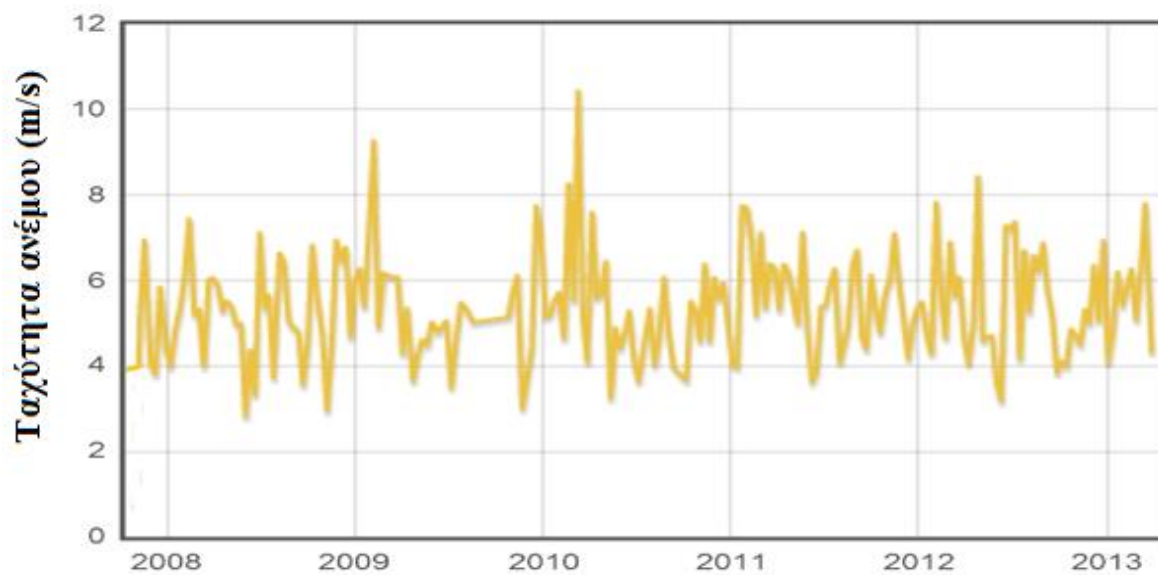
Διάγραμμα 7.1 Ετήσιο ποσοστιαίο διάγραμμα υγρασίας για το ΕΜΠ.



Διάγραμμα 7.2 Ετήσιο διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας για το ΕΜΠ.

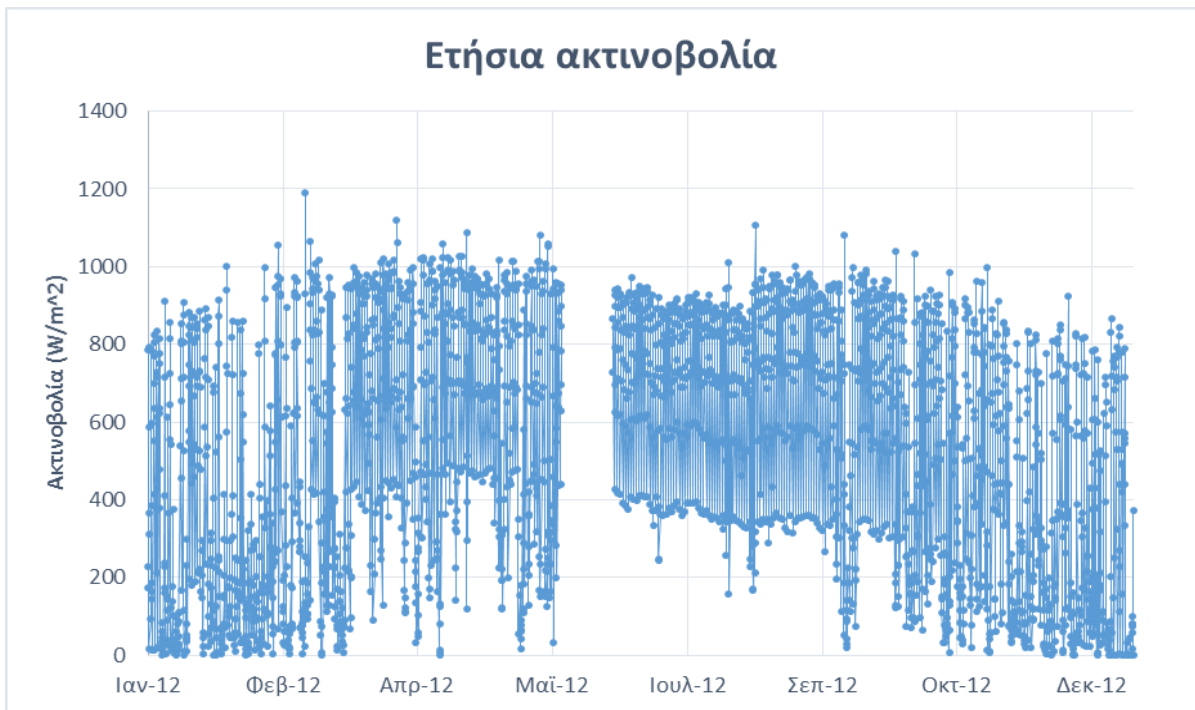


Διάγραμμα 7.3 Ετήσιο διάγραμμα ηλιακής ακτινοβολίας για το ΕΜΠ.

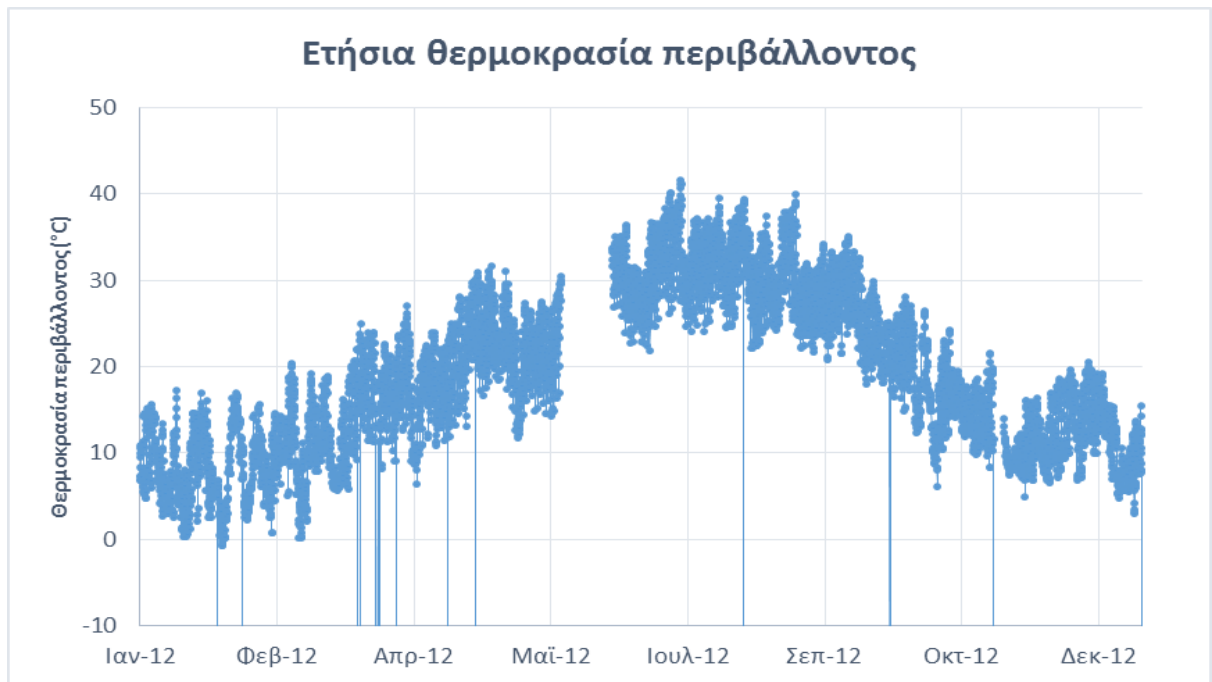


Διάγραμμα 7.4 Ετήσιο διάγραμμα ταχύτητας ανέμου για το ΕΜΠ.

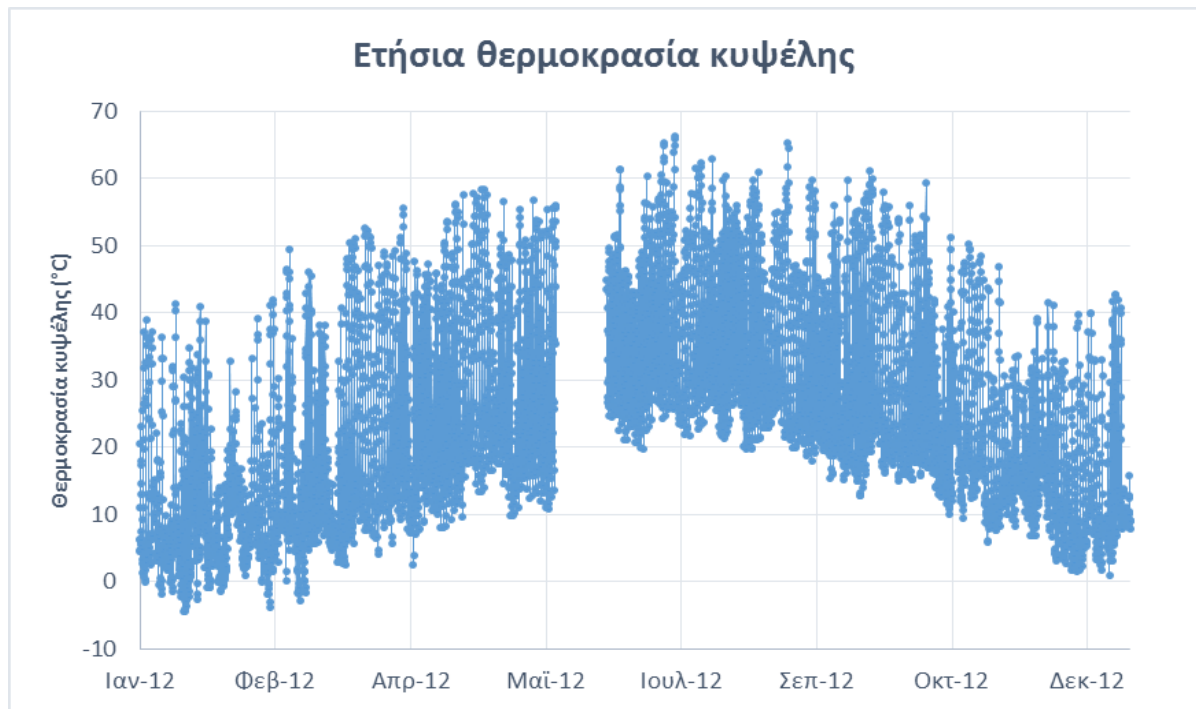
Ενώ παρακάτω παρατίθενται και τα ετήσια διαγράμματα θερμοκρασίας και ακτινοβολίας όπως αυτά προέκυψαν από τις μετρήσεις κατά την εκτέλεση του πειράματος.



Διάγραμμα 7.5 Ετήσιο διάγραμμα ακτινοβολίας για το 2012, με μετρήσεις ανά ώρα στο χρονικό διάστημα 9:00-16:00, όπως προέκυψαν από το πυρανόμετρο CMP11.



Διάγραμμα 7.6 Ετήσιο διάγραμμα θερμοκρασίας περιβάλλοντος για το 2012, με μετρήσεις ανά ώρα στο χρονικό διάστημα 9:00-16:00.

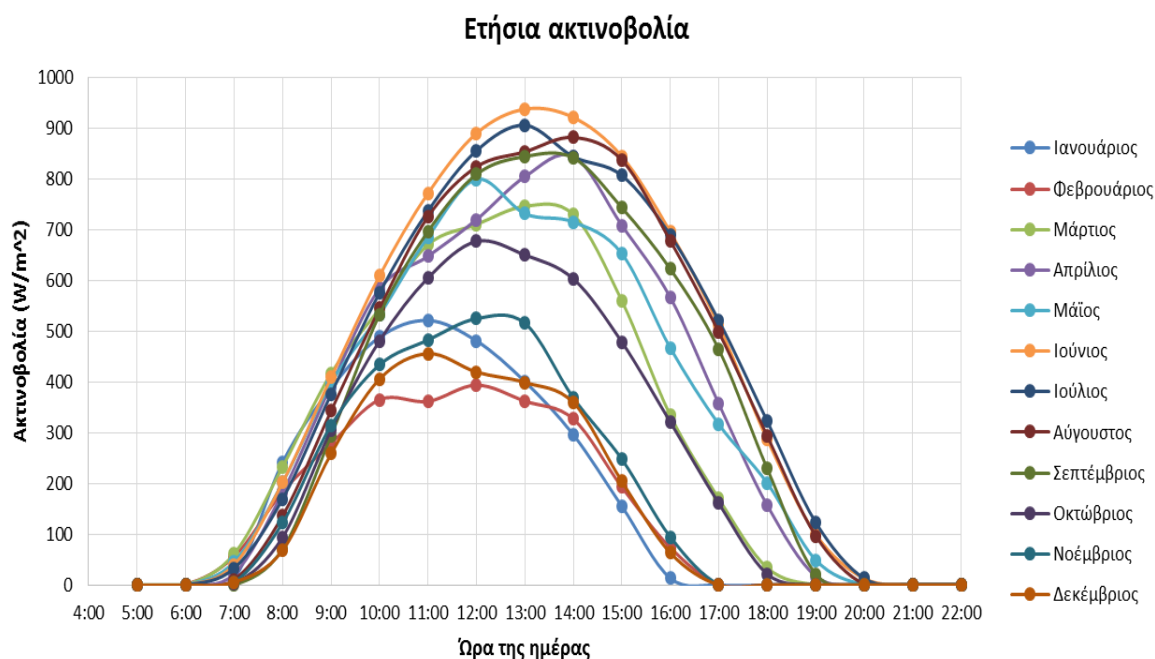


Διάγραμμα 7.7 Ετήσιο διάγραμμα θερμοκρασίας κεντρικής κυψέλης για το 2012, με μετρήσεις ανά ώρα στο χρονικό διάστημα 9:00-16:00.

Από το **διάγραμμα 7.5** γίνεται φανερή η αστάθεια που παρουσιάζουν οι μετρήσεις του πυρανομέτρου, οι οποίες μεταβάλλονται απότομα και γρήγορα. Οι απότομες αλλαγές στις καταγραφές του πυρανομέτρου οφείλονται κυρίως στις πρωινές ώρες, καθώς επηρεάζονται άμεσα από την απότομη μεταβολή του καιρού και τις συννεφίες. Αυτό θα φανεί πιο έντονα σε παρακάτω διαγράμματα όπου και θα εξηγηθεί εκτενέστερα το παραπάνω φαινόμενο. Αξίζει επίσης να αναφερθεί σε αυτό το σημείο, ότι από τις 03 έως τις 22 Ιουνίου υπήρξε διακοπή της λειτουργίας των μετρητικών οργάνων θερμοκρασίας και ακτινοβολίας, χωρίς όμως αυτό να επηρέασε τις μετρήσεις της κάρτας ISET-mpp.

7.4 ΕΤΗΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΝΑ ΜΗΝΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

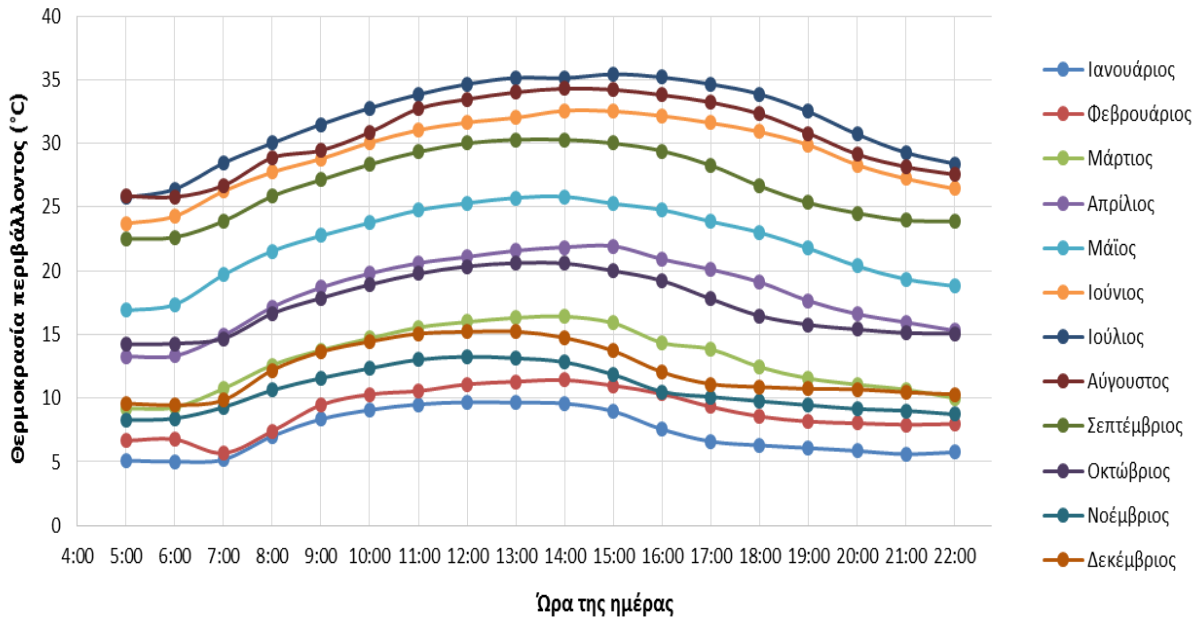
Εδώ παρατίθενται τα ετήσια δεδομένα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας ανοιγμένα ανά μήνα λειτουργίας του πλαισίου, όπως αυτά προέκυψαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.



Διάγραμμα 7.8 Ετήσιο διάγραμμα ακτινοβολίας ανά ώρα της ημέρας και μήνα.

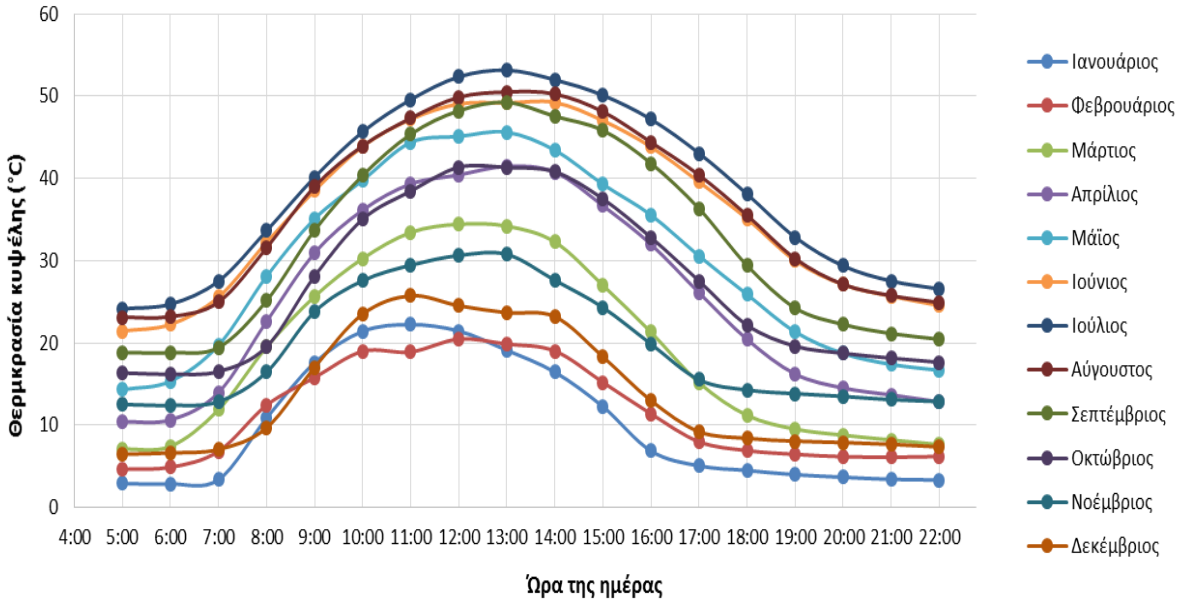
Το διάγραμμα της ακτινοβολίας παρουσίασε κανονική κατανομή κατά τη διάρκεια της ημέρας, με τα μεγαλύτερα ποσά ακτινοβολίας να προσφέρονται στο χρονικό διάστημα 10:00-15:00. Παρατηρείται επίσης τι οι καμπύλες των μηνών Νοεμβρίου-Φεβρουαρίου είναι ελαφρώς μετατοπισμένες προς τα αριστερά λόγω της μικρότερης διάρκειας της ημέρας κατά τους χειμερινούς μήνες. Τέλος, η καμπύλη του Φεβρουαρίου παρουσιάζει μια μικρή κάμψη κατά τις 11:00 το πρωί, η οποία οφείλεται στην έντονη συννεφιά που επικρατούσε εκείνες τις ώρες καθ'όλη τη διάρκεια του Φεβρουαρίου, με αποτέλεσμα το πυρανόμετρο να μην δίνει ακριβείς μετρήσεις.

Ετήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος



Διάγραμμα 7.9 Ετήσιο διάγραμμα θερμοκρασίας περιβάλλοντος ανά ώρα της ημέρας και μήνα.

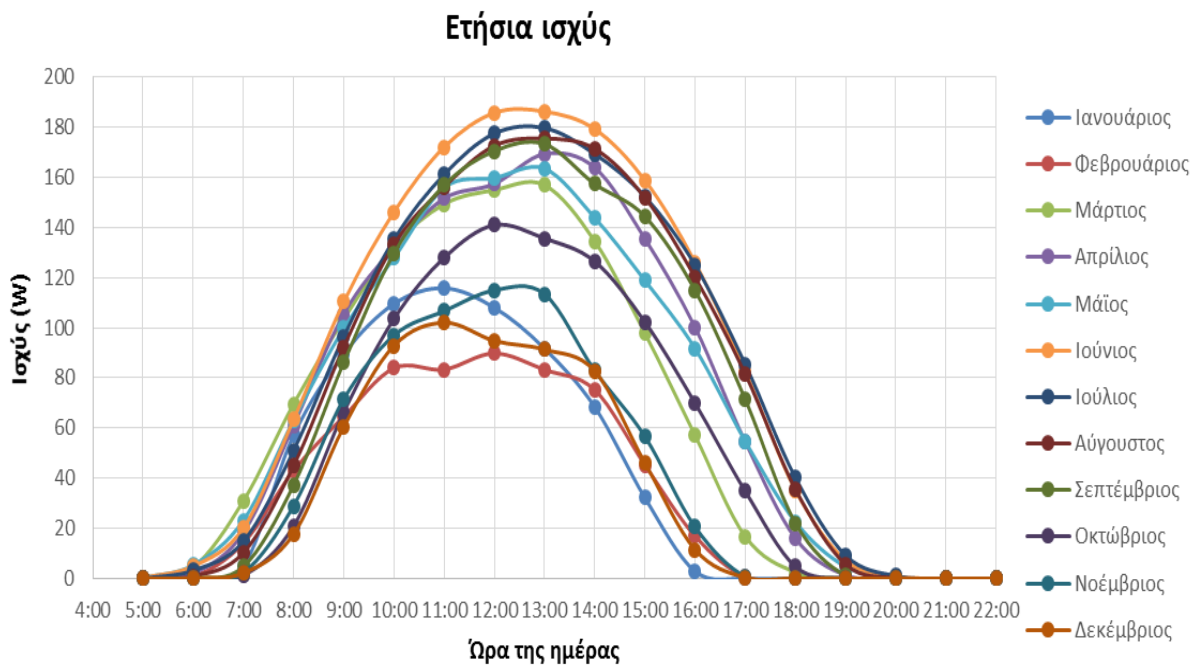
Ετήσια θερμοκρασία κυψέλης



Διάγραμμα 7.10 Ετήσιο διάγραμμα θερμοκρασίας κυψέλης ανά ώρα της ημέρας και μήνα.

Από τη σύγκριση των **διαγραμμάτων 7.8, 7.9 και 7.10** παρατηρείται ότι η μορφή του διαγράμματος της θερμοκρασίας κυψέλης δεν ακολουθεί τόσο τη μορφή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ενώ προσεγγίζει αρκετά αυτή της ακτινοβολίας. Έτσι, η θερμοκρασία κυψέλης κρατάει μια σχεδόν σταθερή τιμή για τις πρώτες πρωινές ώρες, φτάνει στο μέγιστό της το μεσημέρι και επιστρέφει κοντά στην αρχική της τιμή το απόγευμα, σε αντίθεση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος που διατηρεί μια πιο σταθερή μορφή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Φαίνεται επίσης ότι όταν υπάρχει πτώση της ακτινοβολίας λόγω έντονης συννεφιάς όπως π.χ τον Φεβρουάριο στις 11:00 επηρεάζεται και η θερμοκρασία η οποία μειώνεται αντίστοιχα. Τέλος, είναι φανερό και η διαφορά θερμοκρασίας που επικρατεί ανάμεσα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και κυψέλης η οποία είναι εντονότερη κυρίως το μεσημέρι και ανέρχεται στους 15°C -20°C κατά μέσο όρο.

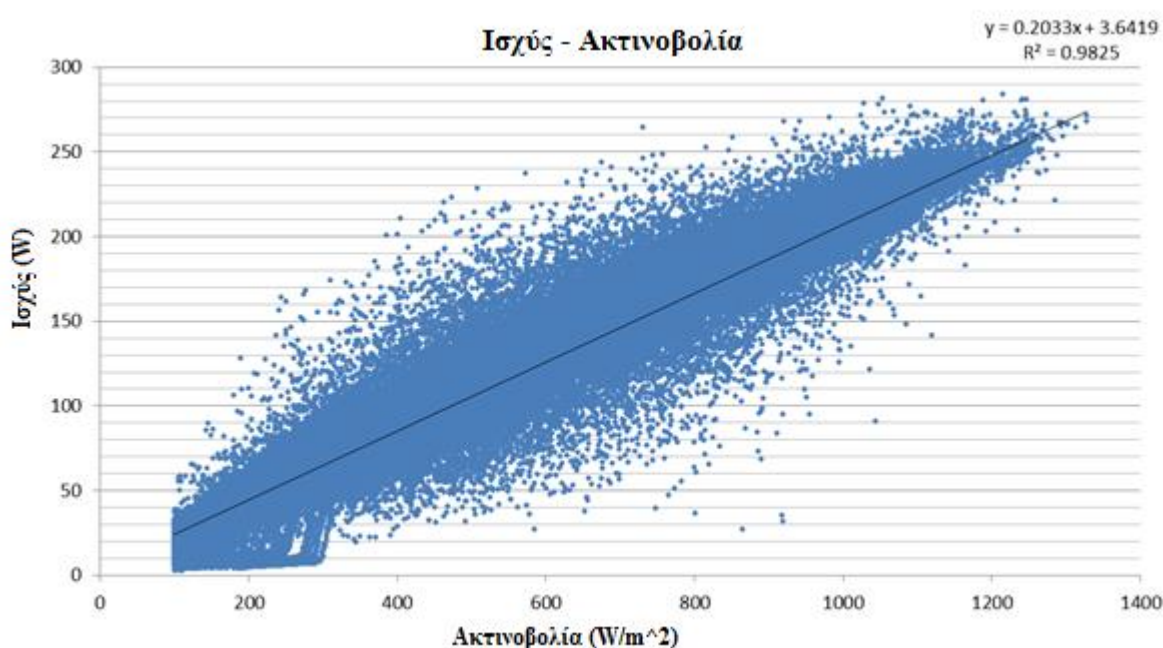
Τέλος παρατίθεται και το διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος ανά ώρα της ημέρας και μήνα το οποίο ακολουθεί σε μεγάλο βαθμό τη μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας, όπως άλλωστε αναμενόταν.



Διάγραμμα 7.11 Ετήσιο διάγραμμα παραγόμενης ισχύος ανά ώρα της ημέρας και μήνα.

7.5 ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΙΣΧΥΟΣ-ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Εδώ παρουσιάζονται τα συνολικά διαγράμματα ισχύος ,απόδοσης καθώς και της απόδοσης ανοιγμένης σε συνθήκες STC συναρτήσε της ακτινοβολίας, για όλο το έτος με όλες τις μετρήσεις ανά 10 δευτερόλεπτα όπως προέκυψαν από τη βάση δεδομένων SOL.Connect PV Analyzer. Όπως θα φανεί και παρακάτω τα διαγράμματα έχουν περιοριστεί σε ακτινοβολίες $\geq 100 \text{ W/m}^2$ καθώς σε μικρότερες ακτινοβολίες από αυτή, προέκυπταν εσφαλμένα πολύ υψηλές αποδόσεις με αποτέλεσμα τα διαγράμματα να είναι ανακριβή.

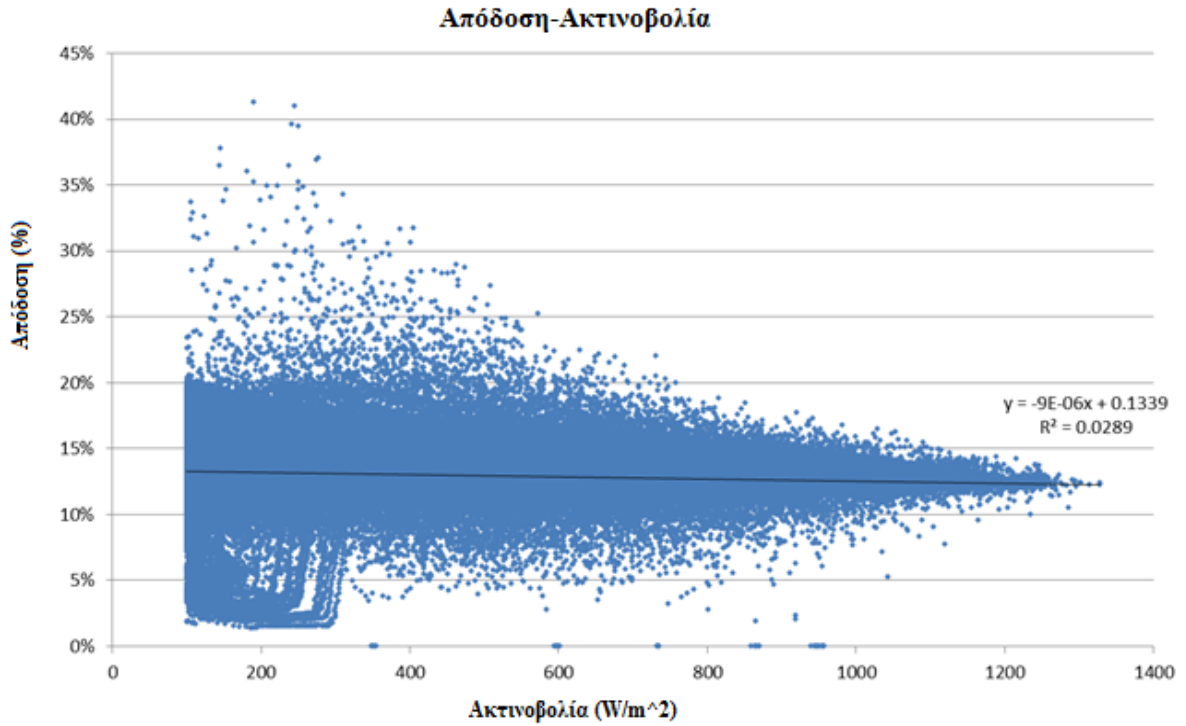


Διάγραμμα 7.12 Συνολικό ετήσιο διάγραμμα ισχύος-ακτινοβολίας, για ακτινοβολίες $\geq 100 \text{ W/m}^2$.

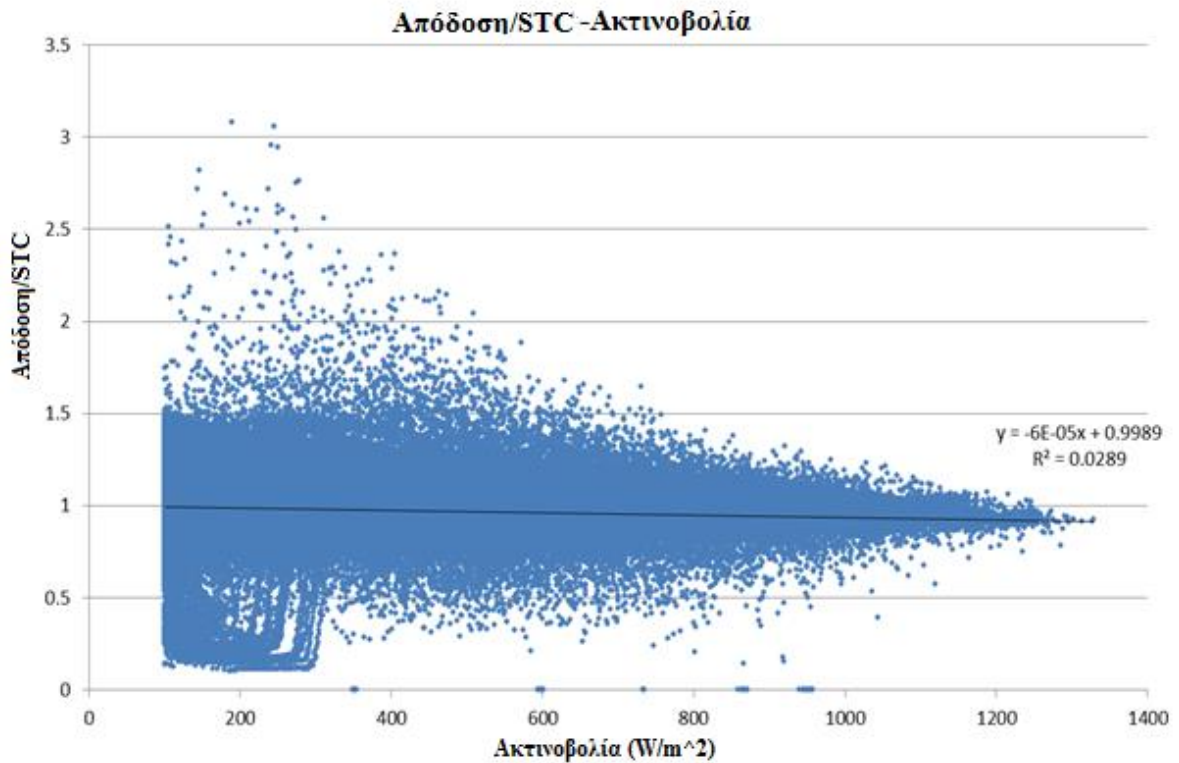
Από τα διαγράμματα 7.12 και 7.13 προκύπτουν οι εξισώσεις: $P=0.2033 \cdot G+3.6419$ και $\eta= -9 \cdot 10^{-6} \cdot G +0.1339$, όπου G η ακτινοβολία, P η ισχύς και η η απόδοση του πλαισίου. Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να δώσουν μια πρώτη εικόνα της απόδοσης καθώς και της παραγόμενης ισχύος του πλαισίου σε διάφορες συνθήκες ακτινοβολίας, χωρίς να λαμβάνεται βεβαίως υπ'όψιν η θερμοκρασία του πλαισίου εκείνη την στιγμή. Στον πίνακα 7.1 παρουσιάζονται κάποιες τιμές απόδοσης και ισχύος για διάφορες ακτινοβολίες.

| Ακτινοβολία [W/m ²] | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 |
|---------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Ισχύς [W] | 44.30 | 84.96 | 125.62 | 166.28 | 206.94 | 247.60 |
| Απόδοση [%] | 13.21 | 13.03 | 12.85 | 12.67 | 12.49 | 12.31 |

Πίνακας 7.1 Μέσος όρος ισχύος και απόδοσης πλαισίου SE220 για διάφορες τιμές ακτινοβολίας.



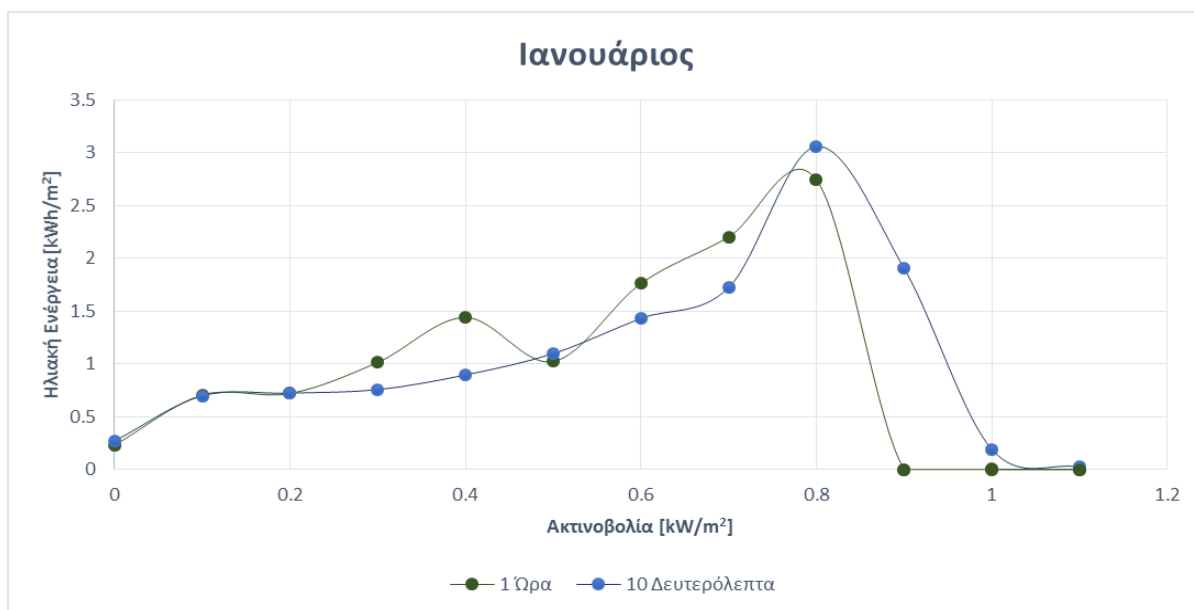
Διάγραμμα 7.13 Συνολικό ετήσιο διάγραμμα απόδοσης-ακτινοβολίας, για ακτινοβολίες $\geq 100 \text{ W/m}^2$.



