



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών στοιχείων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΕΦΑΝΟΣ Ε. ΤΕΤΕΛΕΝΗΣ

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα Ιούλιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών στοιχείων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τη 12^η Ιουλίου 2011.

.....
Κωνσταντίνος Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Βασιλείου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....
ΣΤΕΦΑΝΟΣ Ε. ΤΕΤΕΛΕΝΗΣ

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

Copyright © ΣΤΕΦΑΝΟΣ Ε. ΤΕΤΕΛΕΝΗΣ, 2011.

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

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μονοκρυσταλλικού πυριτίου υπό διαφορετικές συνθήκες ώστε να προσδιορίσουμε που οφείλεται η χαμηλότερη απόδοσή του.

Συγκεκριμένα παρατηρούμε πως μεταβάλλεται η χαρακτηριστική ρεύματος - τάσης (I-V) του φωτοβολταϊκού πλαισίου υπό διαφορετικές τιμές έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, υπό ποσοστιαία σκίαση, υπό μερική σκίαση με αφαίρεση των παρακαμπτήριων διόδων, με ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο σε μία ή περισσότερες στήλες και με ένα ή περισσότερα σκιασμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία στην ίδια στήλη.

Στο 1^ο κεφάλαιο περιγράφεται η χρήση της ηλιακής ενέργειας και πως αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύεται η δομή του φωτοβολταϊκού πλαισίου, οι συνδέσεις και τα είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των ισοδύναμων κυκλωμάτων των φωτοβολταϊκών στοιχείων και των παραγόντων που επηρεάζουν την χαρακτηριστική καμπύλη I-V.

Στο 4^ο κεφάλαιο αναφερόμαστε στο βαθμό απόδοσης και στους παράγοντες που το επηρεάζουν.

Στο 5^ο κεφάλαιο αναλύεται το φαινόμενο της μερικής σκίασης και η συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού πλαισίου υπό της συνθήκες αυτής.

Στο 6^ο κεφάλαιο περιγράφεται το πειραματικό μέρος και συγκεκριμένα τα όργανα μέτρησης τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, οι συνθήκες μετρήσεων, παρουσιάζονται οι πίνακες τιμών, οι χαρακτηριστικές καμπύλες και τα συμπεράσματα για κάθε μέτρηση.

Λέξεις κλειδιά

Φωτοβολταϊκό στοιχείο, φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, δίοδος, ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου, χαρακτηριστική I-V, χαρακτηριστική P-V, βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού στοιχείου, βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου, συνδεσμολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων, σκίαση, μερική σκίαση, παρακαμπτήρια δίοδος, μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

Abstract

This diploma thesis attempts to consult the behavior of a single crystal silicon photovoltaic panel under different conditions, in order to define the reasons of its lower efficiency.

In particular, we observe how the photovoltaic panel's current – voltage diagram (I-V) change, under different solar-radiation values in percentage shading and in partial shading, removing the bypass diodes, with one shaded PV cell at one or more columns and one or more shaded cells at one column

In the first chapter, we describe the use of solar energy and the way of its conversion into electric energy.

In the second chapter, we analyze the structure of the PV panel, the connections and the kinds of PV cells.

In the third chapter, we have the analysis of the equivalent circuits of PV cells and the factors which affect the I-V diagram.

In the fourth chapter, we refer to the efficiency and the factors which affect it.

In the fifth chapter, we analyze the phenomenon of partial shading and the behavior of PV panel under these conditions.

In the sixth chapter we describe the experimental part. Particularly, we refer the measurements instruments that we used and the measurements conditions. We also, present tables of numeric values, diagrams and the conclusions of each measurement.

Keywords

PV cell, photovoltaic panel, solar-radiation, diode, equivalent circuit of PV cell, I-V diagram, P-V diagram, PV cell efficiency, PV panel efficiency, PV cells' connections, shading, partial shading, bypass diode, single crystal silicon.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή της σχολής ΗΜΜΥ κ. Κωνσταντίνο Δέρβο ο οποίος με πνεύμα συνεργασίας και κατανόησης, μου ανέθεσε και επέβλεψε τη διπλωματική μου εργασία.

Ιδιαίτερος εκφράζω τις ευχαριστίες μου στον διδάκτορα κ. Ι. Μέργο για τη συνεργασία κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του πειράματος.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την υποστήριξή τους.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	11
1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	21
1.1 Ηλιακή ενέργεια.....	21
1.2 Ηλιακή ακτινοβολία	24
1.3 Ημιαγωγός.....	26
1.4 Επαφή p-n	28
1.5 Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση της διόδου.....	29
1.6 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	30
2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	33
2.1 Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου	33
2.2 Συνδέσεις φωτοβολταϊκών στοιχείων	34
2.3 Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	35
2.3.1 Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου μεγάλου πάχους	35
2.3.1.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si)..	35
2.3.1.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)	36
2.3.1.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon).....	37
2.3.2 Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών υμενίων, THIN FILM	37
2.3.2.1 Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe ₂ ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS).....	37
2.3.2.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si).....	38
2.3.2.3 Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe).....	39
2.3.2.4 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs).....	39
2.3.3 Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	40
2.3.4 Άλλες τεχνολογίες.....	41
2.4 Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου	41
3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ...	43
3.1 Ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα φωτοβολταϊκών στοιχείων	43
3.1.1 Γενικά.....	43

3.1.2 1 ^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα.....	43
3.1.3 2 ^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα.....	44
3.1.4 3 ^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα.....	45
3.1.5 4 ^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα.....	46
3.1.6 5 ^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα.....	47
3.1.7 6 ^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα.....	49
3.2 Καμπύλη I-V	50
3.2.1 Γενικά.....	50
3.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την καμπύλη I-V	51
3.2.2.1 Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας G.....	51
3.2.2.2 Η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου T.....	53
3.2.2.3 Ο συντελεστής κατασκευής και ποιότητας A.....	54
3.2.2.4 Η αντίσταση σειράς R _s	54
3.2.2.5 Η παράλληλη αντίσταση R _{sh}	57
3.2.2.6 Ανάστροφο ρεύμα κόρου.....	58
3.3 Συντελεστής Πλήρωσης.....	59
4. ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	61
4.1 Ορισμός	61
4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης.....	62
4.2.1 Γενικά.....	62
4.2.2 Η αντίσταση R _s	62
4.2.3 Η γήρανση.....	62
4.2.4 Οι οπτικές απώλειες	62
4.2.5 Η χωροταξική τοποθέτηση.....	63
4.2.6 Η δίοδος αντεπιστροφής	63
4.2.7 Η ακτινοβολία	63
4.2.8 Η σκίαση	64
4.2.9 Η θερμοκρασία.....	64
4.2.10 Ο άνεμος	65
4.2.11 Η ρύπανση.....	65
4.2.12 Οι ηλεκτρικές απώλειες	66
5. ΣΚΙΑΣΗ	67
5.1 Γενικά	67
5.2 Φαινόμενο θερμών κηλίδων (hot-spot effect).....	67
5.3 Επίδραση της ποσοστιαίας σκίασης.....	73
5.4 Ιχνηλάτης.....	75
5.5 Επίδραση του αριθμού των σκιασμένων κελιών.....	76
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	83
6.1 Γενικά	83

6.2 Πρότυπο όργανο μέτρησης έντασης ακτινοβολίας	84
6.3 Πολύοργανο HT SOLAR IV400	85
6.4 Θερμογραφία.....	86
6.4.1 Γενικά.....	86
6.4.2 Θερμοκάμερα FLIR P640	87
6.5 Χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσεως της έντασης ακτινοβολίας.....	87
6.5.1 Γενικά.....	87
6.5.2 Μετρήσεις - Χαρακτηριστικές	87
6.5.3 Συμπεράσματα	90
6.6 Χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσεως της ποσοστιαίας μερικής σκίασης	91
6.6.1 Γενικά.....	91
6.6.2 Μετρήσεις - Χαρακτηριστικές	91
6.6.3 Συμπεράσματα	93
6.7 Χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου και μίας παρακαμπτήριας διόδου.....	94
6.7.1 Γενικά.....	94
6.7.2 Μετρήσεις - Χαρακτηριστικές	94
6.7.2.1 Μετρήσεις και χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου χωρίς παρακαμπτήρια δίοδο συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου	96
6.7.2.2 Μετρήσεις και χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 1 ^η στήλη συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου	98
6.7.2.3 Μετρήσεις και χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 2 ^η στήλη συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου	100
6.7.2.4 Μετρήσεις και χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 3 ^η στήλη συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου	102
6.7.2.5 Μετρήσεις και χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 4 ^η στήλη συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου	104
6.7.3 Συμπεράσματα	106
6.8 Χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου σε μία ή περισσότερες στήλες	113
6.8.1 Γενικά.....	113
6.8.2 Μετρήσεις - Χαρακτηριστικές	113
6.8.3 Συμπεράσματα	116
6.9 Χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσεως ενός ή περισσότερων πλήρως σκιασμένων στοιχείων σε μία στήλη	116
6.9.1 Γενικά.....	116
6.9.2 Μετρήσεις - Χαρακτηριστικές	116
6.9.3 Συμπεράσματα	118
6.10 Βαθμός απόδοσης.....	118
6.11 Συμπεράσματα	119
6.11.1 Επίδραση σκίασης.....	119
6.11.2 Επίδραση γήρανσης	119

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 121

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1: Παγκόσμιος χάρτης ετήσιας ηλιακής ενέργειας [3].....	22
Εικόνα 2: Χάρτης ετήσιας ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα [4]	23
Εικόνα 3: Ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα [6]	24
Εικόνα 4 : Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας σε αίθριες και συννεφιασμένες μέρες [8]....	26
Εικόνα 5 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου [18]	36
Εικόνα 6 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου [18]	37
Εικόνα 7 : φωτοβολταϊκό στοιχείο ταινίας πυριτίου [18].....	37
Εικόνα 8 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο τύπου CIS [18]	38
Εικόνα 9 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου [18].....	39
Εικόνα 10 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο CdTe [18]	39
Εικόνα 11 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο Αρσενικού Γαλλίου [18]	40
Εικόνα 12 : Πολυστρωματικό φωτοβολταϊκό στοιχείο [8].....	41
Εικόνα 13 : Θερμή κηλίδα σε φωτοβολταϊκό στοιχείο	68
Εικόνα 14: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο Siemens AG SM36-18H1 12V/33W.....	83
Εικόνα 15: Πρότυπο όργανο μέτρησης έντασης ακτινοβολίας	84
Εικόνα 16: Πρότυπο όργανο μέτρησης έντασης ακτινοβολίας	84
Εικόνα 17: Πολυόργανο μέτρησης HT SOLAR IV400.....	85
Εικόνα 18: Αισθητήρας έντασης ηλιακής ακτινοβολίας του πολυόργανου HT SOLAR IV400	85
Εικόνα 19: Αισθητήρας θερμοκρασίας του πολυόργανου HT SOLAR IV400	86
Εικόνα 20 : Θερμοκάμερα FLIR P640 [34]	87
Εικόνα 21 : Παρακαμπτήριες δίοδοι φωτοβολταϊκού πλαισίου	94
Εικόνα 22 : Θερμογραφία φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	111

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1 : Ορισμός μάζας αέρος Α.Μ. [8]	25
Σχήμα 2 : Άτομο πυριτίου [9]	27

Σχήμα 3 : Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με πρόσμιξη ατόμων βορίου και φωσφόρου [10]	28
Σχήμα 4 : Επαφή p-n [12]	29
Σχήμα 5 : Συνδεσμολογία ορθής πόλωσης [14]	29
Σχήμα 6 : Συνδεσμολογία ανάστροφης πόλωσης [14]	30
Σχήμα 7 : Λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων στηριζόμενη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο [11]	31
Σχήμα 8 : Μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια [1]	32
Σχήμα 9 : Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου [16]	33
Σχήμα 10 : Πλάγια όψη φωτοβολταϊκού στοιχείου όπου (1) Διαχωρισμός φορτίου (2) Επανασύνδεση (3) Αχρησιμοποίητη φωτεινή ενέργεια (4) Αγωγή ελάσματα [16]	34
Σχήμα 11 : Συνδεσμολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων (a) σε σειρά (b) σε απλές παράλληλες σειρές (c) σε διατάξεις αθροιστικές σταυρωτού δεσμού (d) σε διάταξη γεφυρωτής διασύνδεσης (e) σε διάταξη κυψέλης [17]	35
Σχήμα 12 : Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου	42
Σχήμα 13 : 1 ^ο Ισοδύναμο κύκλωμα [5]	43
Σχήμα 14 : 2 ^ο Ισοδύναμο κύκλωμα [8]	44
Σχήμα 15 : 3 ^ο Ισοδύναμο κύκλωμα [19]	45
Σχήμα 16 : 4 ^ο Ισοδύναμο κύκλωμα [8]	47
Σχήμα 17 : 5 ^ο Ισοδύναμο κύκλωμα [20]	48
Σχήμα 18 : 6 ^ο Ισοδύναμο κύκλωμα [8]	49
Σχήμα 19: Αντιστάσεις που αποτελούν την αντίσταση σειράς του φωτοβολταϊκού στοιχείου [23]	55
Σχήμα 20: Τρεις συνηθισμένοι τρόποι παράθεσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων στα πλαίσια [5]	63
Σχήμα 21: Διάταξη φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά	68
Σχήμα 22: Συνδεσμολογία σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου με τα υπόλοιπα (a) Παράλληλη (b) Σειρά [29]	68
Σχήμα 23: Διάταξη με στοιχεία που αλληλεπικαλύπτονται [30]	72
Σχήμα 24: Διάταξη με στοιχεία που δεν αλληλεπικαλύπτονται [30]	72
Σχήμα 25: Τρεις στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα σκιασμένο στοιχείο [17]	73

Σχήμα 26: Έξι στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα σκιασμένο στοιχείο [17].....	74
Σχήμα 27: Τέσσερις στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα ή περισσότερα σκιασμένα στοιχεία σε μία στήλη [17]	78
Σχήμα 28: Τέσσερις στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο σε μία ή περισσότερες στήλες [17].....	80
Σχήμα 29 : Βραχυκυκλωμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο με καταγεγραμμένη τη θερμοκρασία κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου	112

Πίνακες τιμών

Πίνακας 1 : Συνολική ετήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m^2) σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας, σε επίπεδα με κλίση 0° , 30° , 45° , 60° και 90° και προσανατολισμό προς το Νότο [5].....	23
Πίνακας 2 : Τύποι υπολογισμού αντίστασης των στοιχείων της R_s [23].....	56
Πίνακας 3 : Γενικά χαρακτηριστικά καμπύλων I-V συναρτήσεως της έντασης ακτινοβολίας ..	87
Πίνακας 4 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P συναρτήσεως της έντασης ακτινοβολίας.....	88
Πίνακας 5 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P συναρτήσεως της έντασης ακτινοβολίας.....	88
Πίνακας 6 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P συναρτήσεως της έντασης ακτινοβολίας.....	89
Πίνακας 7 : Συντελεστής διαφάνειας υλικών	91
Πίνακας 8 : Γενικά χαρακτηριστικά καμπύλων I-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσεως της ποσοστιαίας μερικής σκίασης.....	91
Πίνακας 9 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσεως της ποσοστιαίας μερικής σκίασης.....	92
Πίνακας 10 : Γενικά χαρακτηριστικά καμπύλων I-V φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου και μίας διόδου bypass.....	95
Πίνακας 11 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P φωτοβολταϊκού πλαισίου χωρίς παρακαμπτήρια δίοδο συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου	96
Πίνακας 12 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 1 ^η στήλη συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου.....	98
Πίνακας 13 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στη 2 ^η στήλη συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου.....	100
Πίνακας 14 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 3 ^η στήλη συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου.....	102

Πίνακας 15 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 4 ^η στήλη συναρτήσει ενός σκιασμένου στοιχείου.....	104
Πίνακας 16 : Γενικά χαρακτηριστικά καμπύλων I-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου σε μία ή περισσότερες στήλες.....	113
Πίνακας 17 : Μετρήσεις και υπολογισμοί I-V-P φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους σε όλες τις στήλες συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου σε μία ή περισσότερες στήλες.....	114
Πίνακας 18 : Γενικά χαρακτηριστικά καμπύλων I-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσει ενός ή περισσότερων πλήρως σκιασμένων στοιχείων σε μία στήλη.....	116

Ευρετήριο χαρακτηριστικών I-V

Χαρακτηριστική I-V 1 : Διόδου [15].....	30
Χαρακτηριστική I-V 2 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου για σταθερή ένταση ακτινοβολίας και θερμοκρασίας [21]	51
Χαρακτηριστική I-V 3 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από την ένταση ακτινοβολίας G [21]	52
Χαρακτηριστική I-V 4 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από T [22]	54
Χαρακτηριστική I-V 5 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από R_s [22]	57
Χαρακτηριστική I-V 6 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από R_{sh} [22]	57
Χαρακτηριστική I-V 7 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από I_o [22]	58
Χαρακτηριστική I-V 8 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από το φως [5].....	59
Χαρακτηριστική I-V 9 : I-V με σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο συνδεδεμένο παράλληλα [29].....	69
Χαρακτηριστική I-V 10 : Με σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο συνδεδεμένο σε σειρά [29]	69
Χαρακτηριστική I-V 11 : Γραφικός υπολογισμός με σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο συνδεδεμένο παράλληλα [29]	70
Χαρακτηριστική I-V 12 : Γραφικός υπολογισμός με σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο συνδεδεμένο σε σειρά [29]	71
Χαρακτηριστική I-V 13 : Επίδραση σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου όταν υπάρχει δίοδος παράκαμψης στο κύκλωμα [29].....	72

Χαρακτηριστική I-V 14 : Τριών στηλών εξαρτώμενη από την ποσοστιαία σκίαση ενός στοιχείου [17]	73
Χαρακτηριστική I-V 15 : Έξι στηλών εξαρτώμενη από την ποσοστιαία σκίαση ενός κελιού [17].....	74
Χαρακτηριστική I-V 16 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει των σκιασμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων [31].....	77
Χαρακτηριστική I-V 17 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει των σκιασμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων μιας στήλης [17]	79
Χαρακτηριστική I-V 18 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει ενός σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου σε μία ή περισσότερες στήλες [17].....	81
Χαρακτηριστική I-V 19 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει της έντασης ακτινοβολίας.	90
Χαρακτηριστική I-V 20 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσει της ποσοστιαίας μερικής σκίασης	92
Χαρακτηριστική I-V 21 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου χωρίς παρακαμπτήρια δίοδο συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	97
Χαρακτηριστική I-V 22 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 1 ^η στήλη συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου.....	99
Χαρακτηριστική I-V 23 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στη 2 ^η στήλη συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου.....	101
Χαρακτηριστική I-V 24 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 3 ^η στήλη συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου.....	103
Χαρακτηριστική I-V 25 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 4 ^η στήλη συναρτήσει ενός σκιασμένου στοιχείου.....	105
Χαρακτηριστική I-V 26 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στην 1 ^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου	107
Χαρακτηριστική I-V 27 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στη 2 ^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου	108
Χαρακτηριστική I-V 28 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στην 3 ^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου	109
Χαρακτηριστική I-V 29 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στην 4 ^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου	110
Χαρακτηριστική I-V 30 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου σε μία ή περισσότερες στήλες	115

Χαρακτηριστική I-V 31 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσει ενός ή περισσότερων πλήρως σκιασμένων στοιχείων σε μία στήλη 117

Ευρετήριο χαρακτηριστικών P-V

Χαρακτηριστική P-V 1 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου για σταθερή ένταση ακτινοβολίας και θερμοκρασίας [21] 51

Χαρακτηριστική P-V 2 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου εξαρτώμενη από ένταση ακτινοβολίας .. 90

Χαρακτηριστική P-V 3 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσει της ποσοστιαίας μερικής σκίασης 93

Χαρακτηριστική P-V 4 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου χωρίς παρακαμπτήρια δίοδο συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου 97

Χαρακτηριστική P-V 5 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 1^η στήλη συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου 99

Χαρακτηριστική P-V 6 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στη 2^η στήλη συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου 101

Χαρακτηριστική P-V 7 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 3^η στήλη συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου 103

Χαρακτηριστική P-V 8 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 4^η στήλη συναρτήσει ενός σκιασμένου στοιχείου 105

Χαρακτηριστική P-V 9 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στην 1^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου 107

Χαρακτηριστική P-V 10 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στη 2^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου 108

Χαρακτηριστική P-V 11 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στην 3^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου 109

Χαρακτηριστική P-V 12 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στην 4^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου 110

Χαρακτηριστική P-V 13 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου σε μία ή περισσότερες στήλες 115

Χαρακτηριστική P-V 14 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσει ενός ή περισσότερων πλήρως σκιασμένων στοιχείων σε μία στήλη 117

Ευρετήριο χαρακτηριστική η-T

Χαρακτηριστική η-T 1 : Τυπική καμπύλη της μεταβολής της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους [5] 65

1. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

1.1 Ηλιακή ενέργεια

Ο ήλιος είναι η βασική πηγή ενέργειας του πλανήτη μας καθώς δίνει ζωή σε κάθε οργανισμό της βιόσφαιρας, δημιουργεί τους ανέμους, παράγει την αποθηκευμένη χημική ενέργεια σε ξύλα και ορυκτά καύσιμα, και επομένως είναι η πηγή όλης σχεδόν της ενέργειας που χρησιμοποιούμε. Ο ήλιος είναι απλανής αστέρας μέσου μεγέθους όπου, λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών που επικρατούν (μερικών εκατομμυρίων °C), τα μόρια και άτομα των στοιχείων που τον συνθέτουν βρίσκονται σε κατάσταση νέφους θετικών και αρνητικών ιόντων ή κατάσταση πλάσματος, όπως ονομάστηκε. Σε αυτές τις θερμοκρασίες οι ταχύτατα κινούμενοι πυρήνες υδρογόνου συσσωματώνονται, υπερνικώντας τις μεταξύ τους απωστικές ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις και δημιουργούν πυρήνες του στοιχείου ηλίου. Η πυρηνική αυτή σύντηξη είναι ισχυρά εξώθερμη και οι παραγόμενες τεράστιες ποσότητες ενέργειας ακτινοβολούνται προς όλες τις κατευθύνσεις στο διάστημα. Η γη συλλαμβάνει το ένα δισεκατομμυριοστό της εκπεμπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, που όμως αντιστοιχεί σε τεράστια ενεργειακή ποσότητα αν αναλογιστούμε ότι η ηλιακή ενέργεια που φτάνει στη γη σε μία εβδομάδα είναι περίπου ίση με τη συνολικά αποθηκευμένη ενέργεια όλων των καυσίμων του πλανήτη.