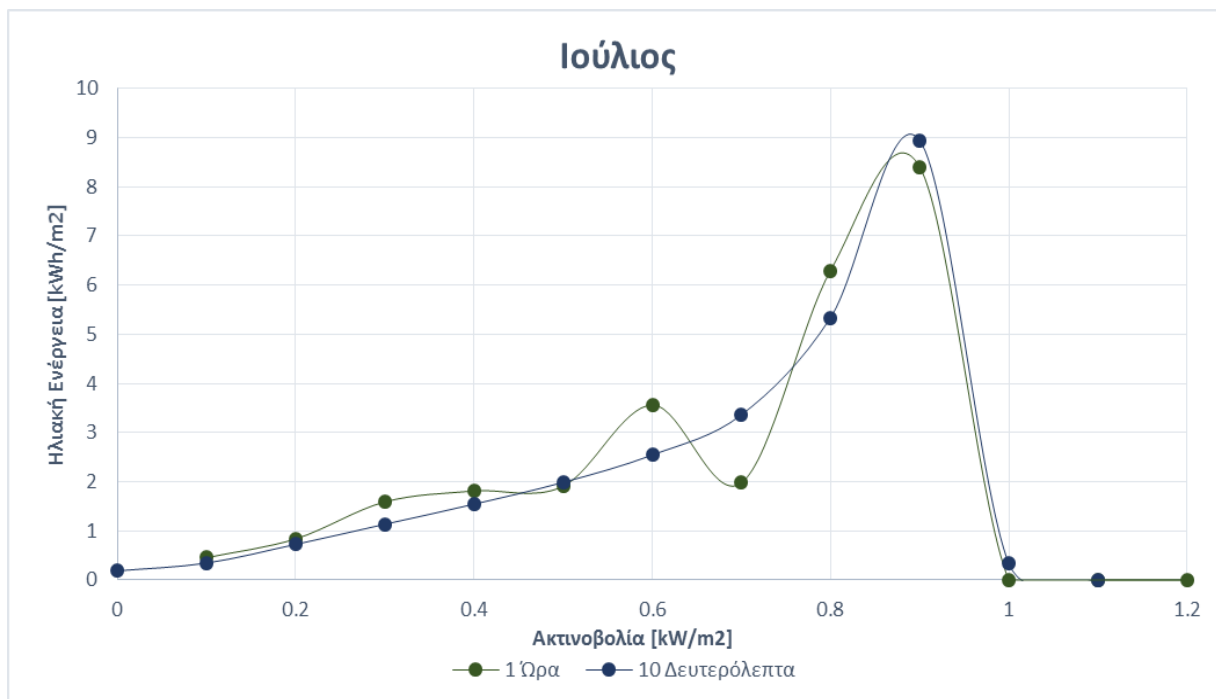
Διάγραμμα 7.14 Συνολικό ετήσιο διάγραμμα απόδοσης/STC-ακτινοβολίας, για ακτινοβολίες $\geq 100 \text{ W/m}^2$.

7.6 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΣΕ ΧΑΜΗΛΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Αρχικά επιλέχθηκαν ένας χειμερινός και ένας καλοκαιρινός μήνας (Ιανουάριος, Ιούνιος) και συγκρίθηκε η ηλιακή ενέργεια σε συνάρτηση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία στο πλαίσιο, για μετρήσεις ανά ώρα και ανά δέκα δευτερόλεπτα αντίστοιχα.

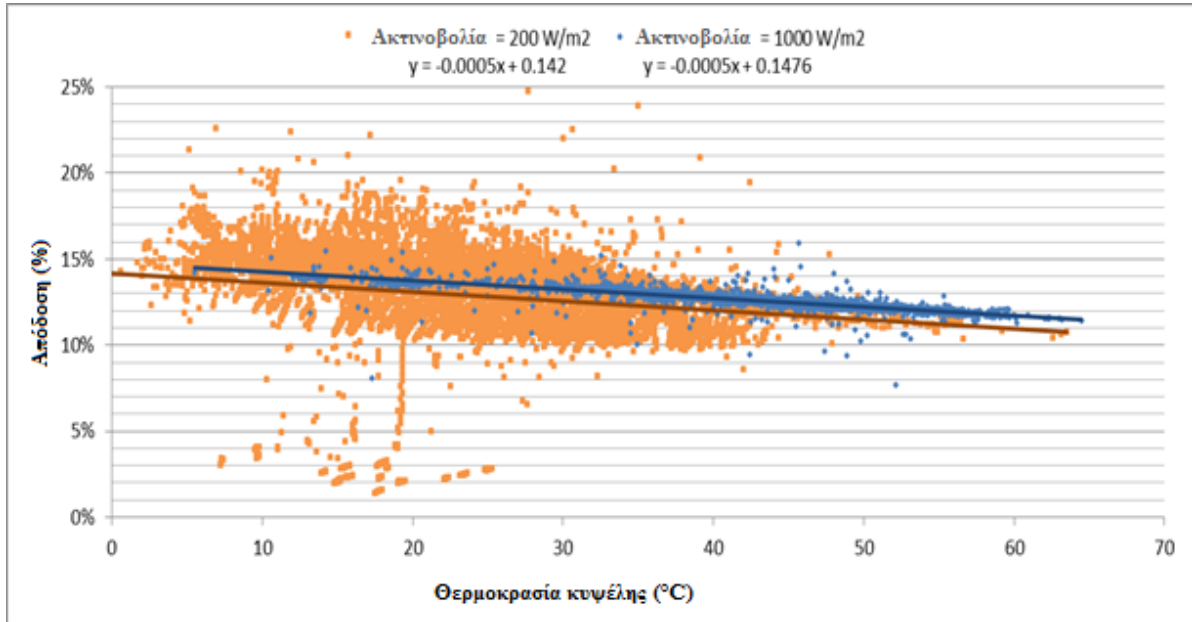


Διάγραμμα 7.15 Διάγραμμα ακτινοβολίας-ηλιακής ενέργειας για τον μήνα Ιανουάριο με μετρήσεις ανά δέκα δευτερόλεπτα και ανά μία ώρα.



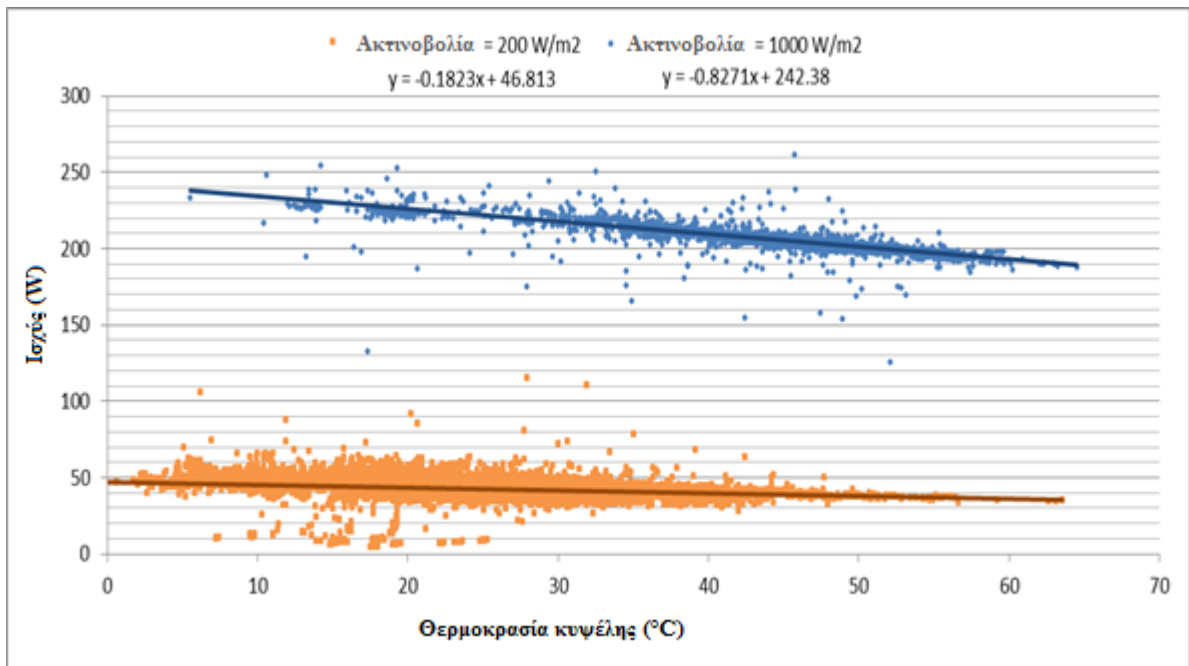
Διάγραμμα 7.16 Διάγραμμα ακτινοβολίας-ηλιακής ενέργειας για τον μήνα Ιανουάριο με μετρήσεις ανά δέκα δευτερόλεπτα και ανά μία ώρα.

Από τα **διαγράμματα 7.15** και **7.16** γίνεται φανερό ότι χρησιμοποιώντας ωριαίες μετρήσεις ακτινοβολίας το φωτοβολταϊκό πλαίσιο πρόκειται να δώσει καλύτερη συμπεριφορά σε χαμηλό φως, χωρίς όμως αυτό να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Έτσι παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα για συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας [$200\text{W}/\text{m}^2$] σε σύγκριση με ακτινοβολία σε συνθήκες STC [$1000\text{W}/\text{m}^2$] για μετρήσεις ανά 10 δευτερόλεπτα.

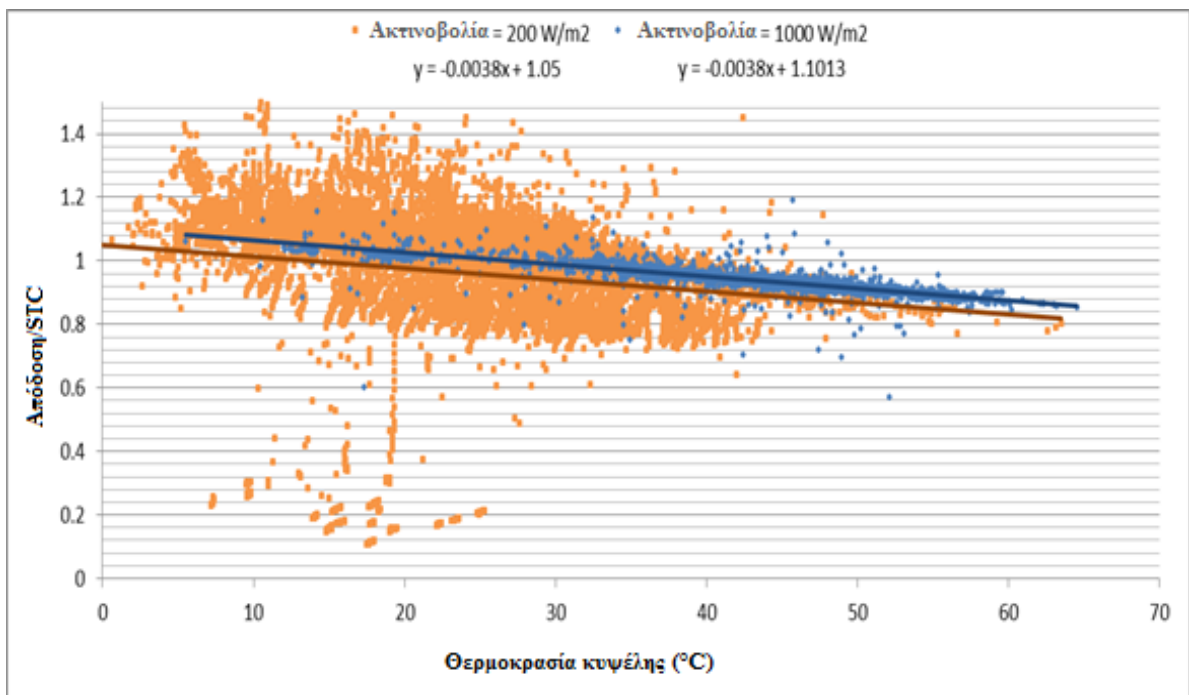


Διάγραμμα 7.17 Συγκριτικό διάγραμμα απόδοσης-θερμοκρασίας για ακτινοβολίες $200\text{ W}/\text{m}^2$ και $1000\text{W}/\text{m}^2$.

Από το **διάγραμμα 7.17** για θερμοκρασία κυψέλης 25°C και ακτινοβολία $1000\text{ W}/\text{m}^2$ (συνθήκες STC) προκύπτει απόδοση $\eta=13.43\%$, απόκλιση 0.03% από την ονομαστική τιμή 13.4% που δίνει ο κατασκευαστής. Παίρνοντας τώρα τη διαφορά των δύο τάσεων (trendlines) προκύπτει ότι η μέση απόδοση του πλαισίου σε ακτινοβολία $1000\text{ W}/\text{m}^2$ είναι κατά 0.56% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μέση απόδοση σε ακτινοβολία $200\text{ W}/\text{m}^2$. Επομένως η απόδοση του πλαισίου αυξάνεται με την αύξηση της ακτινοβολίας, όπως άλλωστε αναμένονταν. Ενώ από το **διάγραμμα 7.18** για θερμοκρασία πλαισίου 25°C προκύπτει $P_{\text{STC}}=221.7025\text{W}$.



Διάγραμμα 7.18 Συγκριτικό διάγραμμα ισχύος-θερμοκρασίας για ακτινοβολίες 200 W/m² και 1000W/m².

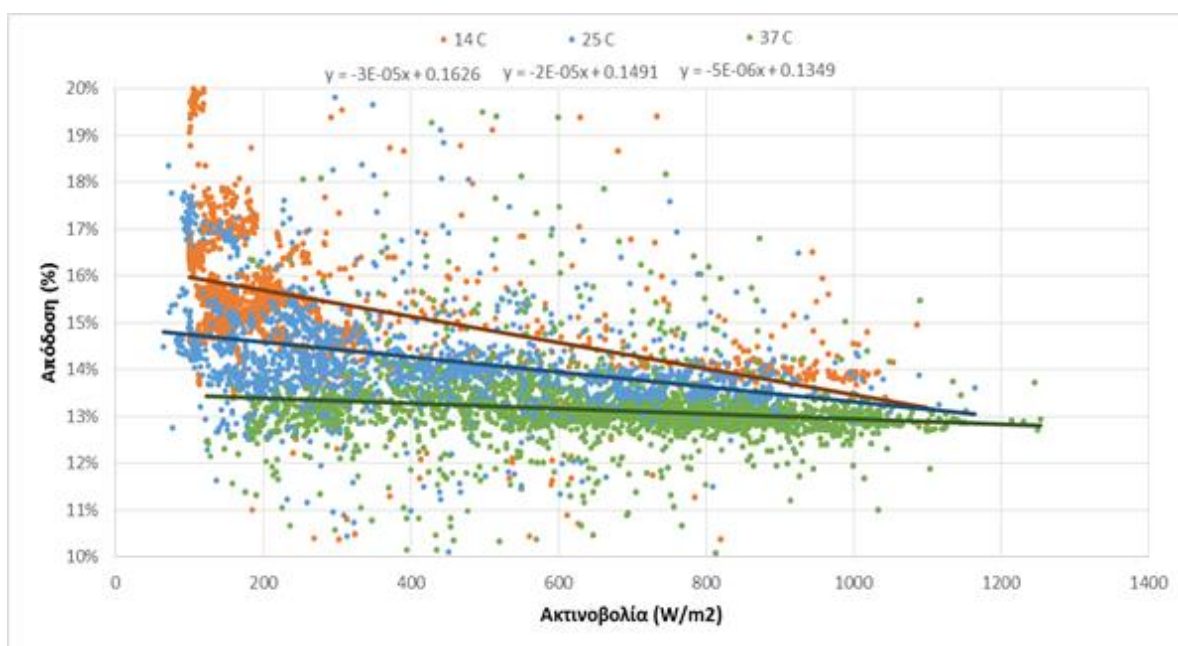


Διάγραμμα 7.19 Συγκριτικό διάγραμμα απόδοσης/STC-θερμοκρασίας για ακτινοβολίες 200 W/m² και 1000W/m².

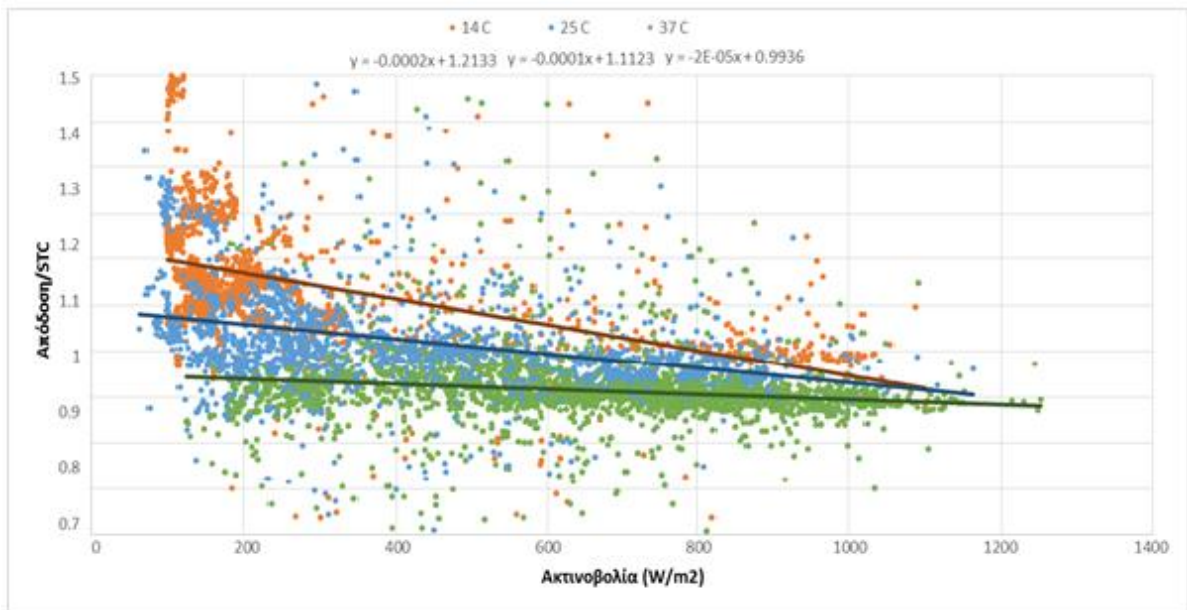
Γενικότερα λοιπόν παρατηρείται πτώση της απόδοσης και της ισχύος με την αύξηση της θερμοκρασίας και σταθερή ακτινοβολία.

7.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

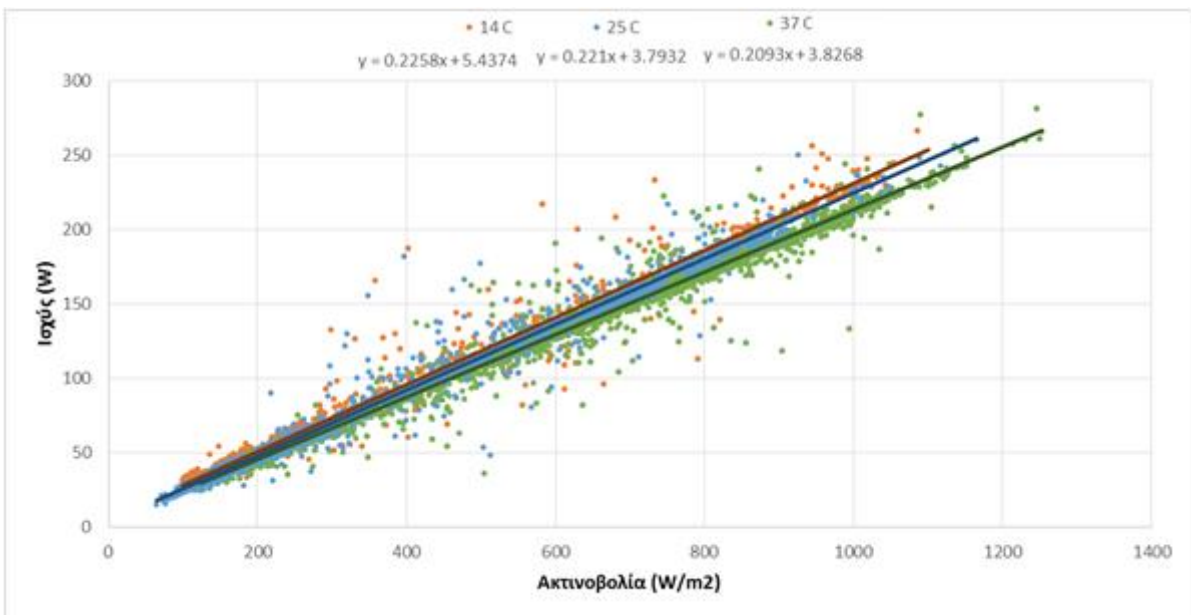
Για να διαπιστωθεί η επιρροή που ασκεί η θερμοκρασία κυψέλης στην συμπεριφορά του πλαισίου επιλέχθηκαν οι μέσες τιμές θερμοκρασίας κυψέλης για χειμερινούς (Σεπτέμβρης-Φεβρουάριος) και καλοκαιρινούς μήνες (Μάρτιος-Αύγουστος) αντίστοιχα. Η μέση τιμή θερμοκρασίας κυψέλης για τους χειμερινούς μήνες προέκυψε 14°C ενώ για τους καλοκαιρινούς 37°C. Στο παρακάτω διάγραμμα λοιπόν γίνεται σύγκριση της απόδοσης του πλαισίου συναρτήσει της ακτινοβολίας για αυτές τις θερμοκρασίες αλλά και για θερμοκρασία κυψέλης σε συνθήκες STC 25°C. Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται έχουν περιοριστεί στο χρονικό διάστημα 10:00-13:00 κάθε ημέρας όπου και υπήρχαν πιο καθαρά αποτελέσματα



Διάγραμμα 7.20 Συγκριτικό διάγραμμα απόδοσης-ακτινοβολίας για θερμοκρασίες κυψέλης 14°C, 25°C και 37°C.



Διάγραμμα 7.21 Συγκριτικό διάγραμμα απόδοσης/STC-ακτινοβολίας για θερμοκρασίες κυψέλης 14°C, 25°C και 37°C .

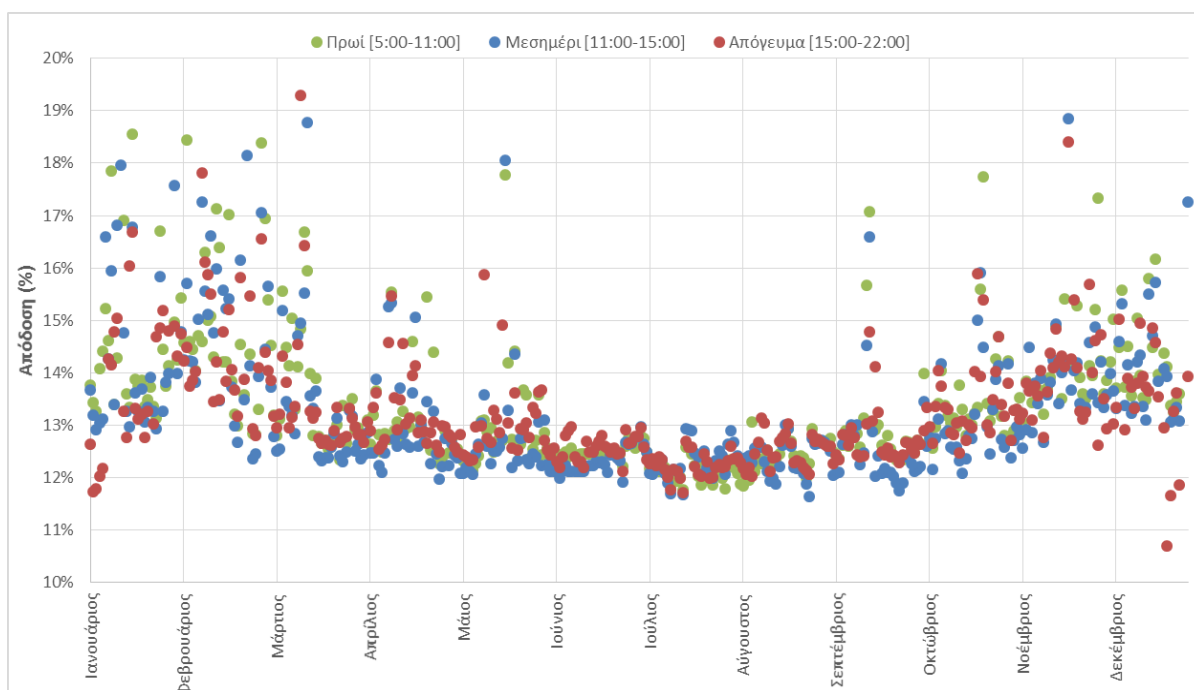


Διάγραμμα 7.22 Συγκριτικό διάγραμμα ισχύος-ακτινοβολίας για θερμοκρασίες κυψέλης 14°C, 25°C και 37°C..

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερή η σημασία της θερμοκρασίας κυψέλης στο βαθμό απόδοσης του πλαισίου. Σε χαμηλές κυρίως ακτινοβολίες η θερμοκρασία κυψέλης έχει καθοριστικό ρόλο, καθώς με την αύξησή της, μειώνεται αισθητά η απόδοση του πλαισίου. Έτσι, για ακτινοβολία 100 W/m^2 και θερμοκρασία κυψέλης 14°C , ο βαθμός απόδοσης φτάνει το 15.96%, ενώ για ίδια ακτινοβολία και θερμοκρασία κυψέλης 37°C πέφτει στο 13.44%. Παρατηρείται, επίσης, ότι με την αύξηση της ακτινοβολίας η εξάρτηση αυτή όλο και ελαττώνεται, καθώς σε μεγάλες ακτινοβολίες η απόδοση τείνει να γίνεται ίδια για όλες τις θερμοκρασίες. Έτσι, παίρνοντας τώρα μια μεγάλη τιμή ακτινοβολίας 1000 W/m^2 προκύπτει απόδοση 13.26% και 12.99% για θερμοκρασία πλαισίου 14°C και 37°C αντίστοιχα. Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι κάποιες τιμές απόδοσης, κυρίως σε χαμηλές ακτινοβολίες και θερμοκρασίες, αποκλίνουν από τις υπόλοιπες. Αυτή η απόκλιση μπορεί να αποδοθεί στις ημέρες στις οποίες υπήρχε συννεφιά και το πυρανόμετρο έδινε εσφαλμένες τιμές ακτινοβολίας ενώ η μετρούμενη ισχύς ήταν η πραγματική. Επιπλέον, παρατηρείται ότι με την αύξηση της ακτινοβολίας και υπό σταθερή θερμοκρασία το πλαίσιο πρόκειται να δώσει μεγαλύτερες τιμές ισχύος αλλά μικρότερες τιμές αποδόσεως. Τέλος, παρατηρείται ότι για θερμοκρασία κυψέλης 14°C οι αντίστοιχες τιμές ακτινοβολίας έχουν μικρό εύρος και περιορίζονται κυρίως στο διάστημα 100W/m^2 - 300W/m^2 , όπως ήταν αναμενόμενο.

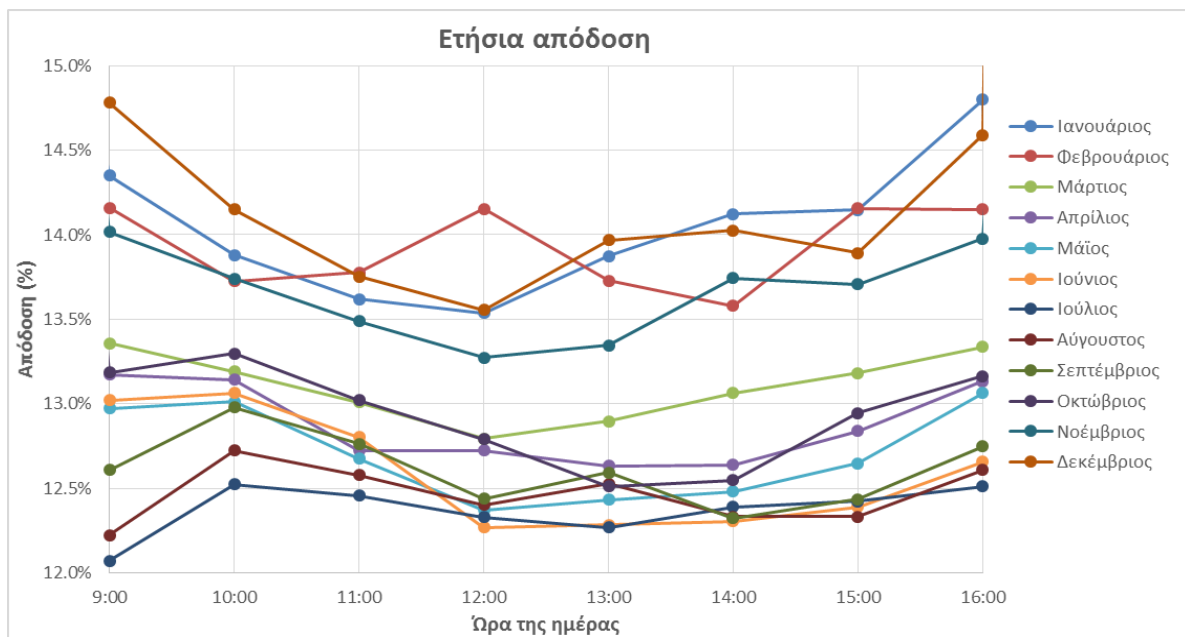
7.8 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΩΝ 30° ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Για να διαπιστωθεί η επίδραση της σταθερής κλίσης εγκατάστασης των 30° στην συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού πλαισίου, χρησιμοποιήθηκαν οι ετήσιες μετρήσεις ξεχωριστά για πρωί, μεσημέρι και απόγευμα. Με αυτό τον τρόπο το πυρανόμετρο λόγω του σφαιρικού γυάλινου περιβλήματος θα καταγράφει την ακτινοβολία χωρίς να επηρεάζεται από την κλίση, ενώ το φωτοβολταϊκό πλαίσιο θα λαμβάνει διαφορετική ακτινοβολία ανάλογα με τη θέση του ηλίου. Έτσι παρουσιάζεται αρχικά το **διάγραμμα 7.23**.



Διάγραμμα 7.23 Ημερήσιο διάγραμμα απόδοσης για πρωινές, μεσημεριανές και βραδινές ώρες για όλο το έτος.

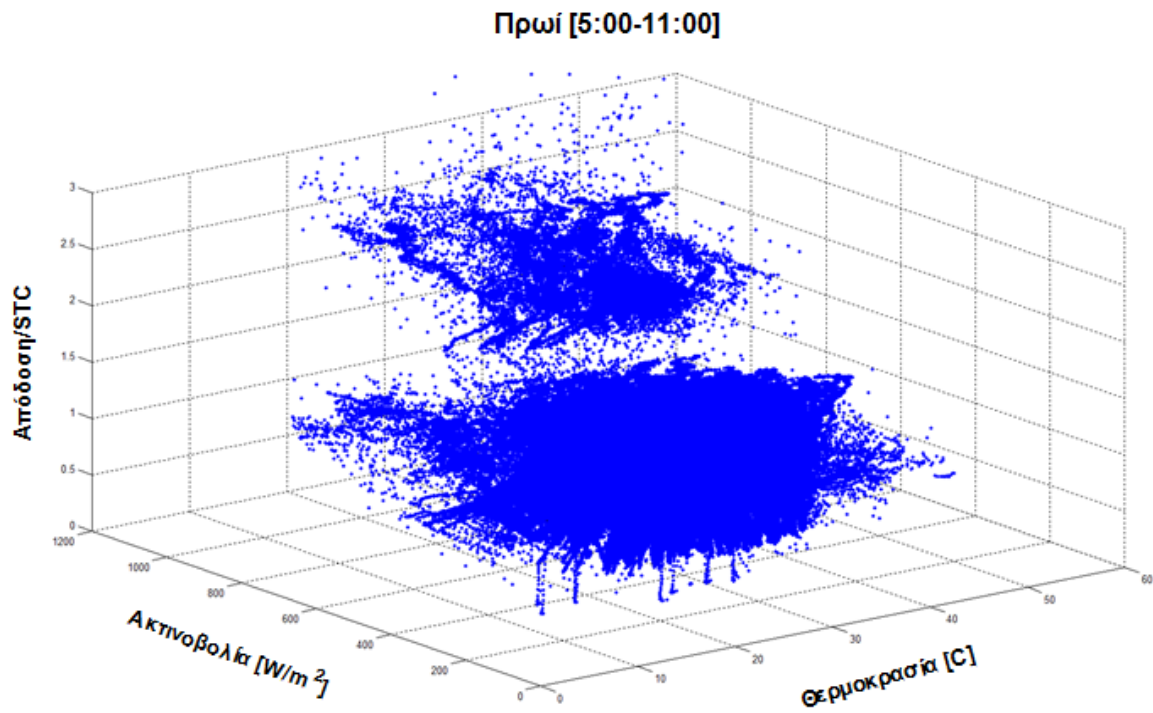
Παίρνοντας, τώρα, τον μέσο όρο της απόδοσης ανά ώρα από τις 09:00-16:00, ώστε να υπάρχουν ομαλότερα αποτελέσματα, προκύπτει το **διάγραμμα 7.24** όπου δίνει την απόδοση ανά μήνα και ώρα της ημέρας.



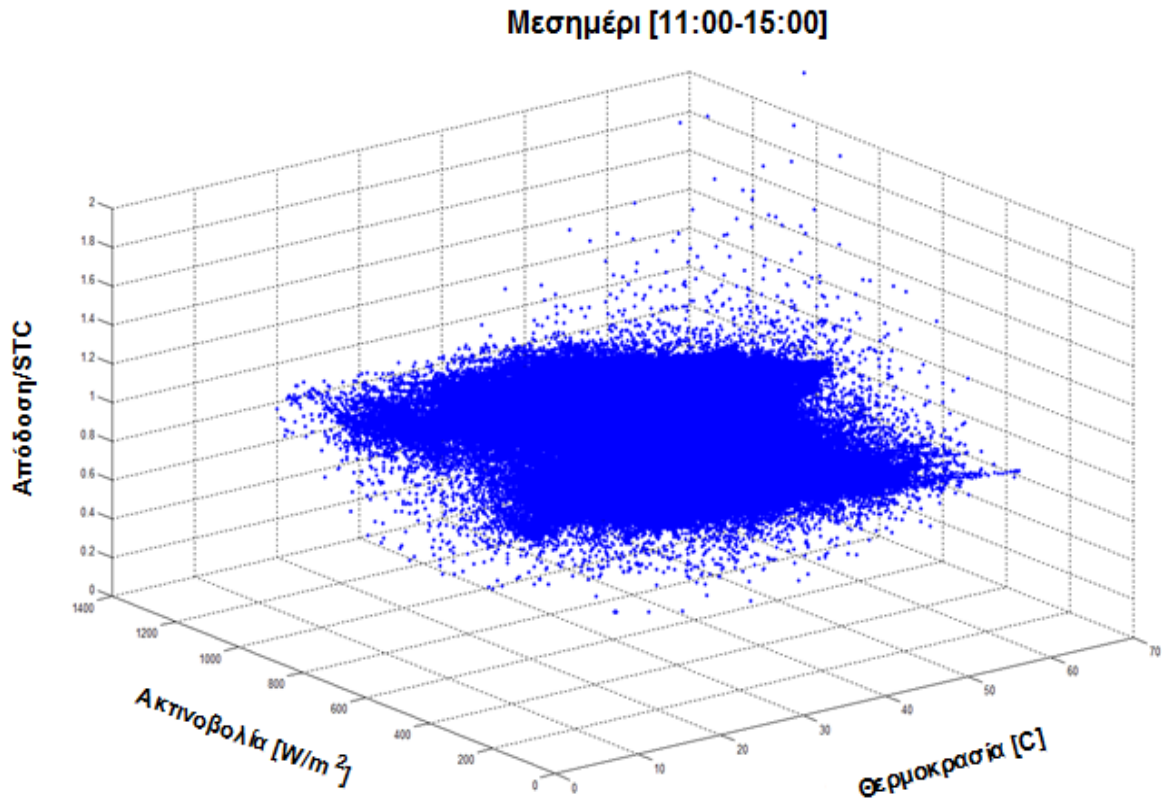
Διάγραμμα 7.24 Ετήσιο διάγραμμα απόδοσης ανά μήνα για το χρονικό διάστημα 9:00-16:00.

Από τα **διαγράμματα 7.23** και **7.24** γίνεται φανερό, πως η απόδοση του πλαισίου επηρεάζεται κυρίως από τη θερμοκρασία και όχι τόσο από την κλίση του. Έτσι τους ψυχρότερους μήνες παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες αποδόσεις ενώ τους θερινούς μήνες η απόδοση ήταν μειωμένη, όπως φαίνεται και από τη μορφή των διαγραμμάτων. Επιπλέον, από το **διάγραμμα 7.23** φαίνεται πως κατά τη διάρκεια της ημέρας επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απόδοση τις απογευματινές ώρες, και χαμηλότερη το μεσημέρι, πράγμα που αποδίδεται πάλι στην χαμηλή θερμοκρασία του απογεύματος και την αντίστοιχα υψηλή θερμοκρασία του μεσημεριού. Αξίζει όμως να σχολιαστούν κάποιες αποκλίσεις στην απόδοση που παρουσιάζονται ως επί το πλείστον τους χειμερινούς μήνες και οφείλονται στις έντονες συννεφιές που τους χαρακτηρίζουν και οδηγούν το πυρανόμετρο σε στιγμιαία εσφαλμένες μετρήσεις.

Τέλος παρουσιάζονται και τρισδιάστατα διαγράμματα απόδοσης ανοιγμένης σε STC συνθήκες, σε συνάρτηση με την ακτινοβολία και τη θερμοκρασία κυψέλης για το πρωί το μεσημέρι και το βράδυ αντίστοιχα.

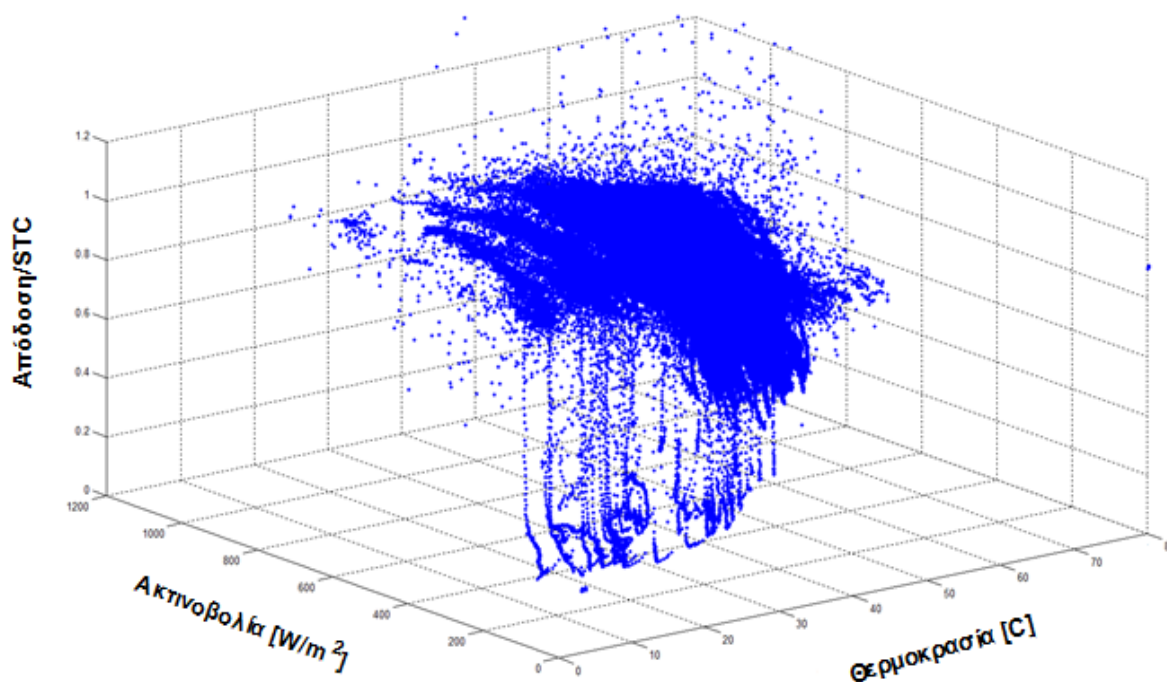


Διάγραμμα 7.25 Διάγραμμα απόδοσης για πρωινές ώρες [5:00-11:00] συναρτήσει της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας πλαισίου.



Διάγραμμα 7.26 Διάγραμμα απόδοσης για μεσημβρινές ώρες [11:00-15:00] συναρτήσει της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας πλαισίου.

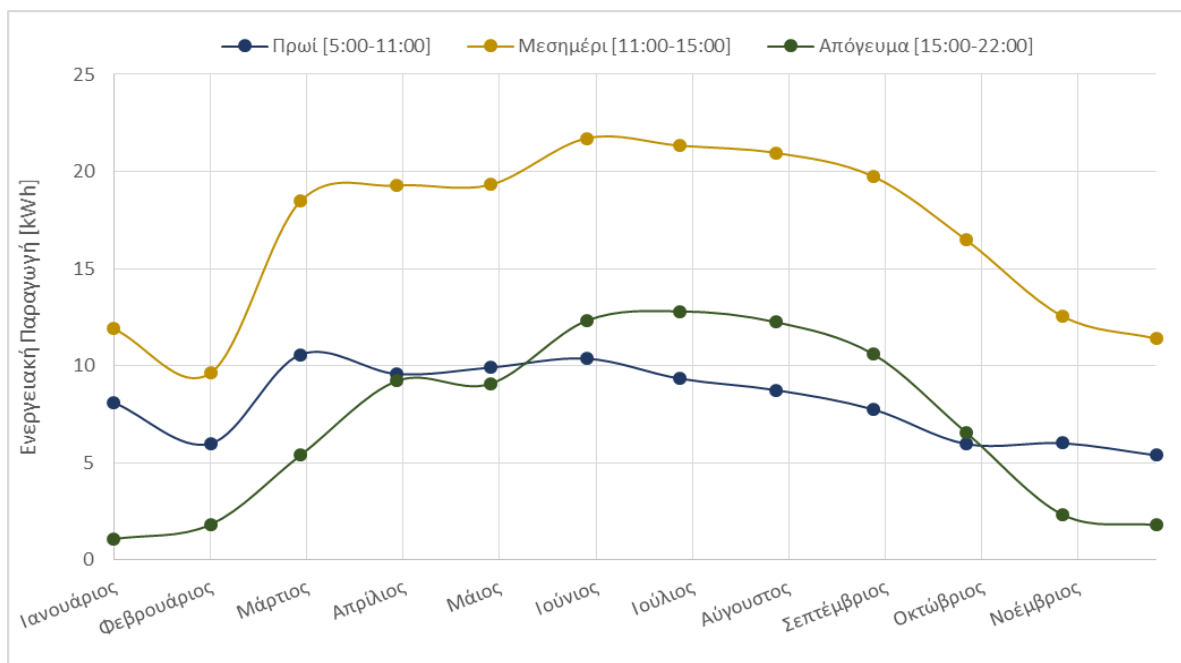
Απόγευμα [15:00-22:00]



Διάγραμμα 7.27 Διάγραμμα απόδοσης για απογευματινές ώρες [15:00-22:00] συναρτήσει της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας πλαισίου.

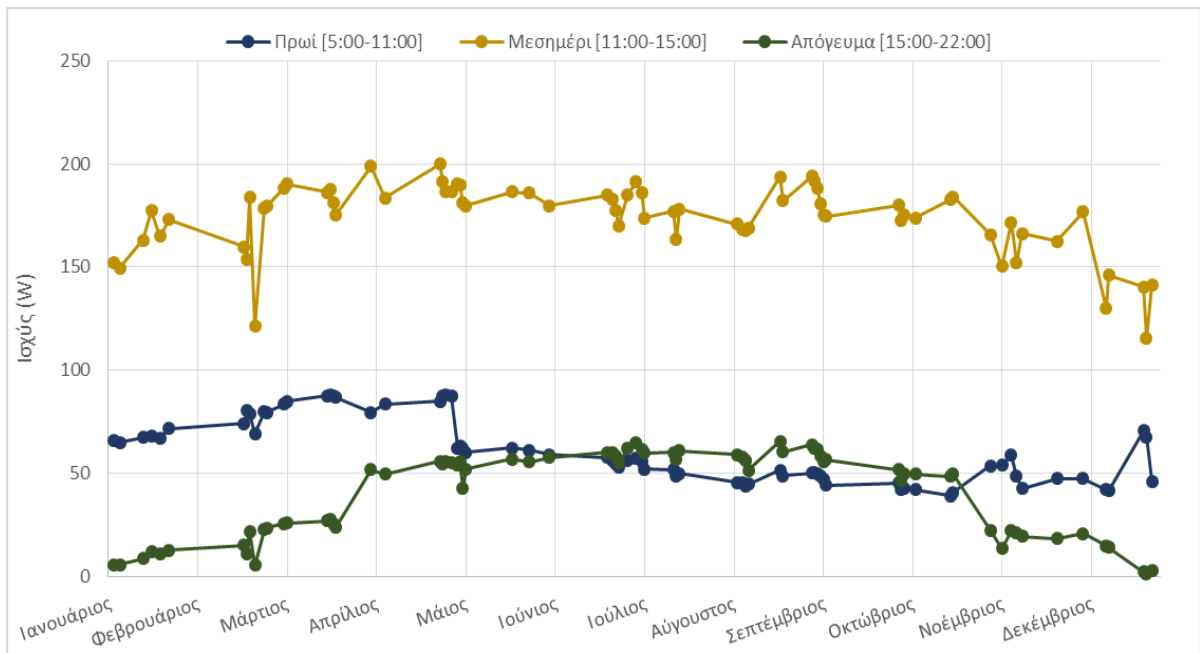
Στο **διάγραμμα 7.25** φαίνεται η εσφαλμένη καταγραφή της ακτινοβολίας που γίνονταν από το πυρανόμετρο τις πρωινές ώρες, με αποτέλεσμα να προκύπτουν παράλογες τιμές στην απόδοση. Ενώ από το **διάγραμμα 7.27** φαίνεται η πτώση της απόδοσης σε χαμηλές ακτινοβολίες και θερμοκρασίες, η οποίες αποδίδονται στις νυχτερινές κυρίως ώρες.

Για να μελετηθεί τώρα η επίδραση της κλίσης στην παραγωγή του πλαισίου και όχι στην απόδοσή του, δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα παραγόμενης ενέργειας ανά μήνα, για πρωί μεσημέρι και βράδυ.



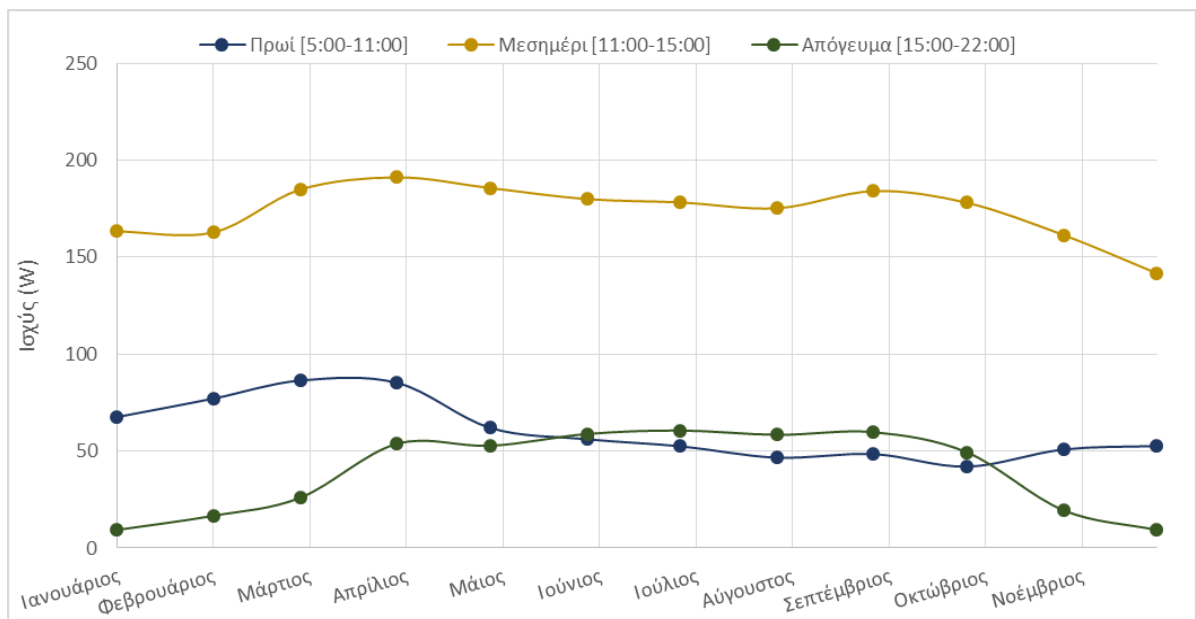
Διάγραμμα 7.28 Ετήσιο διάγραμμα ενεργειακής παραγωγής ανά μήνα για πρωί, μεσημέρι και απόγευμα .

Από το **διάγραμμα 7.28** παρατηρείται ,πως εξαιτίας της κλίσης των 30° , το μεσημέρι που ο ήλιος βρίσκεται στην ψηλότερη θέση του το πλαίσιο είχε και τη μεγαλύτερη παραγωγή. Η επίδραση της κλίσης είναι επίσης φανερή κατά την έναρξη της καλοκαιρινής περιόδου όπου παρατηρείται μια μείωση της παραγωγής τις πρωινές ώρες και μια αντίστοιχη αύξηση κατά τις απογευματινές,. Αυτό οφείλεται στην αλλαγή της θέσης του ηλίου, ο οποίος ανεβαίνει ψηλότερα, με αποτέλεσμα το καλοκαίρι η ακτινοβολία να είναι για περισσότερη ώρα κάθετη στο πλαίσιο το απόγευμα από ότι το πρωί. Είναι ,λοιπόν, φανερό ότι η κλίση του πλαισίου παίζει καθοριστικό ρόλο για την παραγωγή αλλά όχι για την απόδοση του πλαισίου. Για να εξαλειφθούν όμως ο καιρικοί παράγοντας από το παραπάνω διάγραμμα και να γίνουν οι μετρήσεις πιο αξιόπιστες, επιλέχθηκαν 6 ηλιόλουστες ημέρες από κάθε μήνα και καταγράφηκε πάλι η μέση ημερήσια ισχύς για κάθε μια από αυτές τις ημέρες. Έτσι, προέκυψε το **διάγραμμα 7.29**, όπου παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά με το **διάγραμμα 7.28** με την παραγωγή να αντιστρέφεται πάλι τους καλοκαιρινούς μήνες και να αυξάνεται κατά τις απογευματινές ώρες.



Διάγραμμα 7.29 Ετήσιο διάγραμμα μέσης ισχύος για 6 ηλιόλουστες ημέρες κάθε μήνα χωρισμένες σε πρωί, μεσημέρι και απόγευμα .

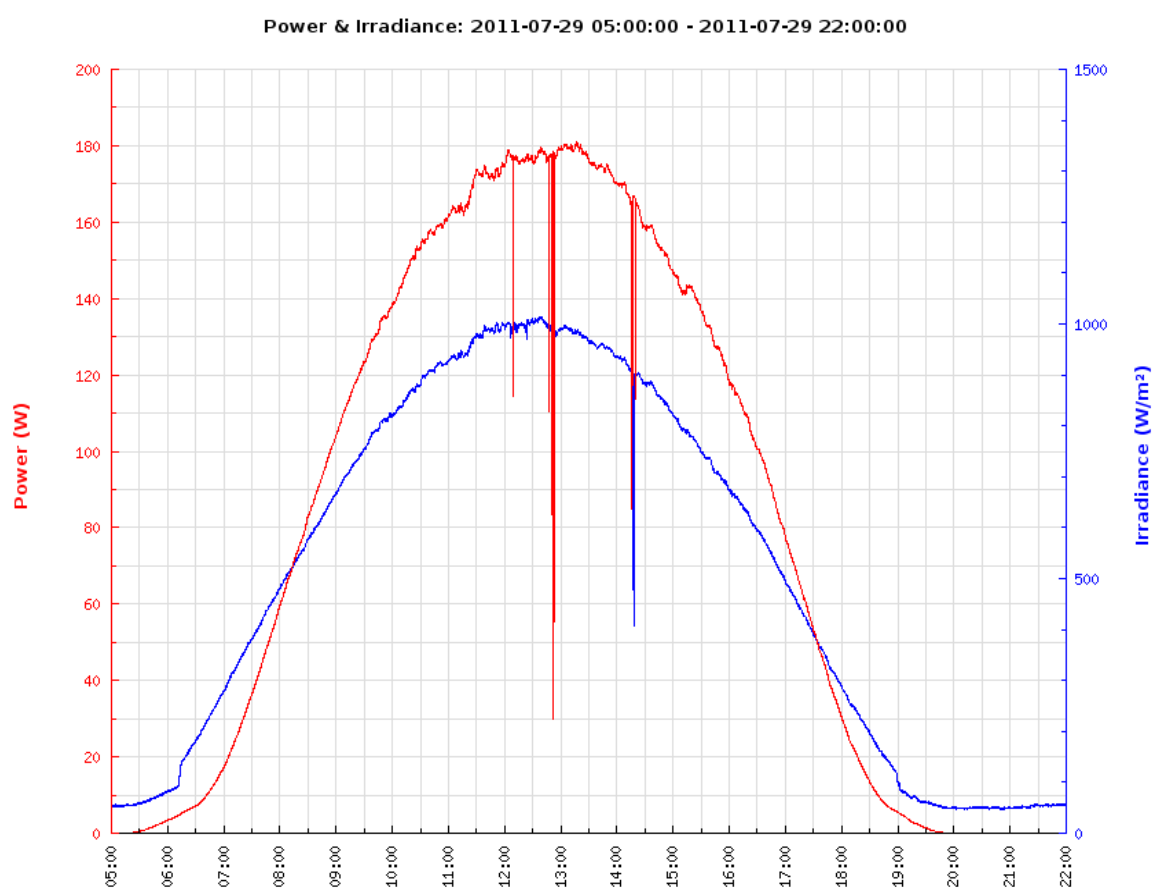
Ενώ παίρνοντας το μέσο όρο της ισχύος από της 6 ηλιόλουστες ημέρες για κάθε μήνα, προκύπτει το παρακάτω εξομαλυμένο διάγραμμα .



Διάγραμμα 7.30 Διάγραμμα μέσου όρου ισχύος των 6 ημερών κάθε μήνα χωρισμένο σε πρωί, μεσημέρι και απόγευμα .

7.9 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΚΑΘΑΡΣΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Για να εξακριβωθεί η επιρροή που ασκούν οι ακαθαρσίες στην λειτουργία του πλαισίου χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις δυο ημερών κατά τις οποίες έγινε καθαρισμός στο πλαίσιο (μία καλοκαιρινή ημέρα και μια φθινοπωρινή). Οι ημέρες που επιλέχθηκαν είναι '25-09-2012' και '29-07-2011'. Από τις μετρήσεις ακτινοβολίας και παραγόμενης ισχύος υπολογίστηκε ο μέσος όρος της απόδοσης 5 λεπτά πριν τον καθαρισμό και 5 λεπτά μετά, ούτως ώστε να μην προλάβει να μεταβληθεί αρκετά η θερμοκρασία του πλαισίου. Έτσι εξήχθησαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

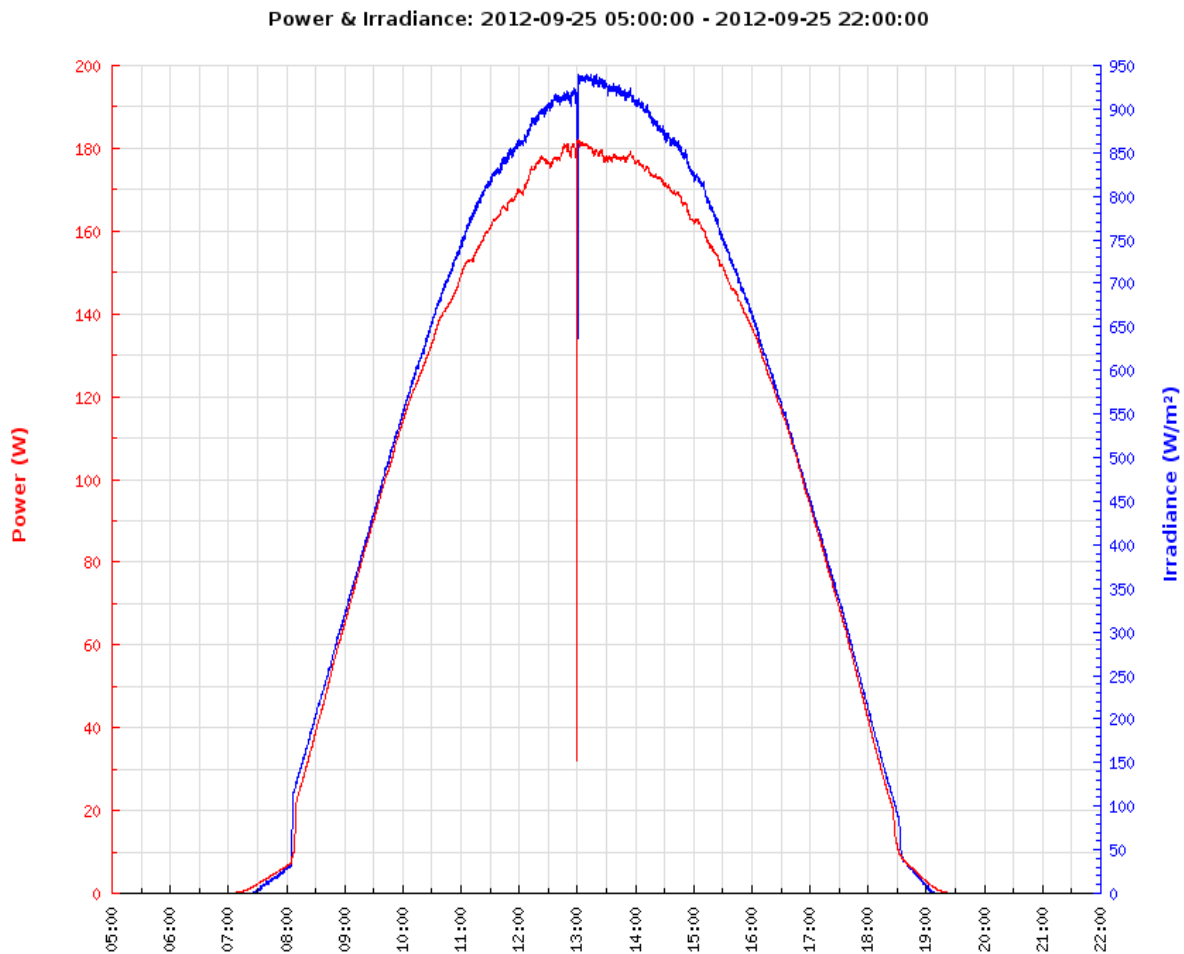


Διάγραμμα 7.31 Διάγραμμα ισχύος και ακτινοβολίας στις 29/07/2011 .

Απόδοση πριν τον καθαρισμό : 10.6471%

Απόδοση μετά τον καθαρισμό: 11.0424%

Μεταβολή: 0.3953%



Διάγραμμα 7.32 Διάγραμμα ισχύος και ακτινοβολίας στις 25/09/2012 .

Απόδοση πριν τον καθαρισμό : 11.9609%

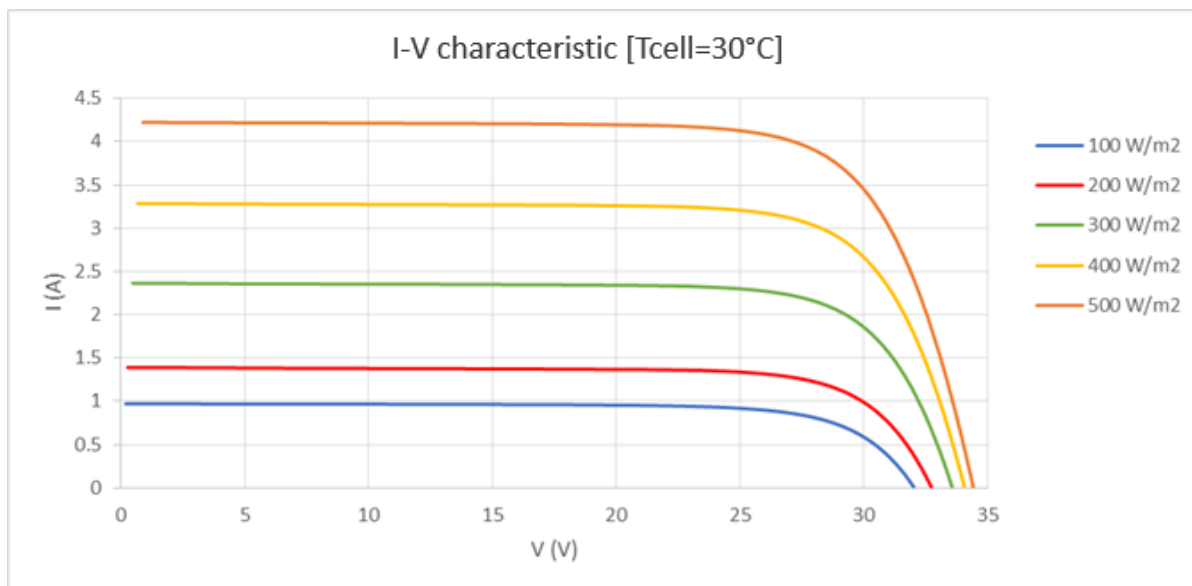
Απόδοση μετά τον καθαρισμό: 11.9935%

Μεταβολή: 0.0326%

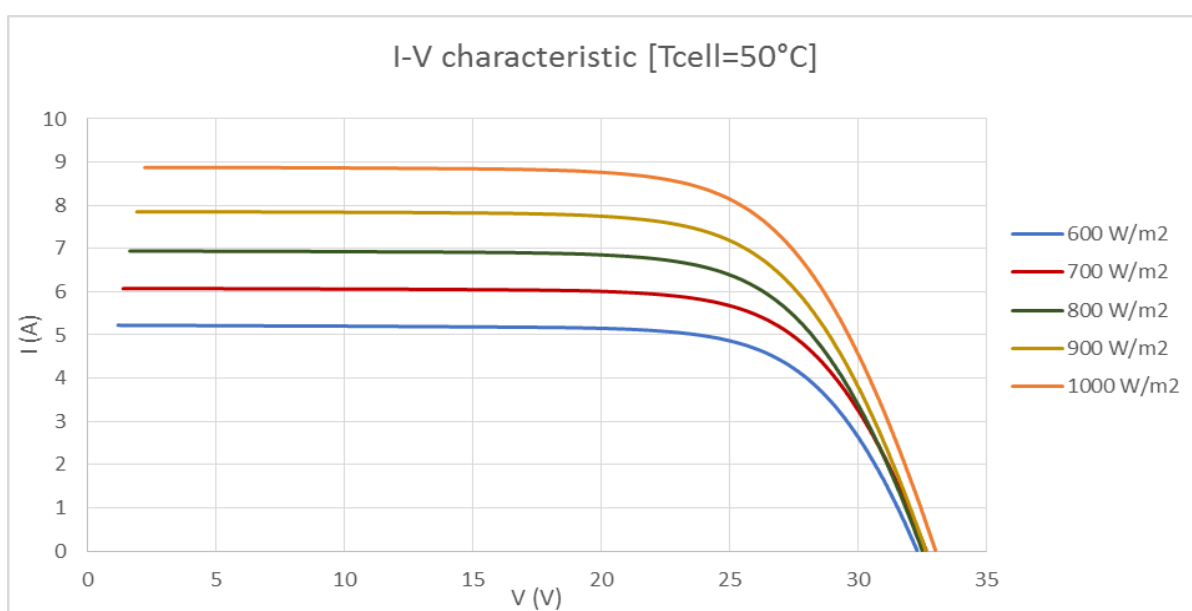
Προκύπτει λοιπόν ότι τους καλοκαιρινούς μήνες ,όπου δεν βρέχει ,είναι πιο πιθανό για το πλαίσιο να σκονιστεί και έτσι η διαφορά στην απόδοση πριν και μετά τον καθαρισμό είναι μεγαλύτερη από ότι έναν φθινοπωρινό μήνα. Ακόμα και έτσι όμως η διαφορά στην απόδοση δεν ήταν μεγάλη καθώς το πλαίσιο, λόγω του περιβάλλοντος στο οποίο εγκαταστάθηκε, σκονίζονταν ελάχιστα καθ'όλη τη διάρκεια του έτους.

7.10 I-V ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ

Παρακάτω παρουσιάζονται οι I-V χαρακτηριστικές για διάφορες τιμές θερμοκρασίας και ακτινοβολίας.

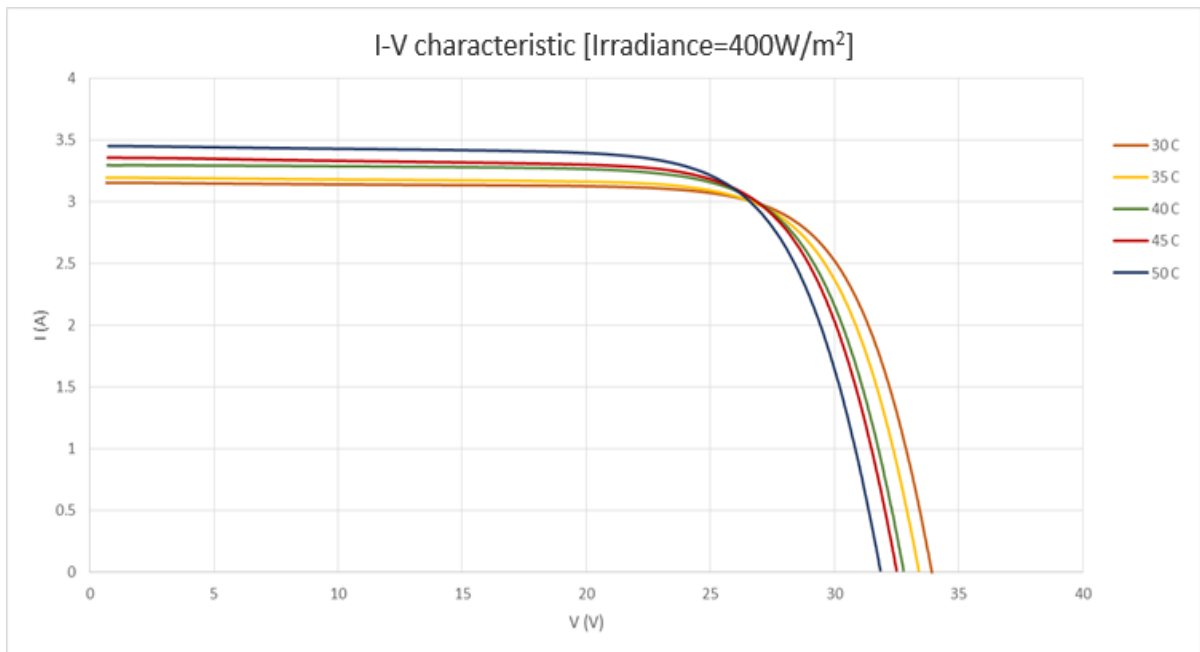


Διάγραμμα 7.33 Σύγκριση I-V χαρακτηριστικών για χαμηλές ακτινοβολίες και θερμοκρασία κυψέλης 30°C.

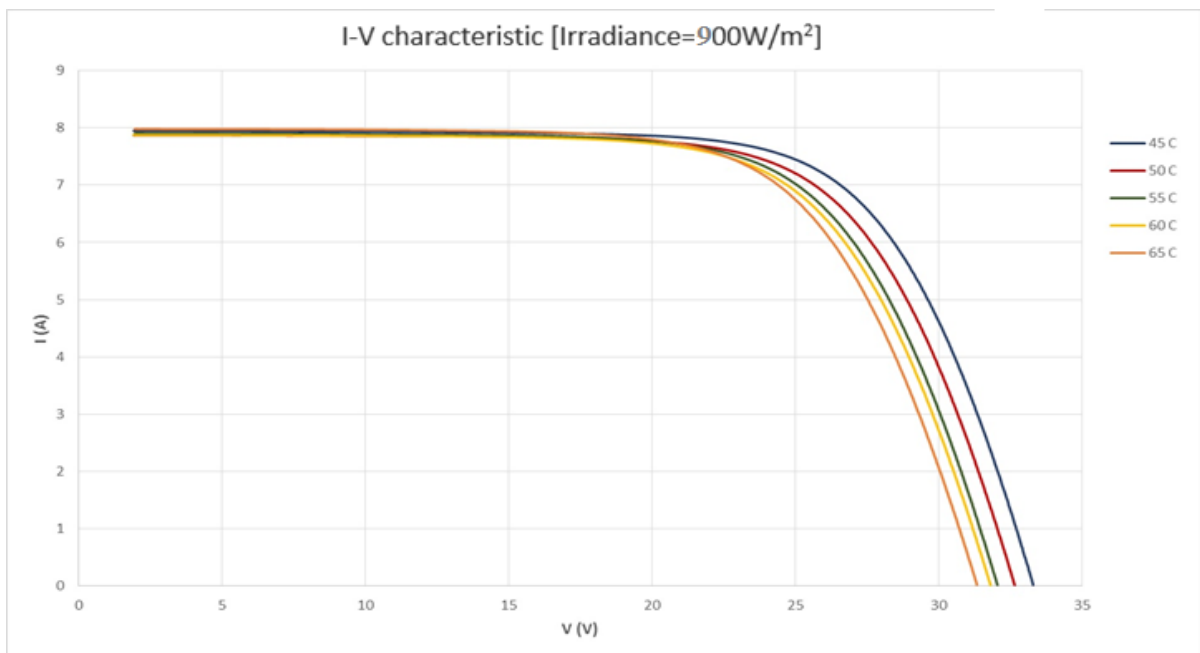


Διάγραμμα 7.34 Σύγκριση I-V χαρακτηριστικών για υψηλές ακτινοβολίες και θερμοκρασία κυψέλης 50°C.

Από τις παραπάνω χαρακτηριστικές παρατηρείται η έντονη εξάρτηση του ρεύματος από την ακτινοβολία, η οποία γίνεται όμως αντιληπτή περισσότερο στις υψηλές ακτινοβολίες όπου η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή και το ρεύμα μειώνεται ανάλογα με την αύξηση της ακτινοβολίας.



Διάγραμμα 7.35 Σύγκριση I-V χαρακτηριστικών για χαμηλές θερμοκρασίες κυψέλης και ακτινοβολία 400 W/m².

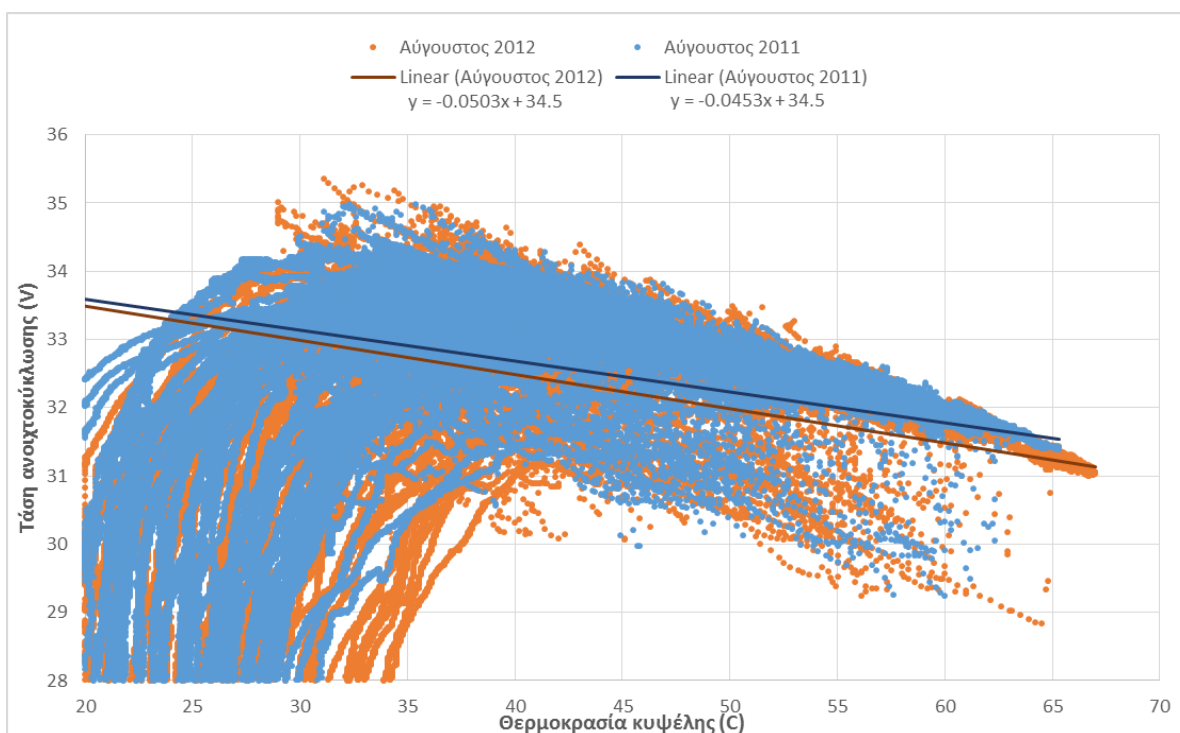


Διάγραμμα 7.36 Σύγκριση I-V χαρακτηριστικών για υψηλές θερμοκρασίες κυψέλης και ακτινοβολία 900 W/m².

Από τις παραπάνω χαρακτηριστικές παρατηρείται η έντονη εξάρτηση της τάσης από την θερμοκρασία κυψέλης, η οποία γίνεται και εδώ περισσότερο εμφανής σε υψηλές θερμοκρασίες όπου το ρεύμα παραμένει σχεδόν σταθερό και η τάση μειώνεται ανάλογα με την αύξηση της θερμοκρασίας.

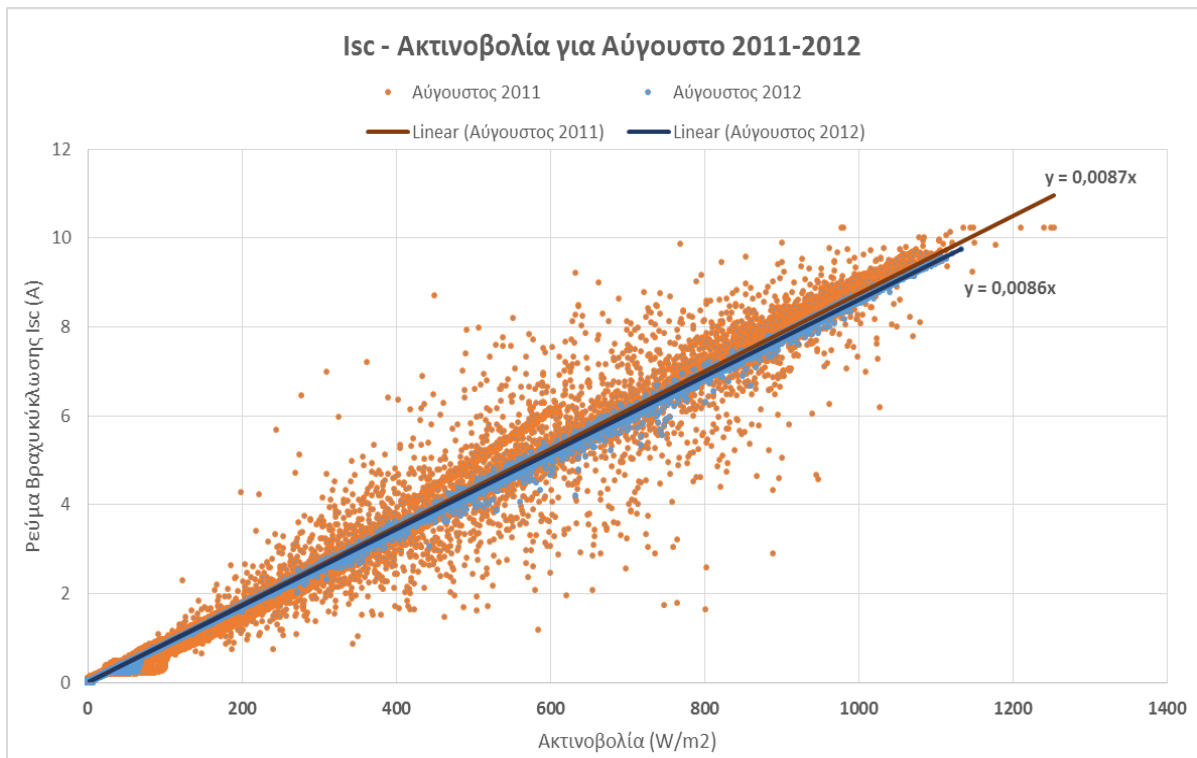
7.11 ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΣΤΟ ΕΝΑ ΕΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Για να μελετηθεί η υποβάθμιση του πλαισίου χρησιμοποιήθηκαν αρχικά οι μετρήσεις της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) συναρτήσει της θερμοκρασίας πλαισίου και του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) συναρτήσει της ακτινοβολίας, για τον Αύγουστο του 2011 όπου και πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση του πλαισίου, αλλά και για τον Αύγουστο του 2012, ένα χρόνο ακριβώς μετά την έκθεση του πλαισίου σε πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος.