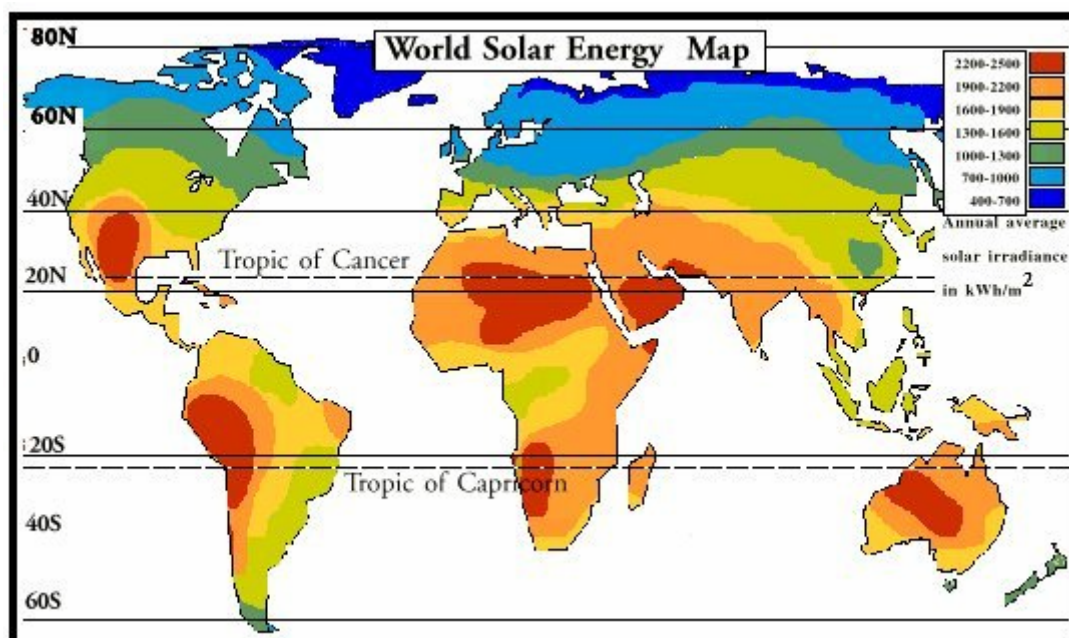
Η ηλιακή ακτινοβολία αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού με δύο τρόπους: θερμικές και φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Η θερμική αξιοποίηση περιλαμβάνει συλλογή της ηλιακής ενέργειας για να παραχθεί θερμότητα κυρίως για θέρμανση νερού και μετατροπή του σε ατμό για την κίνηση ατμοστρόβιλων. Στη δεύτερη εφαρμογή τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων ή συστοιχιών τους. Η συγκεκριμένη τεχνολογία εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 στα διαστημικά προγράμματα των ΗΠΑ. Η εξέλιξη της επέτρεψε τη μείωση του κόστους στην παραγωγή ηλεκτρισμού από \$300 σε \$4 ανά Watt. Λόγω της σχετικά χαμηλής απόδοσής τους και του συνεπαγόμενου υψηλού συνολικού κόστους, τα φωτοβολταϊκά συστήματα βρίσκουν κυρίως εφαρμογή ως μονάδες μικρής δυναμικότητας σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές όπου η σύνδεση με το δίκτυο είναι πολύ ακριβή [1].

Με μία καλή προσέγγιση, ο ήλιος ενεργεί ως μία τέλεια πηγή ακτινοβολίας (μέλαν σώμα) σε μία θερμοκρασία κοντά στους 5.8000 K. Η προσπίπτουσα κατά μέσο όρο ροή ενέργειας πάνω σε μία μονάδα επιφάνειας κάθετη προς τη διεύθυνση της δέσμης έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα, είναι γνωστή ως ηλιακή σταθερά και ισούται με $S=1367 \text{ W/m}^2$. Γενικότερα, η ολική ισχύς από μία πηγή ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στη μονάδα επιφάνειας, ονομάζεται ένταση ακτινοβολίας [2].

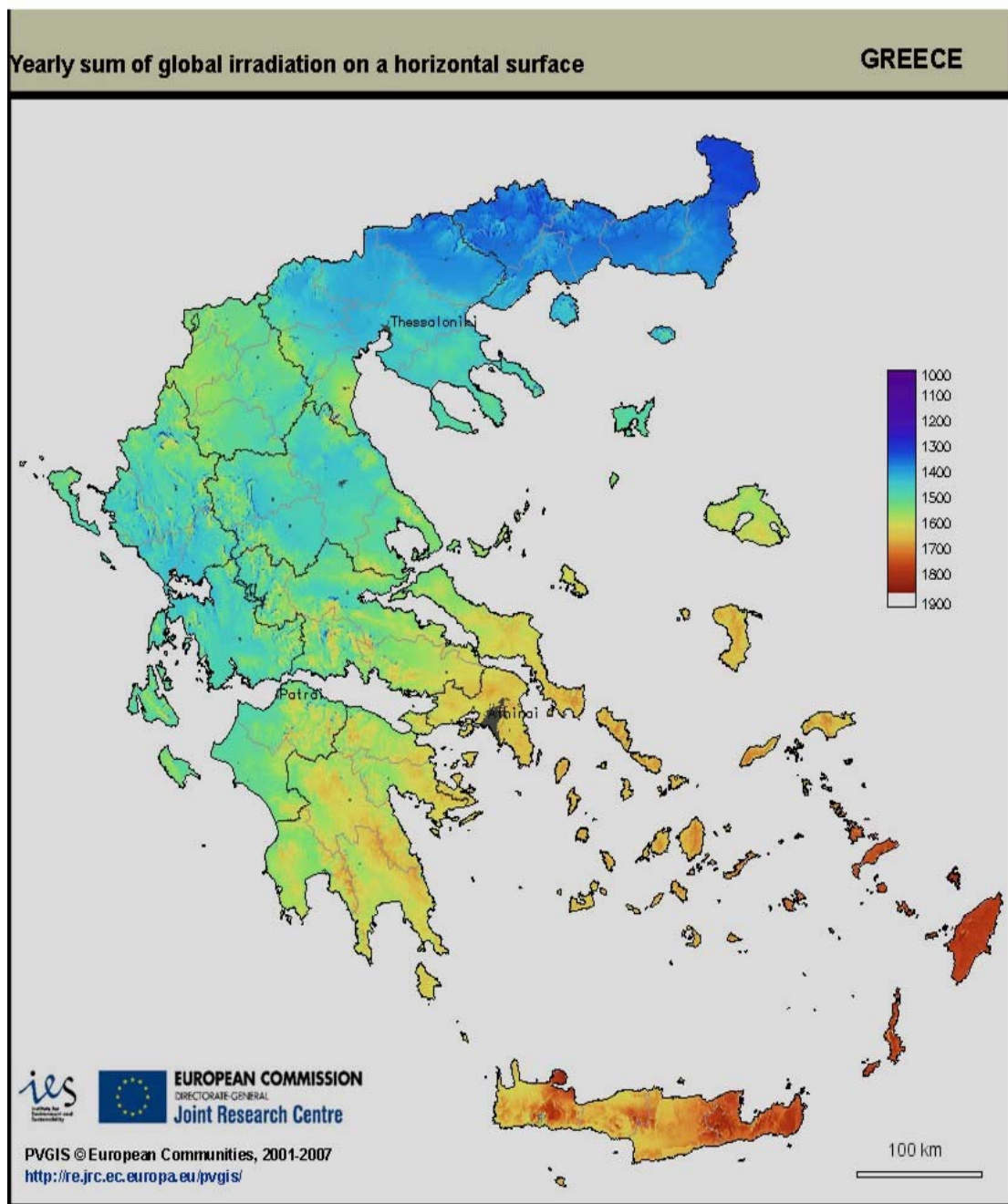
Η ατμόσφαιρα της γης, μειώνει σημαντικά την ακτινοβολία με τους μηχανισμούς της ανάκλασης, απορρόφησης (από το όζον, τους υδρατμούς, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα) και σκέδασης (από τα μόρια αέρα, σκόνης ή ρύπους). Όταν η ηλιακή ακτινοβολία αθροίζεται στη διάρκεια ενός έτους, προκύπτει η ετήσια ηλιακή ενέργεια, συνήθως σε kWh/m². Η τιμή αυτή διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία.

Αν και όλη η γη δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, η ποσότητά της στην επιφάνεια κάθε τόπου εξαρτάται κυρίως από τη γεωγραφική του θέση, την εποχή και τη νεφοκάλυψη. Η έρημος π.χ. δέχεται περίπου το διπλάσιο ποσό ηλιακής ενέργειας από άλλες περιοχές. Στο μεγαλύτερο τμήμα της χώρα μας η ηλιοφάνεια διαρκεί περισσότερες από 2700 ώρες το χρόνο. Στη Δυτική Μακεδονία και την Ήπειρο εμφανίζει τις μικρότερες τιμές, κυμαινόμενη από 2200 ως 2300 ώρες, ενώ στη Ρόδο και τη νότια Κρήτη ξεπερνά τις 3100 ώρες ετησίως. Συνεπώς η Ελλάδα αποτελεί μία από τις κατεξοχήν κατάλληλες περιοχές της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) για εφαρμογές εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας [1].

Στην εικόνα 1, φαίνονται τα ποσά πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας ετησίως ανά τον κόσμο και στην εικόνα 2, όσον αφορά την Ελλάδα. Στον πίνακα 1 φαίνεται η ετήσια πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας για διάφορα κεκλιμένα επίπεδα και διαφορετικές πόλεις της Ελλάδας.



Εικόνα 1: Παγκόσμιος χάρτης ετήσιας ηλιακής ενέργειας [3]



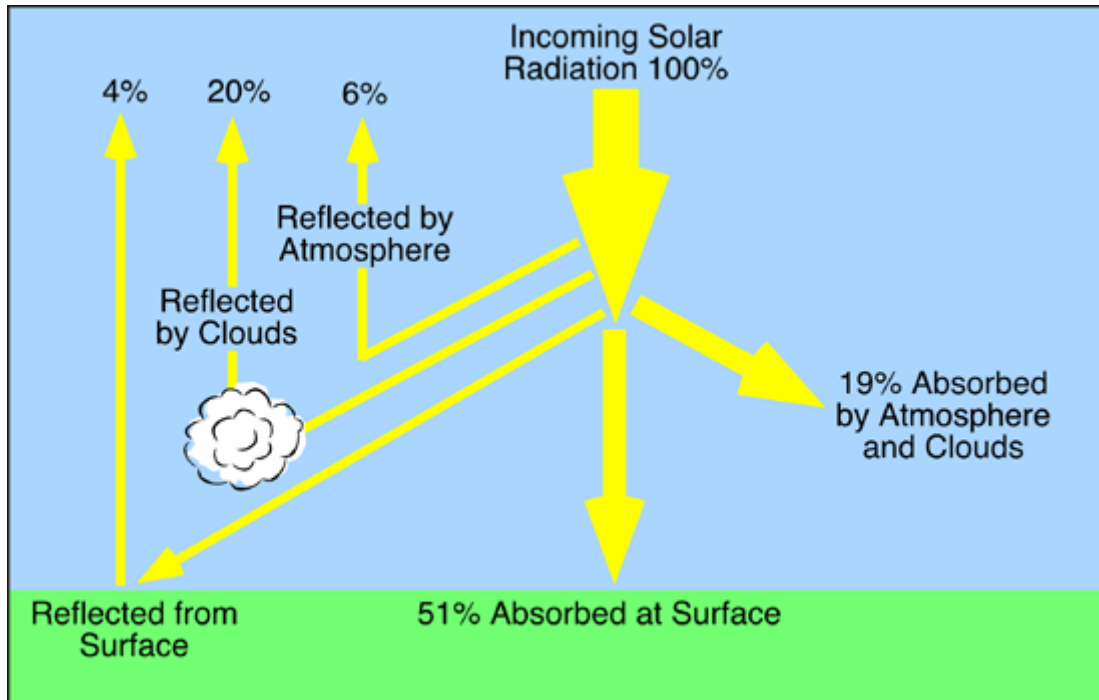
Εικόνα 2: Χάρτης ετήσιας ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα [4]

	0°	30°	45°	60°	90°
Αθήνα	1581	1730	1680	1549	1090
Θεσσαλονίκη	1403	1544	1505	1395	1000
Κόρινθος	1526	1666	1617	1490	1050
Πάρος	1629	1751	1685	1538	1058
Πάτρα	1479	1611	1563	1441	1018
Χανιά	1630	1738	1667	1517	1033

Πίνακας 1 : Συνολική ετήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m²) σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας, σε επίπεδα με κλίση 0°, 30°, 45°, 60° και 90° και προσανατολισμό προς το Νότο [5]

1.2 Ηλιακή ακτινοβολία

Η ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης, συνίσταται από ένα μέρος άμεσης ακτινοβολίας και ένα μέρος διάχυτης όπως φαίνεται και στην εικόνα 3. Το 51% της ακτινοβολίας απορροφάται άμεσα από το έδαφος, το 19% απορροφάται από την ατμόσφαιρα και τα σύννεφα ενώ το υπόλοιπο 30% ανακλάται από την επιφάνεια, τα σύννεφα και την ατμόσφαιρα. Η άμεση συνιστώσα της ακτινοβολίας, προέρχεται από την κατεύθυνση του ήλιου σε αντίθεση με τη διάχυτη, η οποία σκεδάζεται από τον ουράνιο θόλο και δεν έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση.



Εικόνα 3: Ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα [6]

Η ολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα οριζόντιο επίπεδο είναι το άθροισμα της ακτινικής και διάχυτης ακτινοβολίας :

$$I = I_b + I_d \quad (1.1)$$

όπου I η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης

I_b η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

I_d η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

Εάν η επιφάνεια είναι κεκλιμένη, τότε στον προηγούμενο ορισμό προσθέτουμε την ακτινοβολία που ανακλάται από το έδαφος :

$$I_T = I_{b,T} + I_{d,T} + I_{refl,T} \quad (1.2)$$

όπου I_T η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης

$I_{b,T}$ η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

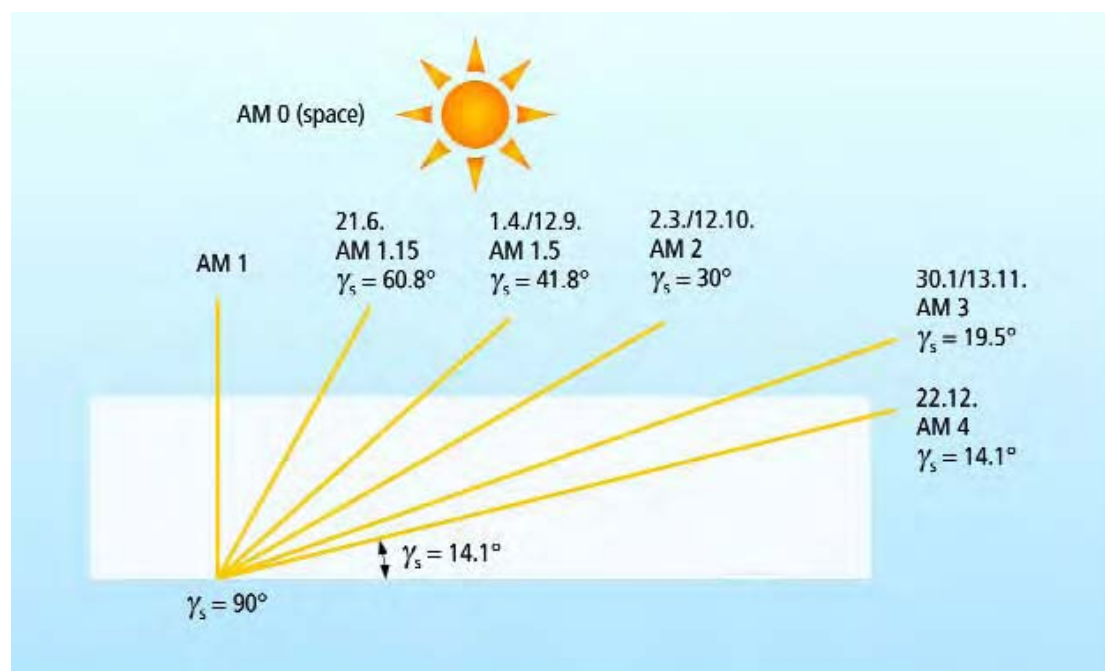
$I_{d,T}$ η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

$I_{refl,T}$ η ανακλώμενη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

[7].

Η ποσότητα της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος είναι φυσικά άκρως μεταβλητή. Επιπλέον, πέρα από την κανονική ημερήσια και ετήσια μεταβολή λόγω της φαινόμενης κίνησης του ήλιου, ακατάστατες μεταβολές (κάλυψη από σύννεφα) προκαλούνται από τις κλιματολογικές συνθήκες καθώς επίσης και τη γενικότερη σύνθεση της ατμόσφαιρας. Γι' αυτό το λόγο, η σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος βασίζεται στη λήψη μετρούμενων δεδομένων που λαμβάνονται στην τοποθεσία εγκατάστασης ή κοντά σε αυτή.

Ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την επίδραση της καθαρής ατμόσφαιρας στη διαδρομή του ηλιακού φωτός, είναι η μάζα αέρος (A.M), ίση προς το σχετικό μήκος της διαδρομής της απευθείας δέσμης διαμέσου της ατμόσφαιρας. Στη διάρκεια μίας ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας στο επίπεδο της θάλασσας, η ακτινοβολία από τον ήλιο, όταν βρίσκεται στο Ζενίθ, αντιστοιχεί σε μάζα αέρος 1. Σε άλλες περιπτώσεις, η μάζα αέρος (A.M), είναι κατά προσέγγιση ίση προς το $1/\cos\gamma_s$, όπου γ_s είναι η γωνία του Ζενίθ όπως μας δείχνει το Σχήμα 1 [2].

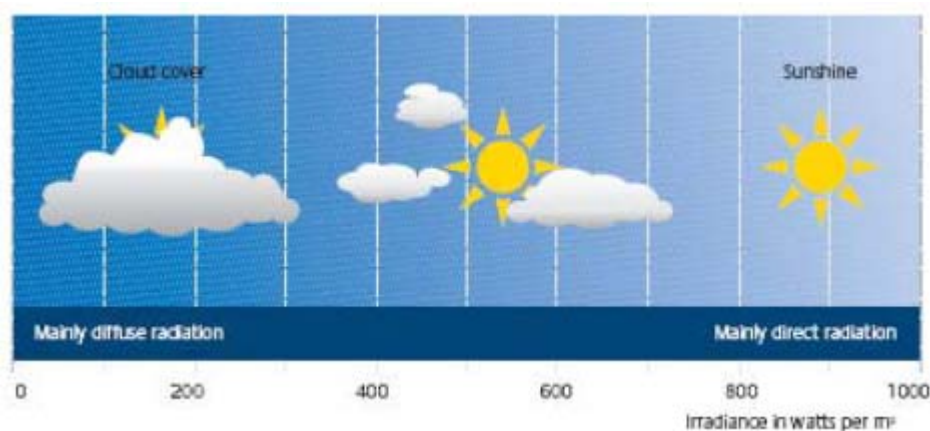


Σχήμα 1 : Ορισμός μάζας αέρος A.M. [8]

Ανάλογα με τις συνθήκες συννεφιάς και την ώρα της ημέρας (γωνία ύψους του ήλιου), η άμεση και διάχυτη ακτινοβολία διαφοροποιούνται σημαντικά. Τις αίθριες ημέρες, η άμεση ακτινοβολία, είναι η μεγαλύτερη συνιστώσα της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίθετα, σε πολύ συννεφιασμένες μέρες (κυρίως το χειμώνα), η συνολική ακτινοβολία οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη της διάχυτης συνιστώσας όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στη γη, κατανέμεται ανομοιόμορφα στις διάφορες περιοχές. Οι περιοχές κοντά στον ισημερινό λαμβάνουν περισσότερη ακτινοβολία από οποιοδήποτε άλλες. Η ηλιακή ακτινοβολία διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις εποχές και εξαρτάται από την ώρα της ημέρας, το κλίμα (ιδιαίτερα τα

σύννεφα που σκεδάζουν τις ακτίνες του ήλιου) και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες καθορίζουν το ποσό της ηλιακής ενέργειας που διατίθεται για τα φωτοβολταϊκά συστήματα.



Εικόνα 4 : Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας σε αίθριες και συννεφιασμένες μέρες [8]

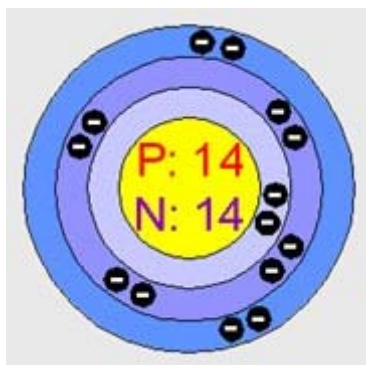
Το ποσό της ενέργειας που παράγει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, δεν εξαρτάται μόνο από τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία αλλά επηρεάζεται σημαντικά και από την ικανότητα των στοιχείων να μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια (conversion efficiency).

1.3 Ημιαγωγή

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού γίνεται κύρια με τη χρήση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων (Φ/Β), που η λειτουργία τους στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την άμεση μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα κατασκευάζονται από ημιαγωγικά υλικά, όπως το πυρίτιο που είναι το συνηθέστερο. Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό κύτταρο, μέρος της ακτινοβολίας διεγείρει ηλεκτρόνια τα οποία μπορούν να κινούνται σχετικά ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου υποχρεώνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς συγκεκριμένη κατεύθυνση, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα του οποίου η ισχύς καθορίζεται από τη ροή των ηλεκτρονίων και την εφαρμοζόμενη τάση στο φωτοβολταϊκό κύτταρο. Για να αυξηθεί η ροή των ελεύθερων ηλεκτρονίων προστίθενται στο καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο προσμίξεις, όπως ο φώσφορος και το βόριο.

Κάθε άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια κατανεμημένα σε τρεις διαφορετικές στοιβάδες. Οι δύο πρώτες είναι συμπληρωμένες με 2 και 8 άτομα αντίστοιχα. Η εξωτερική στοιβάδα περιλαμβάνει τα υπολειπόμενα 4 ηλεκτρόνια που συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου σχηματίζοντας την κρυσταλλική πυραμιδική δομή του καθαρού πυριτίου (Σχήμα 2).

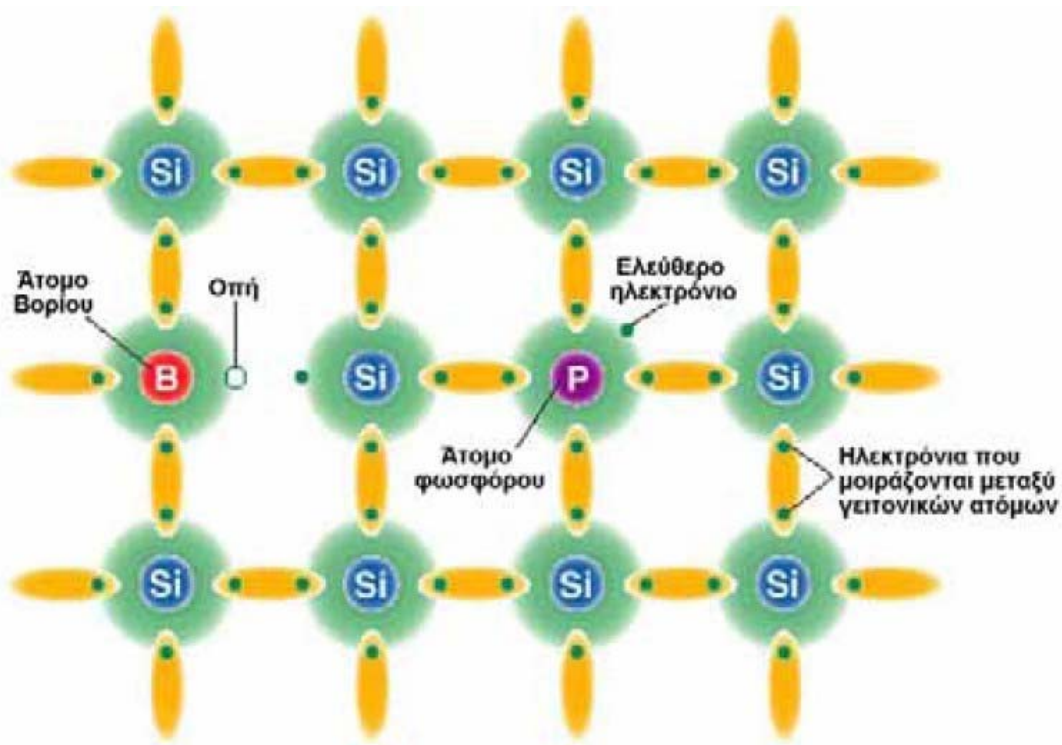


Σχήμα 2 : Άτομο πυριτίου [9]

Το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού καθώς δεν υπάρχουν ελεύθερα κινούμενα ηλεκτρόνια όπως στην περίπτωση του μεταλλικού πλέγματος. Όταν διοχετεύεται ενέργεια στο κρυσταλλικό πυρίτιο, κάποια ηλεκτρόνια διεγείρονται, σπάζουν τους δεσμούς τους και απομακρύνονται προς γειτονικά τους άτομα δημιουργώντας διαθέσιμες θετικά φορτισμένες "οπές" στη δομή του υλικού. Οι θέσεις αυτές καταλαμβάνονται από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων και με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ροή ηλεκτρονίων μέσα στο υλικό. Ο αριθμός όμως των ηλεκτρονίων που μπορούν να κινηθούν είναι σημαντικά περιορισμένος για να χρησιμεύσει στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Για το λόγο αυτό εισάγονται ετεροάτομα στην κρυσταλλική δομή, όπως π.χ. φωσφόρου. Η εξωτερική στοιβάδα του φωσφόρου έχει 5 ηλεκτρόνια εκ των οποίων τα 4 συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου, ενώ το πέμπτο συγκρατείται ηλεκτροστατικά από τα πρωτόνια του πυρήνα. Το συγκεκριμένο ηλεκτρόνιο απαιτεί σημαντικά χαμηλότερη ενέργεια ενεργοποίησης για να κινηθεί στο κρυσταλλικό πλέγμα. Σαν αποτέλεσμα τα περισσότερα από αυτά τα ηλεκτρόνια ελευθερώνονται και γίνονται φορείς ηλεκτρικού ρεύματος που είναι πολύ περισσότεροι από αυτούς του κρυσταλλικού πυριτίου. Η πρόσμιξη του κρυσταλλικού πυριτίου με άτομα φωσφόρου δημιουργεί ημιαγωγό τύπου n.

Όταν προστίθεται στο κρυσταλλικό πυρίτιο βόριο προκύπτουν ημιαγωγοί τύπου p. Το βόριο έχει στην εξωτερική του στοιβάδα 3 ηλεκτρόνια που συμμετέχουν σε δεσμούς με άτομα πυριτίου. Επειδή σε κάθε άτομο απαιτούνται 8 ηλεκτρόνια για τη συμπλήρωση της εξωτερικής τους στοιβάδας, στην εξωτερική στοιβάδα του βορίου υπάρχουν διαθέσιμες 2 ελεύθερες θέσεις ηλεκτρονίων, δημιουργώντας αντίστοιχες θετικά φορτισμένες "οπές" στη δομή του υλικού. Η κατάληψη των οπών από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων δίνει την εικόνα διάδοσής τους στο υλικό ή μεταφοράς θετικών φορτίων στην κρυσταλλική δομή του ημιαγωγού [1].

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο κρυσταλλικός δεσμός πυριτίου (Si), φωσφόρου (P) και βορίου (B).

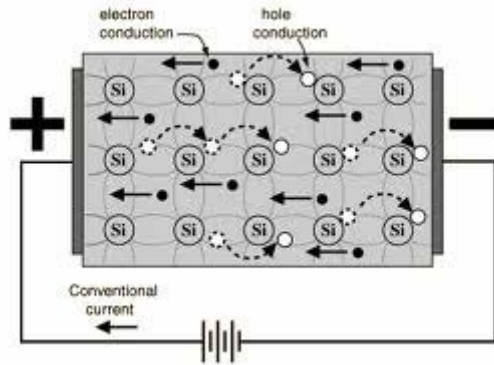


Σχήμα 3 : Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με πρόσμιξη ατόμων βορίου και φωσφόρου [10]

1.4 Επαφή p-n

Κάθε κρυσταλλικός ημιαγωγός, για να έχει ικανοποιητικές ιδιότητες για φωτοβολταϊκές και γενικότερα για ηλεκτρονικές εφαρμογές, θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλης καθαρότητας και το κρυσταλλικό τους πλέγμα να μην έχει αταξίες δομής. Τα άτομα των ημιαγωγικών υλικών, συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς οι οποίοι είναι δυνατόν να σπάσουν υπό την επίδραση της ακτινοβολίας ή θερμότητας, οπότε απελευθερώνονται ηλεκτρόνια (αρνητικοί φορείς n) και αφήνουν κενές θέσεις, τις οπές (θετικοί φορείς p).

Λόγω της ασυμμετρίας που έχουν οι δύο περιοχές στη συγκέντρωση ηλεκτρονίων και οπών ενεργοποιείται στην περιοχή της επαφής τους το φαινόμενο της διάχυσης και έτσι ηλεκτρόνια από την περιοχή n (περίσσεια) μεταφέρονται προς την περιοχή p αποτέλεσμα αυτού είναι να δημιουργείται στον ημιαγωγό n μια περιοχή κοντά στην διεπαφή p-n όπου είναι αυξημένο το θετικό φορτίο. Αντιστρόφως οπές από την περιοχή p (περίσσεια) μεταφέρονται στην περιοχή n. Συνέπεια τούτου είναι σε ένα τμήμα του ημιαγωγού p κοντά στην διεπαφή p-n να επικρατεί αρνητικό φορτίο. Όλη αυτή η δυναμική ισορροπία συγκέντρωσης φορτίων ηλεκτρονίων και οπών περί την διεπαφή p-n αναπτύσσεται χωρίς την επίδραση φωτός. Ακόμα και αν οι δύο ημιαγωγοί n και p συνδεθούν με έναν αγωγό δεν θα εμφανισθεί ρεύμα.

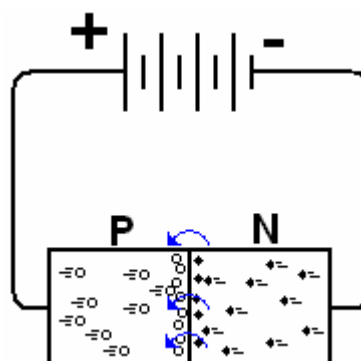


Σχήμα 4 : Επαφή p-n [12]

Συνέπεια του παραπάνω φαινομένου είναι η ανάπτυξη στην περιοχή της διεπαφής p-n ενός εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου με κατεύθυνση από την περιοχή n προς την περιοχή p. Λόγω της ανάπτυξης του παραπάνω ηλεκτρικού πεδίου το φαινόμενο της διάχυσης δεν δύναται να συνεχιστεί αφού όπως είναι γνωστό από την φυσική τα ηλεκτρόνια κινούνται αντίθετα από τη φορά του πεδίου ενώ τα θετικά φορτία σύμφωνα με την κατεύθυνση του πεδίου. Και με αυτό τον τρόπο επέρχεται κατάσταση δυναμικής ισορροπίας. Η διάταξη ημιαγωγών που αποτελείται από μία ένωση p-n και από μία ηλεκτρική σύνδεση στο κάθε τμήμα της ονομάζεται δίοδος [13].

1.5 Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση της διόδου

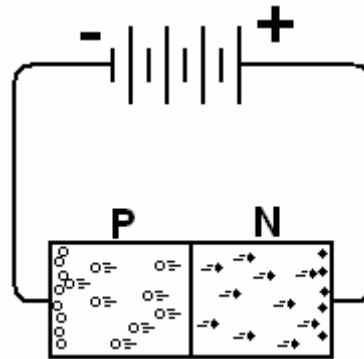
Η μία περίπτωση είναι να επιβληθεί στη δίοδο p-n ορθή πόλωση, δηλαδή ο αρνητικός πόλος της πηγής να συνδεθεί με το τμήμα τύπου n της διόδου, και ο θετικός πόλος με το τμήμα τύπου p. Τότε, τα ηλεκτρόνια ρέουν ανεμπόδιστα από την πηγή, διαμέσου του τμήματος τύπου n, προς την περιοχή της ένωσης όπου επανασυνδέονται με τις οπές που σχηματίζονται με την απομάκρυνση ηλεκτρονίων προς το θετικό πόλο της πηγής, διαμέσου του τμήματος τύπου p.



Σχήμα 5 : Συνδεσμολογία ορθής πόλωσης [14]

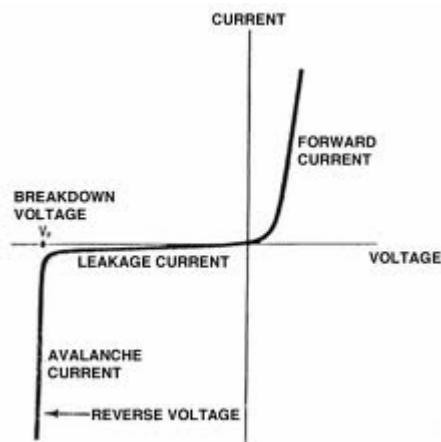
Αντίθετα, στην ανάστροφη πόλωση, δηλαδή αν ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδεθεί με το τμήμα τύπου p και ο θετικός με το τμήμα τύπου n, τότε επανασυνδέονται οι οπές του τμήματος τύπου p με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την πηγή, και, από την άλλη μεριά, απομακρύνονται τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τμήματος τύπου n, προς το θετικό πόλο της πηγής. Έτσι, οι συγκεντρώσεις των

φορέων μειώνονται πάρα πολύ, το πάχος της ζώνης εξάντλησης αυξάνει, και τα φορτισμένα άτομα των προσμίξεων δημιουργούν ένα ισχυρό εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο που είναι αντίθετο προς το πεδίο που επιβάλλει η πηγή. Το αποτέλεσμα είναι ότι τώρα η δίοδος προβάλλει μεγάλη αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα. Δηλαδή μπορεί μια δίοδος που έχει σε ορθή πόλωση αντίσταση μόλις 10Ω , να την αυξάνει στην αντίστροφη πόλωση σε $100\text{ M}\Omega$, δηλαδή να γίνεται δέκα εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη.



Σχήμα 6 : Συνδεσμολογία ανάστροφης πόλωσης [14]

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει ακριβώς την ιδιόμορφη μεταβολή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει μια δίοδος ένωσης p-n, σε συνάρτηση με την τιμή της τάσης και το είδος της πόλωσης που εφαρμόζεται.