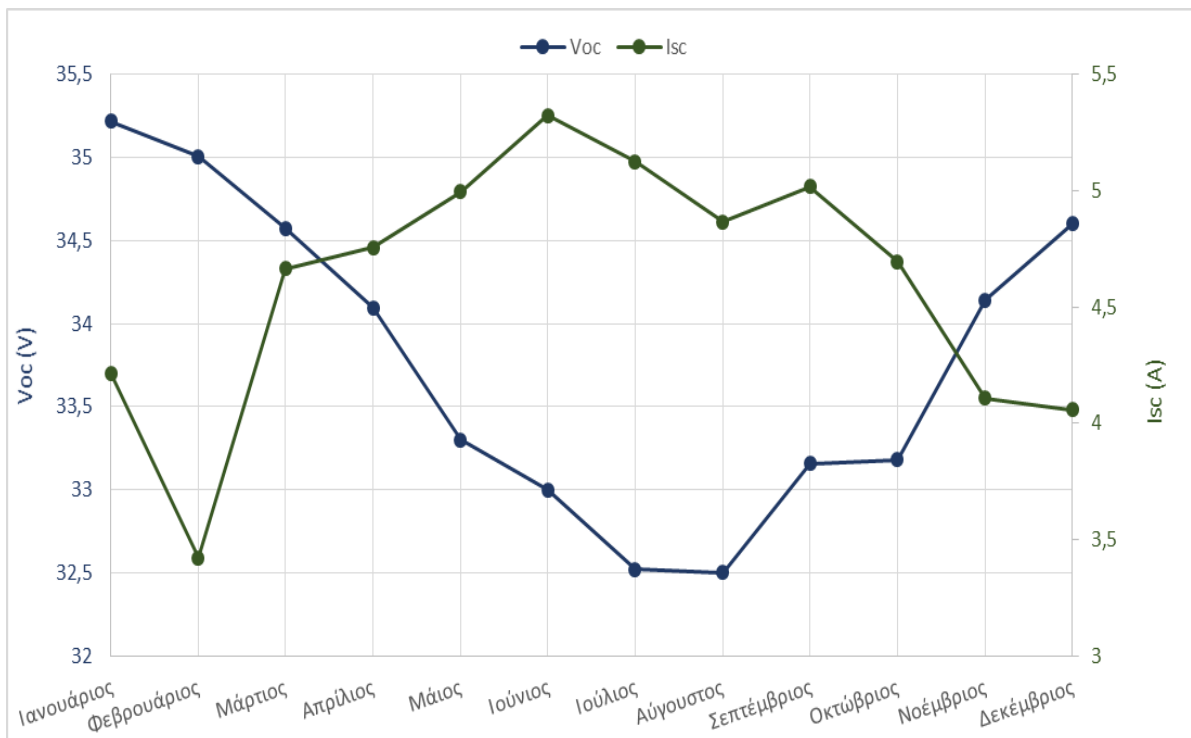
Διάγραμμα 7.37 Συγκριτικό διάγραμμα θερμοκρασίας κυψέλης-τάσης ανοιχτοκύκλωσης για τον Αύγουστο του 2011 και τον Αύγουστο του 2012 αντίστοιχα.

Η πτώση στην τάση ανοιχτοκύκλωσης για ένα χρόνο έκθεσης του πλαισίου προκύπτει $dV_{oc}=0.005*T$ όπως φαίνεται και στο **διάγραμμα 7.37**. Αντίστοιχα το ρεύμα βραχυκύκλωσης είχε μια πτώση $dI_{sc}=0.0001*G$ όπως φαίνεται στο **διάγραμμα 7.38**. . Ενδεικτικά, λοιπόν, για θερμοκρασία κυψέλης $25^{\circ}C$ η πτώση της V_{oc} θα είναι $0.125V$ ή 0.338% ενώ για $G=1000W/m^2$ η πτώση του I_{sc} θα είναι $0.1A$ ή 1.15% . Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν την γρήγορη υποβάθμιση του ρεύματος βραχυκύκλωσης η οποία είναι τριπλάσια της αντίστοιχης υποβάθμισης της τάσης ανοιχτοκύκλωσης.



Διάγραμμα 7.38 Συγκριτικό διάγραμμα ρεύματος βραχυκύκλωσης-ακτινοβολίας για τον Αύγουστο του 2011 και τον Αύγουστο του 2012 αντίστοιχα.

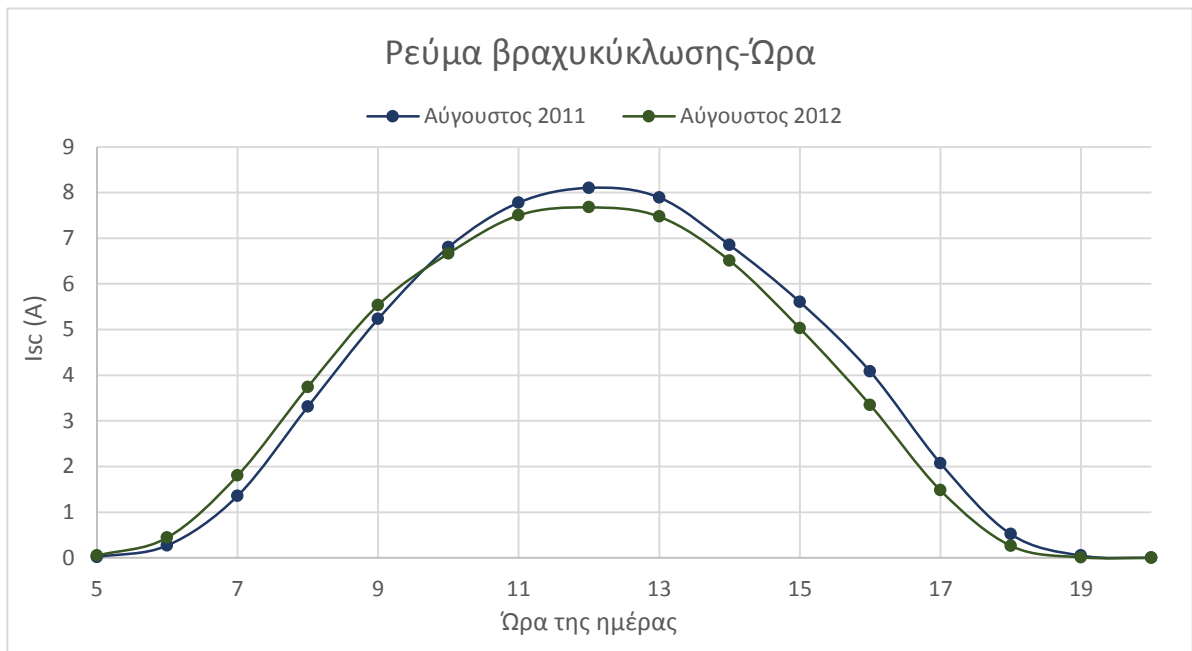
Παρακάτω παρουσιάζεται η μέση τιμή ανά μήνα της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και του ρεύματος βραχυκύκλωσης για όλο το έτος.



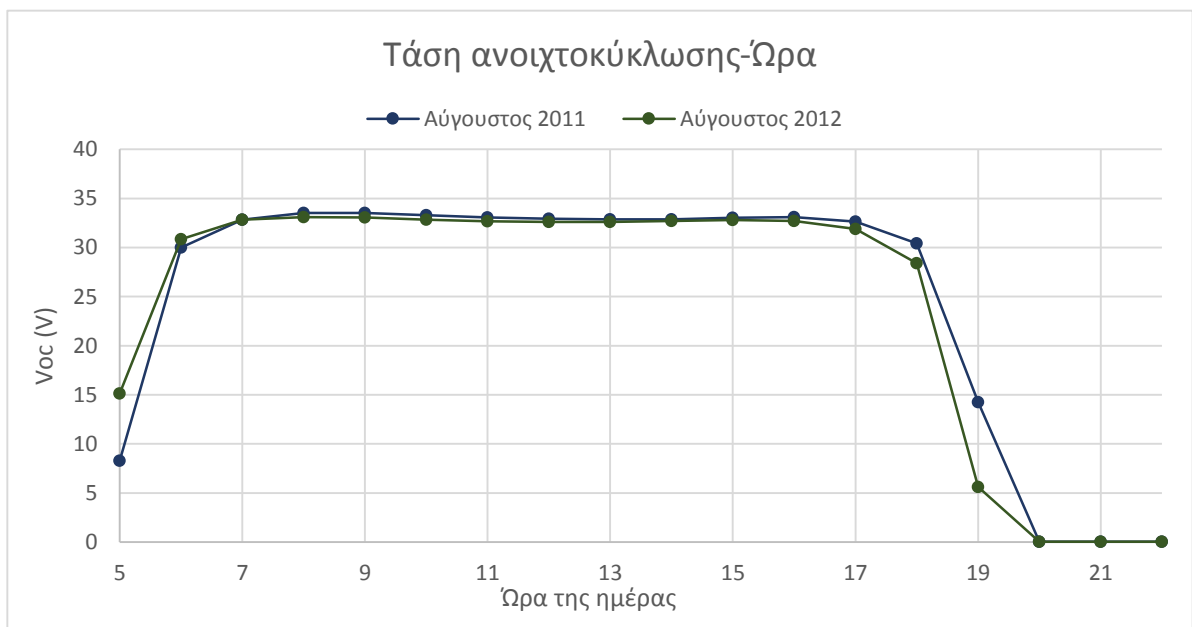
Διάγραμμα 7.39 Μέσος όρος τάσης ανοιχτοκύκλωσης και ρεύματος βραχυκύκλωσης ανά μήνα.

Στο **διάγραμμα 7.39** φαίνεται η εξάρτηση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης από τη θερμοκρασία και του ρεύματος βραχυκύκλωσης από την ακτινοβολία αντίστοιχα. Έτσι, κατά τους θερινούς, ζεστούς, μήνες η τάση ανοιχτοκύκλωσης μειώνεται, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται λόγω των ηλιόλουστων ημερών. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης δέχεται επίσης μια μεγάλη μείωση τον Φεβρουάριο, καθώς ήταν ο μήνας με τα μεγαλύτερα ποσά συννεφιάς.

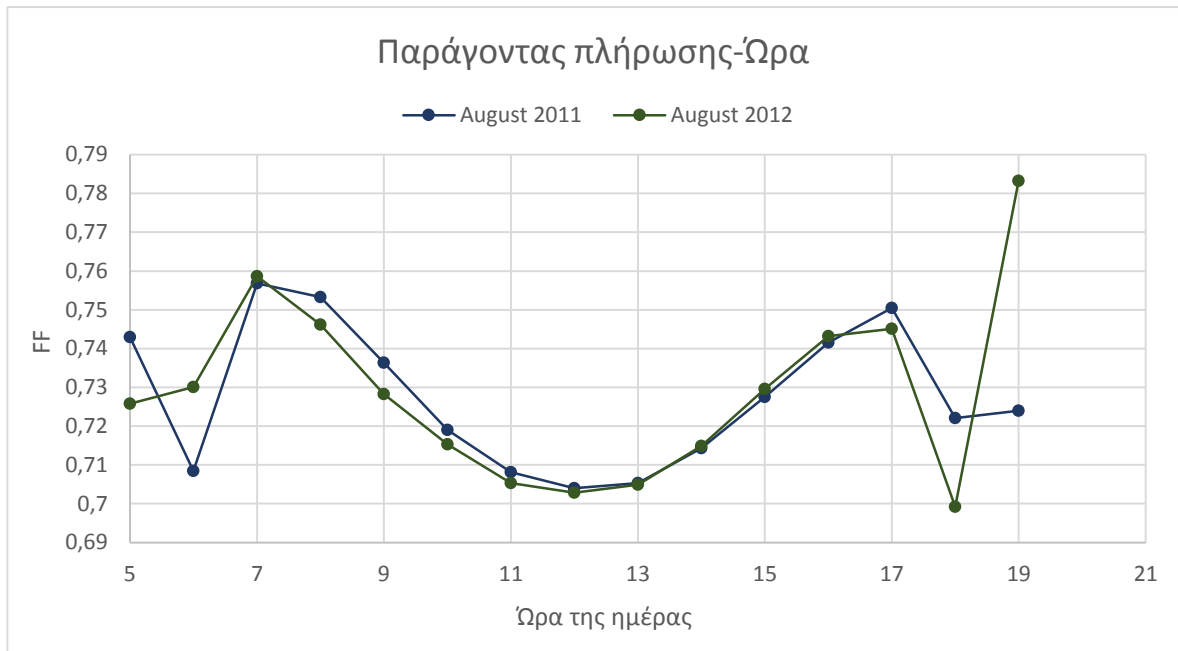
Τέλος έγινε σύγκριση μεταξύ του ρεύματος βραχυκύκλωσης, της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και του παράγοντα πλήρωσης ανά ώρα της ημέρας για τον Αύγουστο του 2011 και τον Αύγουστο του 2012.



Διάγραμμα 7.40 Ρεύμα βραχυκύκλωσης για τον Αύγουστο του 2011 και 2012 ανά ώρα της ημέρας.

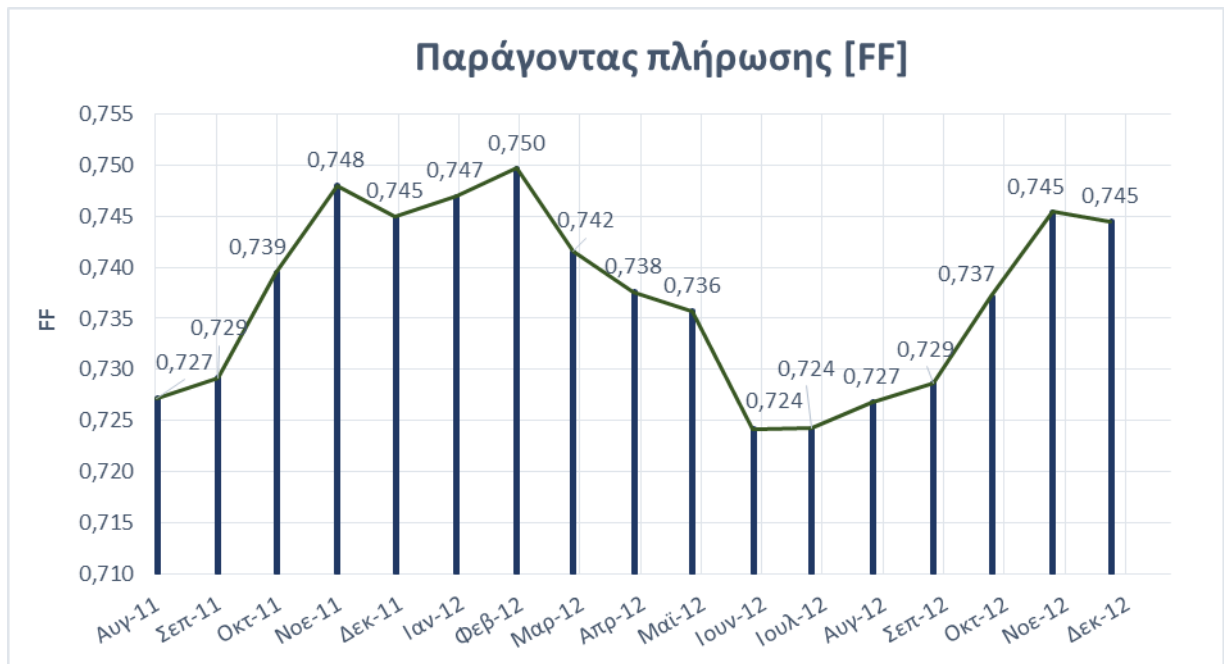


Διάγραμμα 7.41 Τάση ανοιχτοκύκλωσης για τον Αύγουστο του 2011 και 2012 ανά ώρα της ημέρας.

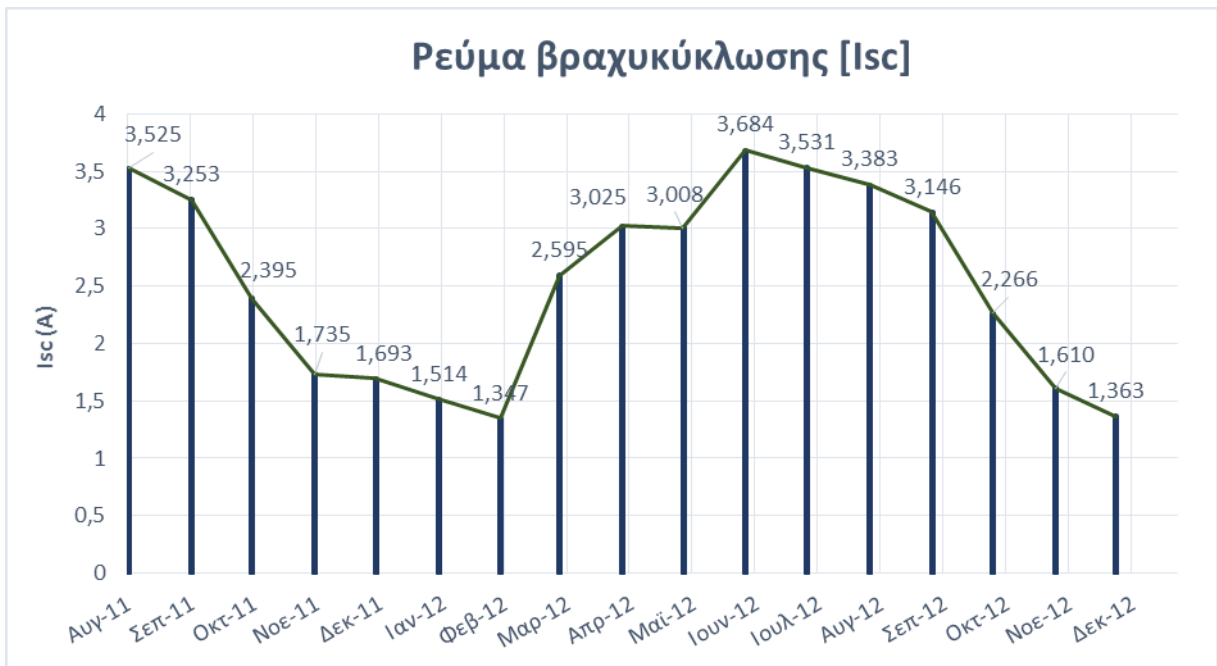


Διάγραμμα 7.42 Παράγοντας πλήρωσης για τον Αύγουστο του 2011 και 2012 ανά ώρα της ημέρας.

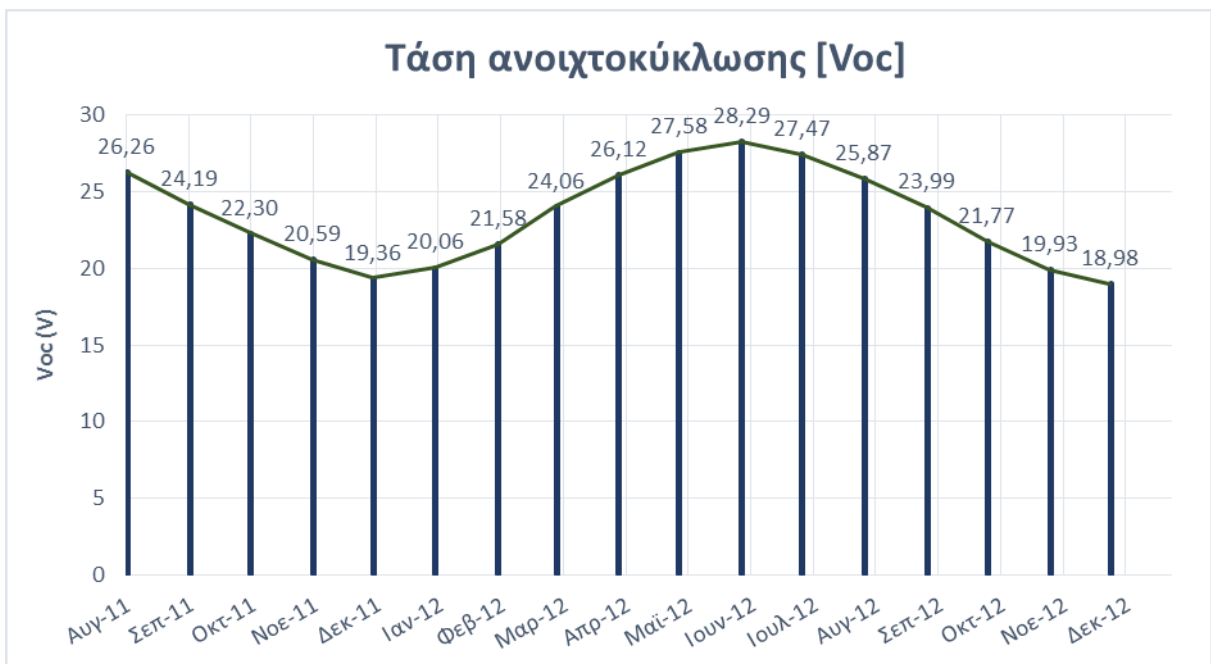
Ενώ, παρουσιάζονται και τα διαγράμματα τάσης ανοιχτοκύκλωσης, ρεύματος βραχυκύκλωσης και παράγοντα πλήρωσης ανά μήνα λειτουργίας του πλαισίου (μηνιαίοι μέσοι όροι) από όταν έγινε η εγκατάστασή του [Αύγουστος 2011], έως την απεγκατάστασή του [Δεκέμβριος 2012].



Διάγραμμα 7.43 Μέσος όρος παράγοντα πλήρωσης ανά μήνα λειτουργίας [Αυγ-11÷Δεκ-12].



Διάγραμμα 7.44 Μέσος όρος ρεύματος βραχυκύκλωσης ανά μήνα λειτουργίας [Αυγ-11÷Δεκ-12].

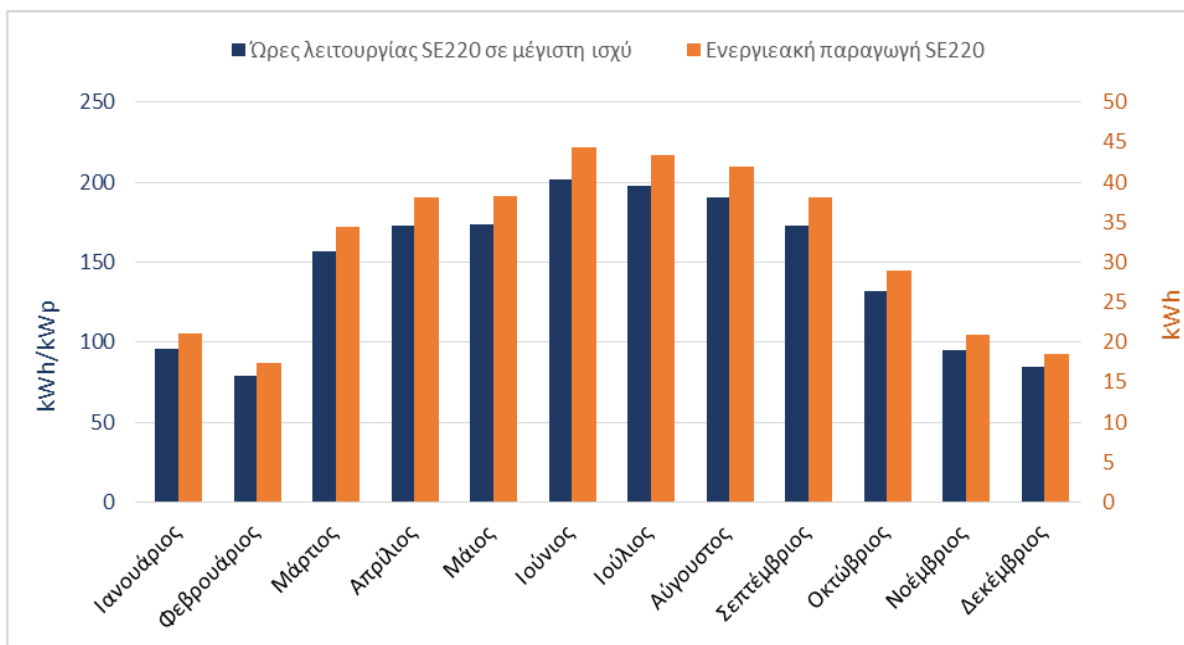


Διάγραμμα 7.45 Μέσος όρος τάσης ανοιχτοκύκλωσης ανά μήνα λειτουργίας [Αυγ-11÷Δεκ-12].

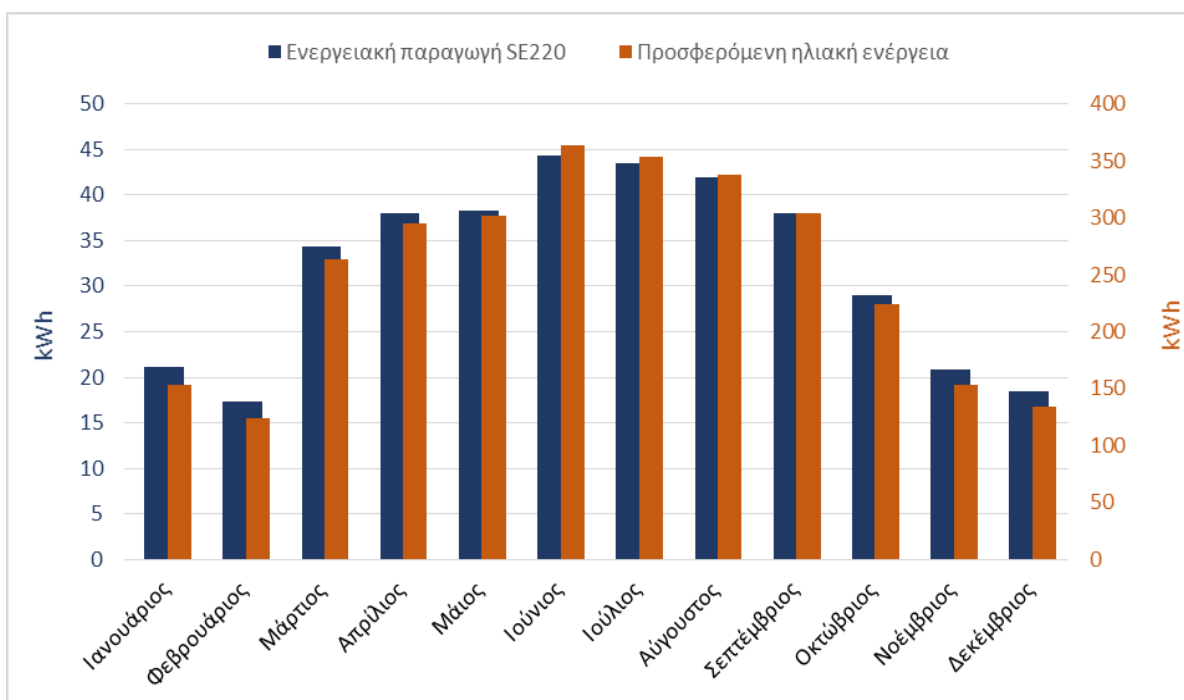
Συγκρίνοντας τώρα τους μήνες [Αυγ-Δεκ] του 2011 με τους αντίστοιχους μήνες του 2012 παρατηρείται μια πτώση σε όλους τους συντελεστές, με εντονότερη αυτή του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Έτσι, η τάση ανοιχτοκύκλωσης παρουσιάζει κατά μέσο όρο μια πτώση στις μηνιαίες τιμές της, η οποία ανέρχεται στα 0.43 V ή 1.97%, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης αντίστοιχα 0.126 A ή 4.97%. Οι τιμές αυτές προσεγγίζουν αρκετά τις τιμές που υπολογίσθηκαν παραπάνω για τον Αύγουστο του 2011 σε σύγκριση με τον Αύγουστο του 2012 συναρτήσει της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας.

7.12 ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

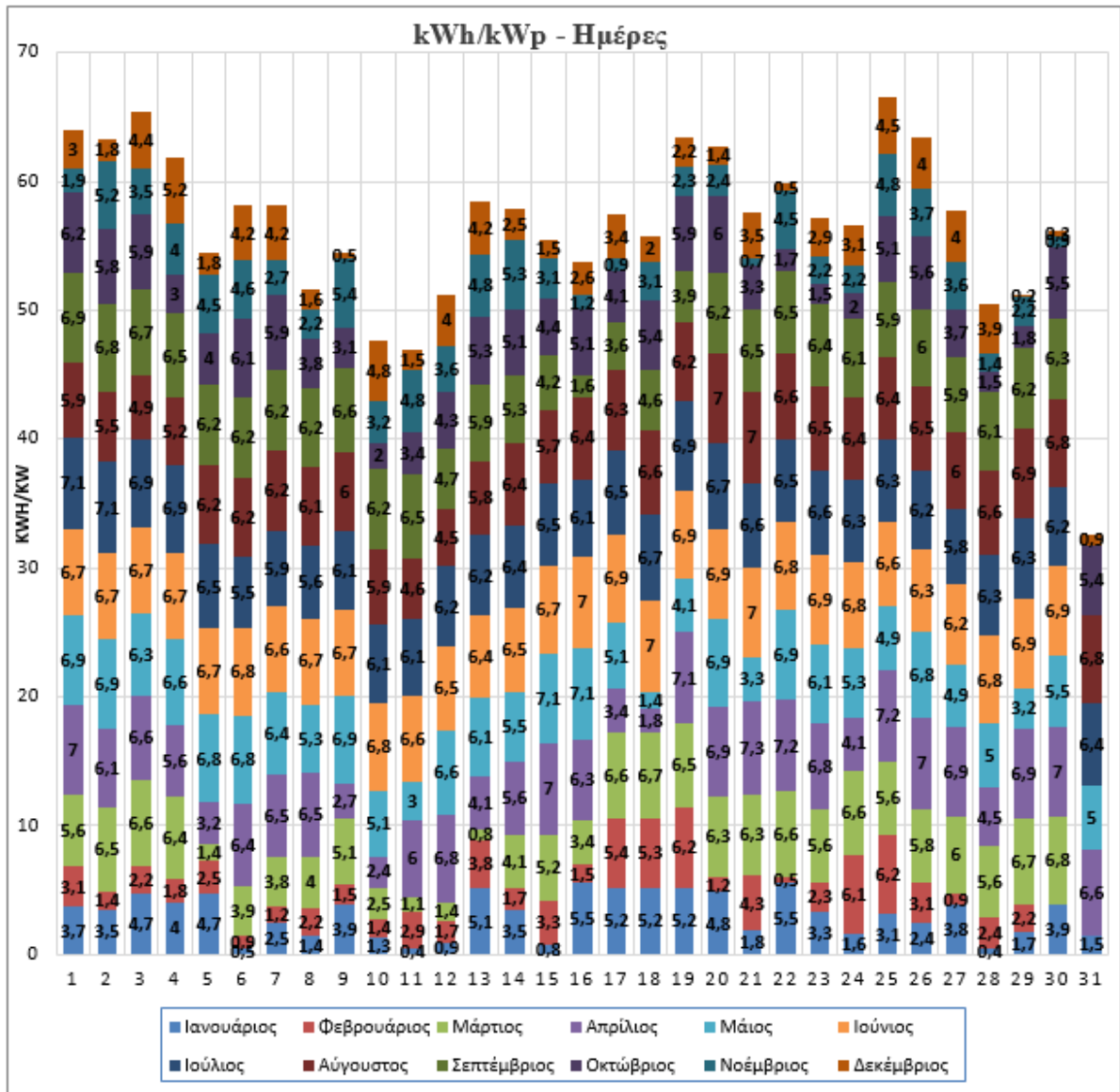
Εδώ παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν την ενεργειακή παραγωγή του πλαισίου κατά τη διάρκεια ενός έτους.



Διάγραμμα 7.46 Ετήσιο διάγραμμα της παραγόμενης ενέργειας σε σχέση με τις ώρες λειτουργίας του πλαισίου στη μέγιστη ισχύ.



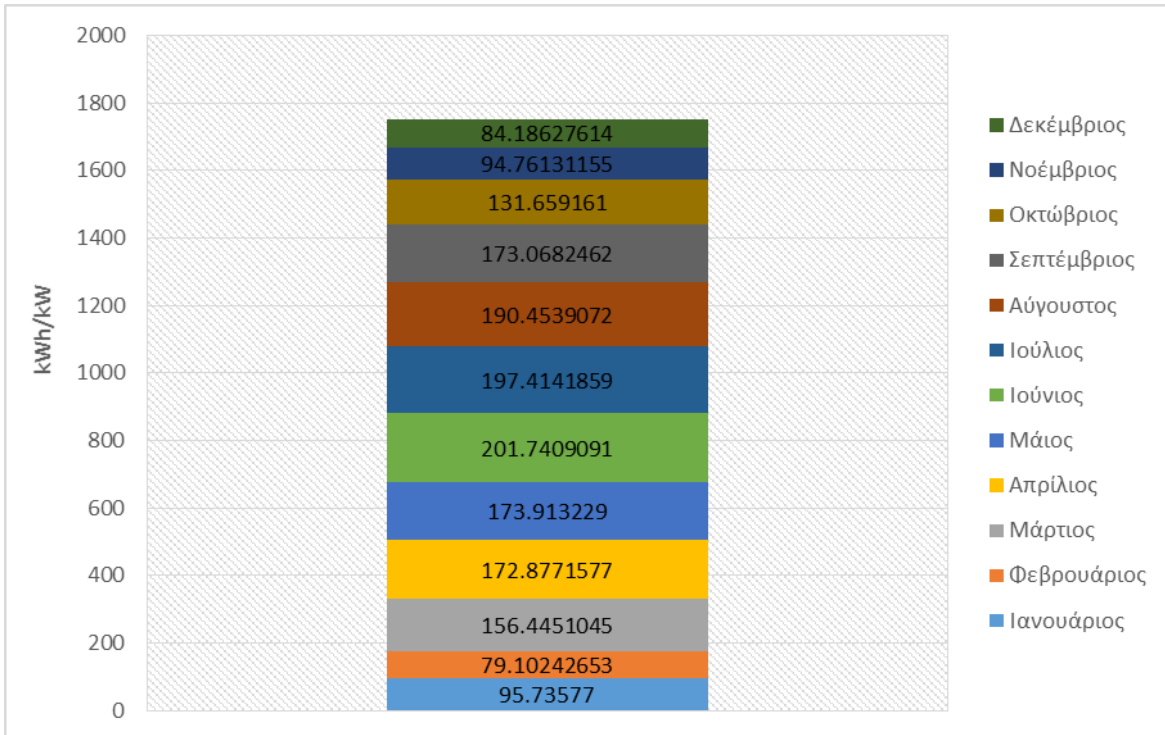
Διάγραμμα 7.47 Ετήσιο διάγραμμα της παραγόμενης ενέργειας του πλαισίου σε σχέση με την προσφερόμενη ενέργεια του ήλιου.



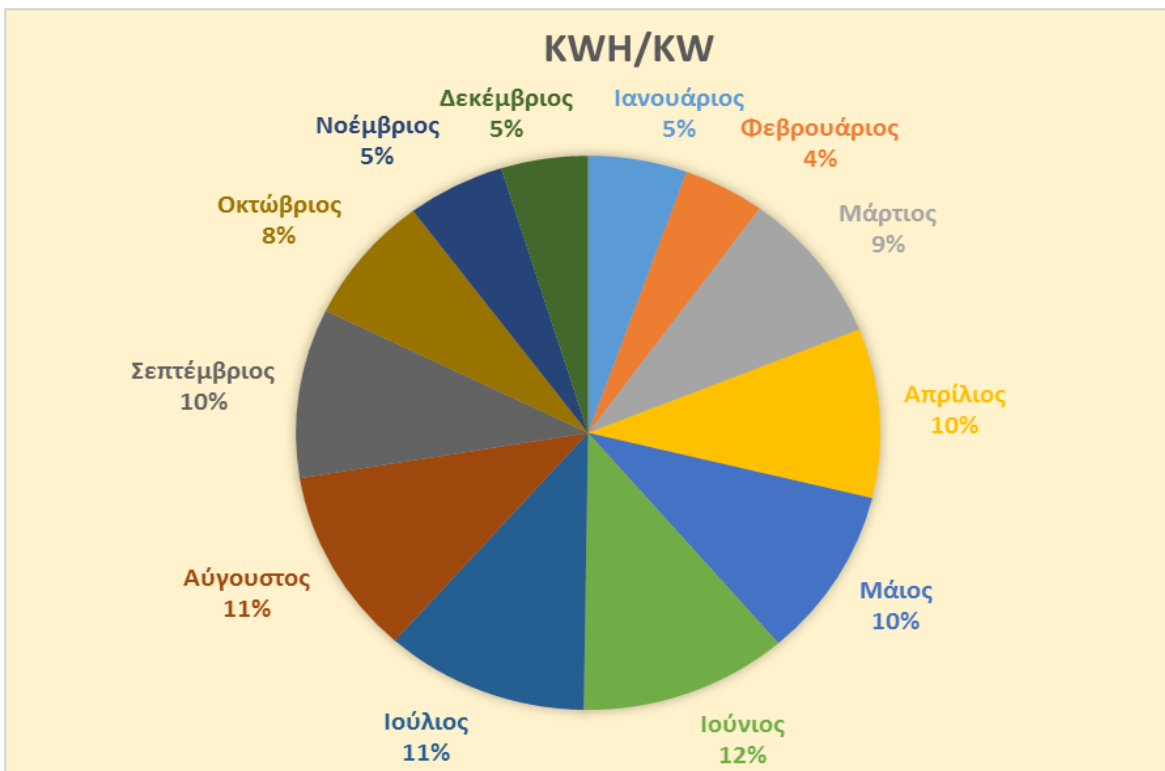
Διάγραμμα 7.48 Ετήσιο διάγραμμα των ωρών λειτουργίας του πλαισίου σε ονομαστική ισχύ ανά ημέρα και μήνα του έτους.