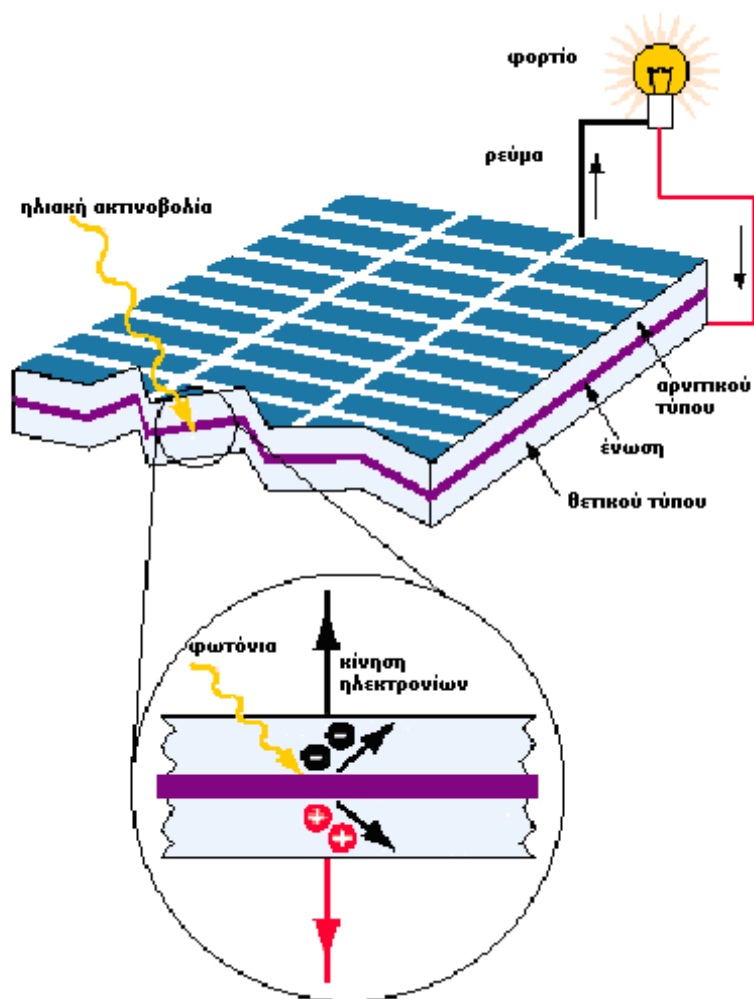


Χαρακτηριστική I-V 1 : Διόδου [15]

1.6 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Φέρνοντας σε επαφή τους ημιαγωγούς τύπου n και p σχηματίζεται ηλεκτρικό πεδίο. Τα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου n κινούνται προς τις κενές θέσεις του πυριτίου τύπου p για να τις καλύψουν. Στην ένωση των δύο υλικών επιτυγχάνεται ισορροπία και δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις δύο πλευρές. Το ηλεκτρικό πεδίο λειτουργεί σαν ηλεκτροδίο, επιτρέποντας τα ηλεκτρόνια να περάσουν από το πυρίτιο p στο n αλλά όχι αντίστροφα. Όταν φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας, κατάλληλου μήκους κύματος, προσπίπτουν σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο διεγείρουν ηλεκτρόνια και τα ελευθερώνουν δημιουργώντας παράλληλα αντίστοιχες οπές. Κάθε φωτόνιο με αρκετή ενέργεια θα ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο

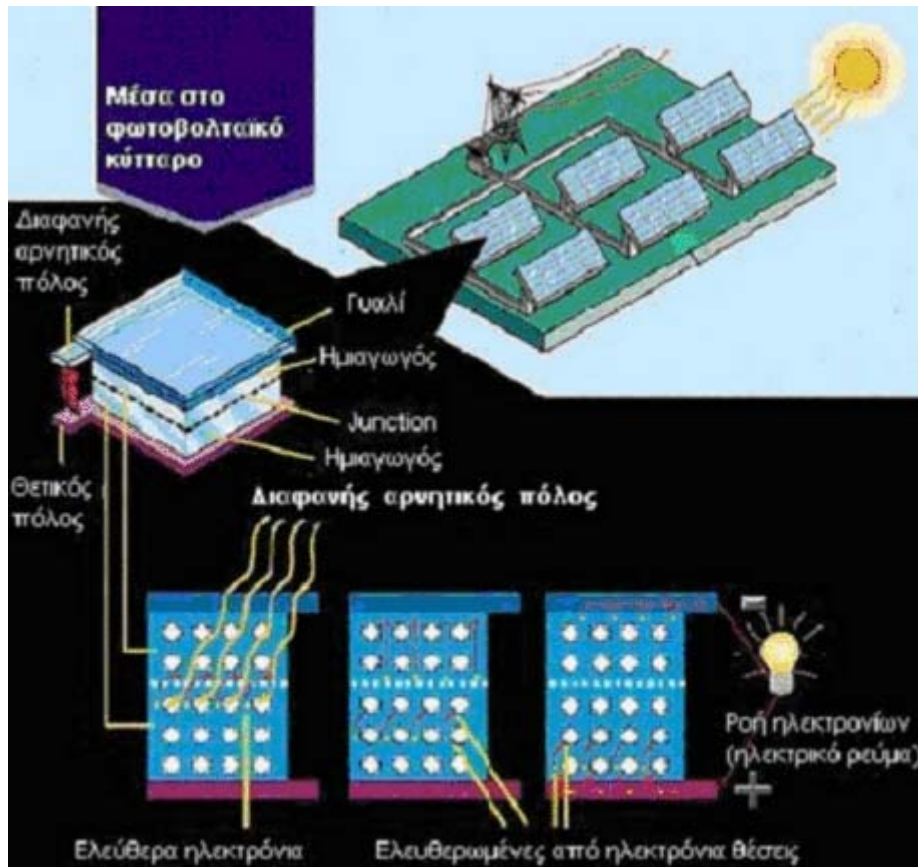
και θα δημιουργήσει μια οπή. Αν αυτό συμβεί κοντά στο ηλεκτρικό πεδίο ή αν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή βρεθούν κοντά στην ένωση p-n ημιαγωγών, το πεδίο θα εξαναγκάσει το ηλεκτρόνιο να πάει στον ημιαγωγό n και θα οδηγήσει την οπή στο πυρίτιο p. Αυτό προκαλεί μεγαλύτερη ανισορροπία στην ηλεκτρική ουδετερότητα και αν χρησιμοποιηθεί μία εξωτερική αγώγιμη οδός τα ηλεκτρόνια θα περάσουν μέσα από αυτή για να πάνε στην αρχική τους θέση από όπου το ηλεκτρικό πεδίο τα απομάκρυνε. Η ροή αυτή των ηλεκτρονίων δημιουργεί το ρεύμα, και το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί την τάση του ρεύματος.



Σχήμα 7 : Λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων στηριζόμενη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο [11]

Το μέγιστο θεωρητικό ποσό ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο είναι περίπου το 25% της ενέργειας που δέχεται, αλλά το πιο συνηθισμένο ποσοστό είναι λιγότερο από 15%. Καθώς η ηλιακή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική, αποτελείται από φάσμα διαφορετικών μηκών κυμάτων, άρα και από φωτόνια διαφορετικών επιπέδων ενέργειας. Τα φωτόνια χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου δεν μπορούν να διεγείρουν ηλεκτρόνια του ημιαγωγού και απλώς διέρχονται μέσα από το φωτοβολταϊκό κύτταρο. Μόνο τα φωτόνια που μεταφέρουν μεγαλύτερη ή ίση ενέργεια από ένα συγκεκριμένο ποσό που

εξαρτάται από το υλικό που είναι κατασκευασμένο το κύτταρο (ενεργειακό διάκενο) μπορούν να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια. Η τεχνολογία των ημιαγωγικών υλικών επέτρεψε την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην παραγωγή ηλεκτρισμού, καθώς ενδεχόμενη χρήση αγώγιμων υλικών, όπως τα μέταλλα, θα οδηγούσε μεν σε μεγαλύτερη ροή ηλεκτρονίων αλλά θα παρουσίαζε πολύ χαμηλή τάση πεδίου [1].



Σχήμα 8 : Μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια [1]

2. Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

2.1 Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου

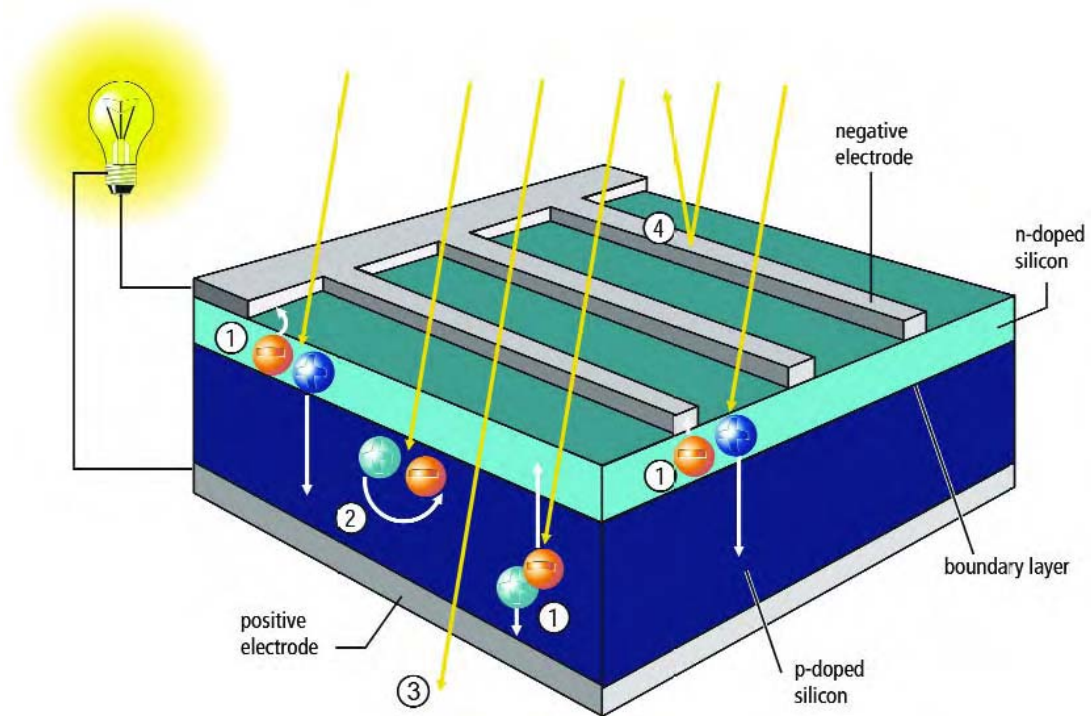
Κατασκευαστικά για λόγους μηχανικής αντοχής και ευχρηστίας, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν ενσωματωμένα στο περίγραμμά τους μεταλλικά ελάσματα ανοδιωμένου αλουμινίου, και για λόγους προστασίας είναι αεροστεγώς και υδατοστεγώς κλεισμένα μέσα σε ειδικό γυαλί και ειδικό μονωτικό πλαστικό. Τα φωτοβολταϊκά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

- Μεταλλική βάση
- Πυρίτιο τύπου P
- Πυρίτιο τύπου N
- Μη ανακλαστικό στρώμα επικάλυψης
- Μεταλλικά αγωγία ελάσματα



Σχήμα 9 : Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου [16]

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από πολλά λεπτά οριζόντια ελάσματα, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 9 και είναι περισσότερα σε σχέση με τα κάθετα και είναι αυτά τα στοιχεία που μαζεύουν τα ηλεκτρόνια που διεγείρονται και αποτελούν το ρεύμα. Στη συνέχεια τα ηλεκτρόνια διοχετεύονται στα κάθετα παχιά ελάσματα, που ονομάζονται “busbars” ή διαφορετικά ζυγοί (Σχήμα 10). Οι ζυγοί των στοιχείων ενώνονται μεταξύ τους και έτσι έχουμε πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους τα οποία και αποτελούν το πλαίσιο. Κάθε πλαίσιο έχει δύο ακροδέκτες τον θετικό και τον αρνητικό πόλο.

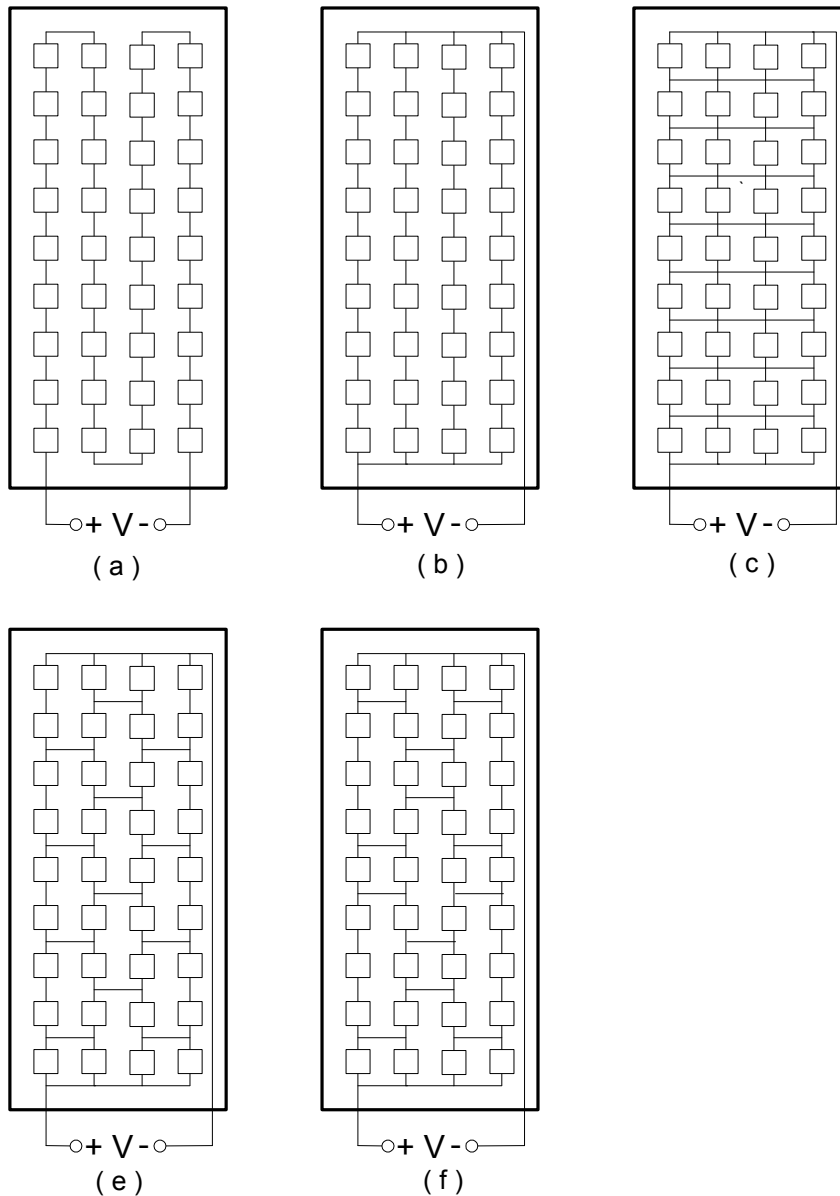


Σχήμα 10 : Πλάγια όψη φωτοβολταϊκού στοιχείου όπου (1) Διαχωρισμός φορτίου (2) Επανασύνδεση (3) Αχρησιμοποίητη φωτεινή ενέργεια (4) Αγωγή ελάσματα [16]

2.2 Συνδέσεις φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους :

1. Σε μια απλή σειρά όπου συνδέουμε τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μεταξύ τους σε σειρά.
2. Σε απλές παράλληλες σειρές (Series – Parallel, SP) όπου συνδέουμε φωτοβολταϊκά στοιχεία μεταξύ τους σε σειρά και αυτή τη σειρά τη συνδέουμε παράλληλα με άλλες σειρές. Συνήθως κάθε σειρά αποτελείται από 9 στοιχεία και κάθε πλαίσιο από 4 σειρές.
3. Σε διατάξεις αθροιστικές σταυρωτού δεσμού (Total – Crossed – Tied, TCT), που προκύπτει από την SP διάταξη συνδέοντας τα ηλεκτρικά συστήματα σταυρωτά σε κάθε σειρά του σημείου συνάντησης.
4. Σε διάταξη γεφυρωτής διασύνδεσης (bridge – linked) στην οποία όλα τα στοιχεία αλληλοσυνδέονται με γεφυρωτή σύνδεση).
5. Σε διάταξη κυψέλης (honeycomb) [17]



Σχήμα 11 : Συνδεσμολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων (a) σε σειρά (b) σε απλές παράλληλες σειρές (c) σε διατάξεις αθροιστικές σταυρωτού δεσμού (d) σε διάταξη γεφυρωτής διασύνδεσης (e) σε διάταξη κυψέλης [17]

2.3 Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία διακρίνονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες, ανάλογα με το υλικό παρασκευής, τη δομή του βασικού υλικού καθώς και τον τρόπο παρασκευής. Έτσι, έχουμε την παρακάτω κατηγοριοποίηση:

2.3.1 Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου μεγάλου πάχους

2.3.1.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Single Crystalline Silicon, sc-Si)

Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3mm. Η απόδοσή τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 - 18% για το πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις

έως και 24,7%. Το μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης. Ένα μειονέκτημά τους είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σύγκριση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Και οι δύο βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου.

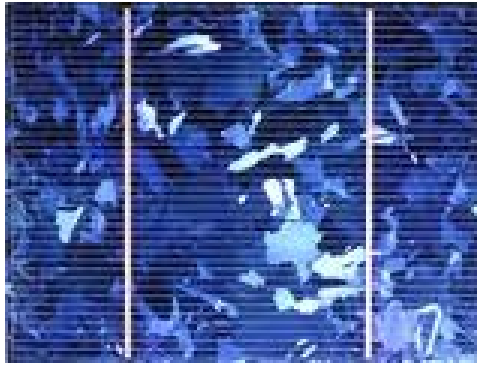
Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με την υψηλότερη απόδοση στο εμπόριο σήμερα, έχει απόδοση πλαισίου 18,5% και έχει μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πλαισίου αποκομίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία [18].



Εικόνα 5 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου [18]

2.3.1.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)

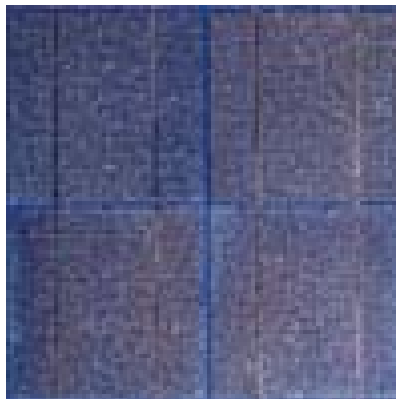
Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3mm. Η μέθοδος παραγωγής τους κοστίζει φθηνότερα σε σύγκριση με αυτή των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή πώλησής τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερη είναι η έκταση της μονοκρυσταλλικής περιοχής τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Στο εργαστήριο 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). Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification) , η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση"), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC [18].



Εικόνα 6 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου [18]

2.3.1.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)

Σε αυτά τα στοιχεία εφαρμόζεται νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου. Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3mm. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 18% [18].



Εικόνα 7 : φωτοβολταϊκό στοιχείο ταινίας πυριτίου [18]

2.3.2 Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών υμενίων, THIN FILM

2.3.2.1 Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη γάλλιου 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 η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο CIGS. 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 [18].



Εικόνα 8 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο τύπου CIS [18]

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

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι και λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη. Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται με 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 φωτοβολταϊκά, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά την διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 mm ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 mm [18].



Εικόνα 9 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου [18]

2.3.2.3 Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το τελουριούχο κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φθάσει το 16%. Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Τροχοπέδη για την χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Επίσης προβληματίζει ή έλλειψη του τελουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό, κατάλληλο για ενσωμάτωση στα κτίρια (BIPV Building Integrated Photovoltaic) [18].



Εικόνα 10 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο CdTe [18]

2.3.2.4 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Το γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το αρσενικό δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43eV που είναι ιδανικό για την

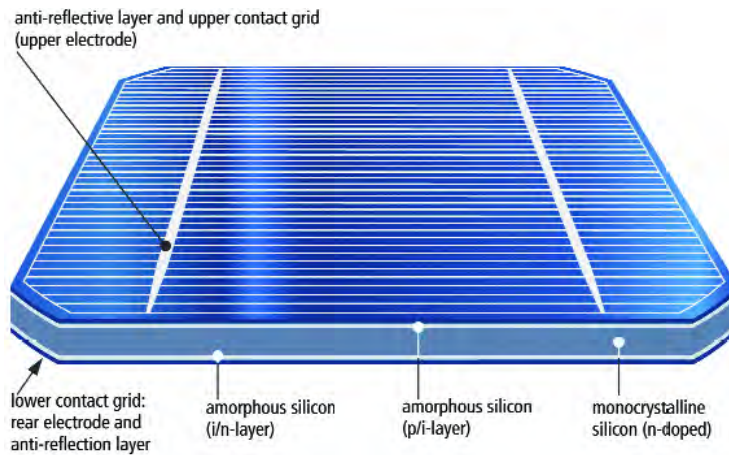
απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος [18].



Εικόνα 11 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο Αρσενικού Γαλλίου [18]

2.3.3 Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Μια άλλη κατηγορία είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που αποτελούνται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer – Ετεροενώσεις με ενδογενή λεπτά στρώματα). Τα πιο γνωστά εμπορικά πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. 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 χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Άλλα πλεονεκτήματα για τα πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού τα φωτοβολταϊκά αυτά έχουν τα παραπάνω πλεονεκτήματα, είναι ακριβότερα σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια [18].



Εικόνα 12 : Πολυστρωματικό φωτοβολταϊκό στοιχείο [8]

2.3.4 Άλλες τεχνολογίες

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες στα φωτοβολταϊκά στοιχεία που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους είναι τα ναοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si) και τα Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία [18].

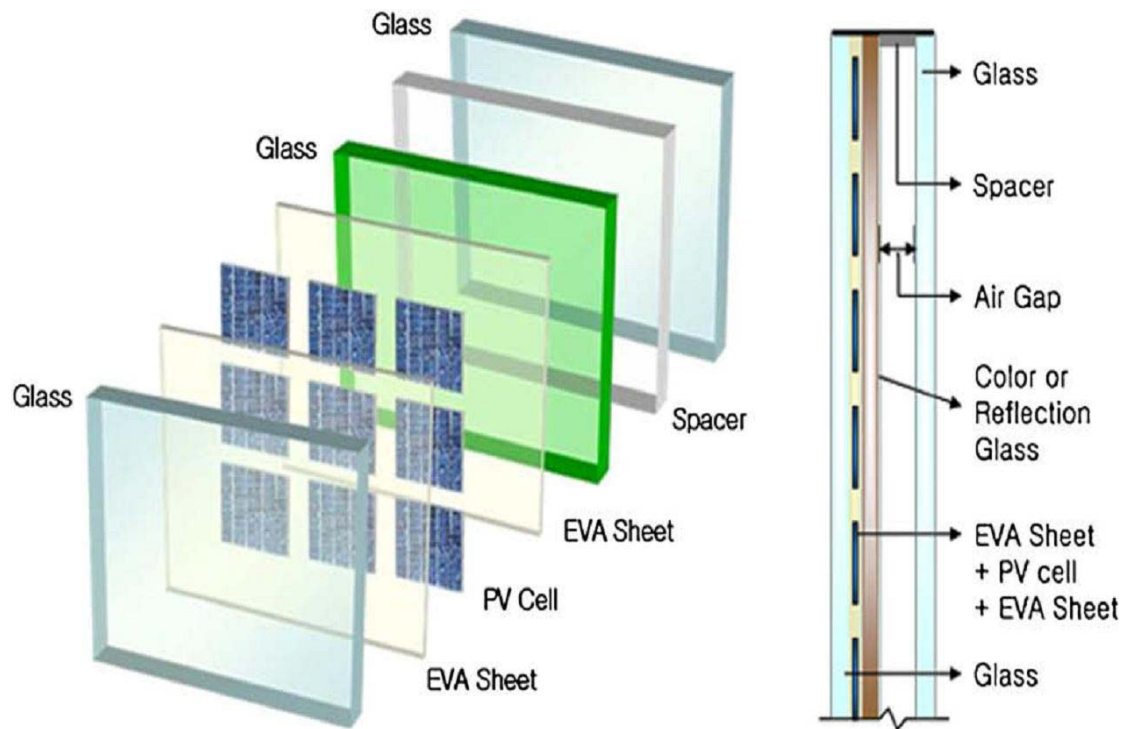
2.4 Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από έναν αριθμό φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για να λειτουργήσει το πλαίσιο τα στοιχεία θα πρέπει να προστατεύονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι πλαισίων και εξαρτώνται από το είδος των φωτοβολταϊκών στοιχείων καθώς και την εφαρμογή τους.

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από διάφορα στρώματα, τα οποία είναι:

- Ειδικό γυαλί
- Συμπυκνωμένο πολυμερές υλικό (Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Sheet) για την ενθυλάκωση των στοιχείων
- Ηλιακά στοιχεία
- Συμπυκνωμένο υλικό (EVA)
- Ειδικό γυαλί
- Κενό αέρος
- Ειδικό γυαλί

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία περικλείονται συνήθως από δυο κομμάτια γυαλιού ή ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικού, ενώ μερικές φορές εξ ολοκλήρου από πλαστικό. Τα είδη των γυαλιών που χρησιμοποιούνται είναι διαφανή, χρωματισμένα και αντανακλούν την θερμότητα. Το συμπυκνωμένο υλικό είναι συνήθως EVA, υλικό που εμφανίζει πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12 : Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται σε σειρά, παράλληλα ή σε συνδυασμούς όπως προαναφέραμε παραπάνω προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε τάση και σε ρεύμα. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πρέπει να είναι όμοια, για να εμφανίζουν όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται επάνω σε περιστρεφόμενα στηρίγματα που ακολουθούν την τροχιά του ήλιου. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας άρα και τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

3. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων

3.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικά κυκλώματα φωτοβολταϊκών στοιχείων

3.1.1 Γενικά

Για να κατανοηθεί η ηλεκτρική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων, είναι χρήσιμο να δημιουργηθεί ένα πρότυπο το οποίο είναι ηλεκτρικά ισοδύναμο, και βασίζεται σε διακριτά ηλεκτρικά στοιχεία των οποίων η συμπεριφορά είναι γνωστή. Σκοπός τους είναι να περιγράψουν με επαρκή ακρίβεια την καμπύλη I-V, να καθορίσουν το σημείο μέγιστης ισχύος ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και έντασης ακτινοβολίας που υπάρχουν και να χρησιμοποιηθούν σε λειτουργία συσκευών ελέγχου και μέτρησης.

Το απλούστερο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα είναι το ιδανικό ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο αποτελείται από μια πηγή ρεύματος παράλληλα με μια δίοδο.

3.1.2 1^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

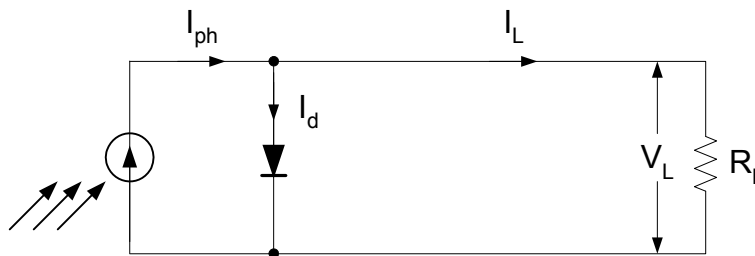
Στο Σχήμα 13 απεικονίζεται το 1^ο ισοδύναμο κύκλωμα όπου το κύκλωμα είναι ιδανικό. Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί μια ισορροπία όταν η τάση, που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα. Δηλαδή πρέπει να ισχύει η σχέση :

$$I_{ph} = I_o \left[\exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

όπου I_{ph} το φωτόρευμα, I_o το ανάστροφο ρεύμα κόρου, q το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο ($1.6 \times 10^{-19} C$), k η σταθερά Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} J/K$), T η απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin και A ένας συντελεστής που ανάλογα με την κατασκευή και την ποιότητα της διόδου παίρνει συνήθως τιμές μεταξύ 1 και 2.

Από την παραπάνω σχέση βρίσκουμε ότι η τιμή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} του στοιχείου είναι :

$$V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1\right) \quad (3.2)$$



Σχήμα 13 : 1^ο Ισοδύναμο κύκλωμα [5]

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων χωρίς φορτίο, η τιμή του I_{ph} είναι πολύ μεγαλύτερη του I_o οπότε η παραπάνω σχέση απλοποιείται στη :

$$V_L = V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o}\right) \quad (3.3)$$

που δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος σε συνάρτηση με το φωτόρευμα.

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσο με το φωτόρευμα I_{ph} :

$$I_{sc} = I_{ph} \text{ και } V = 0 \quad (3.4)$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων υπό φορτίο, το ρεύμα φορτίου I_L υπολογίζεται από τη λύση της εξίσωσης :

$$I_L = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(q \frac{I_L R_L}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

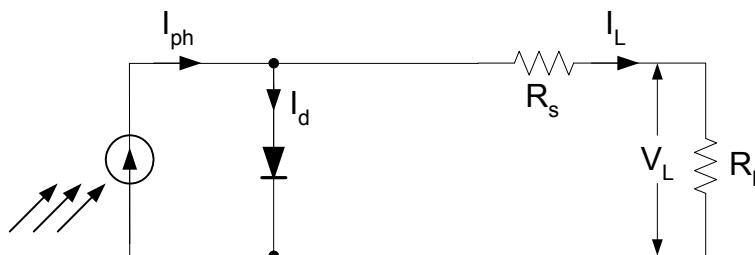
Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V η βέλτιστη τάση είναι $V_L = V_{mpp}$ και δίνεται από τη λύση της εξίσωσης :

$$\frac{I_{ph}}{I_o} + 1 = \left(1 + q \frac{V_{mpp}}{AkT} \right) \exp\left(q \frac{V_{mpp}}{AkT}\right) \quad (3.6)$$

Το ιδανικό μοντέλο είναι το πιο απλοποιημένο ισοδύναμο με αποτέλεσμα βέβαια να υστερεί πάρα πολύ σε ακρίβεια [5].

3.1.3 2^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Στο Σχήμα 14 απεικονίζεται το 2^ο ισοδύναμο κύκλωμα όπου είναι το απλό μοντέλο και περιέχει την αντίσταση R_s η οποία παρεμβάλλεται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό.



Σχήμα 14 : 2^ο Ισοδύναμο κύκλωμα [8]

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η αντίσταση R_s πρέπει να έχει τιμή όσο δυνατόν μικρότερη τιμή. Το ρεύμα I_L υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_L = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(q \frac{V_L + I_L R_s}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (3.7)$$

Η παραπάνω εξίσωση δεν είναι γραμμική. Οι παράμετροι I_{ph} , R_s και A ποικίλουν ανάλογα τη θερμοκρασία και εξαρτώνται από τις ανοχές του κατασκευαστή.

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων χωρίς φορτίο, η $V_L=V_{oc}$ και $I_L=0$. Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$0 = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(q \frac{V_{oc}}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (3.8)$$

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσο με το ρεύμα I_L :

$$I_{sc} = I_L \text{ και } V_L = 0 \quad (3.9)$$

οπότε η σχέση γίνεται :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(q \frac{I_{sc} R_s}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (3.10)$$

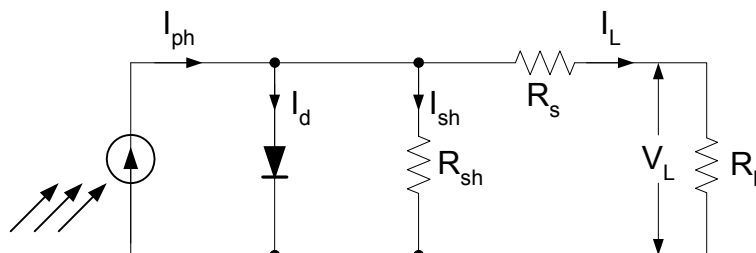
Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V η βέλτιστη τάση είναι $V_L=V_{mpp}$ και $I_L=I_{mpp}$ δίνεται από τη λύση της εξίσωσης :

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (3.11)$$

Η προσθήκη της αντίστασης με την οποία υπολογίζουμε τις απώλειες λόγω της πτώσης τάσης πάνω στις ηλεκτρικές επαφές μας δίνει περισσότερη ακρίβεια σε σύγκριση με το ιδανικό μοντέλο [19].

3.1.4 3^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Στο Σχήμα 15 απεικονίζεται το 3^ο ισοδύναμο κύκλωμα όπου είναι το μοντέλο μιας διόδου και περιέχει την αντίσταση R_s και την αντίσταση R_{sh} η οποία είναι η αντίσταση διαμέσου της διόδου και εκφράζει τις απώλειες από τις διαρροές ρεύματος που υπάρχουν λόγω κατασκευαστικών ελαττωμάτων.



Σχήμα 15 : 3^ο Ισοδύναμο κύκλωμα [19]

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η R_{sh} έχει μεγαλύτερη των 500Ω. Οι αντιστάσεις R_s και R_{sh} μειώνουν αισθητά την απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου αφού

επηρεάζουν τόσο την τάση V_L όσο και το ρεύμα I_L . Το ρεύμα I_L υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_L = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_s}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_L + I_L R_s}{R_{sh}} \quad (3.12)$$

Η παραπάνω εξίσωση δεν είναι γραμμική. Οι παράμετροι I_{ph} , R_s , R_{sh} και A ποικίλουν ανάλογα τη θερμοκρασία και εξαρτώνται από τις ανοχές του κατασκευαστή.

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων χωρίς φορτίο, η $V_L = V_{oc}$ και $I_L = 0$. Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$0 = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (3.13)$$

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσο με το ρεύμα I_L :

$$I_{sc} = I_L \text{ και } V_L = 0 \quad (3.14)$$

οπότε η σχέση γίνεται :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(q \frac{I_{sc} R_s}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (3.15)$$

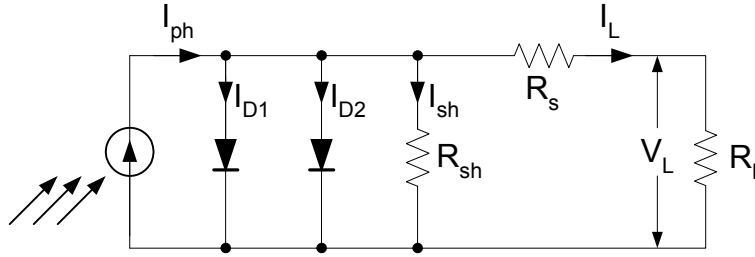
Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V η βέλτιστη τάση είναι $V_L = V_{mpp}$ και $I_L = I_{mpp}$ δίνεται από τη λύση της εξίσωσης :

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}} \quad (3.16)$$

Το μοντέλο μιας διόδου έχει μη επαρκή ακρίβεια σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών [8].

3.1.5 4^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Στο Σχήμα 16 απεικονίζεται το 4^ο ισοδύναμο κύκλωμα όπου είναι το μοντέλο δύο διόδων και περιέχει τις αντιστάσεις R_s και R_{sh} , τη δίοδο D1 η οποία συνήθως είναι ιδανική σύμφωνα με τη σχέση $I_{D1} = I_{s1} \exp \left(q \frac{V_D}{A_1 kT} \right)$ (3.17) και έχει συντελεστή κατασκευής A_1 ίσο με 1 και τη δίοδο D2 η οποία είναι μη ιδανική υπακούοντας τη σχέση $I_{D2} = I_{s2} \exp \left(q \frac{V_D}{A_2 kT} \right)$ (3.18) και έχει συντελεστή κατασκευής A_2 .



Σχήμα 16 : 4^ο Ισοδύναμο κύκλωμα [8]

Το ρεύμα I_L υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_L = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_s}{A_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_s}{A_2 k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_L + I_L R_s}{R_{sh}} \quad (3.19)$$

όπου I_{s1} το ρεύμα κόρου λόγω διάχυσης και I_{s2} το ρεύμα κόρου λόγω επανασύνδεσης. Οι υπόλοιπες παράμετροι ομοίως με παραπάνω.

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων χωρίς φορτίο, η $V_L = V_{oc}$ και $I_L = 0$. Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$0 = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{A_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{A_2 k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (3.20)$$

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσο με το ρεύμα I_L :

$$I_{sc} = I_L \text{ και } V_L = 0 \quad (3.21)$$

οπότε η σχέση γίνεται :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{I_{sc} R_s}{A_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{I_{sc} R_s}{A_2 k T} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (3.22)$$

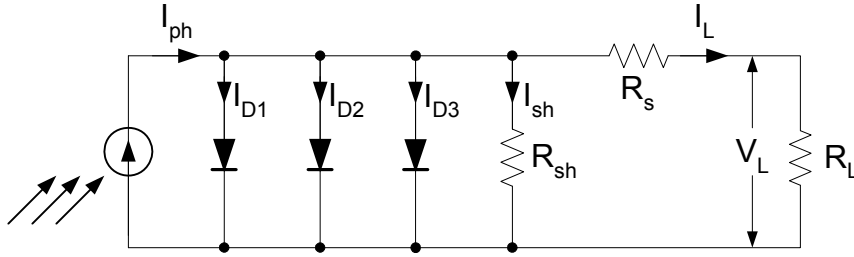
Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V η βέλτιστη τάση είναι $V_L = V_{mpp}$ και $I_L = I_{mpp}$ δίνεται από τη λύση της εξίσωσης :

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{A_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{A_2 k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}} \quad (3.23)$$

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για μεγαλύτερη ακρίβεια [17].

3.1.6 5^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Στο Σχήμα 17 απεικονίζεται το 5^ο ισοδύναμο κύκλωμα όπου είναι το μοντέλο τριών διόδων και περιέχει τις αντιστάσεις R_s και R_{sh} , τη δίοδο D1, τη δίοδο D2 και τη δίοδο D3.



Σχήμα 17 : 5^ο Ισοδύναμο κύκλωμα [20]

Το ρεύμα I_L υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_L = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_s}{A_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_s}{A_2 k T} \right) - 1 \right] - I_{s3} \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_s}{A_3 k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_L + I_L R_s}{R_{sh}} \quad (3.24)$$

όπου I_{s1} το ρεύμα κόρου λόγω διάχυσης, I_{s2} το ρεύμα κόρου λόγω επανασύνδεσης και I_{s3} το ρεύμα κόρου λόγω θερμιονικής εκπομπής. Οι υπόλοιπες παράμετροι ομοίως με παραπάνω.

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων χωρίς φορτίο, η $V_L = V_{oc}$ και $I_L = 0$. Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$0 = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{A_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{A_2 k T} \right) - 1 \right] - I_{s3} \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{A_3 k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (3.25)$$

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσο με το ρεύμα I_L :

$$I_{sc} = I_L \text{ και } V_L = 0 \quad (3.26)$$

οπότε η σχέση γίνεται :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{I_{sc} R_s}{A_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{I_{sc} R_s}{A_2 k T} \right) - 1 \right] - I_{s3} \left[\exp \left(q \frac{I_{sc} R_s}{A_3 k T} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (3.27)$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V η βέλτιστη τάση είναι $V_L = V_{mpp}$ και $I_L = I_{mpp}$ δίνεται από τη λύση της εξίσωσης :

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{A_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{A_2 k T} \right) - 1 \right] - I_{s3} \left[\exp \left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{A_3 k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}} \quad (3.28)$$

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια [18].

3.1.7 6^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

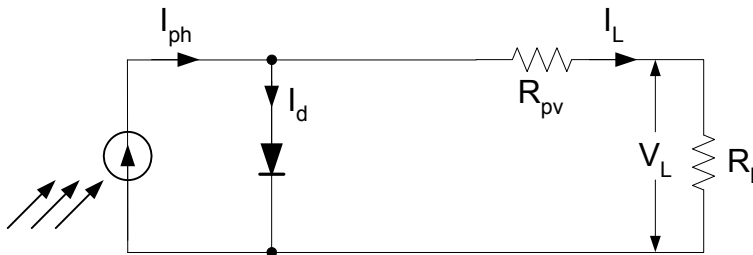
Στο Σχήμα 18 απεικονίζεται το 6^ο ισοδύναμο κύκλωμα όπου είναι το αποτελεσματικό μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου και περιέχει την αντίσταση R_{pv} η οποία είναι ο συνδυασμός των R_s και R_{sh} και δεν είναι ωμική αντίσταση αφού παίρνει είτε θετικές είτε αρνητικές τιμές.

Για την περιγραφή αυτού του μοντέλου απαιτούνται τέσσερις παράμετροι των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Οι τέσσερις παράμετροι που πρέπει να υπολογίσουμε είναι η αντίσταση R_{pv} , η θερμοκρασία T , το ρεύμα I_o και το φωτόρευμα I_{ph} . Αρχικά υπολογίζουμε την κλίση M . Υπάρχουν δύο τρόποι για τον υπολογισμό της. Ο πρώτος είναι γραφικά όπου $M = \frac{dV}{dI} = \tan \phi = \frac{\Delta V}{\Delta I}$ και το MPP βρίσκεται πάνω στην καμπύλη σε γωνία 45° (Αφού $\tan 45^\circ = 1$) και ο δεύτερος είναι από τη σχέση :

$$M = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \left(-5.411 \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{V_{oc} \times I_{sc}} + 6.450 \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} + 3.417 \frac{I_{mpp}}{I_{sc}} - 4.422 \right) \quad (3.29)$$

Γνωρίζοντας τώρα την κλίση M μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση R_{pv} από τη σχέση :

$$R_{pv} = -M \frac{I_{sc}}{I_{mpp}} + \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_{mpp}} \right) \quad (3.30)$$



Σχήμα 18: 6^ο Ισοδύναμο κύκλωμα [8]

Το ρεύμα I_L υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_L = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_{pv}}{A k T} \right) - 1 \right] \quad (3.31)$$

Η παραπάνω εξίσωση δεν είναι γραμμική. Οι παράμετροι I_{ph} , R_{pv} και A ποικίλουν ανάλογα τη θερμοκρασία και εξαρτώνται από τις ανοχές του κατασκευαστή.