Από τα διαγράμματα 7.46 και 7.47 προκύπτει ο Ιούνιος ως ο παραγωγικότερος μήνας και ο Φεβρουάριος ως ο λιγότερο παραγωγικός, ενώ η παραγωγικότερη περίοδος του πλαισίου ήταν κυρίως το καλοκαίρι και η Άνοιξη. Τέλος διαιρώντας προσφερόμενη ενέργεια με την παραγόμενη ενέργεια του πλαισίου προκύπτει μια ενδεικτική τιμή απόδοσης $\approx 13\%$. Από το **διάγραμμα 7.48** προκύπτει πως η ημέρα με την χαμηλότερη παραγωγή ήταν η **29^η Δεκεμβρίου**, με παραγωγή μόλις **0.2 kWh/kWp** ή **44Wh**, ενώ η καλύτερη ημέρα ήταν η **21^η Απριλίου** με παραγωγή **7.3 kWh/kWp** ή **1606 Wh**.

Ενώ παρακάτω παρουσιάζεται και το αθροιστικό διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος για τον κάθε μήνα.



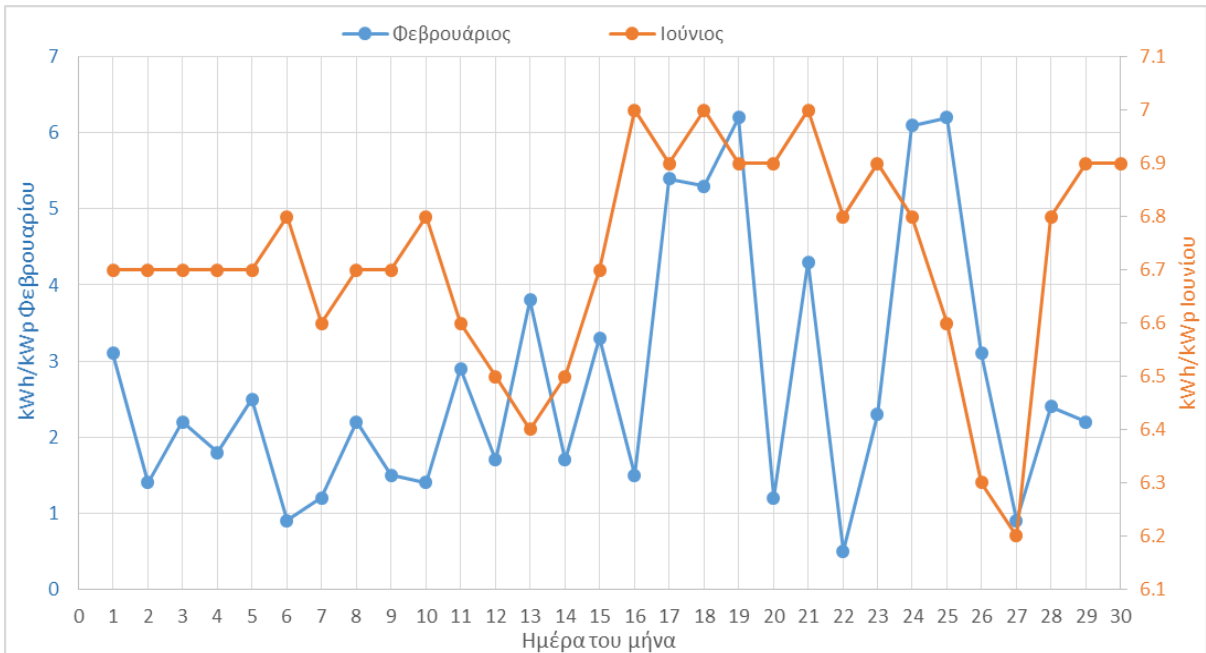
Διάγραμμα 7.49 Συγκριτικό διάγραμμα των ωρών που δούλεψε το πλαίσιο στην ονομαστική ισχύ του ανά μήνα λειτουργίας.



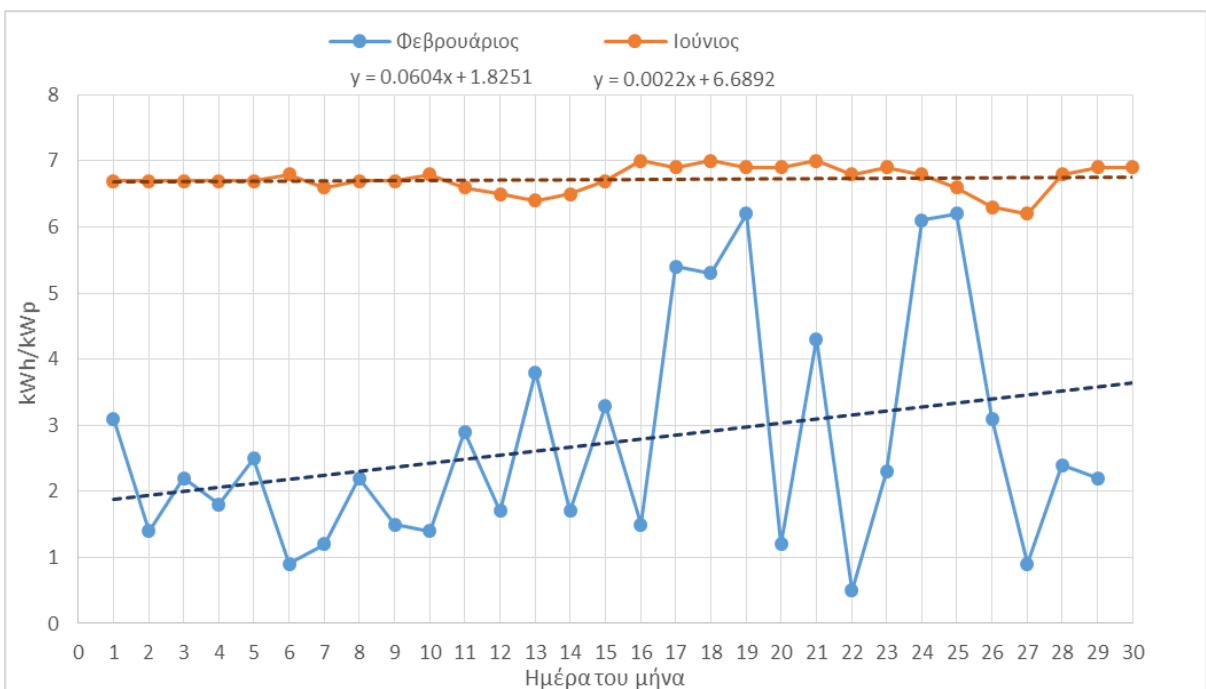
Διάγραμμα 7.50 Ποσοστιαίο διάγραμμα των ωρών που δούλεψε το πλαίσιο στην ονομαστική ισχύ του ανά μήνα λειτουργίας.

Το πλαίσιο δούλεψε συνολικά σε μέγιστη ισχύ όλο το έτος για **1751.358 h**.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προέκυψε πως παραγωγικότερος μήνας ήταν ο Ιούνιος με ετήσια παραγωγή **44374 Wh**, ενώ ο λιγότερο παραγωγικός μήνας ήταν ο Φεβρουάριος με παραγωγή **17424 Wh**. Έτσι παρακάτω γίνεται σύγκριση μεταξύ των ωρών λειτουργίας σε ονομαστική ισχύ αυτών των δύο μηνών.



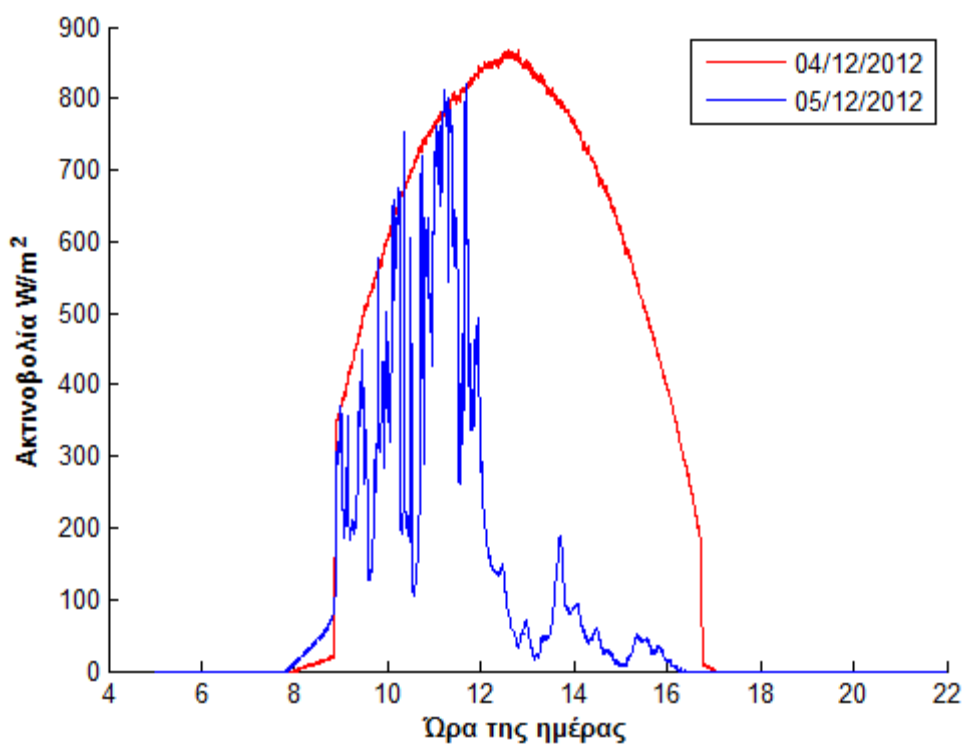
Διάγραμμα 7.51 Ετήσιο διάγραμμα ωρών λειτουργίας σε ονομαστική ισχύ για Φεβρουάριο και Ιούνιο σε ξεχωριστούς άξονες.



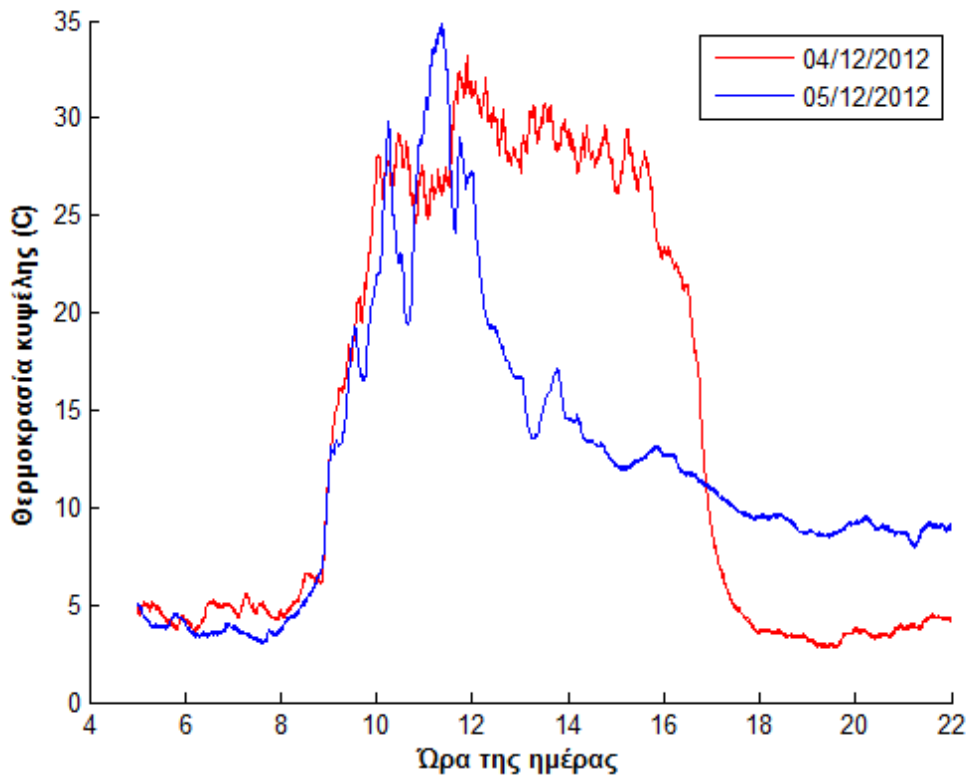
Διάγραμμα 7.52 Ετήσιο διάγραμμα ωρών λειτουργίας σε ονομαστική ισχύ για Φεβρουάριο και Ιούνιο σε κοινό άξονα.

7.13 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΣΕ ΑΝΤΙΘΕΤΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

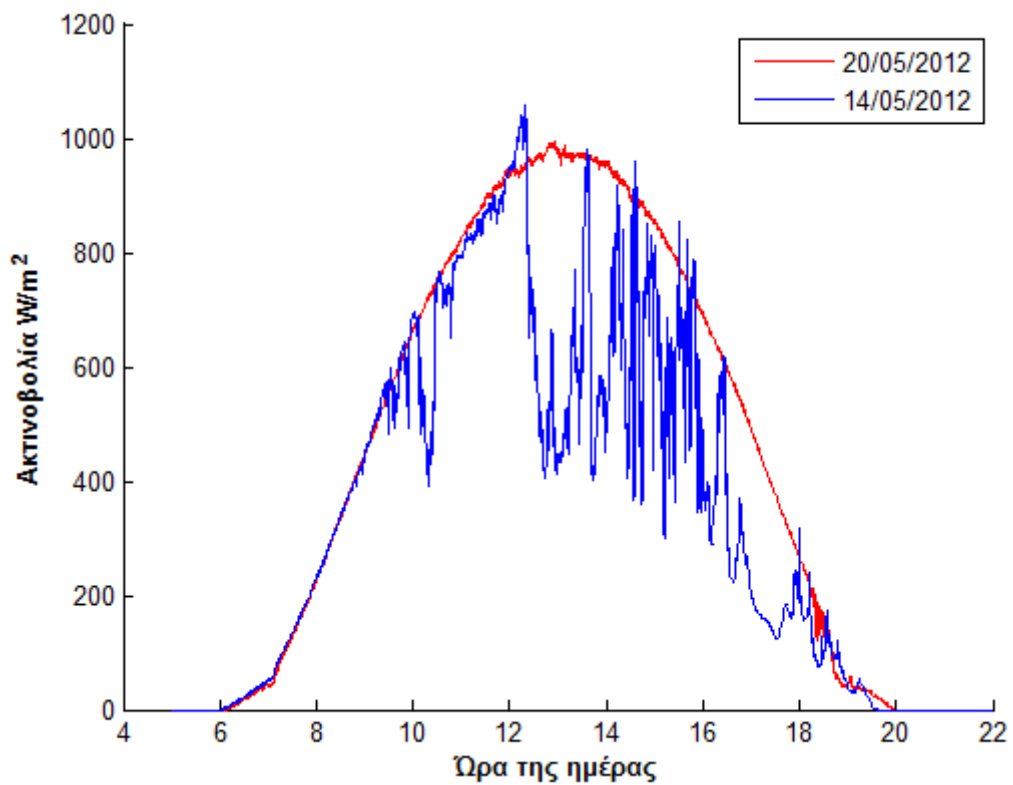
Για να διερευνηθεί η συμπεριφορά του πλαισίου σε δύσκολες καιρικές συνθήκες αλλά και για να ελεγχθεί η ακρίβεια της προσομοίωσης, εξετάστηκαν τέσσερις ημέρες, δύο βροχερές-συννεφιασμένες και δύο ηλιόλουστες από την χειμερινή και την θερινή περίοδο του έτους 2012 αντίστοιχα, οι οποίες περάστηκαν έπειτα και στην προσομοίωση και συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι ημέρες 14/05/2012, 20/05/2012, 04/12/2012 και 05/12/2012 των οποίων τα διαγράμματα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας παρουσιάζονται παρακάτω



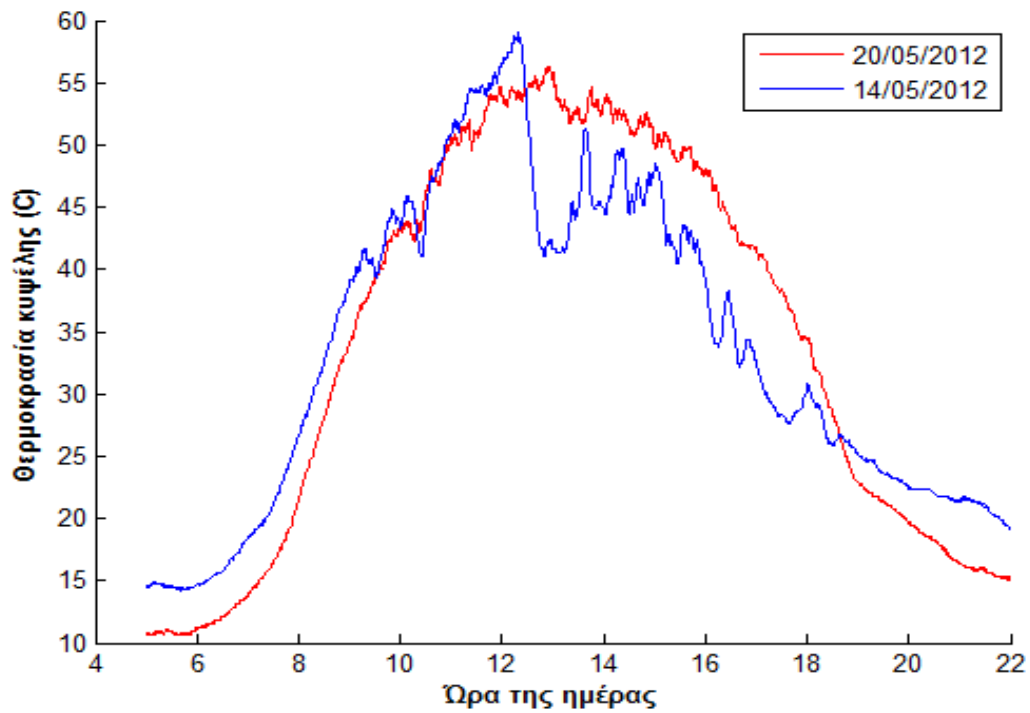
Διάγραμμα 7.53 Ακτινοβολία κατά την διάρκεια μιας συννεφιασμένης και μιας ηλιόλουστης ημέρας του Δεκεμβρίου.



Διάγραμμα 7.54 Θερμοκρασία κυψέλης κατά την διάρκεια μιας συννεφιασμένης και μιας ηλιόλουστης ημέρας του Δεκεμβρίου.



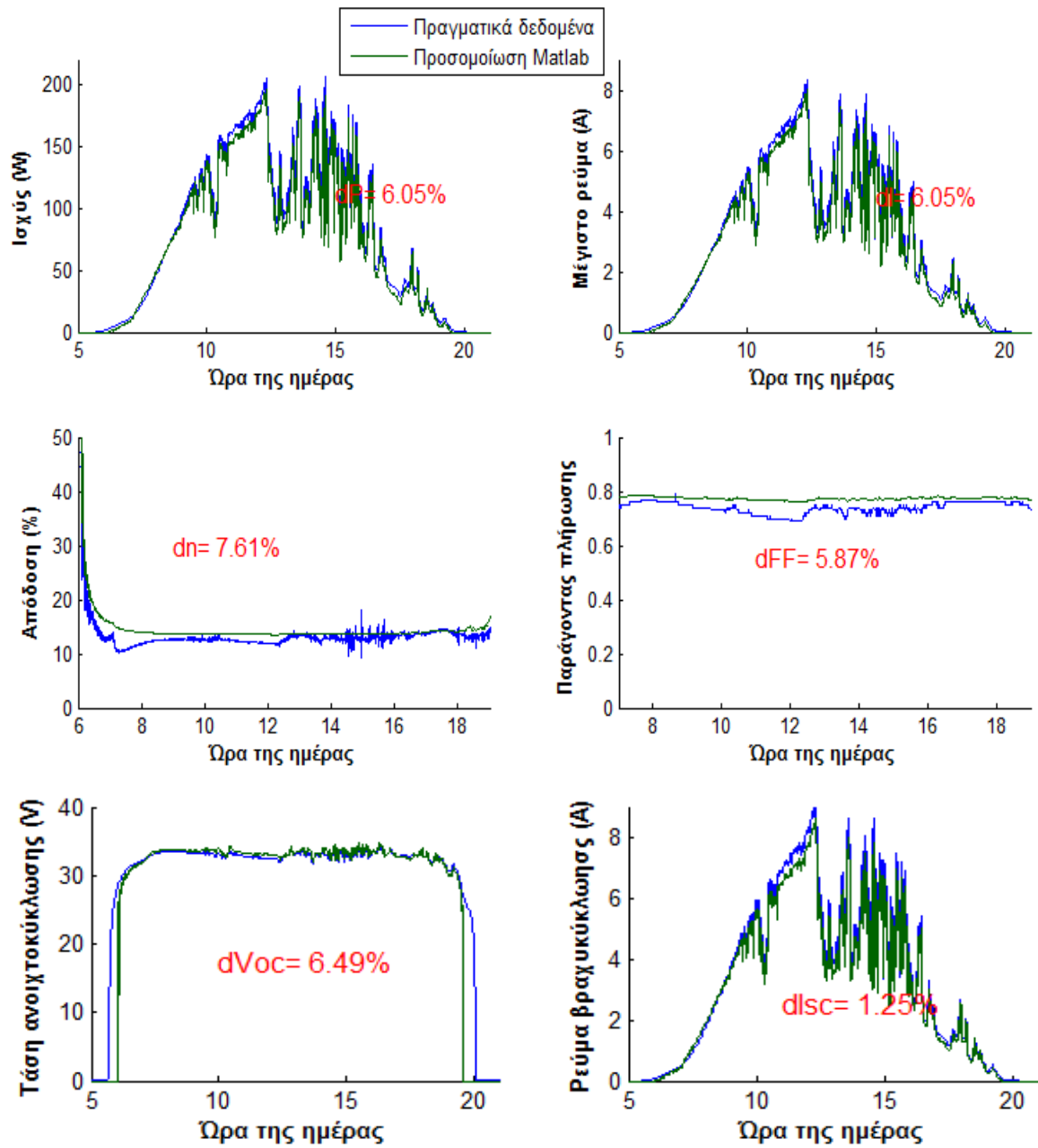
Διάγραμμα 7.55 Ακτινοβολία κατά την διάρκεια μιας συννεφιασμένης και μιας ηλιόλουστης ημέρας του Μαΐου.



Διάγραμμα 7.56 Θερμοκρασία κυψέλης κατά την διάρκεια μιας συννεφιασμένης και μιας ηλιόλουστης ημέρας του Μαΐου.

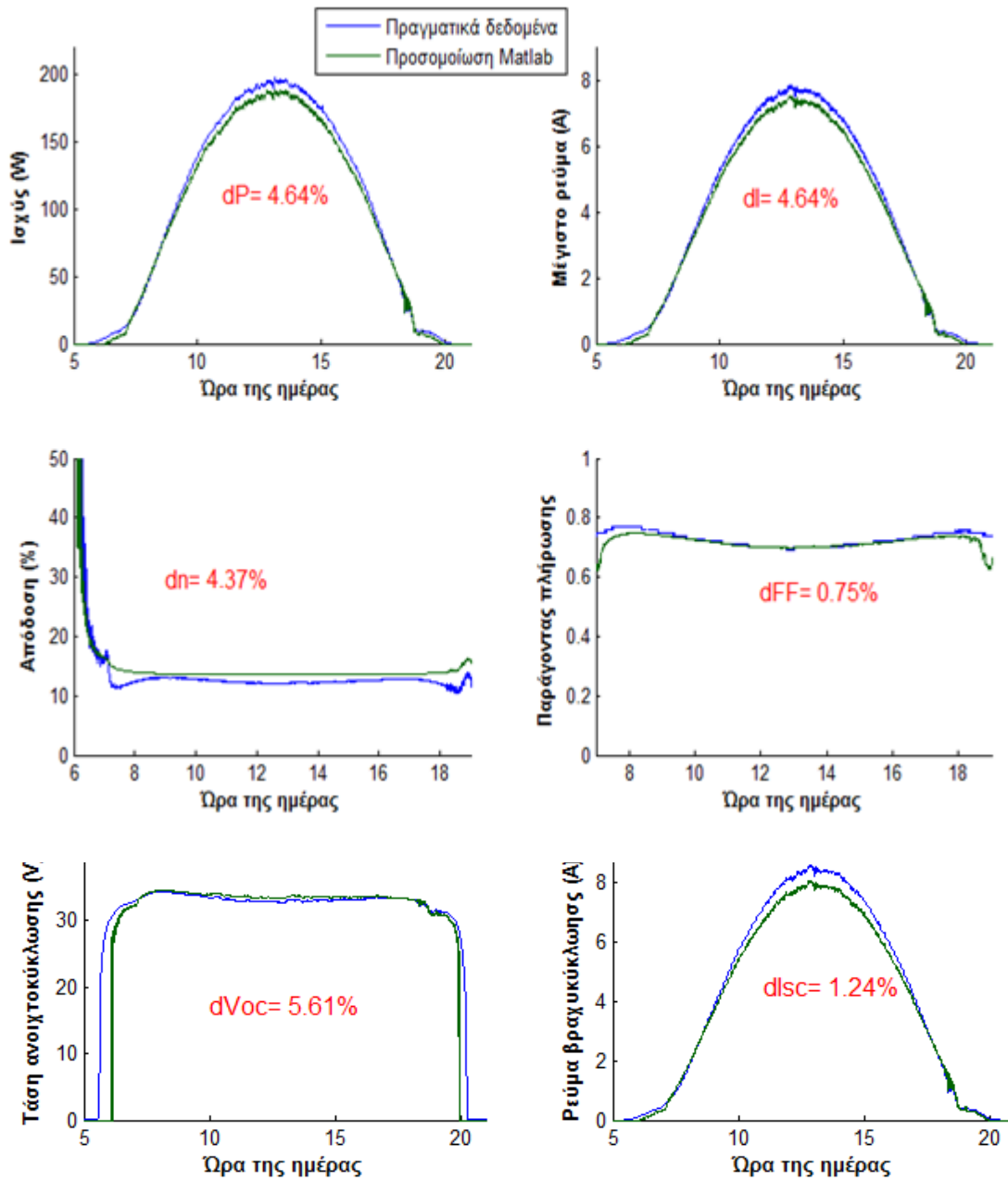
Τα παραπάνω δεδομένα καθώς και η παραγόμενη μέγιστη τάση του πλαισίου περάστηκαν στην προσομοίωση του matlab και παρακάτω θα γίνει σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πραγματικών μετρήσεων από την βάση δεδομένων.

14 Μαΐου 2012



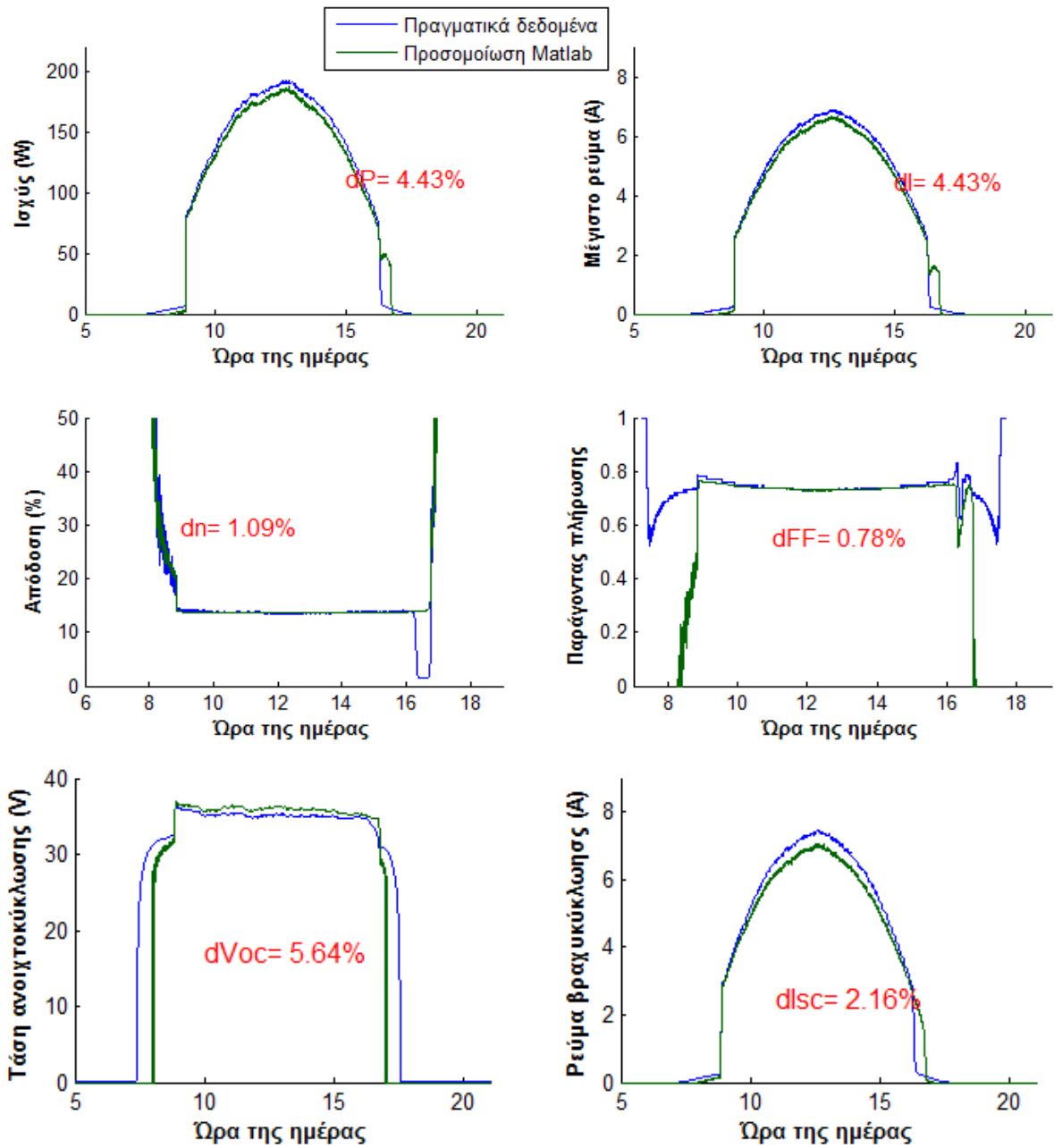
Διάγραμμα 7.57 Συγκριτικά διαγράμματα P, I_{mp} , η , FF, V_{oc} και I_{sc} μεταξύ μετρήσεων και προσομοίωσης για τις 14/05/2012 μεταξύ 09:00-15:00, με αναγραφή της μεταξύ τους απόκλισης για το διάστημα 09:00-15:00.

20 Μαΐου 2012



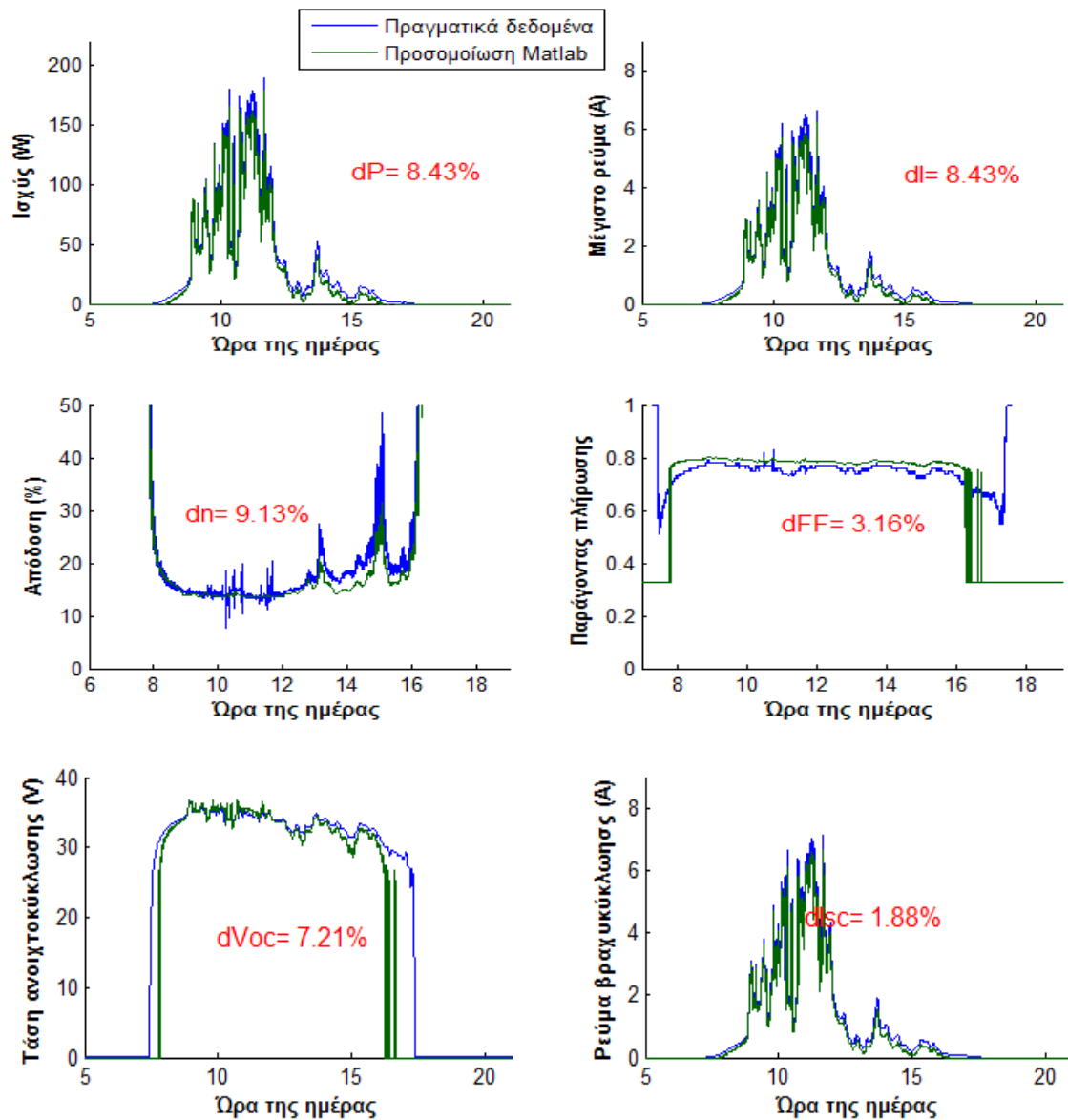
Διάγραμμα 7.58 Συγκριτικά διαγράμματα P, I_{pr} , η , FF, V_{oc} και I_{sc} μεταξύ μετρήσεων και προσομοίωσης για τις 20/05/2012, με αναγραφή της μεταξύ τους απόκλισης για το διάστημα 09:00-15:00.

4 Δεκεμβρίου 2012



Διάγραμμα 7.59 Συγκριτικά διαγράμματα P, I_{mp} , η , FF, V_{oc} και I_{sc} μεταξύ μετρήσεων και προσομοίωσης για τις 04/12/2012, με αναγραφή της μεταξύ τους απόκλισης για το διάστημα 09:00-15:00.