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων χωρίς φορτίο, η $V_L = V_{oc}$ και $I_L = 0$. Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$0 = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(q \frac{V_{oc}}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (3.32)$$

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσο με το ρεύμα I_L :

$$I_{sc} = I_L \text{ και } V_L = 0 \quad (3.33)$$

οπότε η σχέση γίνεται :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(q \frac{I_{sc} R_{\pi\omega}}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (3.34)$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V η βέλτιστη τάση είναι $V_L = V_{mpp}$ και $I_L = I_{mpp}$ δίνεται από τη

$$\text{λύση της εξίσωσης : } I_{mpp} = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_{pv}}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (3.35)$$

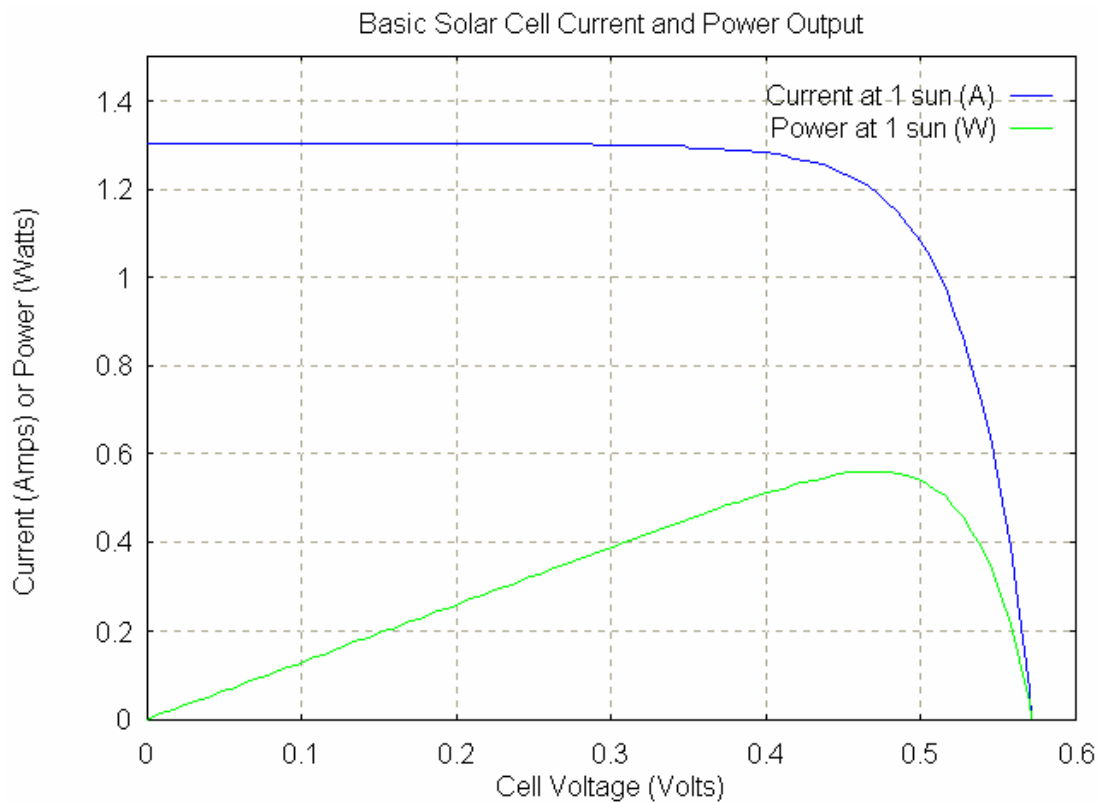
Το αποτελεσματικό μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου χρησιμοποιείται για μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά και σε εφαρμογές προσομοίωσης [8].

3.2 Καμπύλη I-V

3.2.1 Γενικά

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Ενώ οι περισσότερες ηλεκτρικές πηγές διατηρούν τη τάση τους σταθερή στην περιοχή κανονικής λειτουργίας τους, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η τάση μεταβάλλεται ριζικά και μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που παρέχουν στο κύκλωμα ακόμα και αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή.

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για μεταβαλλόμενες τιμές της αντίστασης του κυκλώματος που τροφοδοτεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του φωτοβολταϊκού στοιχείου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (Το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο και έχει μέγιστη τιμή ρεύματος I_{sc} και μηδενική τάση) και σε άπειρη αντίσταση (Το κύκλωμα είναι ανοιχτοκυκλωμένο και έχει μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης V_{oc}), όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω χαρακτηριστική.



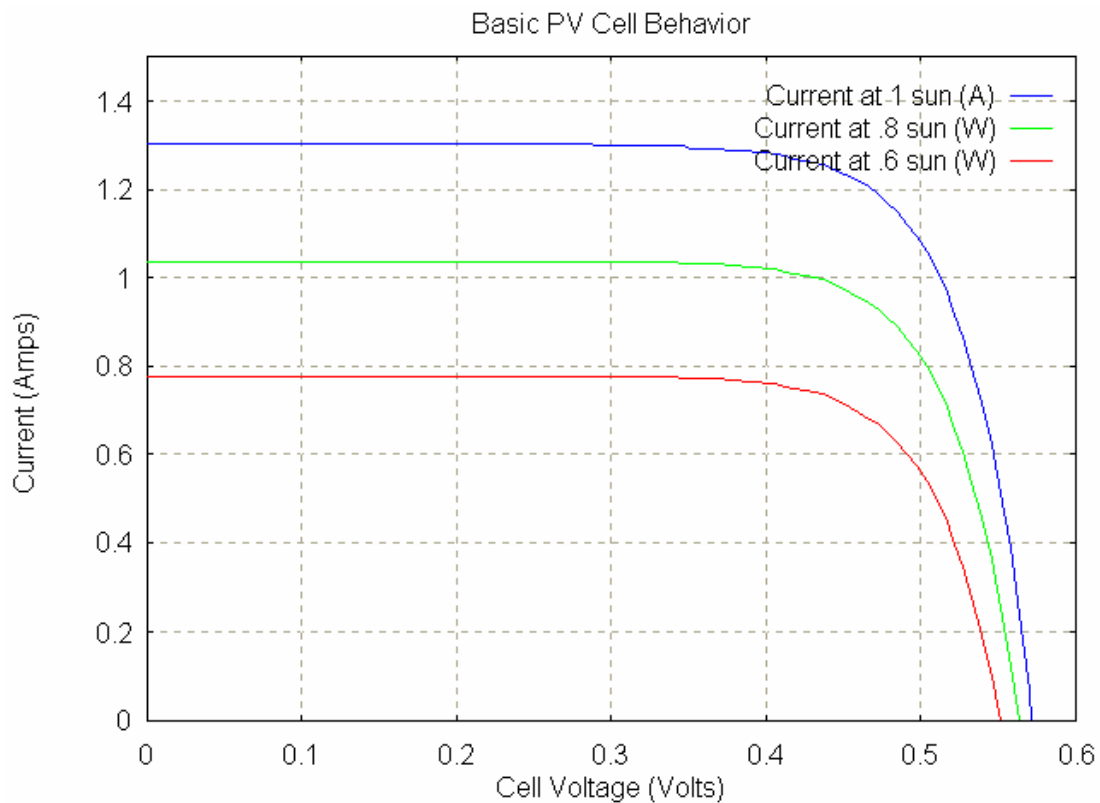
Χαρακτηριστική P-V 1 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου για σταθερή ένταση ακτινοβολίας και θερμοκρασίας [21]

Χαρακτηριστική I-V 2 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου για σταθερή ένταση ακτινοβολίας και θερμοκρασίας [21]

3.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την καμπύλη I-V

3.2.2.1 Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας G

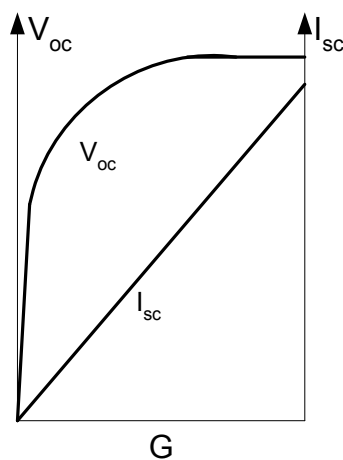
Σε αυτή τη περίπτωση η ένταση του ρεύματος που παρέχει στο κύκλωμα το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι πρακτικά ανάλογη προς την ποσότητα της ακτινοβολίας που δέχεται, δηλαδή προς το γινόμενο της έντασης (της πυκνότητας της ισχύος) της ακτινοβολίας επί το εμβαδόν της επιφάνειάς του.



Χαρακτηριστική I-V 3 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από την ένταση ακτινοβολίας G [21]

Το ρεύμα βραχυκυκλώματος I_{sc} μεταβάλλεται γραμμικά με την ακτινοβολία, ενώ η τάση του ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} μένει σχεδόν σταθερή στις μεταβολές της ακτινοβολίας για μεγάλες σχετικά τιμές ακτινοβολίας. Μαθηματικά, η εξάρτηση τάσης-ακτινοβολίας είναι λογαριθμική, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα σύμφωνα με τη σχέση :

$$V_L = V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o}\right) \quad (3.36)$$



Χαρακτηριστική V-G 1 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου [5]

Χαρακτηριστική I-G 1 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου [5]

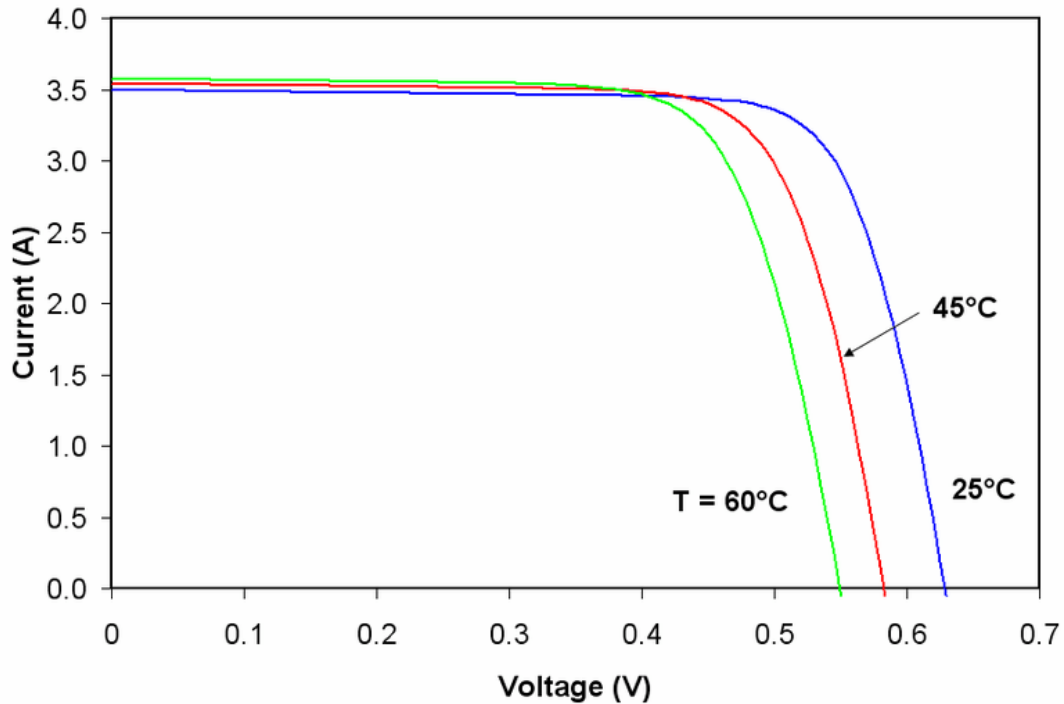
3.2.2.2 Η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου T

Η θερμοκρασία επηρεάζει την χαρακτηριστική I-V με δύο τρόπους : άμεσα, μέσω του T που βρίσκεται στον εκθετικό όρο της χαρακτηριστικής εξίσωσης 3.1 και έμμεσα μέσω της επίδρασης του I_0 . Ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το μέγεθος του εκθέτη, το μέγεθος του I_0 αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση θερμοκρασίας. Η πιο σωστή επίδραση είναι να μειωθεί η V_{oc} γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το μέγεθος αυτής της μείωσης είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την V_{oc} δηλαδή τα φωτοβολταϊκά στοιχεία με τις υψηλότερες τιμές της V_{oc} υφίστανται τις μικρότερες μειώσεις της τάσης με την αυξανόμενη θερμοκρασία.

Για τα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου η αλλαγή στην V_{oc} με τη θερμοκρασία είναι της τάξης του $-0,5\%/^{\circ}\text{C}$ ενώ για τα υψηλής απόδοσης είναι της τάξης του $-0,3\%/^{\circ}\text{C}$.

Η τιμή του φωτορεύματος I_{ph} αυξάνεται αργά καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία λόγω της αύξησης των φορέων στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Πάντως αυτή η επίδραση είναι μικρή της τάξης του $0.065\%/^{\circ}\text{C}$ για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου και $0.09\%/^{\circ}\text{C}$ για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου.

Η γενική επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας αυτούς τους παράγοντες σε σχέση με τη χαρακτηριστική εξίσωση. Εντούτοις, δεδομένου ότι η αλλαγή στην τάση είναι πολύ ισχυρότερη από την αλλαγή στο ρεύμα, η γενική επίδραση στην απόδοση τείνει να είναι παρόμοια με αυτήν στη τάση. Στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου μειώνεται η απόδοσή τους κατά $0.50\%/^{\circ}\text{C}$ και στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου μειώνεται κατά $0.15-0.25\%/^{\circ}\text{C}$ [22].



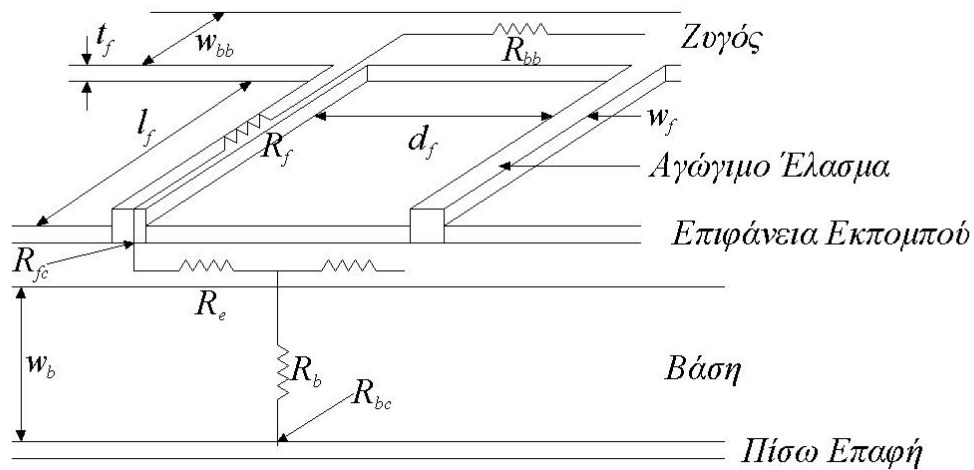
Χαρακτηριστική I-V 4 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από T [22]

3.2.2.3 Ο συντελεστής κατασκευής και ποιότητας A

Ο συντελεστής κατασκευής και ποιότητας A εκφράζει πόσο πλησιάζει η συμπεριφορά της διόδου την θεωρητική όπου η επαφή p-n είναι ιδανική και δεν υπάρχει καμία επανασύνδεση φορέων μέσα στην περιοχή ανταλλαγής φορτίου. Όταν ο συντελεστής είναι 1 έχουμε την ιδανική δίοδο ενώ είναι 2 όταν υπάρχει σε μεγάλο βαθμό επανασύνδεση φορέων [22].

3.2.2.4 Η αντίσταση σειράς R_s

Όπως αναφέραμε παραπάνω η αντίσταση σειράς R_s εμποδίζει τη διέλευση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό. Στο παρακάτω Σχήμα φαίνεται αναλυτικότερα η δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου καθώς και οι αντιστάσεις από τις οποίες αποτελείται η αντίσταση σειράς.



Σχήμα 19: Αντιστάσεις που αποτελούν την αντίσταση σειράς του φωτοβολταϊκού στοιχείου [23]

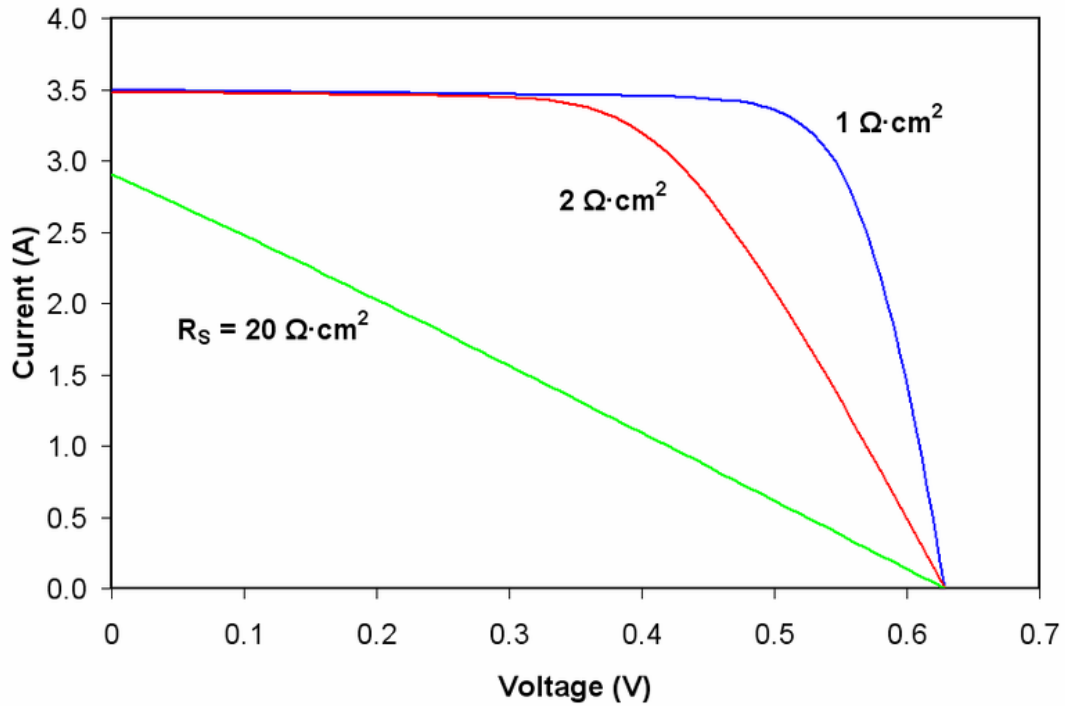
Οι εκφράσεις για τις διάφορες αντιστάσεις οι οποίες αποτελούν την αντίσταση σειράς R_s αναλύονται στον παρακάτω πίνακα. Συγκεκριμένα R_{sp} είναι η αντίσταση επιφάνειας του εκπομπού (Ω /τετράγωνο), ρ_{cf} και ρ_{cr} είναι οι ειδικές αντιστάσεις της μπροστινής και της πίσω επαφής, ρ_b είναι η ειδική αντίσταση της βάσης και ρ_m είναι η ειδική αντίσταση των μπροστινών αγώγιμων ελασμάτων [23].

Πίνακας 2 : Τύποι υπολογισμού αντίστασης των στοιχείων της R_s [23]

Εξάρτημα Αντίστασης	Σύμβολο	Τύπος
Αντίσταση εκπομπού	R_e	$R_e = \frac{R_{sp} d_f}{7l_f}$
Αντίσταση βάσης	R_b	$R_b = AW_b \rho_b$
Αντίσταση μπροστινής επαφής	R_{fc}	$R_{fc} = \frac{\sqrt{R_{sp} \rho_{cf}}}{l_f} \coth \left(W_f \sqrt{\frac{R_{sp}}{\rho_{cf}}} \right)$
Αντίσταση πίσω επαφής	R_{bc}	$R_{bc} = A \rho_{cr}$
Αντίσταση αγώγιμων ελασμάτων	R_f	$R_f = \frac{l_f \rho_m}{3t_f W_f}$
Αντίσταση ζυγού	R_{bb}	$R_{bb} = \frac{\rho_m}{3t_f W_{bb}}$

Αν υποθέσουμε ότι η αντίσταση σειράς αυξάνεται, τότε η πτώση τάσης στα άκρα της αυξάνεται για την ίδια τιμή της έντασης του ρεύματος, με αποτέλεσμα να μειωθεί η τάση V στα άκρα του φορτίου άρα και του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} για μεγάλες τιμές της R_s , ενώ η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} παραμένει σταθερή.