5 Δεκεμβρίου 2012

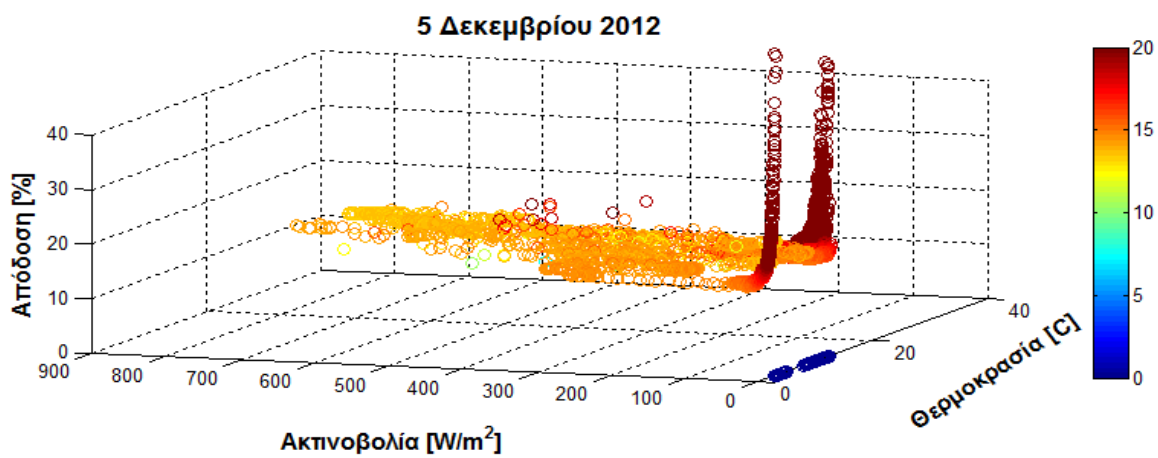
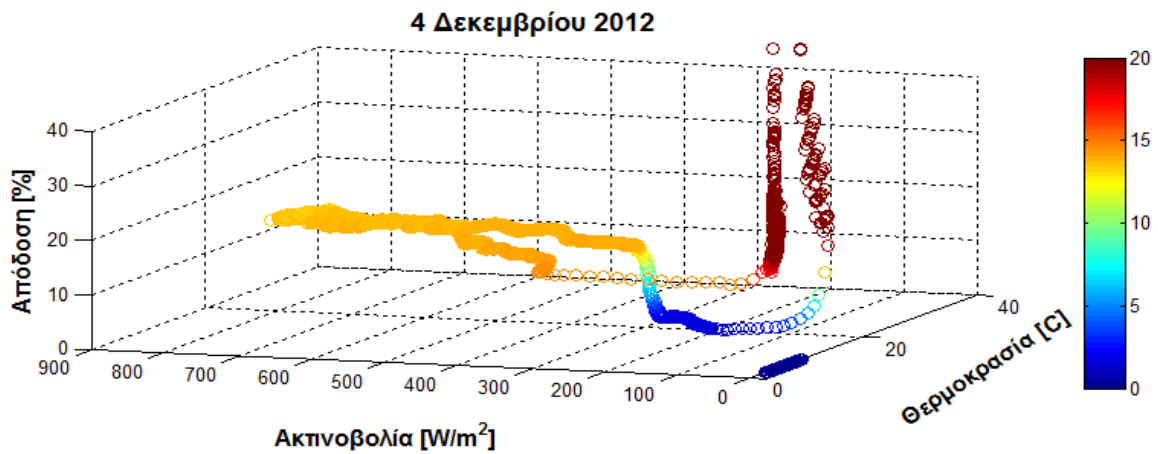


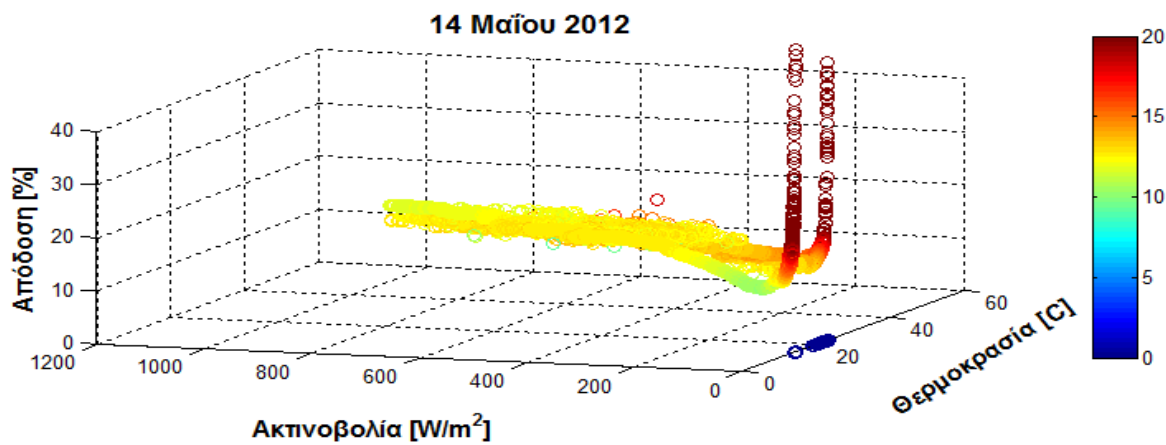
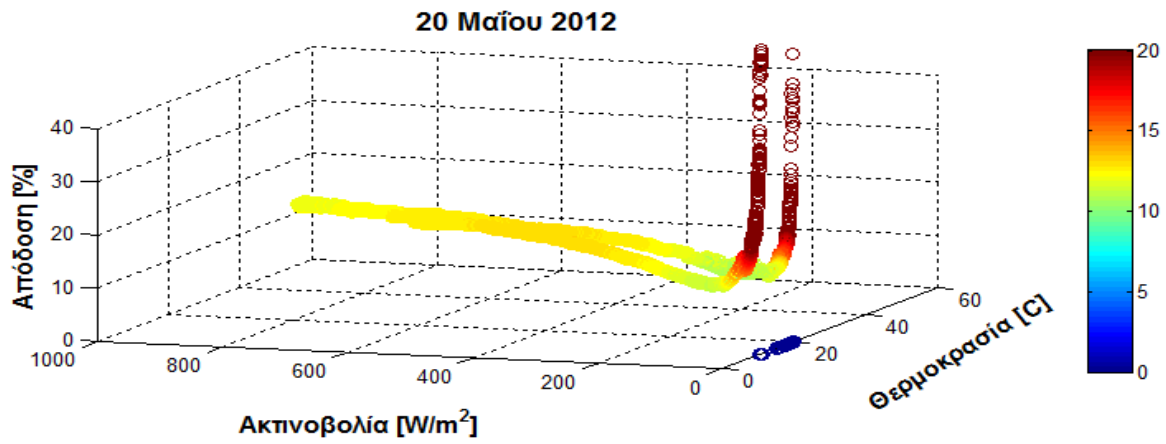
Διάγραμμα 7.60 Συγκριτικά διαγράμματα P, Imp ,n, FF, Voc και Isc μεταξύ μετρήσεων και προσομοίωσης για τις 05/12/2012, με αναγραφή της μεταξύ τους απόκλισης για το διάστημα 09:00-15:00.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα η προσομοίωση δίνει μια πολύ καλή εικόνα της πραγματικότητας αφού προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό τα δεδομένα των μετρήσεων τόσο σε ηλιόλουστες όσο και σε συννεφιασμένες ημέρες με μέση απόκλιση **4.639%**. Η μεγαλύτερη απόκλιση (**9.13%**) παρατηρείται στον παράγοντα πλήρωσης στις **05/12/2012** του **διαγράμματος 7.60** και οφείλεται στις απότομες μεταβολές του καιρού που επικρατούσαν εκείνη την ημέρα τις οποίες δεν μπόρεσε να ακολουθήσει πιστά η προσομοίωση.

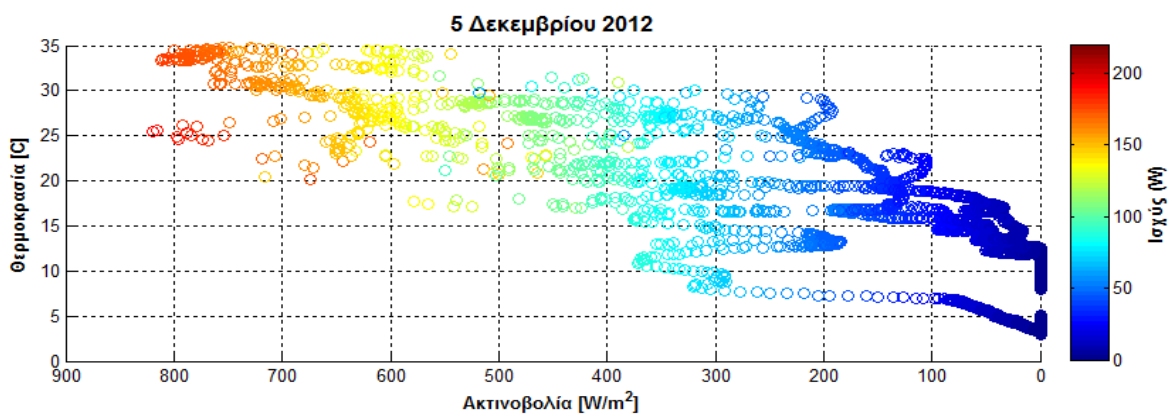
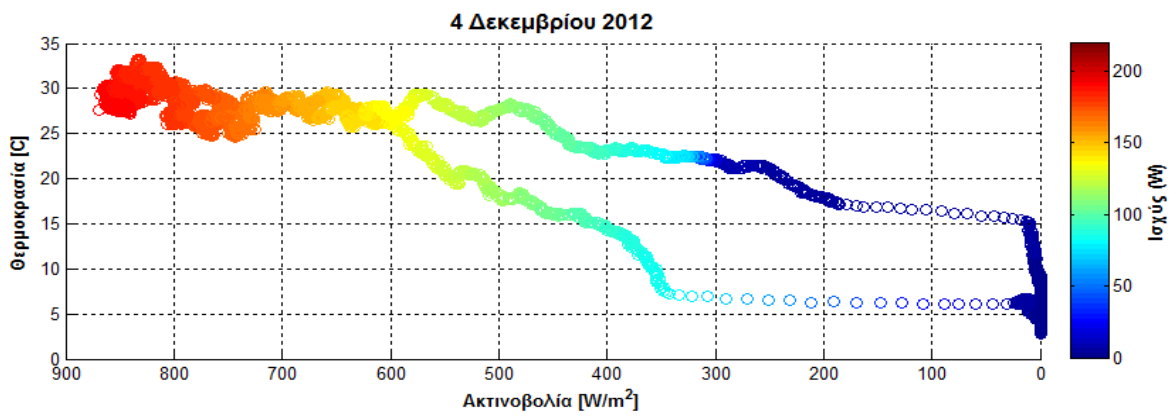
Γενικότερα όμως, η προσομοίωση προσεγγίζει αρκετά τις πειραματικές τιμές, με τα αποτελέσματα να είναι ακριβέστερα κατά τις ηλιόλουστες ημέρες ενώ τις ημέρες που επικρατούσαν έντονα καιρικά φαινόμενα οι αποκλίσεις οξύνονταν.

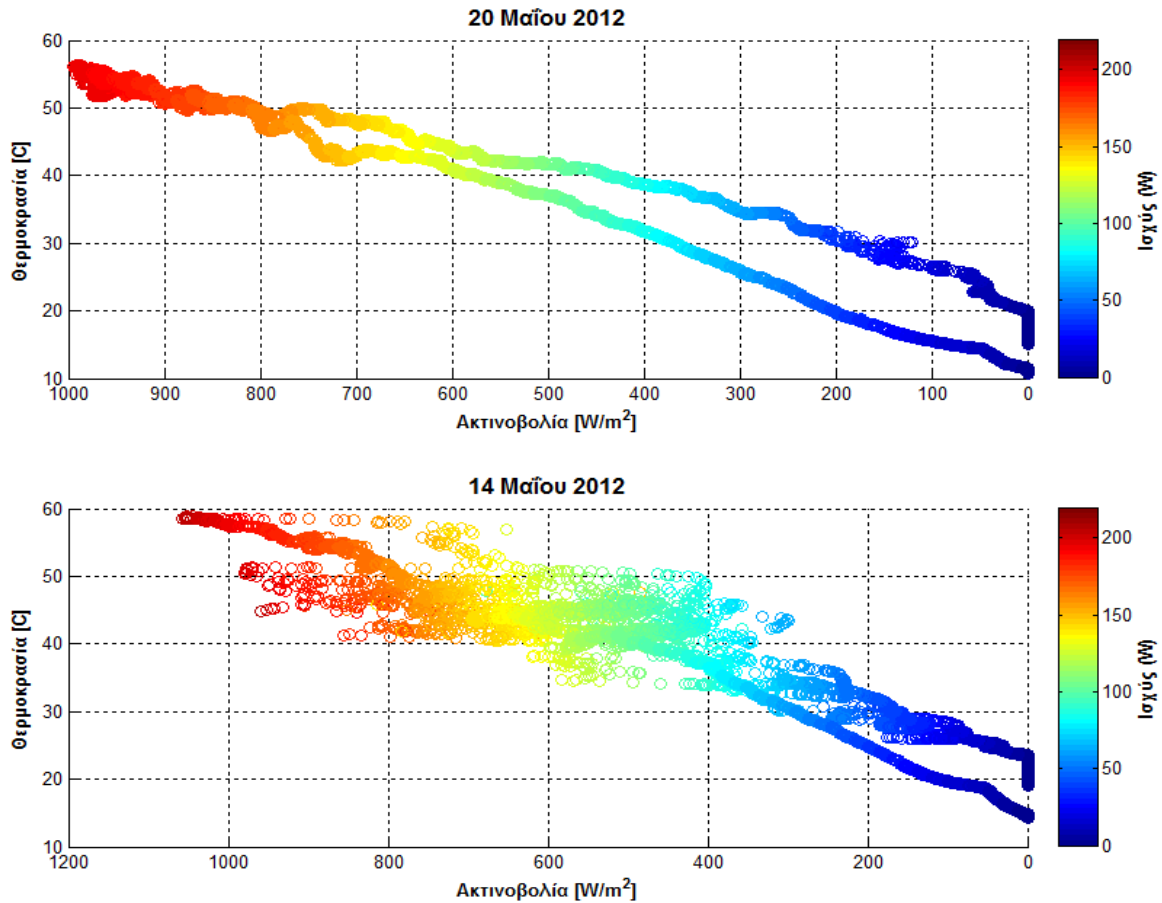
Επιπλέον, παρουσιάζονται και τα διαγράμματα αποδόσεως και ισχύος για τις τέσσερις ημέρες, συναρτήσει της θερμοκρασίας κυψέλης και της ακτινοβολίας .





Διάγραμμα 7.61 Διαγράμματα απόδοσης των τεσσάρων ημερών συναρτήσει θερμοκρασίας και ακτινοβολίας.





Διάγραμμα 7.62 Διαγράμματα ισχύος των τεσσάρων ημερών συναρτήσει θερμοκρασίας και ακτινοβολίας.

Από το **διαγράμματα 7.61** φαίνεται η διαφορά στην απόδοση κατά τους θερινούς και τους χειμερινούς μήνες, η οποία λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας είναι υψηλότερη τον Δεκέμβριο, ενώ παράλληλα φαίνεται και η απότομη αύξηση της απόδοσης που συμβαίνει κατά τις πρωινές και τις βραδινές ώρες. Από το **διάγραμμα 7.62** φαίνεται η διαφορά στη μορφή της ισχύος, όπου τον Μάιο ακολουθεί μια πιο ομαλή πορεία ,ενώ τον Δεκέμβριο παρατηρείται μια πτώση σε χαμηλές ακτινοβολίες και θερμοκρασίες μέχρι να πάρει την τελική της μορφή.

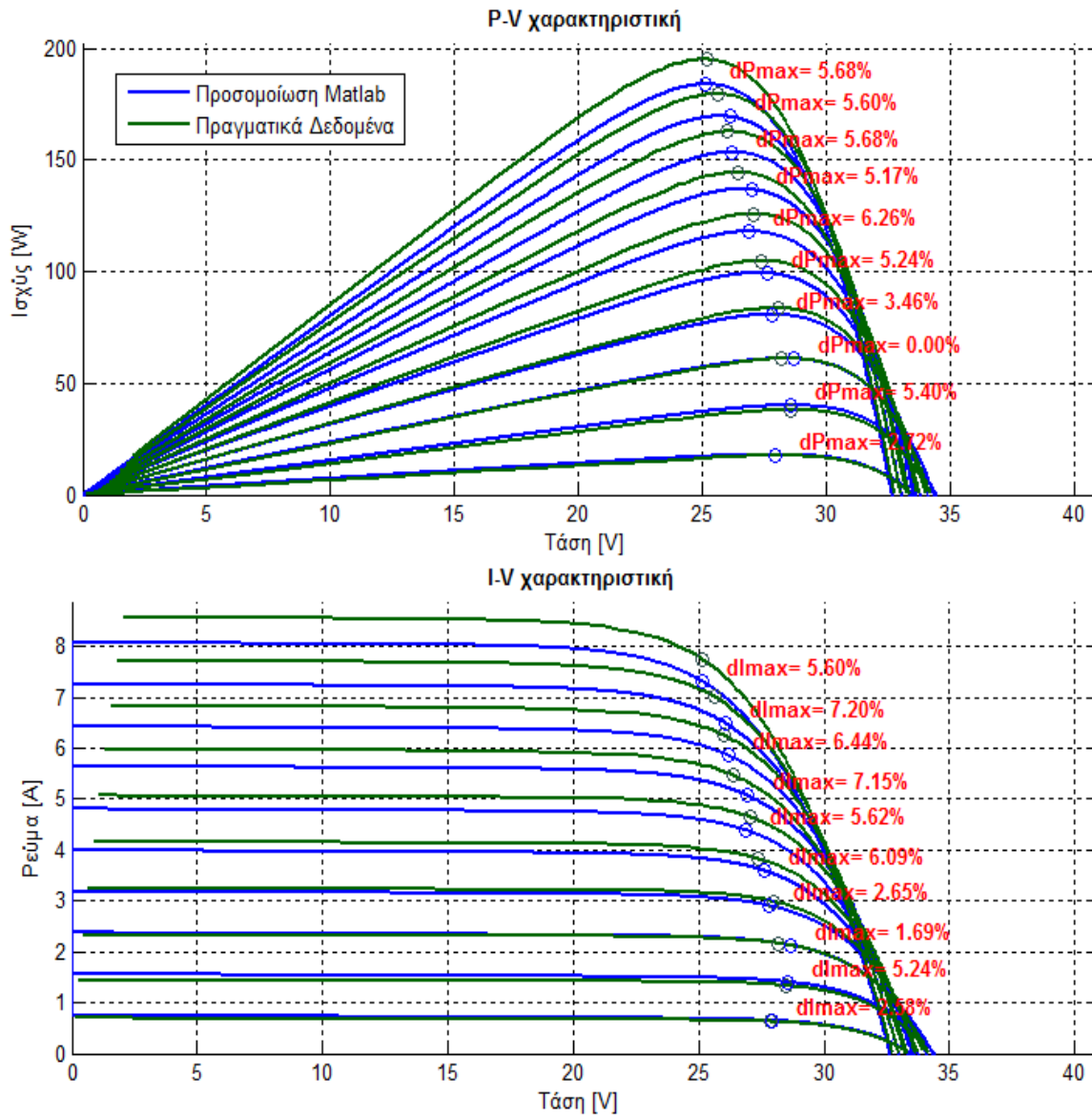
Έπειτα επιλέχθηκαν χρονικά διαστήματα από τις 20 Μαΐου, ως την πιο ηλιόλουστη ημέρα και από τις 5 Δεκεμβρίου, ως την πιο συννεφιασμένη ημέρα, με διαφορά στην ακτινοβολία περίπου $\sim 100 \text{ W/m}^2$ και συγκρίθηκαν οι πραγματικές I-V και P-V χαρακτηριστικές που προέκυψαν με τις αντίστοιχες της προσομοίωσης. Τα χρονικά διαστήματα με τις αντίστοιχες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας κυψέλης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

| | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------------------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 20 Μαΐου | Ωρα | 7:18 | 7:50 | 8:18 | 8:45 | 9:13 | 9:41 | 10:11 | 10:46 | 11:30 | 12:49 |
| | Ακτινοβολία [W/m ²] | 92 | 192 | 292 | 392 | 491 | 591 | 694 | 790 | 892 | 992 |
| | Θερμοκρασία Κυψέλης [°C] | 15.3 | 19.3 | 25.4 | 31.5 | 36.8 | 40.6 | 43.6 | 46.8 | 50.8 | 55 |
| 5 Δεκεμβρίου | Ωρα | 08:52 | 09:06 | 8:53 | 9:06 | 9:28 | 9:56 | 10:28 | 11:17 | - | - |
| | Ακτινοβολία [W/m ²] | 108 | 206 | 290 | 393 | 497 | 594 | 694 | 792 | - | - |
| | Θερμοκρασία Κυψέλης [°C] | 6.9 | 12.9 | 6.7 | 14.2 | 17.7 | 25.5 | 28.9 | 27.4 | - | - |

Πίνακας 7.2 Χρονικά διαστήματα από 5 Δεκεμβρίου και 20 Μαΐου με τις αντίστοιχες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας κυψέλης.

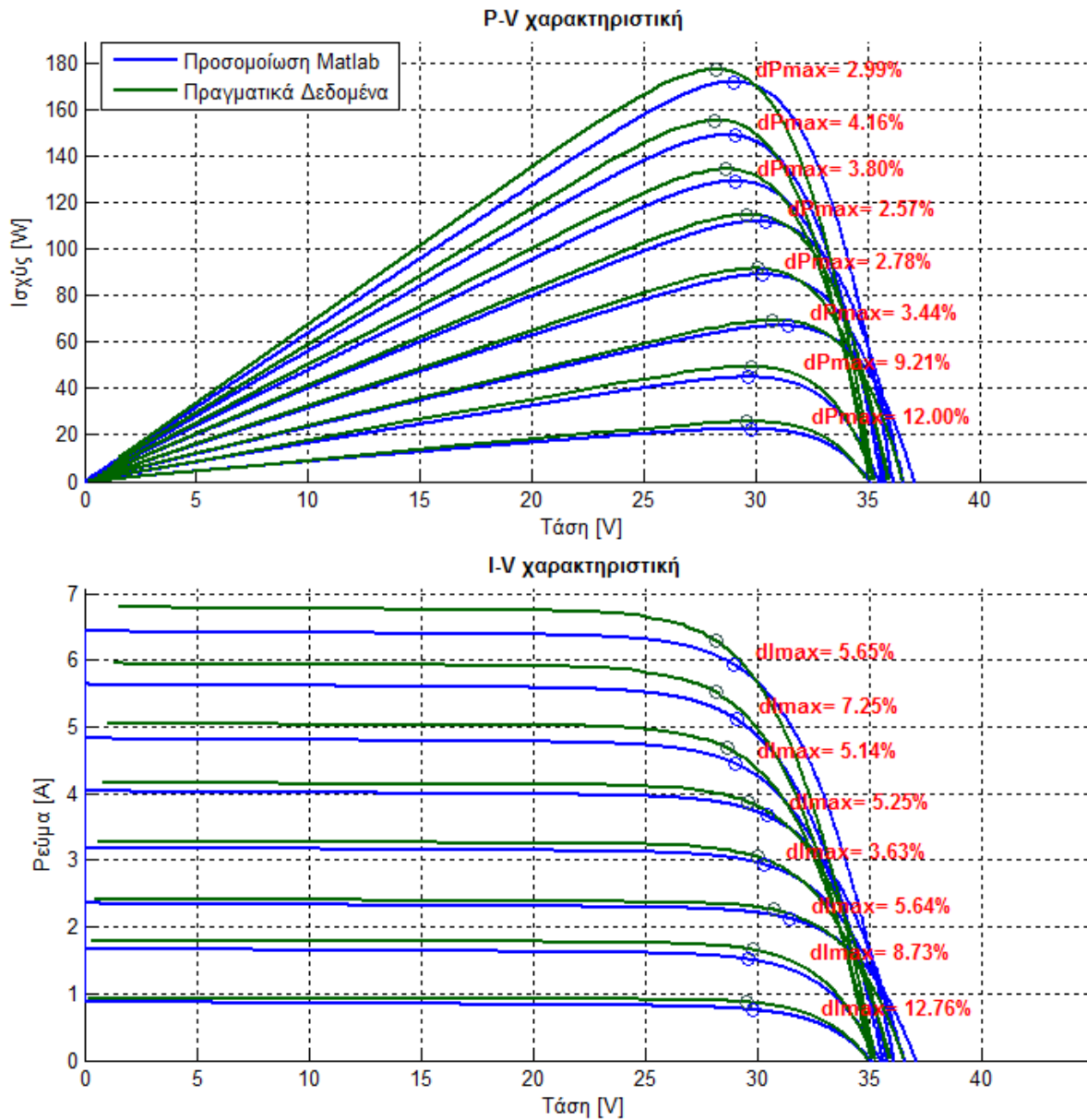
Οι I-V και P-V καμπύλες που προέκυψαν φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.

Για τις 20 Μαΐου



Διάγραμμα 7.63 I-V και P-V χαρακτηριστικές για τις 20 Μαΐου. Με μπλε κύκλους συμβολίζονται οι τιμές P_{mp} , I_{mp} , V_{mp} της προσομοίωσης, ενώ με πράσινους κύκλους οι αντίστοιχες πραγματικές τιμές.

Για τις 5 Δεκεμβρίου



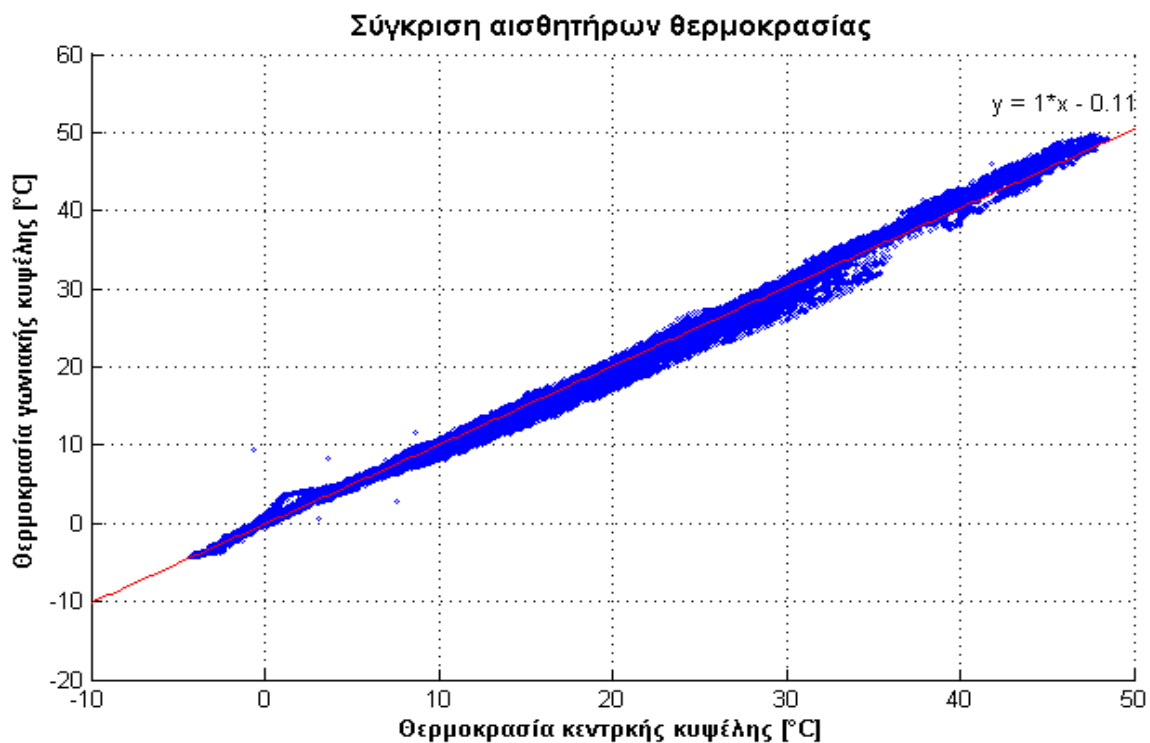
Διάγραμμα 7.64 I-V και P-V χαρακτηριστικές για τις 5 Δεκεμβρίου. Με μπλε κύκλους συμβολίζονται οι τιμές P_{mp}, I_{mp}, V_{mp} της προσομοίωσης, ενώ με πράσινους κύκλους οι αντίστοιχες πραγματικές τιμές.

Και εδώ η προσομοίωση δίνει μια πολύ καλή εικόνα της πραγματικότητας με τις καμπύλες I-V και P-V να προσεγγίζουν πολύ τις πειραματικές με αποκλίσεις στις μέγιστες τιμές τους της τάξεως του **10%** . Μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται κυρίως κατά την συννεφιασμένη ημέρα, στις 5 Δεκεμβρίου όπου η προσομοίωση παίρνει μεγαλύτερες τιμές τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} , καθώς και χαμηλότερες τιμές I_{mp}, P_{mp} σε χαμηλές ακτινοβολίες. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στον τύπο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της V_{oc} ο οποίος δεν ανταποκρίνεται το ίδιο σε αυτές τις ημέρες καθώς και στις μετρήσεις της ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις του πυρανομέτρου και όχι του πολυκρυσταλλικού αισθητήρα, ο οποίος όπως θα αποδειχθεί παρακάτω αποδίδει καλύτερα στις συννεφιασμένες ημέρες. Τέλος, παρατηρείται γενικότερα ότι σε μεγάλες τιμές ακτινοβολίας το I_{sc} προκύπτει ελαφρώς πιο αισιόδοξο απ'ότι στην πραγματικότητα.

7.14 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ

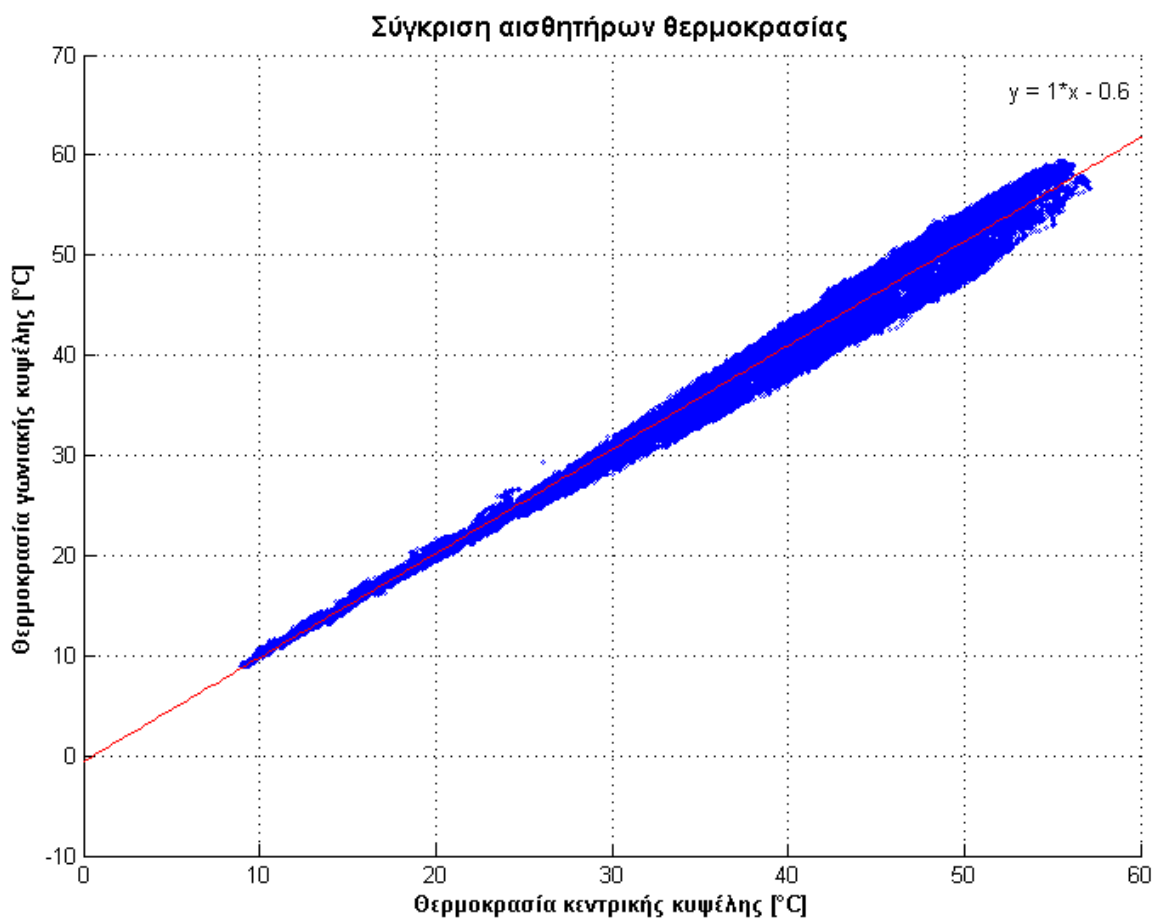
Αρχικά γίνεται σύγκριση των μετρήσεων των δύο αισθητήρων θερμοκρασίας PT1000 που τοποθετήθηκαν ένας στη γωνία και ένας στο κέντρο του πλαισίου αντίστοιχα. Επιλέγοντας ένα ηλιόλουστο μήνα (Μάιο) και ένα συννεφιασμένου (Φεβρουάριο) προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα.

Για τον Φεβρουάριο



Διάγραμμα 7.65 Συγκριτικό διάγραμμα αισθητήρων θερμοκρασίας κυψέλης για τον Φεβρουάριο του 2012.

Για το Μάιο

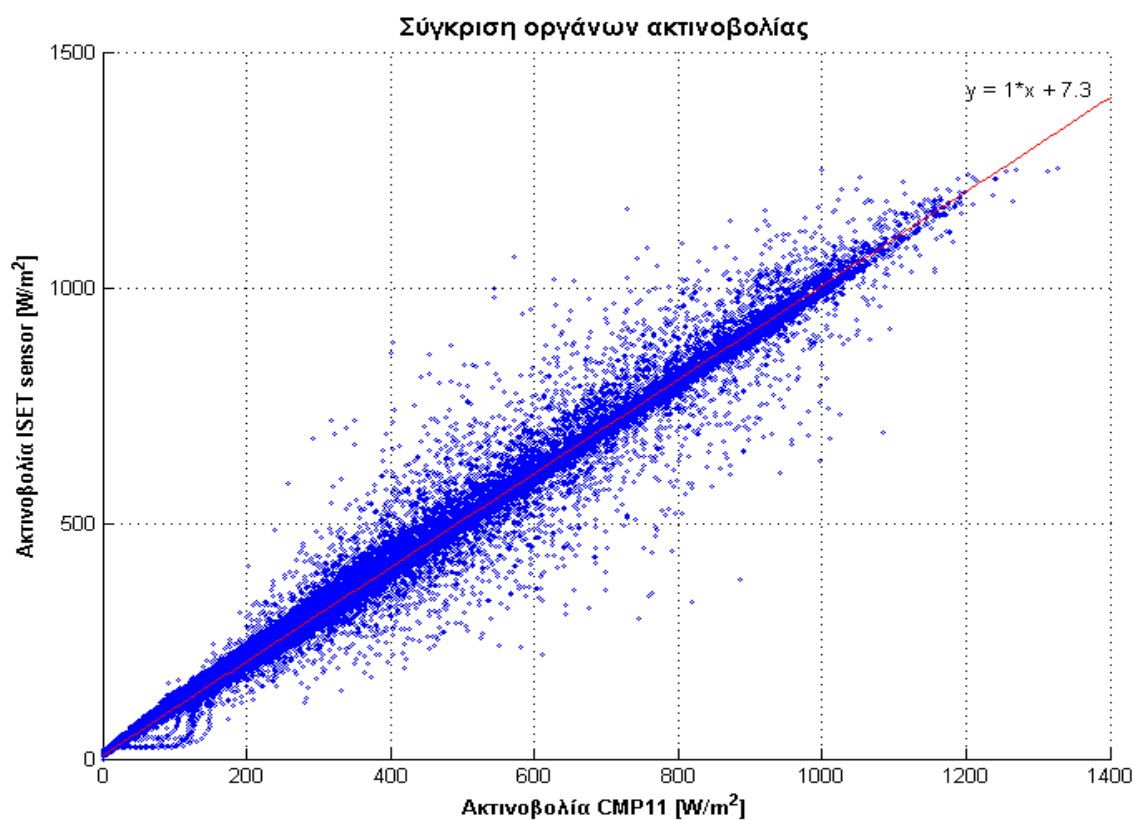


Διάγραμμα 7.66 Συγκριτικό διάγραμμα αισθητήρων θερμοκρασίας κυψέλης για το Μάιο του 2012.

Άρα τόσο σε συννεφιασμένους όσο και σε ηλιόλουστους μήνες η διαφορά θερμοκρασίας που κατέγραφαν οι δύο αισθητήρες δεν ήταν τόσο μεγάλη, με τον αισθητήρα που βρίσκονταν στο κέντρο του πλαισίου να δίνει πιο υψηλές θερμοκρασίες. Οι θερμοκρασία της γωνιακής κυψέλης παρουσιάζει μικρότερες τιμές καθώς ψύχονταν περισσότερο σε σχέση με την κεντρική κυψέλη. Ωστόσο, οι μετρήσεις του κεντρικού αισθητήρα θεωρούνται πιο αξιόπιστες, καθώς τα φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου τείνουν να έχουν πιο ομαλή κατανομή της θερμοκρασίας τους στο κέντρο.

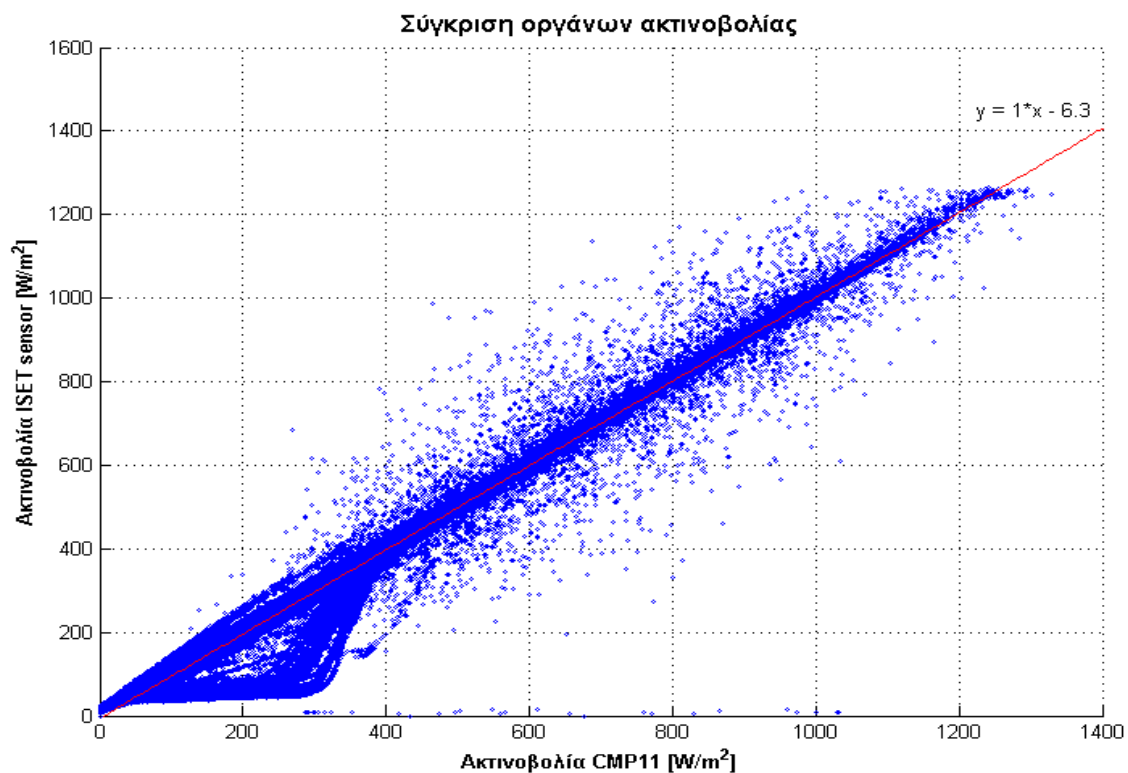
Έπειτα γίνεται σύγκριση της ακτινοβολίας που κατέγραφε το πυρανόμετρο και ο πολύκρυσταλλικός αισθητήρας

Για τον Φεβρουάριο



Διάγραμμα 7.67 Συγκριτικό διάγραμμα οργάνων καταγραφής της ακτινοβολίας για το Φεβρουάριο του 2012.

Για το Μάιο

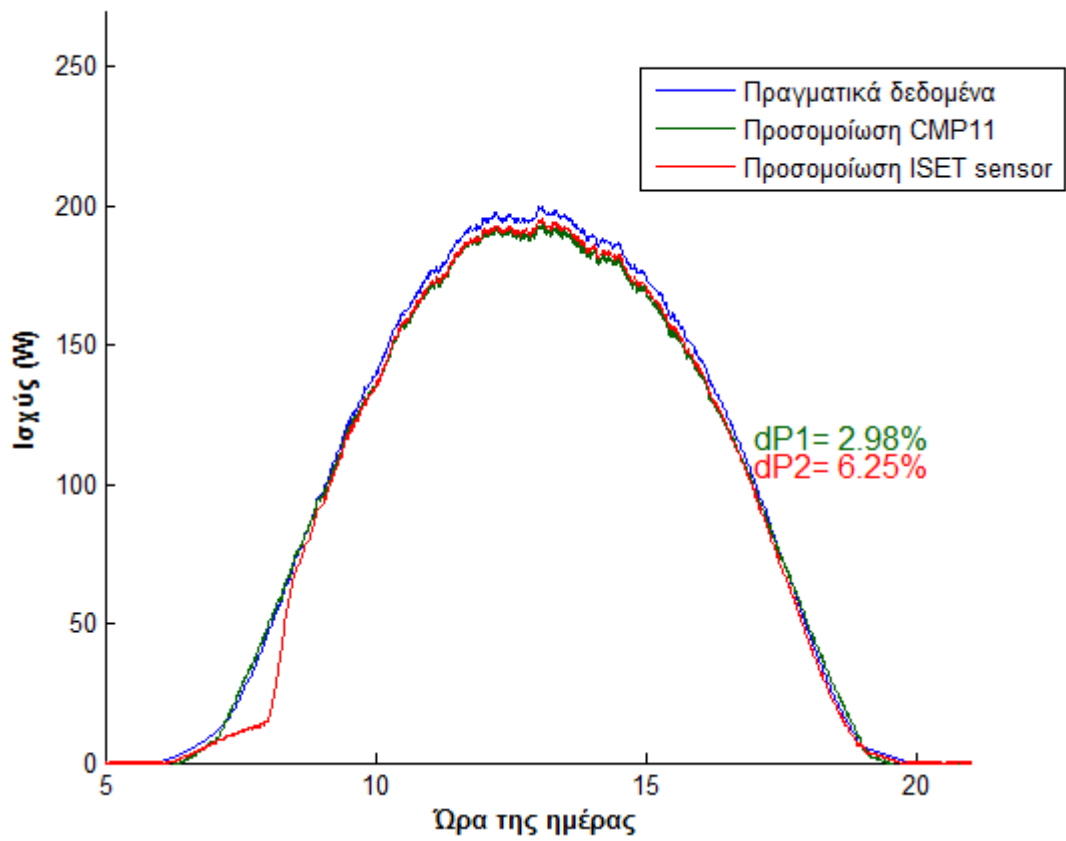


Διάγραμμα 7.68 Συγκριτικό διάγραμμα οργάνων καταγραφής της ακτινοβολίας για το Μάιο του 2012.

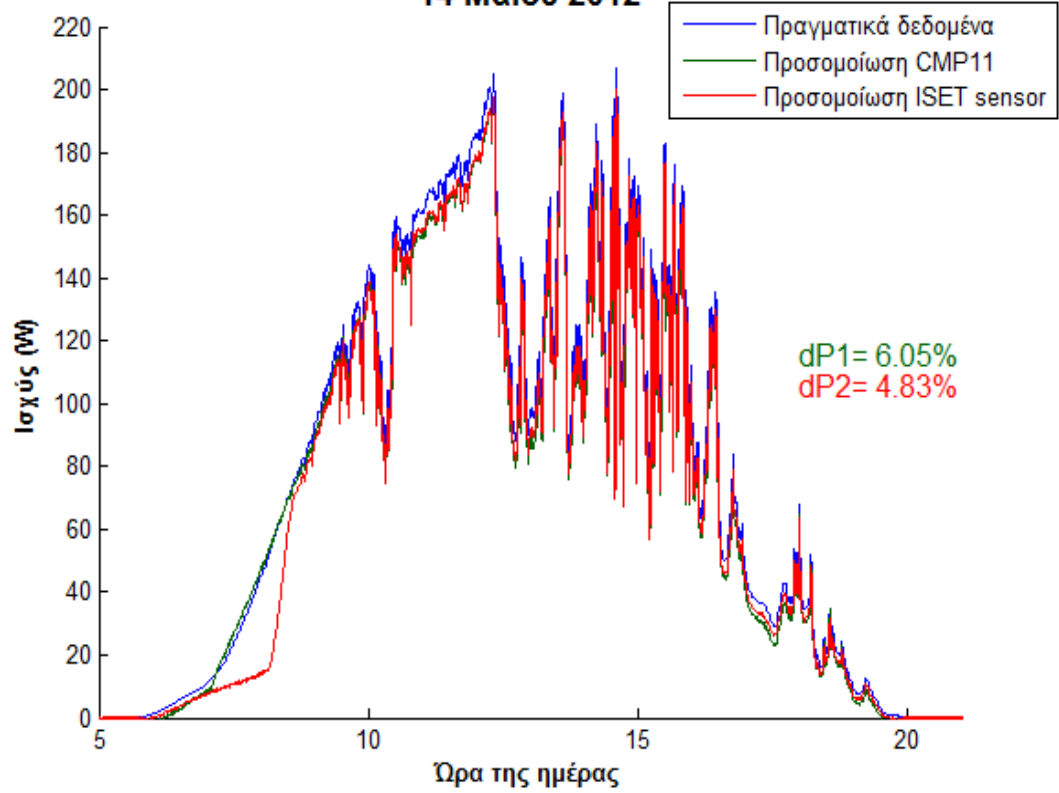
Από τα **διαγράμματα 7.67 και 7.68** γίνεται φανερή η επίδραση της συννεφιάς στις μετρήσεις του πυρανομέτρου. Έτσι, ενώ τον Μάιο που ήταν ένας κατά βάση ηλιόλουστος μήνας το πυρανόμετρο κατέγραφε πιο ακριβείς τιμές στην ακτινοβολία από τον πολυκρυσταλλικό αισθητήρα, τον Φεβρουάριο ο πολυκρυσταλλικός αισθητήρας παρουσίασε μεγαλύτερη ακρίβεια. Η παραπάνω διαφορά οφείλεται στον τρόπο λειτουργίας του πυρανομέτρου, ο οποίος βασίζεται στην διαφορά θερμοκρασίας του θόλου και του περιβάλλοντος. Έτσι, όταν ένα σύννεφο ξεκινάει να καλύψει τον Ήλιο ή όταν ο Ήλιος ξεπροβάλλει πίσω από ένα σύννεφο, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο θα δεχτεί ξαφνικά μια μεγάλη ποσότητα ακτινοβολίας την οποία ο πολυκρυσταλλικός αισθητήρας θα προλάβει να καταγράψει ενώ το πυρανόμετρο θα αργήσει να την αντιληφθεί λόγω της αργής μεταβολής στην θερμοκρασία. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **“φαινόμενο παρυφής σύννεφου”** (cloud edge effect) και είναι το ίδιο φαινόμενο που προκαλεί και τις μεγάλες τιμές στην απόδοση που εμφανίστηκαν σε προηγούμενα διαγράμματα.

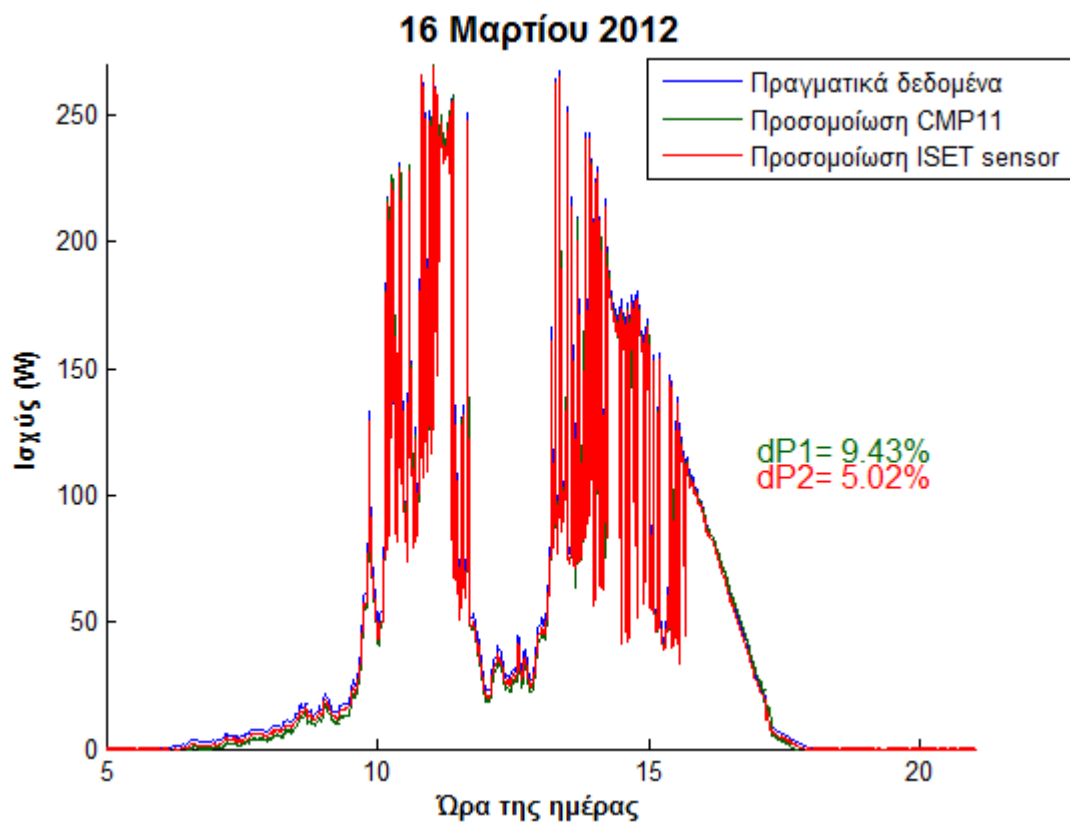
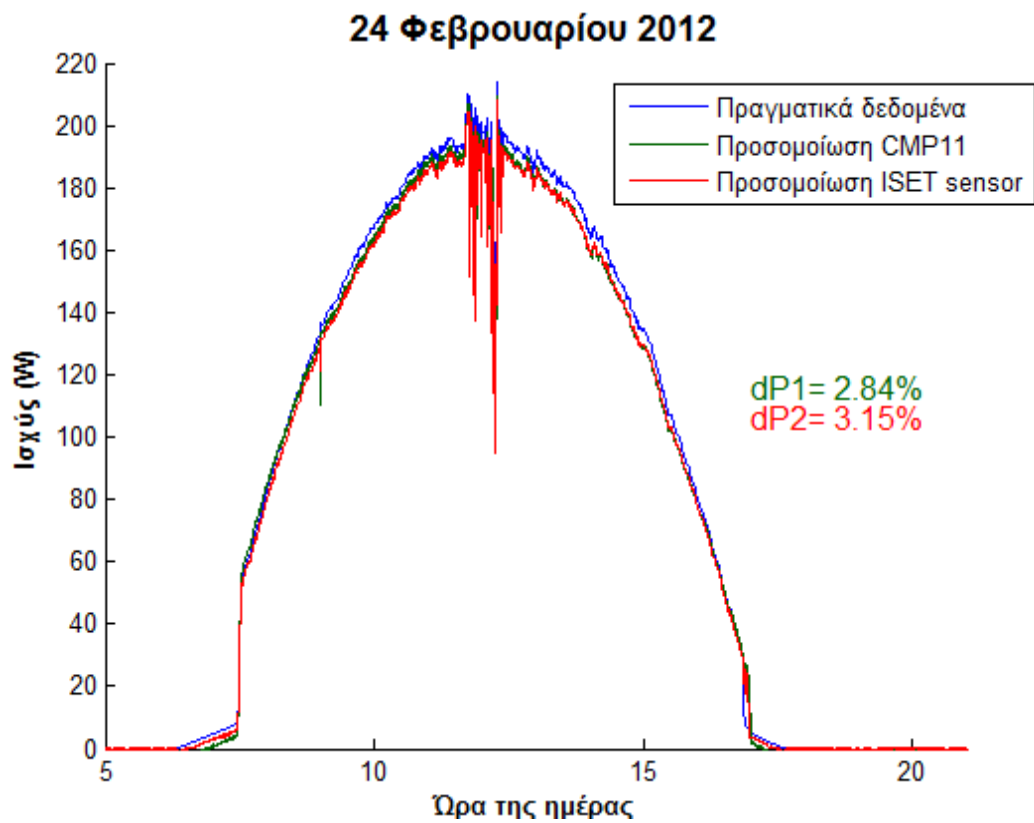
Για να φανεί καλύτερα η διαφορά στην ακρίβεια μεταξύ των δύο οργάνων, επιλέχθηκαν κάποιες συννεφιασμένες και κάποιες ηλιόλουστες ημέρες και συγκρίθηκαν τα διαγράμματα ισχύος μεταξύ πραγματικών μετρήσεων και προσομοίωσης, επιλέγοντας παράλληλα σαν ακτινοβολία εισόδου αυτή του CMP11 και του ISET sensor. Τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω επιβεβαιώνουν το πλεονέκτημα του πυρανομέτρου CMP11 σε ηλιόλουστες ημέρες και το αντίστοιχο πλεονέκτημα του ISET sensor στις συννεφιασμένες ημέρες.

2 Μαΐου 2012



14 Μαΐου 2012

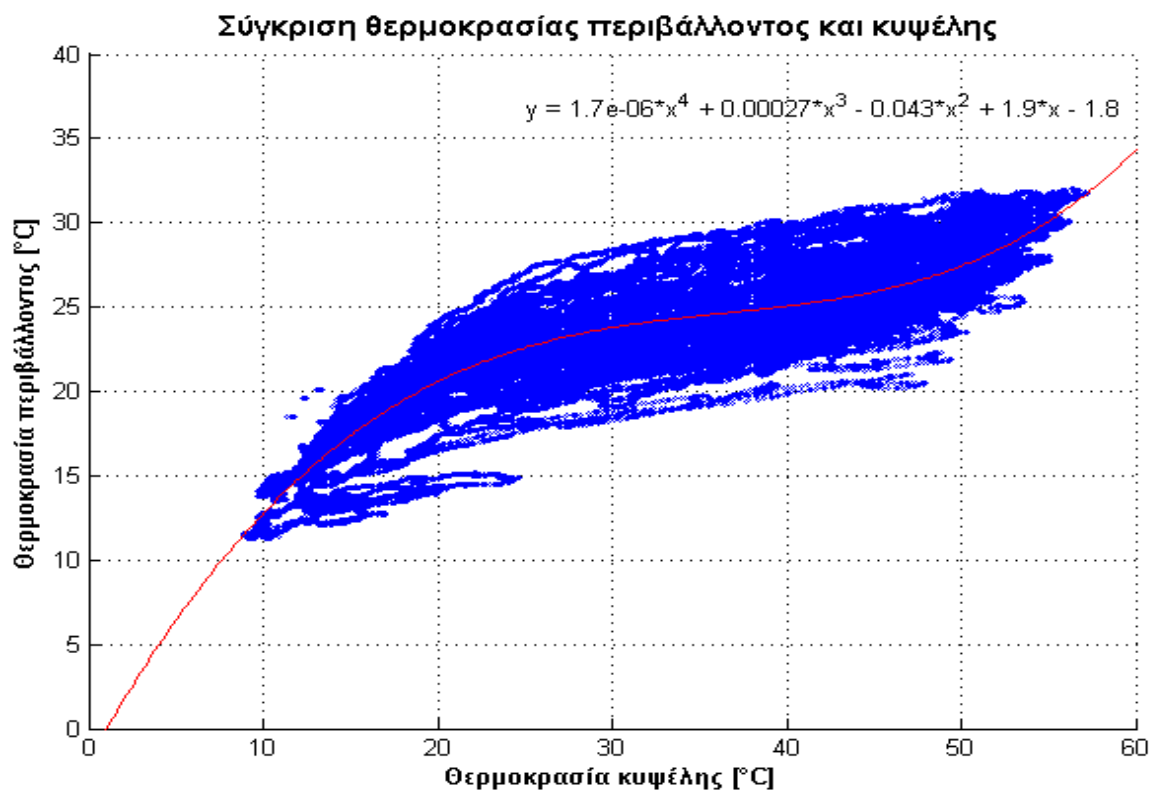




Διάγραμμα 7.69 Συγκριτικό διάγραμμα απόδοσης μεταξύ μετρήσεων και προσομοίωσης για τυχαίες ημέρες του 2012 με μετρήσεις ακτινοβολίας από CMP11 και ISET sensor.

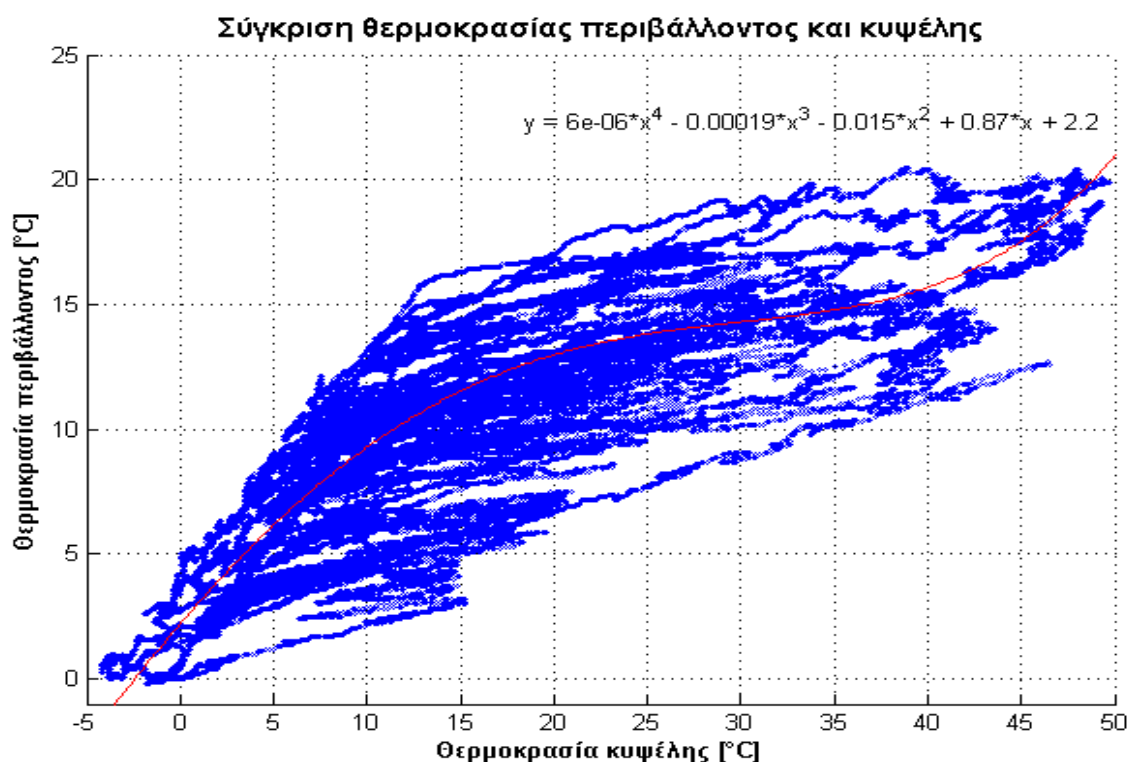
Τέλος, γίνεται και σύγκριση μεταξύ θερμοκρασίας περιβάλλοντος και θερμοκρασίας πλαισίου (κεντρικός αισθητήρας), πάλι για τους δύο μήνες Φεβρουάριο και Μάιο, ώστε να προκύψει η σχέση που συνδέει τις δύο αυτές τιμές.

Για το Μάιο



Διάγραμμα 7.70 Συγκριτικό διάγραμμα θερμοκρασίας περιβάλλοντος και κυψέλης για το Μάιο του 2012.

Για τον Φεβρουάριο



Διάγραμμα 7.71 Συγκριτικό διάγραμμα θερμοκρασίας περιβάλλοντος και κυψέλης για το Φεβρουάριο του 2012.

Δίνοντας τώρα διάφορες τιμές στην θερμοκρασία κυψέλης και αντικαθιστώντας στις παραπάνω τεταρτοβάθμιες εξισώσεις προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος, οι οποίες καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα

| | Θερμοκρασία κυψέλης [°C] | Θερμοκρασία περιβάλλοντος [°C] | | Θερμοκρασία κυψέλης [°C] | Θερμοκρασία περιβάλλοντος [°C] |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΑΪΟΥ | 5 | 6.4 | ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ | 5 | 6.2 |
| | 10 | 12.8 | | 10 | 9.3 |
| | 15 | 17.4 | | 15 | 11.5 |
| | 20 | 20.6 | | 20 | 13.0 |
| | 25 | 22.6 | | 25 | 13.8 |
| | 30 | 23.8 | | 30 | 14.3 |
| | 35 | 24.5 | | 35 | 14.8 |
| | 40 | 25.1 | | 40 | 15.7 |
| | 45 | 25.9 | | 45 | 17.5 |
| | 50 | 27.4 | | 50 | 21.0 |
| | 55 | 30.1 | | 55 | 26.7 |
| | 60 | 34.3 | | 60 | 35.4 |

Πίνακας 7.3 Θερμοκρασία περιβάλλοντος για διάφορες τιμές θερμοκρασίας κυψέλης για τους μήνες Φεβρουάριο και Μάιο του 2012.

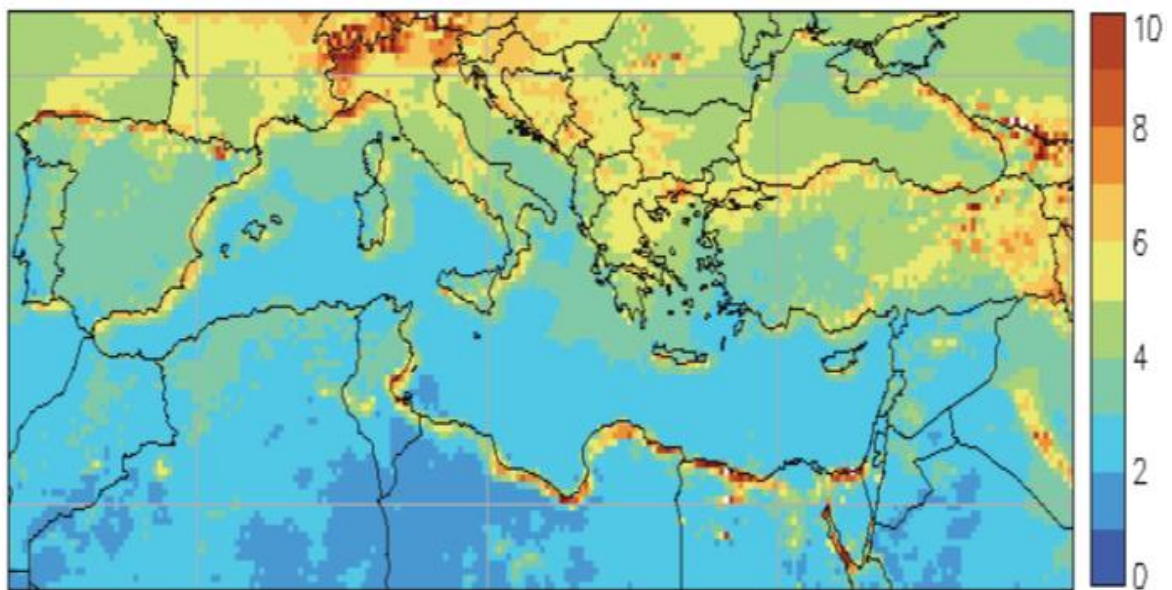
Από τον **πίνακα 7.3** εξετάζοντας μαζί τις τιμές του Μαΐου και του Φεβρουαρίου προκύπτει πως η μέση διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας περιβάλλοντος και θερμοκρασίας πλαισίου

είναι 13°C. Ενώ η μεγαλύτερη διαφορά που παρατηρήθηκε είναι τον Φεβρουάριο, όπου για θερμοκρασία κυψέλης 50°C, η αντίστοιχη τιμή θερμοκρασίας περιβάλλοντος προέκυψε 21°C, δηλαδή διαφορά 29 °C.

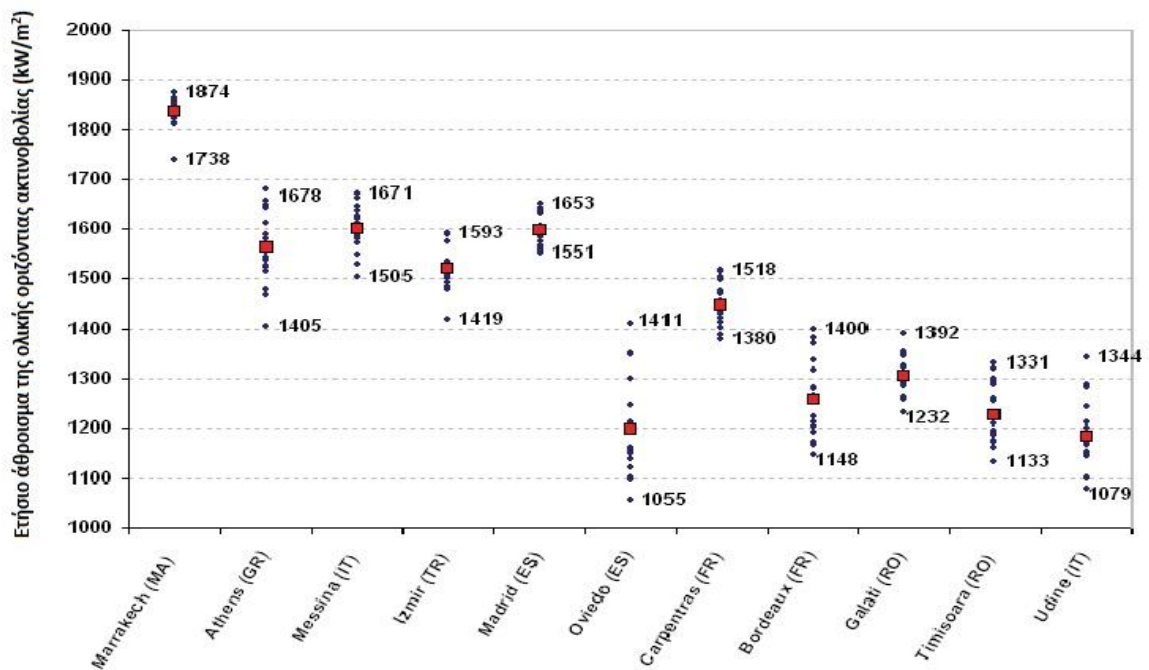
7.15 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Σε όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και ο παράγοντας της αβεβαιότητας. Η αβεβαιότητα προκύπτει τόσο από ανακρίβειες του μετρητικού εξοπλισμού και της δοκιμαστικής διάταξης, όσο και από τις ετήσιες διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, οι ετήσιες διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας αξίζει να ληφθούν υπόψιν σε μελέτες όπου χρησιμοποιούνται οι μακροχρόνιοι μέσοι όροι της ακτινοβολίας, ως μέσα πρόβλεψης της ενεργειακής παραγωγής του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Εδώ, οι μετρήσεις της ακτινοβολίας προέκυπταν κατευθείαν από το πυρανόμετρο, οπότε (για λόγους πληρότητας) θα γίνει μια απλή αναφορά στην διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας της Αθήνας, χωρίς όμως να χρησιμοποιηθούν έπειτα τα αποτελέσματα στον υπολογισμό της συνολικής αβεβαιότητας.

Για τη μελέτη της διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας, έγινε χρήση των διαγραμμάτων τυπικής απόκλισης των ετήσιων μέσων όρων, ως μια ένδειξη της γενικής μεταβλητότητας της ηλιακής πηγής ενέργειας για 18 έτη σε διάφορες περιοχές **σχήμα 7.14**. Έτσι, προκύπτει ότι στο ξηρό κλίμα της βόρειας Αφρικής και της Μέσης Ανατολής, η ετήσια μεταβλητότητα είναι πολύ χαμηλή, με την τυπική απόκλιση να μην υπερβαίνει το 4%. Παρόμοια καιρική σταθερότητα μπορεί να παρατηρηθεί, όμως και σε μεγάλα μέρη της Ευρώπης όπως και στην Ελλάδα, με την τυπική απόκλιση να βρίσκεται μεταξύ 4% και 6%, ενώ ο υψηλότερος βαθμός μεταβλητότητας (μέχρι 10%) έχει εντοπιστεί κατά μήκος των ακτών, και στα βουνά. Η κατανομή των ετήσιων μέσων όρων παρουσιάζεται αναλυτικότερα στην **εικόνα 7.14** για 11 διαφορετικές πόλεις. Τα αποτελέσματα για την περίοδο των 18 ετών δείχνουν ότι η τυπική απόκλιση δεν δίνει πάντα σωστή εντύπωση για τα πιθανά καιρικά φαινόμενα. Η διασπορά των ετήσιων τιμών με το χρόνο δεν κατανέμεται πάντα συμμετρικά με το μακροπρόθεσμο μέσο όρο.

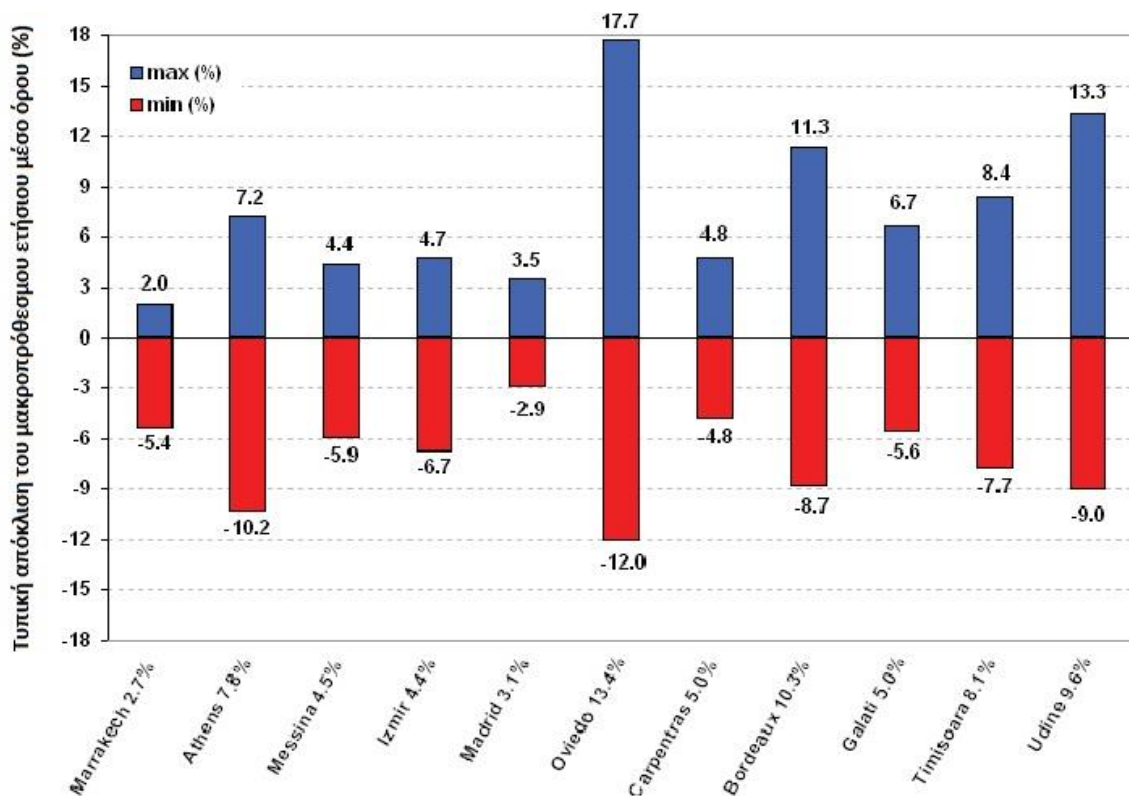


Σχήμα 7.13 Τυπική απόκλιση (%) των ετήσιων αθροισμάτων της ολικής οριζόντιας ακτινοβολίας (έτη 1985, 1987, και 1989-2004).



Σχήμα 7.14 Κατανομή των ετήσιων αθροισμάτων της ολικής οριζόντιας ακτινοβολίας (kWh/m²) γύρω από τους μακροπρόθεσμους μέσους όρους σε 11 περιοχές (έτη 1985, 1987, και 1989-2004).

Το **σχήμα 7.15** δείχνει ότι οι μετρήσεις των ετών με τη χαμηλότερη ή την υψηλότερη ακτινοβολία μπορούν να προϋδεάσουν για τις πληροφορίες που λαμβάνονται από την τυπική απόκλιση. Παραδείγματος χάριν, το πιο ηλιόλουστο έτος στην Ελλάδα (Αθήνα: τυπική απόκλιση 7.8%) ήταν 7.2% επάνω από το μακροπρόθεσμο μέσο όρο, ενώ στο "χειρότερο" έτος ο ετήσιος ηλιακός πόρος ήταν 10.2% κάτω. Αν και το ποσό ηλιοφάνειας στην Ούντινε (Ιταλία: τυπική απόκλιση 9.6%) στο καλύτερο έτος υπερέβη την απόκλιση του χειρότερου έτους περισσότερο από 4%, συνέβαινε συχνότερα το ετήσιο άθροισμα να είναι κάτω του μακροπρόθεσμου μέσου όρου (10 από τις 18 φορές).



Σχήμα 7.15 Σχετική διαφορά των ετών με το χαμηλότερο και υψηλότερο άθροισμα ολικής οριζόντιας ακτινοβολίας σε σχέση με τους μακροπρόθεσμους μέσους. Για σύγκριση, φαίνεται και η σχετική τυπική απόκλιση μετά από το όνομα κάθε πόλης.

Η συνολική αβεβαιότητα των μετρήσεων προκύπτει από τον πίνακα 7.3

| | | |
|---------------------------------------------|-------|---------------------------------------|
| Καλιμπράρισμα πλαισίου^[1] | ±2.5% | Για πλαίσια τεχνολογίας c-Si |
| SOL.Connect Center | <1% | Συνθήκες STC |
| Θερμοκρασία πλαισίου | ±0.5% | PT 1000 |
| Θερμοκρασία περιβάλλοντος | ±1.2% | NRG 110S |
| Απόκλιση P_{max} | ±2.5% | 214.5 ≤ P _{max} ≤ 225.5 |
| Αβεβαιότητα πυρανομέτρου | <2% | CMP11 |
| Απώλειες λόγω ακαθαρσιών | 0.4% | Κυρίως λόγω σκόνης |
| Συνολική αβεβαιότητα | 4.4% | $U^2 = u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2$ |

Πίνακας 7.4 Παράγοντες αβεβαιότητας μετρήσεων.

Η συνολική αβεβαιότητα υπολογίζεται από τον τύπο $U^2 = 2.5^2 + 1^2 + 0.5^2 + 1.2^2 + 2.5^2 + 2^2 + 0.4^2 = 19.35 \rightarrow$
 $U = 4.3988\%$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΙΣΧΥΟΣ 220W

8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός του παραπάνω πειράματος ήταν η κατασκευή ενός χειροποίητου πολυκρυσταλλικού πλαισίου με χαρακτηριστικά που να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο αυτά του πλαισίου SE220 της Silcio.

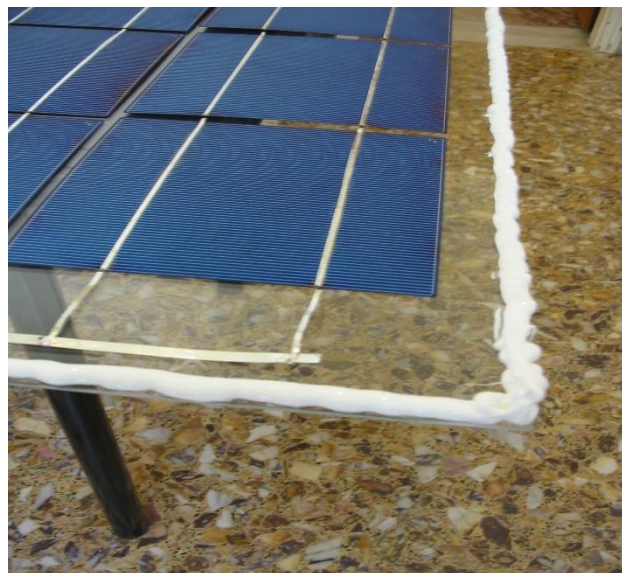
8.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Στο χώρο του εργαστηρίου πραγματοποιήθηκε κατασκευή φωτοβολταϊκού πλαισίου από πολυκρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου, οι οποίες προμηθεύτηκαν από την Silcio, ώστε να έχουν όσο το δυνατόν παραπλήσια συμπεριφορά με αυτές του πλαισίου SE220. Η κάθε κυψέλη έχει τάση λειτουργίας 0.485 V και το φωτοβολταϊκό κατασκευάστηκε από 60 κυψέλες ούτως ώστε να έχει συνολική τάση εξόδου $V=29.12$ Volt, οι κυψέλες που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο **σχήμα 8.1**.



Σχήμα 8.1 Φωτογραφία από τις 60 πολυκρυσταλλικές κυψέλες πριν την κατασκευή του πλαισίου.