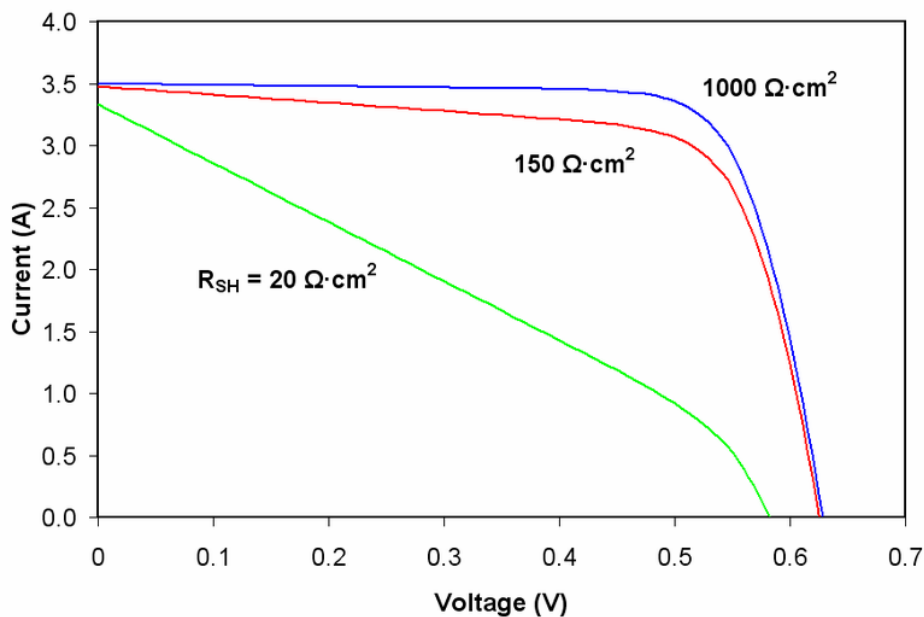
Οι απώλειες υπολογίζονται από τη σχέση $P = I^2 R_s$ (3.37) και αυξάνονται όσο αυξάνεται το I_{ph} δηλαδή όσο αυξάνεται η ένταση ακτινοβολίας [22].



Χαρακτηριστική I-V 5 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από R_s [22]

3.2.2.5 Η παράλληλη αντίσταση R_{sh}

Αν υποθέσουμε ότι η παράλληλη αντίσταση μειώνεται, τότε η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση R_{sh} αυξάνεται για δεδομένη τιμή της τάσης V στα άκρα της, με αποτέλεσμα να μειωθεί η τιμή της έντασης του ρεύματος φορτίου I_L και συνεπώς η τάση V_{oc} . Για μικρές τιμές της R_{sh} θα υπάρξει σημαντική μείωση της τάσης V_{oc} [22].



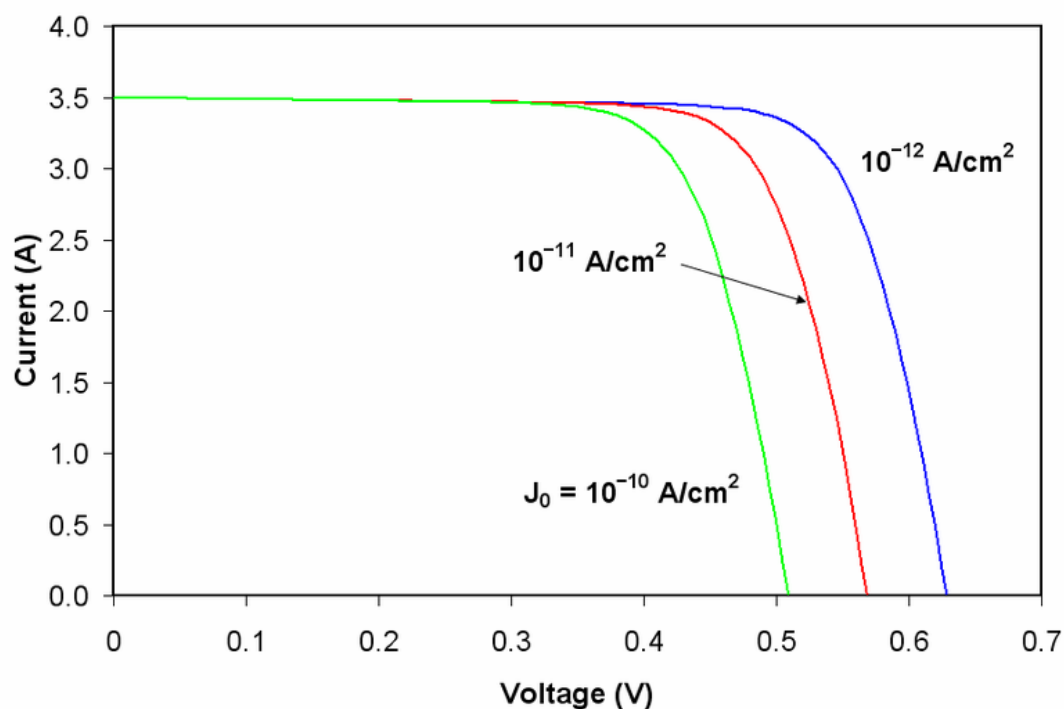
Χαρακτηριστική I-V 6 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από R_{sh} [22]

3.2.2.6 Ανάστροφο ρεύμα κόρου

Εάν υποθέσουμε πως η παράλληλη αντίσταση είναι άπειρη τότε η χαρακτηριστική εξίσωση του κυκλώματος μπορεί να λυθεί ως προς V_{oc} :

$$V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1\right) \quad (3.38)$$

Οπότε μία αύξηση του ρεύματος κόρου έχει ως συνέπεια τη μείωση της V_{oc} η οποία είναι ανάλογη του αντίστροφου του λογαρίθμου.



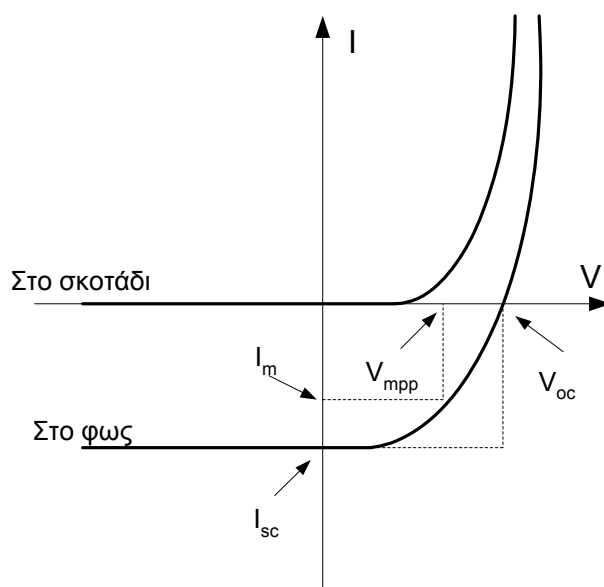
Χαρακτηριστική I-V 7 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από I_o [22]

3.3 Συντελεστής Πλήρωσης

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος P_{mmp} προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης I_{sc} και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF (Fill Factor)

$$FF = \frac{P_{mmp}}{I_{sc}V_{oc}} = \frac{I_{mmp}V_{mmp}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (3.39)$$

Στο παρακάτω διάγραμμα ο συντελεστής πλήρωσης FF δίνεται από το λόγο του εμβαδού του μέγιστου ορθογωνίου που μπορεί να εγγραφεί στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V του στοιχείου, σε συνθήκες ακτινοβολίας, προς το εμβαδόν που ορίζεται από τις τιμές I_{sc} και V_{oc} [5].



Χαρακτηριστική I-V 8 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από το φως [5]

4. Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών

4.1 Ορισμός

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος P_{mmp} προς το γινόμενο της επιφάνειας A του φωτοβολταϊκού στοιχείου και της έντασης ακτινοβολίας G μας δίνει το βαθμό απόδοσης.

$$\eta = \frac{P_{mmp}}{AG} = \frac{I_{mmp} V_{mmp}}{AG} = \frac{FFI_{sc} V_{oc}}{AG} \quad (4.1)$$

Η απόδοση αυτή είναι πάντοτε μικρότερη από τη μέγιστη θεωρητική απόδοση $\eta_{max,th}$, που δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{max,th} = \frac{\phi(E_g) V_m}{\phi E_\mu} \quad (4.2)$$

όπου $\phi(E_g)$ είναι η ροή των φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, ϕ είναι η συνολική φωτονική ροή στην ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο και E_μ είναι η μέση ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας.

Στην ηλιακή ακτινοβολία, περίπου τα 2/3 των φωτονίων έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου (1,1eV). Επίσης, η V_m των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου ίση με το 1/3 της E_μ της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως βρίσκουμε πρόχειρα ότι η μέγιστη θεωρητική απόδοση των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου :

$$\eta = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3} = 22\% \quad (4.3)$$

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται σημαντικά από τη σύσταση της ακτινοβολίας. Δηλαδή, μια δέσμη ακτινοβολίας θα προκαλέσει σε ένα στοιχείο την παραγωγή λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με μια άλλη ίσης ισχύος αλλά πλουσιότερη σε φωτόνια με ευνοϊκότερη ενέργεια για τον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο [5].

4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης

4.2.1 Γενικά

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να είναι είτε εσωτερικοί είτε εξωτερικοί. Εσωτερικοί είναι τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού στοιχείου R_s , οι οπτικές απώλειες, η γήρανση, η χωροταξική τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και η δίοδος αντεπιστροφής ενώ εξωτερικοί είναι η ακτινοβολία, η σκίαση, η θερμοκρασία, ο άνεμος, η ρύπανση και οι ηλεκτρικές απώλειες.

4.2.2 Η αντίσταση R_s

Η αντίσταση R_s είναι ένας σημαντικός παράγοντας που παίζει ρόλο στο βαθμό απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ της όψης του στοιχείου και της ένωσης p-n τόσο μεγαλύτερη είναι και η αντίσταση (βλέπε 3.2.2.4) άρα και οι απώλειες ισχύος. Οπότε για να έχουμε καλύτερο βαθμό απόδοσης πρέπει να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερη R_s .

4.2.3 Η γήρανση

Λόγω της φθοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και των υπόλοιπων μερών που απαρτίζουν το φωτοβολταϊκό σύστημα αναμένεται ότι με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται μία μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος, που συνήθως υπολογίζεται από 1% ως 2% για κάθε έτος [5].

4.2.4 Οι οπτικές απώλειες

Με τον όρο οπτικές απώλειες εννοούμε τη διαφοροποίηση της ανακλαστικότητας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (υαλοπίνακας, αντανακλαστικό επίστρωμα, υλικό φωτοβολταϊκών στοιχείων) σε σχέση με την αντίστοιχη σε STC (Standard Testing Conditions). Η ανακλαστικότητα του οπτικού συστήματος όψεως του φωτοβολταϊκού πλαισίου, σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή σε Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς, αυξάνει καθώς αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στην επιφάνειά του, ιδιαίτερα σε γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60° .

Επίσης, οπτικές απώλειες έχουμε και με τη διαφοροποίηση του φάσματος της ακτινοβολίας. Καθώς το $A.M=1.5$ ηλιακό φάσμα που καθορίζεται από τις STC, χρησιμοποιείται ως αναφορά για τις προδιαγραφές απόδοσης των πλαισίων, η ετήσια παραγωγή του πλαισίου θεωρείται σχετικά ανεξάρτητη από τις μεταβολές του ηλιακού φάσματος γιατί οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά τη διάρκεια της ημέρας, εξαλείφονται κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση. Αυτά όσον αφορά φωτοβολταϊκά ευρείας φασματικής περιοχής. Για φωτοβολταϊκά στενής φασματικής περιοχής οι ετήσιες απώλειες είναι σημαντικότερες.

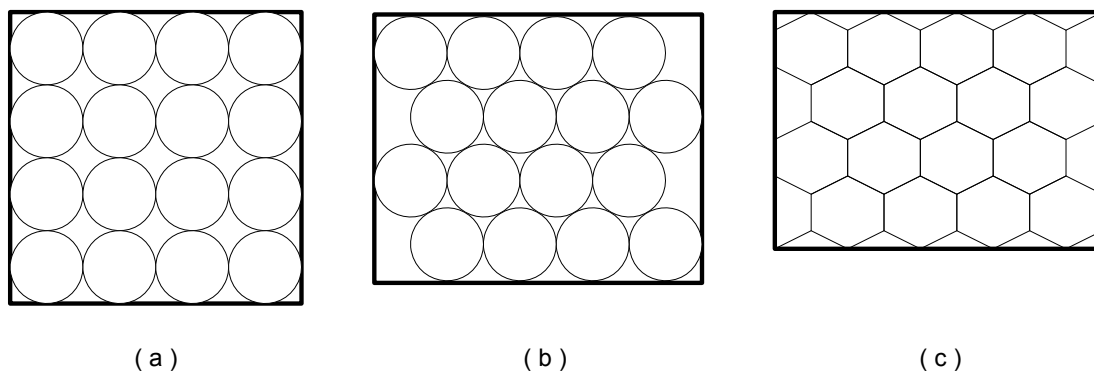
Επιπλέον, υπάρχουν απώλειες λόγω διαφοροποίησης της πόλωσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η μέση ετήσια επίδραση του παράγοντα αυτού προσδιορίζεται γύρω στο 2%. Τέλος, οπτικές απώλειες παρατηρούνται και λόγω χαμηλών τιμών της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του ηλιακού στοιχείου μειώνεται στις χαμηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιαίτερα κάτω από την τιμή των 200 W/m^2 . Οι

οπτικές απώλειες, αποδεικνύονται μικρής σημασίας για εμπορικά πλαίσια καλής ποιότητας. Σε άλλες όμως περιπτώσεις οι ενεργειακές αυτές απώλειες αποδεικνύονται σχετικά σημαντικές και γενικά υπολογίζονται σε 3%, κατά μέσο όρο στο έτος [24].

4.2.5 Η χωροταξική τοποθέτηση

Η χωροταξική τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταξύ τους έχει σημασία αφού όσο πιο πυκνά είναι τοποθετημένα μεταξύ τους τόσο μεγαλύτερος είναι και ο συντελεστής κάλυψης σ_k του πλαισίου, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας του ημιαγωγού όπου γίνεται η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, προς τη συνολική επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Η τιμή του κυμαίνεται από 0,78 για κυκλικά στοιχεία σε παράλληλα στοιχισμένες σειρές (Σχήμα 12 (a)), 0,88 για κυκλικά στοιχεία συγχωνευμένα μεταξύ τους (Σχήμα 12 (b)) και φτάνει μέχρι 0,98 για τα μεγαλύτερου κόστους τετραγωνικά ή εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία (Σχήμα 12 (c)) [5].



Σχήμα 20: Τρεις συνηθισμένοι τρόποι παράθεσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων στα πλαίσια [5]

4.2.6 Η δίοδος αντεπιστροφής

Η δίοδος αντεπιστροφής εμποδίζει την εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή διαμέσου του φωτοβολταϊκού πλαισίου, όταν αυτό δε φωτίζεται και προκαλεί απώλειες ενέργειας της τάξης του 1%. Ο συντελεστής απωλειών της δόδου αντεπιστροφής είναι $\sigma_8=0,99$ [25].

4.2.7 Η ακτινοβολία

Η ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε ετήσια βάση, είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και ως εκ τούτου, εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός συλλέκτη είναι με τη σειρά της άμεσα εξαρτώμενη από τον προσανατολισμό του πλαισίου ως προς τον ήλιο. Για μεγαλύτερα λαμβανόμενα ποσά της ηλιακής ενέργειας, τα πλαίσια πρέπει να προσανατολίζονται κατάλληλα και να είναι τοποθετημένα στη βέλτιστη γωνία κλίσης εφόσον δεν χρησιμοποιούνται στρεφόμενες βάσεις ενός ή δύο αξόνων. Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και ως εκ τούτου, μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ.

4.2.8 Η σκίαση

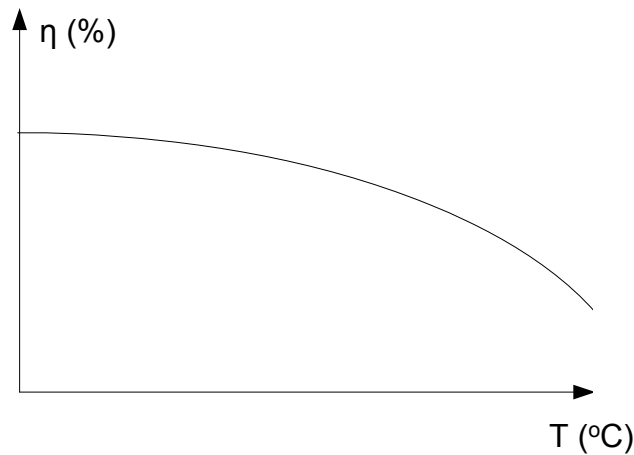
Ένας άλλος παράγοντας επίδρασης της DC ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η σκίαση. Το φαινόμενο της σκίασης εμφανίζεται είτε σε περιπτώσεις που συναντώνται εμπόδια στον ορίζοντα των πλαισίων όπως παρακείμενα κτήρια, βλάστηση κλπ, είτε σε περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης 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. Ένα σκιασμένο στοιχείο, συμπεριφέρεται κατά βάση όπως η απλή διάσπαση p-n, η οποία, όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, δέχεται από τα υπόλοιπα υγιή φωτοβολταϊκά στοιχεία μία υψηλή ανάστροφη τάση. Αν τα υπόλοιπα φωτιζόμενα στοιχεία του πλαισίου είναι μεγάλου αριθμού, αυτή η τάση μπορεί να φτάσει την τάση διάσπασης της σκιασμένης διόδου, προκαλώντας την καταστροφή της. Στην πράξη, για τα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, το σκιασμένο στοιχείο λειτουργεί ως μία μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν τα υπόλοιπα. 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 ενός κατεστραμμένου στοιχείου. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως φαινόμενο Hot Spot (κατάσταση “θερμής κηλίδας”).

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. Ο συγκεκριμένος παράγοντας θα αναλυθεί εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο [24].

4.2.9 Η θερμοκρασία

Συγκεκριμένα με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι, εκδηλώνεται ισχυρό ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της V_{oc} και του FF. Παράλληλα μειώνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Χαρακτηριστική η-T 1 : Τυπική καμπύλη της μεταβολής της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους [5]

Αν ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου σε μια δεδομένη θερμοκρασία (π.χ. 20 °C) είναι η , η τιμή του σε μια διαφορετική θερμοκρασία (θ) θα είναι :

$$\eta_{\theta} = \eta \cdot \sigma_{\theta} \quad (4.4)$$

όπου σ_{θ} είναι ένας αδιάστατος συντελεστής της θερμοκρασίας διόρθωσης της απόδοσης. Στη δεδομένη θερμοκρασία, ο σ_{θ} είναι ίσος με τη μονάδα, και μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης θερμοκρασίας, για τα συνηθισμένα φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου [5].

4.2.10 Ο άνεμος

Η ταχύτητα του ανέμου, μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της θερμοκρασίας του στοιχείου καθότι μεγάλες ταχύτητες, έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Όταν οι άνεμοι είναι βόρειοι είναι συνήθως κρύοι, με αποτέλεσμα τα φωτοβολταϊκά να λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές που θα λειτουργούσαν εάν υπήρχε άπνοια, υπό τα ίδια ποσοστά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αντίθετα συμβαίνει για θερμούς ανέμους [26].

4.2.11 Η ρύπανση

Η ηλεκτροπαραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να μειωθεί από ρύπανση της επιφάνειάς τους, από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνεται περιοδικός καθαρισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απορρυπαντικό. Πάντως, σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90° (κάθετοι) για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, ή τουλάχιστον 45° για να μην συγκρατείται η σκόνη.

Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια βρίσκεται σε μία περιοχή που εκτιμάμε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς μας η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, με τη χρησιμοποίηση ενός αδιάστατου συντελεστή καθαρότητας σ_p , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ που παράγει όταν η επιφάνειά του είναι εντελώς καθαρή. Η τιμή του σ_p είναι τόσο μικρότερη από τη μονάδα όσο εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, όσο σπανιότερες είναι οι βροχές στην περιοχή κλπ. [5].

4.2.12 Οι ηλεκτρικές απώλειες

Πέρα από τους παραπάνω παράγοντες , πρέπει κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, να προνοήσουμε για τις ηλεκτρικές απώλειες στους αγωγούς που συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στις συστοιχίες, καθώς και τις συνδέσεις τους με άλλα μέρη του συστήματος, όπως διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, συσσωρευτές, μετατροπείς κλπ. Επομένως, κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας των φωτοβολταϊκών ενός συστήματος, πρέπει να γίνεται πρόβλεψη, ανάλογα με την περίπτωση και για την κάλυψη όλων αυτών των απωλειών, που μπορεί να είναι της τάξης περίπου του 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και περισσότερο [5].

5. Σκίαση

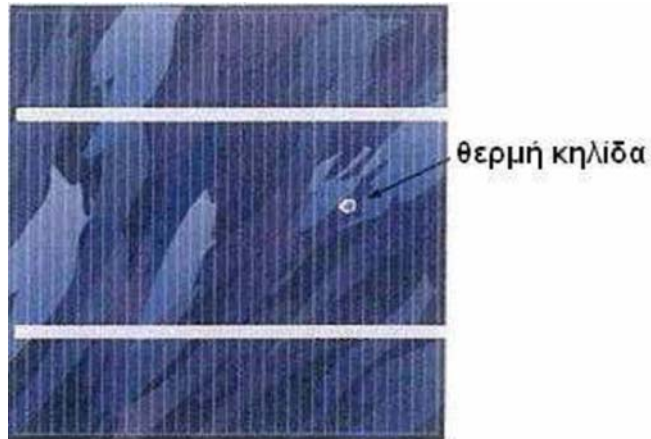
5.1 Γενικά

Η σκίαση είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου όπως αναφέραμε και προηγουμένως. Αυτός ο παράγοντας μπορεί να είναι τυχαίος και για μικρό χρονικό διάστημα όπως συσσωρευμένη σκόνη σε κάποιο σημείο του φωτοβολταϊκού πλαισίου και κυρίως όταν τοποθετούνται με κλίση κοντά στην κάτω ακμή του, χώμα ή φύλλα αν βρίσκεται κοντά σε γεωργική έκταση, περιττώματα πουλιών, ή ακόμα και από μεταφορά σωματιδίων τα οποία αφήνονται στην ατμόσφαιρα από τα διάφορα εργοστάσια που πιθανόν να βρίσκονται κοντά στην περιοχή εγκατάστασης μιας φωτοβολταϊκής διάταξης είτε μετά την τοποθέτηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, η ανάπτυξη ενός δένδρου, η τοποθέτηση ενός στύλου της Δ.Ε.Η ή του Ο.Τ.Ε ή κάποιας εξωτερικής κατασκευής η οποία να είναι μόνιμη ή χιόνι. Δηλαδή κάποιο κομμάτι του φωτοβολταϊκού πλαισίου ή ακόμα και ένα στοιχείο του μπορεί να σκιάζεται από κάποιο παράγοντα που δεν έχουμε υπολογίσει κατά την εγκατάσταση του ενώ το υπόλοιπο να εκτίθεται κανονικά σε μεγάλη ένταση ακτινοβολίας που προσεγγίζει τα 1000W/m^2 .

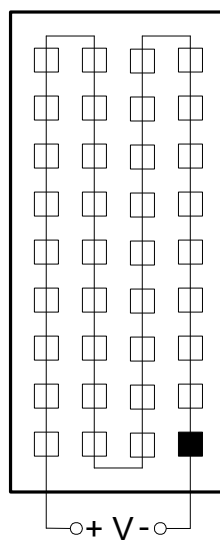
5.2 Φαινόμενο θερμών κηλίδων (hot-spot effect)

Το φαινόμενο των θερμών κηλίδων διαπιστώθηκε από τις πρώτες κιόλας ημέρες που ο άνθρωπος ταξίδεψε στο διάστημα. Η πρώτη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων έγινε σε τέτοια διαστημικά ταξίδια για να πετυχαίνουν ανεξάντλητη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι λοιπόν τεκμηριωμένα εξακριβώθηκε σχεδόν άμεσα πως το φαινόμενο των θερμών κηλίδων μπορεί να εμφανιστεί από αστοχία υλικού ενός από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που απαρτίζουν μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια, από λανθασμένη σύνδεση της πολικότητας των στοιχείων ή από μερική σκίαση. Πάντως και στις τρεις περιπτώσεις τα αποτελέσματα είναι ακριβώς τα ίδια, δηλαδή οδηγούμαστε στην υπερθέρμανση των “κακών” φωτοβολταϊκών στοιχείων και τελικά στην ολική τους καταστροφή. Το φαινόμενο λοιπόν των θερμών κηλίδων (hot – spot effect) συμβαίνει όταν υπάρχει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο που δίνει χαμηλό ρεύμα σε σχέση με τα υπόλοιπα που είναι ενωμένα σε μια σειρά [27,28].

Στο Σχήμα 21 έχουμε ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο συνδεδεμένο σε σειρά με τα υπόλοιπα. Το σκιασμένο αυτό στοιχείο μπορεί είτε να έχει καεί, είτε να έχει σκιαστεί είτε να έχει αντίθετη πολικότητα. Η χαρακτηριστική του κυκλώματος είναι ένας συνδυασμός της χαρακτηριστικής των καλών στοιχείων με αυτήν του σκιασμένου στοιχείου.

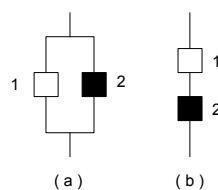


Εικόνα 13 : Θερμή κηλίδα σε φωτοβολταϊκό στοιχείο

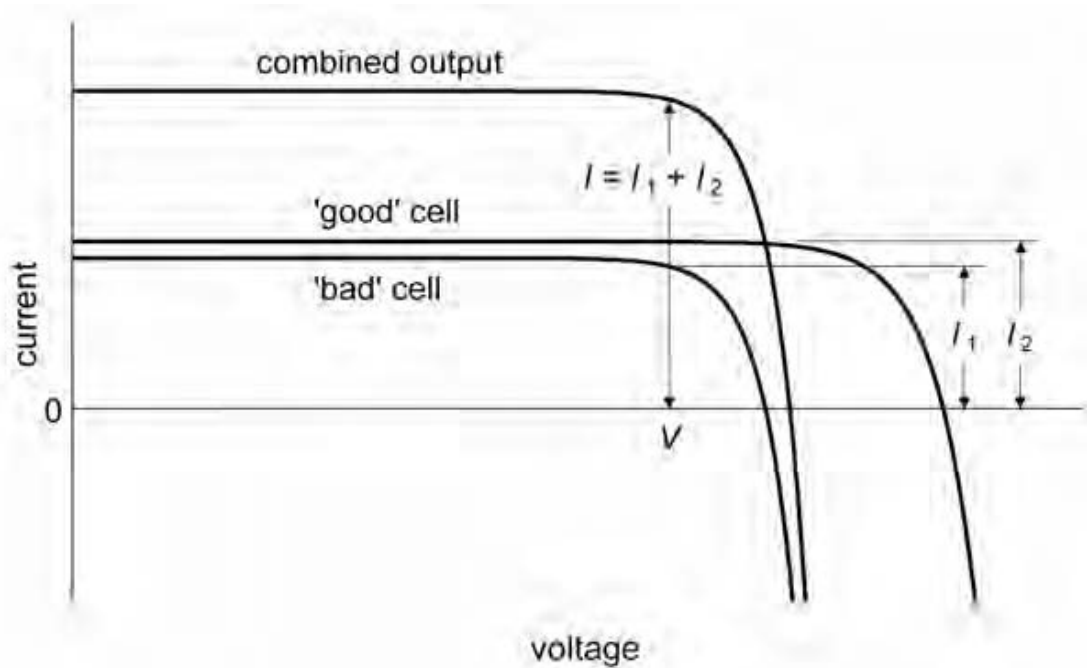


Σχήμα 21: Διάταξη φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά

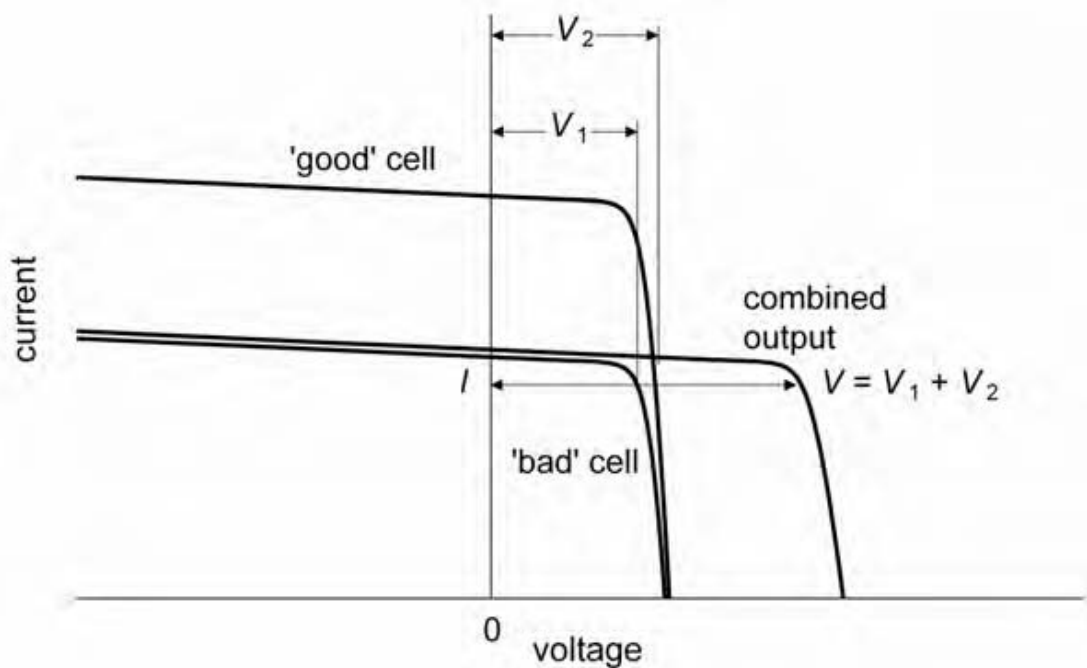
Ανάλογα με το πώς είναι συνδεδεμένα το σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο με τα υπόλοιπα στοιχεία μεταξύ τους, σε σειρά ή παράλληλα, διαφοροποιείται και η χαρακτηριστική εξόδου του κυκλώματος [29].



Σχήμα 22: Συνδεσμολογία σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου με τα υπόλοιπα (a) Παράλληλη (b) Σειρά [29]



Χαρακτηριστική I-V 9 : I-V με σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο συνδεδεμένο παράλληλα [29]

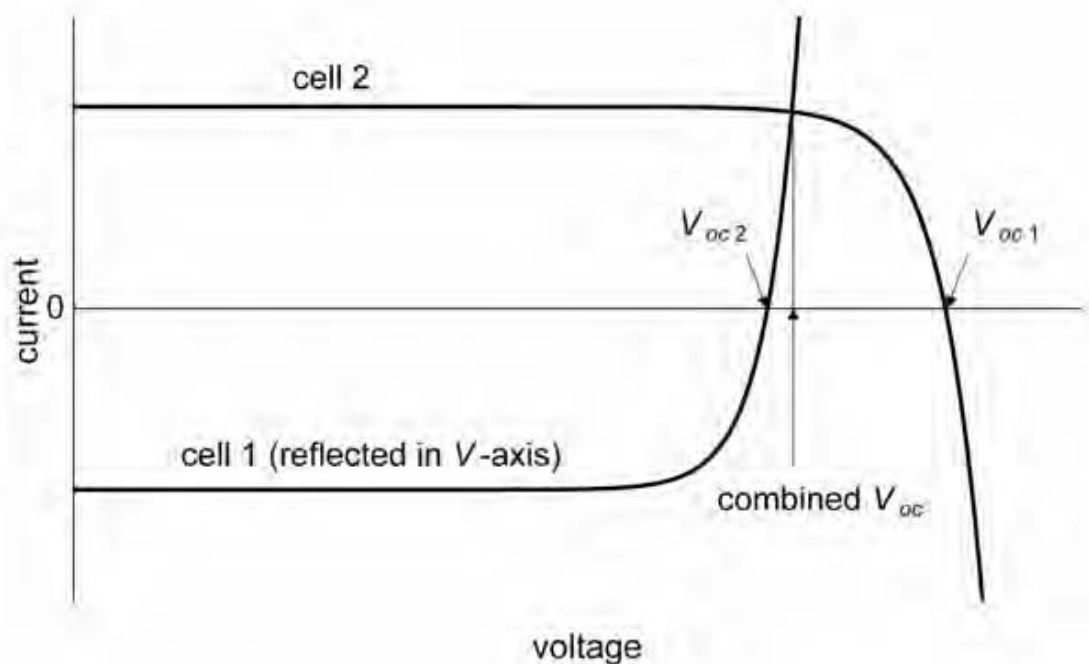


Χαρακτηριστική I-V 10 : Με σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο συνδεδεμένο σε σειρά [29]

Στην Χαρακτηριστική I-V 9 παρατηρούμε πως στην τελική χαρακτηριστική του κυκλώματος το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους ρευμάτων βραχυκύκλωσης I_{sc1} και I_{sc2} . Αντίθετα στην Χαρακτηριστική I-V 10 παρατηρούμε πως στην τελική χαρακτηριστική του κυκλώματος η τάση

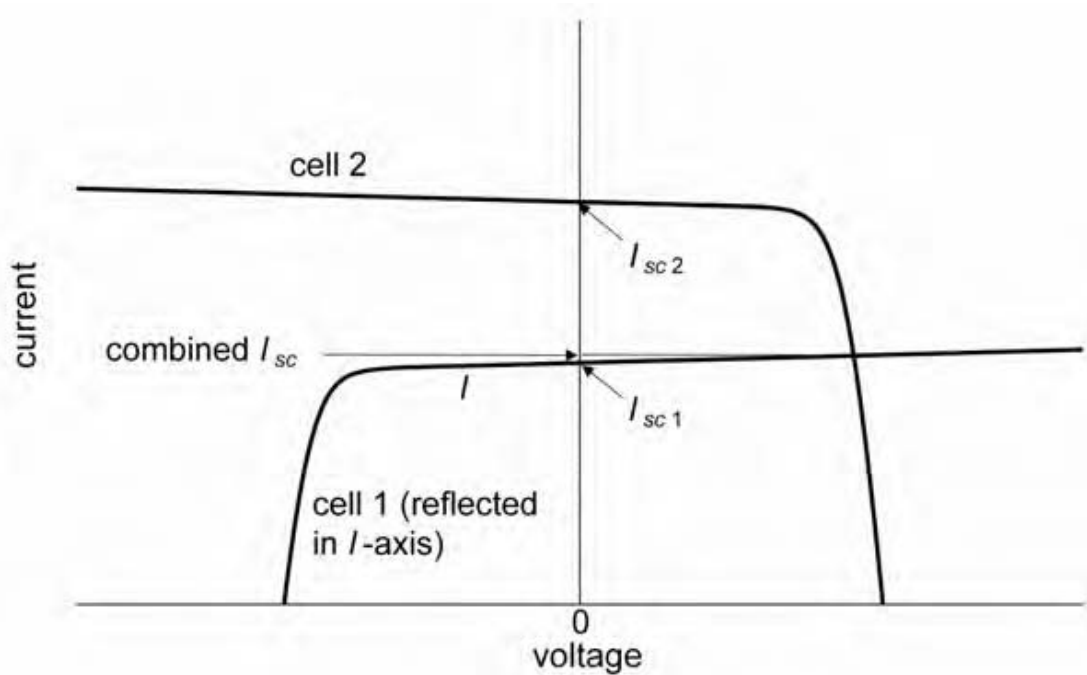
ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους τάσεων ανοιχτοκύκλωσης V_{oc1} και V_{oc2} .

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού της τελικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης του κυκλώματος όταν τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους είναι να αντιστρέψουμε την χαρακτηριστική του καλού φωτοβολταϊκού στοιχείου ως προς τον άξονα της τάσης και η τελική τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} θα είναι η τάση στο σημείο τομής των δύο επιμέρους χαρακτηριστικών [29].



Χαρακτηριστική I-V 11 : Γραφικός υπολογισμός με σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο συνδεδεμένο παράλληλα [29]

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού του τελικού ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} του κυκλώματος όταν τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους είναι να αντιστρέψουμε την χαρακτηριστική του καλού φωτοβολταϊκού στοιχείου ως προς τον άξονα της έντασης και το τελικό ρεύμα βραχυκυκλώματος I_{sc} θα είναι η ένταση στο σημείο τομής των δύο επιμέρους χαρακτηριστικών [29].



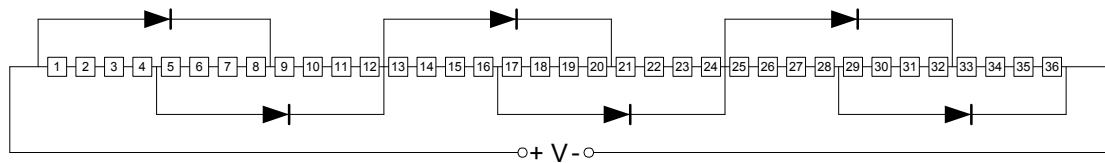
Χαρακτηριστική I-V 12 : Γραφικός υπολογισμός με σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο συνδεδεμένο σε σειρά [29]

Ένα σκιαζόμενο στοιχείο σε μια σειρά μειώνει το ρεύμα δια μέσου των μη σκιαζόμενων στοιχείων, προκαλώντας τα “καλά” στοιχεία να παράγουν υψηλότερη τάση η οποία μπορεί να προκαλέσει ανάστροφη πόλωση του σκιαζόμενου φωτοβολταϊκού στοιχείου. Έτσι λοιπόν αυτή η ενέργεια που χάνεται στο σκιαζόμενο στοιχείο μετατρέπεται σε θερμότητα που μπορεί να προκαλέσει το ράγισμα ή ακόμα και το λιώσιμο αυτού. Μπορεί να αναπτυχθούν και θερμοκρασίες της τάξης των 150 °C που είναι απαγορευτικές για φωτοβολταϊκά πλαίσια ευρείας χρήσης. Το καταστροφικό αυτό φαινόμενο είναι ικανό να αποφευχθεί με τη χρήση μιας παρακαμπτήριας διάδου.

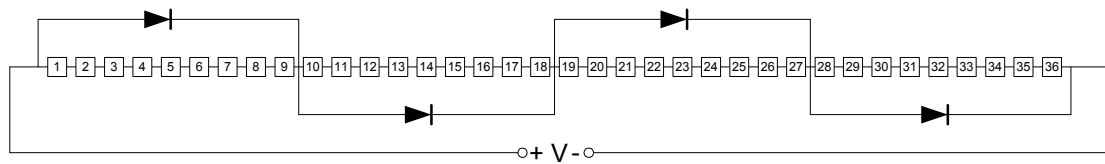
Μια διάδος συνδέεται παράλληλα με μια σειρά φωτοβολταϊκών στοιχείων την οποία θέλουμε να προστατέψουμε αλλά με αντίθετη πόλωση. Κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας κάθε στοιχείο είναι ορθά πολωμένο και η διάδος που είναι ανάστροφα πολωμένη δεν άγει. Όμως όταν ένα στοιχείο πολωθεί ανάστροφα και εμφανισθεί μια διαφορά του ρεύματος βραχυκυκλώσεως μεταξύ των φωτοβολταϊκών στοιχείων της σειράς, τότε η διάδος άγει και προστατεύει το “προβληματικό” στοιχείο.

Πρακτικά θα έπρεπε να είχαμε μια διάδο για κάθε στοιχείο που αυτό φυσικά είναι ανέφικτο λόγω του υψηλού κόστους για αυτό και χρησιμοποιείται μια διάδος κατά μήκος μιας ομάδας στοιχείων. Ο μέγιστος αριθμός φωτοβολταϊκών στοιχείων που μπορεί να καλύπτει μια διάδος είναι περίπου 10-15 (στοιχεία ανά διάδο) για φωτοβολταϊκά πλαίσια πυριτίου. Άρα για ένα κανονικό πλαίσιο σαν και αυτό που χρησιμοποιούμε στο πείραμά μας που αποτελείται από 36 φωτοβολταϊκά στοιχεία χρησιμοποιούνται τέσσερις διάδοι προκειμένου να μην ευάλωτο στο φαινόμενο των θερμών κηλίδων.

Τέλος είναι απαραίτητο να αναφέρουμε πως οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν δύο τρόπους τοποθέτησης διόδων κατά τους οποίους μπορεί να παρουσιάζεται αλληλοεπικάλυψη στοιχείων ή και όχι [29].