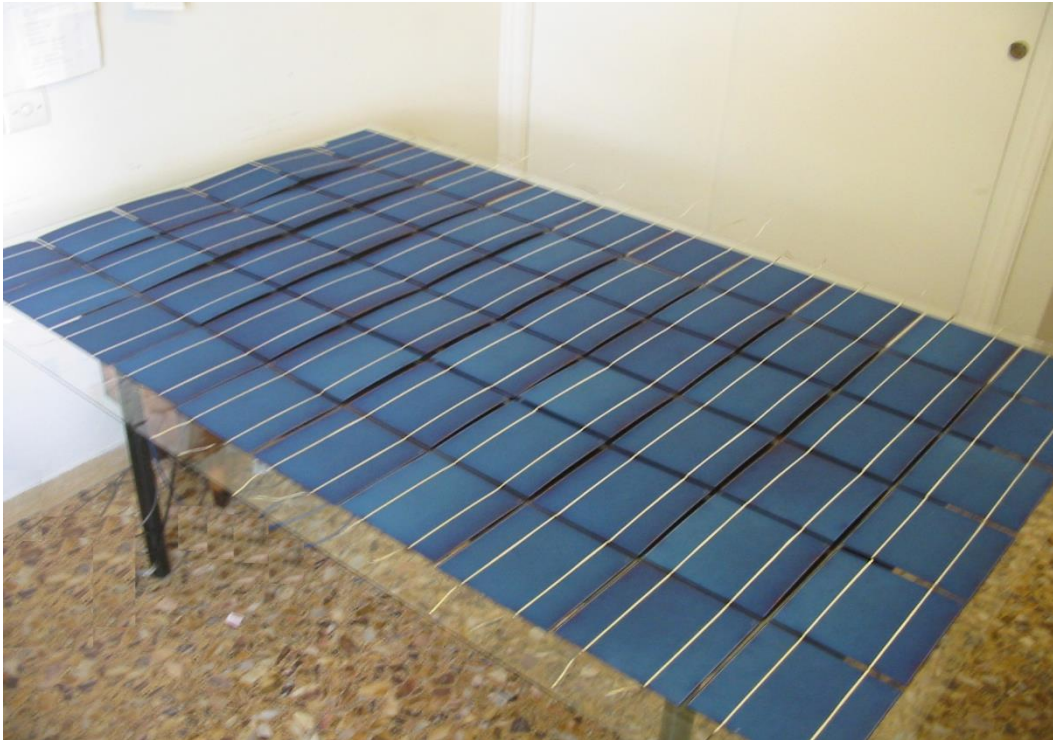
Στο πρώτο στάδιο της κατασκευής οι κυψέλες κολλήθηκαν με κολλητήρι 120W πολύ προσεκτικά σε σειρά και έπειτα τοποθετήθηκαν και κολλήθηκαν με σιλικόνη πάνω σε γυαλί όπως φαίνεται στο **σχήμα 8.2**.



Σχήμα 8.2 Φωτογραφία από τις εν σειρά συνδεδεμένες κυψέλες.

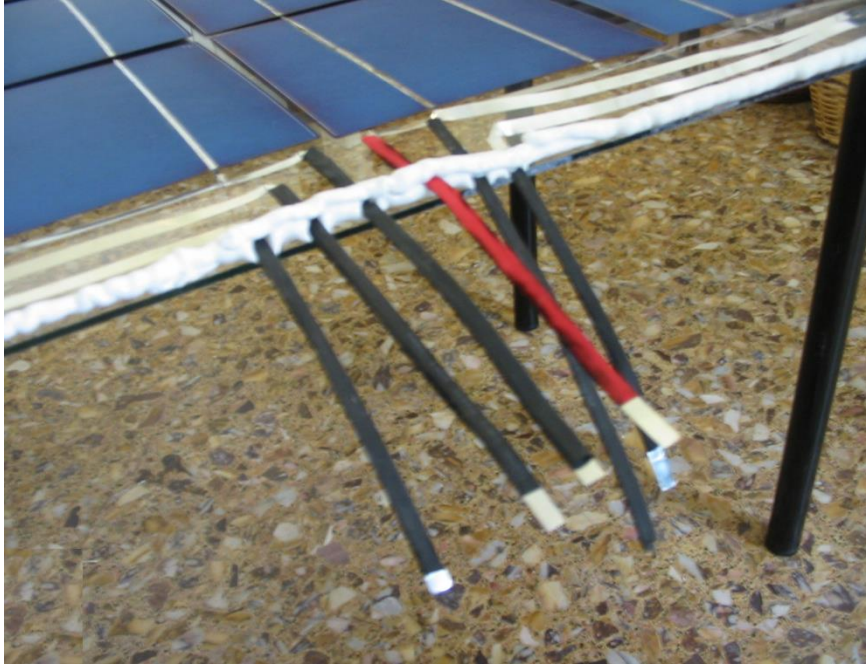
Εδώ να σημειωθεί ότι κατά την τοποθέτηση των κυψελών προέκυψε ένα ατύχημα, καθώς δύο από τις κυψέλες θρυμματίστηκαν ελαφρώς στην άκρη.

Έπειτα από αναμονή μερικών λεπτών ώστε να κολλήσουν οι κυψέλες στο γυαλί, περάστηκε σιλικόνη γύρω από το φωτοβολταϊκό για να κολληθεί στο πάνω μέρος του φ/β γυαλί και να μονωθούν οι κυψέλες. Ο λόγος που τοποθετήθηκε γυαλί είναι για να μειωθεί η αντανάκλαση των εισερχόμενων ακτίνων του ήλιου, αυξάνοντας έτσι την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως και 5%. Μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα του πλαισίου με τις κυψέλες κολλημένες και τοποθετημένες στο διπλό γυαλί φαίνεται στο **σχήμα 8.3**



Σχήμα 8.3 Φωτογραφία από τις εν σειρά συνδεδεμένες κυψέλες επάνω στο γυαλί.

Τέλος, το πλαίσιο καλύφθηκε από γωνίες αλουμινίου γύρω γύρω και συνδέθηκαν οι ακροδέκτες του πλαισίου με διόδους ελεύθερης διέλευσης Shottky ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο hot spot, το οποίο έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 5. Η συνδεσμολογία των κυψελών με τις διόδους παράκαμψης πραγματοποιήθηκε όπως φαίνεται στο **σχήμα 8.4**.



Σχήμα 8.4 Φωτογραφία από τους ακροδέκτες πριν την τοποθέτηση των διόδων Shottky.

Η τελική εικόνα του πλαισίου έπειτα από την εγκατάστασή του στην ταράτσα του εργαστηρίου ΣΗΕ φαίνεται στο **σχήμα 8.5**.



Σχήμα 8.5 Φωτογραφία από την εγκατάσταση του πλαισίου στην ταράτσα του εργαστηρίου ΣΗΕ.

Ενώ στο **σχήμα 8.6** παρατίθεται μια φωτογραφία στην οποία τα δύο πλαίσια έχουν τοποθετηθεί το ένα δίπλα στο άλλο, ώστε να γίνουν φανερές οι διαφορές των διαστάσεων μεταξύ του εργοστασιακού και του χειροποίητου πλαισίου.



Σχήμα 8.6 Φωτογραφία των δύο πλαισίων, τοποθετημένων το ένα πλάι στο άλλο.

Συγκρίνοντας τις διαστάσεις των δύο πλαισίων, γίνεται φανερή η διαφορά στο πλάτος που παρουσιάζει το χειροποίητο πλαίσιο σε σχέση με το βιομηχανικό. Η διαφορά αυτή οφείλεται αφενός μεν στα μεγαλύτερα κενά μεταξύ των κυψελών αλλά και στις διόδους παράκαμψης οι οποίες τοποθετήθηκαν στο πλαϊνό τμήμα του πλαισίου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παρακάτω φαίνεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στο matlab Simulink για την κατασκευή του εσωτερικού της μάσκας του φωτοβολταϊκού μοντέλου.

```
BlockName=gcb;

% Τεχνικά χαρακτηριστικά έτοιμων φωτοβολταϊκών πλαισίων
%=====
%
Type=1;
Module_Spec (Type) .Desc= 'Kyocera KD135GX-LP';           % Τύπος
πλαισίου
Module_Spec (Type) .T= 'Πολυκρυσταλλικό';               % Τύπος
πυριτίου
Module_Spec (Type) .Ns= 36;                               % Αριθμός
κυψελών σε σειρά
Module_Spec (Type) .Pmp= 135.044;                         % Μέγιστη
ισχύς (W)
Module_Spec (Type) .Vmp= 17.7;                           % Μέγιστη
τάση (V)
Module_Spec (Type) .Imp= 7.62959;                         % Μέγιστο
Ρεύμα (A)
Module_Spec (Type) .Voc= 22.0999;                        % Τάση
ανοιχτοκύκλωσης (V)
Module_Spec (Type) .Isc= 8.36955;                         % Ρεύμα
βραχυκύκλωσης (A)
Module_Spec (Type) .L=1.5;                                % Μήκος ΦΒ
πλαισίου (m)
Module_Spec (Type) .W=0.668;                              % Πλάτος
ΦΒ πλαισίου (m)
Module_Spec (Type) .S=1.5*0.668;                         % Εμβαδόν
ΦΒ πλαισίου (m2)
Module_Spec (Type) .Ki= 5.022e-003;                      %
Θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης (A/deg.C)
Module_Spec (Type) .Kv= -8.000e-002;                    %
Θερμοκρασιακός συντελεστής τάσεως ανοιχτοκύκλωσης (V/deg.C)
Module_Spec (Type) .Rs= 0.10593;                          %
Αντίσταση σειράς ΦΒ πλαισίου (ohms)
Module_Spec (Type) .Rsh= 142.84;                          %
Παράλληλη αντίσταση ΦΒ πλαισίου (ohms)
Module_Spec (Type) .B=1.5;                                %
Παράγοντας ιδανικότητας
%-----
-----%
```

```

Type=2;
Module_Spec (Type) .Desc= 'Kyocera KD205GX-LP';
Module_Spec (Type) .T= 'Πολυκρυσταλλικό';
Module_Spec (Type) .Ns= 54;
Module_Spec (Type) .Pmp= 205.075;
Module_Spec (Type) .Vmp= 26.6;
Module_Spec (Type) .Imp= 7.70959;
Module_Spec (Type) .Voc= 33.1999;
Module_Spec (Type) .Isc= 8.35955;
Module_Spec (Type) .L=1.5;
Module_Spec (Type) .W=0.99;
Module_Spec (Type) .S=1.5*0.99;
Module_Spec (Type) .Ki= 5.016e-003;
Module_Spec (Type) .Kv= -1.200e-001;
Module_Spec (Type) .Rs= 0.15943;
Module_Spec (Type) .Rsh= 931.61;
Module_Spec (Type) .B=1.5;
%-----%
-----%

Type=3;
Module_Spec (Type) .Desc= 'Mitsubishi PV-UD190MF5';
Module_Spec (Type) .T= 'Πολυκρυσταλλικό';
Module_Spec (Type) .Ns= 50;
Module_Spec (Type) .Pmp= 190.503;
Module_Spec (Type) .Vmp= 24.6999;
Module_Spec (Type) .Imp= 7.71272;
Module_Spec (Type) .Voc= 30.8006;
Module_Spec (Type) .Isc= 8.23289;
Module_Spec (Type) .L=1.6581;
Module_Spec (Type) .W=0.834;
Module_Spec (Type) .S=1.6581*0.834;
Module_Spec (Type) .Ki= 4.446e-003;
Module_Spec (Type) .Kv= -1.050e-001;
Module_Spec (Type) .Rs= 0.14743;
Module_Spec (Type) .Rsh= 1982.4;
Module_Spec (Type) .B=1.5;
%-----%
-----%

Type=4;
Module_Spec (Type) .Desc= 'Sanyo HIP-225HDE1';
Module_Spec (Type) .T= 'Μονοκρυσταλλικό';
Module_Spec (Type) .Ns= 60;
Module_Spec (Type) .Pmp= 224.899;
Module_Spec (Type) .Vmp= 33.9;
Module_Spec (Type) .Imp= 6.63419;
Module_Spec (Type) .Voc= 41.7984;
Module_Spec (Type) .Isc= 7.13383;
Module_Spec (Type) .L=1.610;
Module_Spec (Type) .W=0.861;
Module_Spec (Type) .S=1.610*0.861;
Module_Spec (Type) .Ki= 2.140e-003;

```

```

Module_Spec (Type) .Kv= -1.050e-001;
Module_Spec (Type) .Rs= 0.24713;
Module_Spec (Type) .Rsh= 1215.2;
Module_Spec (Type) .B=1.5;
%-----%
-----%
Type=5;
Module_Spec (Type) .Desc= 'SunPower SPR-305-WHT';
Module_Spec (Type) .T= 'Μονοκρυσταλλικό';
Module_Spec (Type) .Ns= 96;
Module_Spec (Type) .Pmp= 305.2;
Module_Spec (Type) .Vmp= 54.70;
Module_Spec (Type) .Imp= 5.58;
Module_Spec (Type) .Voc= 64.20;
Module_Spec (Type) .Isc= 5.96;
Module_Spec (Type) .L=1.5606;
Module_Spec (Type) .W=1.0455;
Module_Spec (Type) .S=1.5606*1.0455;
Module_Spec (Type) .Ki= 3.516e-003;
Module_Spec (Type) .Kv= -1.770e-001;
Module_Spec (Type) .Rs= 0.0380;
Module_Spec (Type) .Rsh= 993.5;
Module_Spec (Type) .B=1.3;
%-----%
-----%
Type=6;
Module_Spec (Type) .Desc= 'Suntech STP270S-24_Vb';
Module_Spec (Type) .T= 'Μονοκρυσταλλικό';
Module_Spec (Type) .Ns= 72;
Module_Spec (Type) .Pmp= 269.843;
Module_Spec (Type) .Vmp= 35;
Module_Spec (Type) .Imp= 7.70979;
Module_Spec (Type) .Voc= 44.4999;
Module_Spec (Type) .Isc= 8.19978;
Module_Spec (Type) .L=1.956;
Module_Spec (Type) .W=0.992;
Module_Spec (Type) .S=1.956*0.992;
Module_Spec (Type) .Ki= 4.969e-003;
Module_Spec (Type) .Kv= -1.504e-001;
Module_Spec (Type) .Rs= 0.32042;
Module_Spec (Type) .Rsh= 3363.6;
Module_Spec (Type) .B=1.5;
%-----%
-----%
Type=7;
Module_Spec (Type) .Desc= 'Canadian Solar CS5P-220M';
Module_Spec (Type) .T= 'Μονοκρυσταλλικό';
Module_Spec (Type) .Ns= 96;
Module_Spec (Type) .Pmp= 219.72;
Module_Spec (Type) .Vmp= 48.3159;
Module_Spec (Type) .Imp= 4.54758;

```

```

Module_Spec (Type) .Voc= 59.2618;
Module_Spec (Type) .Isc= 5.09261;
Module_Spec (Type) .L=1.602;
Module_Spec (Type) .W=1.061;
Module_Spec (Type) .S=1.602*1.061;
Module_Spec (Type) .Ki= 2.022e-003;
Module_Spec (Type) .Kv= -2.170e-001;
Module_Spec (Type) .Rs= 0.24806;
Module_Spec (Type) .Rsh= 235.76;
Module_Spec (Type) .B=1.5;
%-----%
-----%
Type=8;
Module_Spec (Type) .Desc= 'BP Solar SX3190';
Module_Spec (Type) .T= 'Πολυκρυσταλλικό';
Module_Spec (Type) .Ns= 50;
Module_Spec (Type) .Pmp= 190.258;
Module_Spec (Type) .Vmp= 24.3003;
Module_Spec (Type) .Imp= 7.82945;
Module_Spec (Type) .Voc= 30.6021;
Module_Spec (Type) .Isc= 8.51029;
Module_Spec (Type) .L=1.680;
Module_Spec (Type) .W=0.837;
Module_Spec (Type) .S=1.680*0.837;
Module_Spec (Type) .Ki= 5.532e-003;
Module_Spec (Type) .Kv= -1.110e-001;
Module_Spec (Type) .Rs= 0.17514;
Module_Spec (Type) .Rsh= 766.69;
Module_Spec (Type) .B=1.5;
%-----%
-----%
Type=9;
Module_Spec (Type) .Desc= 'First Solar FS-272';
Module_Spec (Type) .T= 'Λεπτού υμενίου CdTe';
Module_Spec (Type) .Ns= 116;
Module_Spec (Type) .Pmp= 71.326;
Module_Spec (Type) .Vmp= 70.558;
Module_Spec (Type) .Imp= 1.01088;
Module_Spec (Type) .Voc= 94.5738;
Module_Spec (Type) .Isc= 1.18103;
Module_Spec (Type) .L=1.2;
Module_Spec (Type) .W=0.06;
Module_Spec (Type) .S=1.2*0.06;
Module_Spec (Type) .Ki= 5.433e-004;
Module_Spec (Type) .Kv= -2.690e-001;
Module_Spec (Type) .Rs= 9.1791;
Module_Spec (Type) .Rsh= 877.05;
Module_Spec (Type) .B=2;
%-----%
-----%

```

```

Type=10;
Module_Spec (Type) .Desc= 'SunPower 128-cell Module';
Module_Spec (Type) .T= 'Μονοκρυσταλλικό';
Module_Spec (Type) .Ns= 128;
Module_Spec (Type) .Pmp= 400.048;
Module_Spec (Type) .Vmp= 72.8992;
Module_Spec (Type) .Imp= 5.48769;
Module_Spec (Type) .Voc= 85.2983;
Module_Spec (Type) .Isc= 5.8675;
Module_Spec (Type) .L=2.067;
Module_Spec (Type) .W=1.046;
Module_Spec (Type) .S=2.067*1.046;
Module_Spec (Type) .Ki= 1.837e-003;
Module_Spec (Type) .Kv= -2.664e-001;
Module_Spec (Type) .Rs= 0.12264;
Module_Spec (Type) .Rsh= 859.93;
Module_Spec (Type) .B=1.2;

```

```

%-----%
-----%

```

```

Type=11;
Module_Spec (Type) .Desc= 'SunForte PM318B00';
Module_Spec (Type) .T= 'Μονοκρυσταλλικό';
Module_Spec (Type) .Ns= 96;
Module_Spec (Type) .Pmp= 318,354;
Module_Spec (Type) .Vmp= 54.7;
Module_Spec (Type) .Imp= 5.82;
Module_Spec (Type) .Voc= 64.7;
Module_Spec (Type) .Isc= 6.2;
Module_Spec (Type) .L=1.559;
Module_Spec (Type) .W=1.046;
Module_Spec (Type) .S=1.559*1.046;
Module_Spec (Type) .Ki= 0.0006;
Module_Spec (Type) .Kv= -1.050e-001;
Module_Spec (Type) .Rs= 0.21;
Module_Spec (Type) .Rsh= 846.214;
Module_Spec (Type) .B=1.2;

```

```

%-----%
-----%

```

```

Type=12;
Module_Spec (Type) .Desc= 'Silcio SE 220';
Module_Spec (Type) .T= 'Πολυκρυσταλλικό';
Module_Spec (Type) .Ns= 60;
Module_Spec (Type) .Pmp= 220.15;
Module_Spec (Type) .Vmp= 29.12;
Module_Spec (Type) .Imp= 7.56;
Module_Spec (Type) .Voc= 36.94;
Module_Spec (Type) .Isc= 8.12;
Module_Spec (Type) .L=1.654;
Module_Spec (Type) .W=0.993;
Module_Spec (Type) .S=1.654*0.993;
Module_Spec (Type) .Ki= 0.00053;

```



```

Module_Spec(Type).Kv= -0.29;
Module_Spec(Type).Rs= 0.29;
Module_Spec(Type).Rsh= 459.17 ;
Module_Spec(Type).B=1.3;
%-----
-----
Type=13;
Module_Spec(Type).Desc= 'Ideal';
Module_Spec(Type).T= 'Ιδανικό';
Module_Spec(Type).Ns= 1;
Module_Spec(Type).Pmp= 0.9863;
Module_Spec(Type).Vmp= 0.517;
Module_Spec(Type).Imp= 1.9;
Module_Spec(Type).Voc= 0.596;
Module_Spec(Type).Isc= 2;
Module_Spec(Type).L=0.1;
Module_Spec(Type).W=0.01;
Module_Spec(Type).S=0.1*0.01;
Module_Spec(Type).Ki= 0.003;
Module_Spec(Type).Kv= -0.03;
Module_Spec(Type).Rs= 0.0000001;
Module_Spec(Type).Rsh= 10000000;
Module_Spec(Type).B=1;
%-----
-----%

Type=strmatch(ModuleType,char(Module_Spec.Desc));

k= 1.3806503e-23;           % Σταθερά Boltzmann (J.K^-1)
q= 1.60217646e-19;       % Φορτίο ηλεκτρονίου (C)
Tref= 25+273.15;         % Θερμοκρασία αναφοράς (K)
Vt=(k*B*Ns)/q;           % Θερμική τάση (mV)

% Αν επιλεχθεί από το χρήστη να εισάγει στοιχεία από τα έτοιμα
πλαίσια
if etoima_plaisia

% Ανάθεση τιμών στις μεταβλητές
Nser=1;
Npar=1;
T=Module_Spec(Type).T;
Ns=Module_Spec(Type).Ns;
Pmp=Module_Spec(Type).Pmp;
Vmp=Module_Spec(Type).Vmp;
Imp=Module_Spec(Type).Imp;
Voc=Module_Spec(Type).Voc;
Isc=Module_Spec(Type).Isc;
L=Module_Spec(Type).L;
W=Module_Spec(Type).W;

```

```

S=Module_Spec (Type) .S;
Ki=Module_Spec (Type) .Ki;
Kv=Module_Spec (Type) .Kv;
Rs=Module_Spec (Type) .Rs;
Rsh=Module_Spec (Type) .Rsh;
B=Module_Spec (Type) .B;

% Πέρασμα κάποιων παραμέτρων στη βάση του matlab για μετέπειτα
χρήση
assignin('base','Voc',Voc);
assignin('base','Isc',Isc);
assignin('base','Pmp',Pmp);
assignin('base','Vmp',Vmp);
assignin('base','Imp',Imp);

% Ανλθαθεση τιμών στην μάσκα του συστήματος
set_param(BlockName,'T',char(T));
set_param(BlockName,'Ns',num2str(Ns));
set_param(BlockName,'Nser',num2str(Nser));
set_param(BlockName,'Npar',num2str(Npar));

str=sprintf('[ %g, %g ]',Voc,Isc);
set_param(BlockName,'ModuleParameters',str);

str=sprintf('[ %g, %g, %g ]',Pmp,Vmp,Imp);
set_param(BlockName,'ModulemaxParameters',str);

str=sprintf('[ %g, %g, %g ]',L,W,S);
set_param(BlockName,'ModulesizeParameters',str);

str=sprintf('[ %g, %g, %g, %g]',Rs,Rsh,Ki,Kv);
set_param(BlockName,'ModelParameters',str);

set_param(BlockName,'B',num2str(B));

% Αν επιλεχθεί από το χρήστη να εισάγει δικά του στοιχεία
πλαισίων
else

% Πέρασμα τιμών στον παράγοντα ιδανικότητας ανάλογα με την
τεχνολογία της κυψέλης που θα επιλεγεί από το χρήστη

C=get_param(gcf,'A');
switch C
case 'Ιδανικό'
B=1;

```

```

% Εμφάνιση νεων μεταβλητιών στη μάσκα
set_param(gcb, 'MaskEnables', {'on';'off';'off';'on';'on';'on';'
on';'on';'on';'on';'on';'off';'on';'on';'on';'on';'on';'on';})
;

    case 'Μονοκρυσταλλικό'
    B=1.2;

set_param(gcb, 'MaskEnables', {'on';'off';'off';'on';'on';'on';'
on';'on';'on';'on';'on';'off';'on';'on';'on';'on';'on';'on';})
;

    case 'Πολυκρυσταλλικό'
    B=1.5;

set_param(gcb, 'MaskEnables', {'on';'off';'off';'on';'on';'on';'
on';'on';'on';'on';'on';'off';'on';'on';'on';'on';'on';'on';})
;

    case 'Υδρογονωμένο άμορφο πυρίτιο'
    B=3.3;

set_param(gcb, 'MaskEnables', {'on';'off';'off';'on';'on';'on';'
on';'on';'on';'on';'on';'off';'on';'on';'on';'on';'on';'on';})
;

    case 'Τελλουριούχο κάδμιο CdTe'
    B=2;

set_param(gcb, 'MaskEnables', {'on';'off';'off';'on';'on';'on';'
on';'on';'on';'on';'on';'off';'on';'on';'on';'on';'on';'on';})
;

    case 'Δισεληνοϊνδιδιούχος χαλκός CIS'
    B=1.5;

set_param(gcb, 'MaskEnables', {'on';'off';'off';'on';'on';'on';'
on';'on';'on';'on';'on';'off';'on';'on';'on';'on';'on';'on';})
;

otherwise

set_param(gcb, 'MaskVisibilities', {'on';'off';'off';'on';'on';'
on';'on';'on';'on';'on';'on';'on';'on';'off';'off';'off';'on';
'on';});

set_param(gcb, 'MaskEnables', {'on';'off';'off';'on';'on';'on';'
on';'on';'on';'on';'on';'on';'on';'on';'on';'on';'on';'on';})
;

end

Voc=ModuleParameters(1);
Isc=ModuleParameters(2);

```

```

Pmp=ModulemaxParameters(1);
Vmp=ModulemaxParameters(2);
Imp=ModulemaxParameters(3);

L=ModulesizeParameters(1);
W=ModulesizeParameters(2);
S=ModulesizeParameters(3);

Rs=ModelParameters(1);
Rsh=ModelParameters(2);
Ki=ModelParameters(3);
Kv=ModelParameters(4);

set_param(BlockName, 'B', num2str(B));

Rsinc=0.01;
tol=0.01;
nv=5;
str=sprintf('[ %g, %g, %g ]',Rsinc,tol,nv);
set_param(BlockName, 'limits',str);

assignin('base', 'Voc',Voc);
assignin('base', 'Isc',Isc);
assignin('base', 'Pmp',Pmp);
assignin('base', 'Vmp',Vmp);
assignin('base', 'Imp',Imp);

if find_Rs_Rsh

set_param(gcb, 'MaskVisibilities', {'on';'off';'off';'on';'on';'
on';'on';'on';'on';'on';'on';'on';'on';'on';'on';'on';'on';
'});

% Το μοντέλο προσαρμόζεται στις ονομαστικές τιμές
Gn=1000;
Tn=25+273.12;
T = Tn;
G = Gn;
Vta = k * T *B/ q; % Θερμική τάση συναρτήσει της τρέχουσας
θερμοκρασίας
Pmax_e=Vmp*Imp;

Rsinc=limits(1);
tol=limits(2);
nv=limits(3);

str=sprintf('[ %g, %g, %g ]',Rsinc,tol,nv);
set_param(BlockName, 'limits',str);

```

```

Rs_max = (Voc - Vmp) / Imp;
Rp_min = Vmp / (Isc - Imp) - Rs_max;

% Αρχικές υποθέσεις για Rsh και Rs
Rsn = 0;
Rp = Rp_min;
% Αρχικό άπειρο σφάλμα για να εκτελεστεί ο βρόχος
perror = Inf;

% Επαναληπτικός βρόχος για την εύρεση των Rs και Rp εως ότου
Pmax, μοντέλου = Pmax, κατασκευαστή

ni = 0;

while (perror > tol) && (Rp > 0)

ni = ni + 1;

% Επίδραση θερμοκρασίας και ακτινοβολίας στο ρεύμα
dT = T - Tn;
Ipn = (Rsn + Rp) / Rp * Isc; % Ονομαστική τιμή
φωτορεύματος
Ipn = (Ipn + Ki * dT) * G / Gn; % Πραγματική τιμή
φωτορεύματος
Io = Isc / (exp(Voc / Vta / Ns) - 1); % Τιμή αναστροφής ρεύματος
κόρου

% Αύξηση της Rs
Rsn = Rsn + Rsinc;

Rp_ = Rp;

Rp = Vmp * (Vmp + Imp * Rsn) / (Vmp * Ipn -
Vmp * Io * exp((Vmp + Imp * Rsn) / Vta / Ns) + Vmp * Io - Pmax_e);

% Επίλυση της εξίσωσης I-V για διάφορα ζεύγη (V, I)
clear V
clear I

V = 0 : Voc / nv : Voc; % Διάνυσμα τάσης
I = zeros(1, size(V, 2)); % Διάνυσμα ρεύματος

for j = 1 : size(V, 2) % Υπολογισμός για όλες τις τάσεις

% Επίλυση της g = I - f(I, V) = 0 με χρήση της μεθόδου Newton-
Raphson

g(j) = Ipn - Io * (exp((V(j) + I(j) * Rsn) / Vta / Ns) - 1) -
(V(j) + I(j) * Rsn) / Rp - I(j);

```

```

while (abs(g(j)) > 0.001)

g(j) = Ipv-Io*(exp((V(j)+I(j)*Rsn)/Vta/Ns)-1) -
(V(j)+I(j)*Rsn)/Rp-I(j);
glin(j) = -Io*(Rsn/Vta/Ns*exp((V(j)+I(j)*Rsn)/Vta/Ns)-1) -
Rsn/Rp-1;      % Παράγωγος της g ως προς το ρεύμα I

I_(j) = I(j) - g(j)/glin(j);
I(j) = I_(j);

end

end % Τέλος του βρόχου for j = 1 : size(V,2)

% Υπολογισμός της ισχύος με χρήση της εξίσωσης I-V
P = (Ipv-Io*(exp((V+I.*Rsn)/Vta/Ns)-1) - (V+I.*Rsn)/Rp) .*V;

Pmax_m = max(P); % Εύρεση της μέγιστης κάθε φορά τιμής
ισχύος

perror = (Pmax_m-Pmax_e); % Σύγκριση με την ονομαστική και
υπολογισμός του σφάλματος

if plot_Rs_Rsh      % Ενεργοποιείται αν επιλεγθεί απο το χρήστη
να γίνει γραφική αναπαράσταση της διαδικασίας κατά τον
υπολογισμό των Rs και Rsh

% Σχεδίαση των P-V και I-V καμπυλών
hold on;
% I-V καμπύλη
figure(1)
set(gcf,'color','w')
grid on
hold on
title('I-V καμπύλη - Εύρεση βέλτιστων Rs και
Rsh','FontSize',14);
xlabel('V [V]','FontSize',12);
ylabel('I [A]','FontSize',12);
xlim([0 Voc*1.1]);
ylim([0 Isc*1.1]);

% Σχεδίαση της I-V καμπύλης
plot(V,I,'LineWidth',2,'Color',rgb('DarkGreen'))

% Σχεδίαση των 'σημείων αναφοράς' Voc,Isc,Vmp και Imp
plot([0 Vmp Voc],[Isc Imp 0], 'o','LineWidth',3,
'MarkerSize',8,'Color','k')

strValues(1) = strtrim(cellstr(num2str([Rsn],'Rs= %0.2f')));

```

```

strValues(2) = strtrim(cellstr(num2str([Rp], 'Rsh= %0.2f')));
text(Voc-5, Isc-1, strValues, 'VerticalAlignment', 'bottom',
'color', 'k', 'FontSize', 12, 'BackgroundColor', [.7 .9 .7]);

% P-V καμπύλη
figure(2)
set(gcf, 'color', 'w')
grid on
hold on
title('P-V καμπύλη - Ρύθμιση μέγιστης ισχύος
Pmp', 'FontSize', 14);
xlabel('V [V]', 'FontSize', 12);
ylabel('P [W]', 'FontSize', 12);
xlim([0 Voc*1.1])
ylim([0 Vmp*Imp*1.1]);

% Σχεδίαση της P-V καμπύλης
plot(V, P, 'LineWidth', 2, 'Color', rgb('DarkGreen'))

% Σχεδίαση των 'σημείων αναφοράς' Voc και Pmp
plot([0 Vmp Voc], [0 Vmp*Imp 0], 'o', 'LineWidth', 3,
'MarkerSize', 8, 'Color', 'k')

end % Τέλος του βρόχου if plot Rs_Rsh

end % Τέλος του βρόχου while (perror>tol)

if (Rp<0) Rp = Rp_

end

str=sprintf('[ %g, %g]', Rsn, Rp);
set_param(BlockName, 'new_Rs_Rsh', str);
set_param(BlockName, 'P_error', num2str(perror));

if insert_Rs_Rsh
str=sprintf('[ %g, %g, %g, %g ]', Rsn, Rp, Ki, Kv);
set_param(BlockName, 'ModelParameters', str);
end

end

end

```

Εδώ παρουσιάζεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την χάραξη πολλών I-V και P-V χαρακτηριστικών ταυτόχρονα με παράλληλη παρουσίαση των σημείων I_{mp} , V_{mp} , P_{mp}

```

V=IV(:,1);
I=IV(:,2);
P=IV(:,1).*IV(:,2);
L=sort([find((V==Voc));find((V==0))] );
L1=L(end);
Ls=L(2);
a=1;
b=1;
% I-V curve

subplot(2,1,1);
grid on
hold on
title('I-V curve');
xlabel('V [V]');
ylabel('I [A]');
xlim([0 max(V)*1.1]);
ylim([0 max(I)*1.1]);

plot(V,I,'LineWidth',2)

% P-V curve

subplot(2,1,2);
grid on
hold on
title('P-V curve');
xlabel('V [V]');
ylabel('P [W]');
xlim([0 max(V)*1.1]);
ylim([0 max(P)*1.1]);

plot(V,P,'LineWidth',2)

if isequal(length(L),2)

[Pmax,ind]=max(P);
Vmax=V(ind);
Imax=I(ind);
subplot(2,1,2);
plot(Vmax,Pmax,'ro');
strValues = strtrim(cellstr(num2str([Vmax
Pmax], '%0.2f,%0.2f')));
text(Vmax,Pmax,strValues,'VerticalAlignment','bottom');
subplot(2,1,1);

```



```

plot(Vmax,Imax,'ro');
strValues = strtrim(cellstr(num2str([Vmax
Imax], '%0.2f,%0.2f')));
text(Vmax,Imax,strValues,'VerticalAlignment','bottom');

else

while Ls<Ll
    Ls=L(a+1);
    Lf=L(a);
    for i=Lf:Ls
        A(i)=P(i);
    end
    [Pmax,ind]=max(A);
    B(b)=Pmax;
    Vmax=V(ind);
    C(b)=Vmax;
    Imax=I(ind);
    D(b)=Imax;
    subplot(2,1,2);
    plot(Vmax,Pmax,'ro');
    strValues = strtrim(cellstr(num2str([Vmax
Pmax], '%0.2f,%0.2f')));
    text(Vmax,Pmax,strValues,'VerticalAlignment','bottom');
    subplot(2,1,1);
    plot(Vmax,Imax,'ro');
    strValues = strtrim(cellstr(num2str([Vmax
Imax], '%0.2f,%0.2f')));
    text(Vmax,Imax,strValues,'VerticalAlignment','bottom');
    a=a+1;
    b=b+1;
end

end

clear A;

```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] World Energy Outlook 2012, International Energy Agency (IEA).
- [2] BP: Statistical Review of World Energy, London, 2012.
- [3] Total World Energy Consumption by source 2010, from REN21 Renewables 2012 Global Status Report.
- [4] ESA Science & Technology. “The Electromagnetic Spectrum”.
- [5] www.pveducation.org.
- [6] John A. Duffie, William A. Beckman. “Solar Engineering of Thermal Processes” second edition. Madison Wisconsin June 1980.
- [7] Καθηγητής Κ. Θ. Δέρβος. “Εισαγωγή στα Ημιαγωγά Υλικά και Φωτοβολταϊκές Διατάξεις”. Αθήνα 2011.
- [8] Ομάδα Εξοικονόμησης Ενέργειας. Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης. ”Προσδιορισμός Προσπίπτουσας Ηλιακής Ακτινοβολίας σε Κεκλιμένες και Περιστρεφόμενες Επιφάνειες”. Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Αθήνα Μάρτιος 2008
- [9] Γ.Μήτσου, «Στοιχεία Θεωρίας Ημιαγωγών» - Εργαστήριο Οπτοηλεκτρονικής και Laser
- [10] Levy MY, Honsberg CB. “Rapid and Precise Calculations of Energy and Particle Flux for Detailed-Balance Photovoltaic Applications”. Solid-State Electronics, 2006.
- [11] Dr. Bill Chameides. “Statistically Speaking: The Evolution of the Silicon Solar Cell”. December 2008.

- [12] S. A. Correiaa, J. Lossena, M. Bährba. “Eliminating Shunts from Industrial Silicon Solar Cells by Spatially Resolved Analysis”. ErSol Solar Energy AG. Solar Zentrum Erfurt, Germany.
- [13] Y. Hishikawa, K. Morita. “Initial Drop in Isc of the Field Test c-Si PV Modules in Japan”, Proceedings of the 3rd PV World Conference, Osaka, (2003).
- [14] P. Grunow, S. Lust, D. Sauter, V. Hoffmann, C. Beneking, B. Litzemberger, L. Podlowski. “Weak Light Performance and Annual Yields of PV Modules and Systems as a Result of the Basic Parameter set of Industrial Solar Cells”. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France. 7-11 June 2004.
- [15] Stefan Krauter, Alexander Preiss. “Comparison of Module Temperature Measurements”. Photovoltaik Institut Berlin AG, Germany.
- [16] Govindasamy TamizhMani, Liang Ji, Yingtang Tang and Luis Petacci. “Photovoltaic Module Thermal/Wind Performance: Long-Term Monitoring and Module Development For Energy Rating”. NCPV and Solar Program Review Meeting 2003
- [17] Αλεξάνδρα Καπετανάκη. «Μελέτη κατασκευή και δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες πολυκρυσταλλικό πλαίσιο και ανιχνευτή MPP για σύνδεση σε σύστημα συσσωρευτών για εφαρμογές χαμηλού κόστους». Αθήνα 2011.
- [18] Γκαρτζώνη Λαμπρινή. “Ανάλυση, Σχεδιασμός και Διερεύνηση της λειτουργίας μονοφασικού φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο”. Πάτρα Φεβρουάριος 2010

- [19] Μαρία Χριστοδούλου. “Επίδραση εξωτερικών παραμέτρων στις χαρακτηριστικές ιδιότητες ηλιακών πλαισίων τύπου CIS ”. Πάτρα Οκτώβριος 2009.
- [20] “Photovoltaic devices III”. Y.Baghzouz Spring 2012.
- [21] G. Mount, L.Wang, K. Putyera, M.Lepage . “Characterization of Solar Grade Silicon Contaminants”.
- [22] B. Sopori . “Impurities and Defects in Photovoltaic Si Devices: A Review”. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Colorado December 1999.
- [23] Κωνσταντίνα Α. Μπαμπαλή. “Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις σε Κτίρια”. Αθήνα, Ιούνιος 2011.
- [24] Edson L. Meyer, Ernest van Dyk. “Assessing the Reliability and Degradation of Photovoltaic Module Performance Parameters”. IEEE Transactions on Reliability. March 2004.
- [25] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, Member, IAENG. “Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK”. World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS), San Francisco, USA, October 2008.
- [26] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. Ruppert F. “Modeling and Circuit-Based Simulation of Photovoltaic Arrays”. University of Campinas - UNICAMP, Brazilian Journal of Power Electronics, 2009.
- [27] Mohsen Taherbaneh, Gholamreza Farahani and Karim Rahmani. “Evaluation the Accuracy of One-Diode and Two-Diode Models for a Solar Panel Based Open-Air Climate Measurements”. Electrical and Information Technology Department, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran.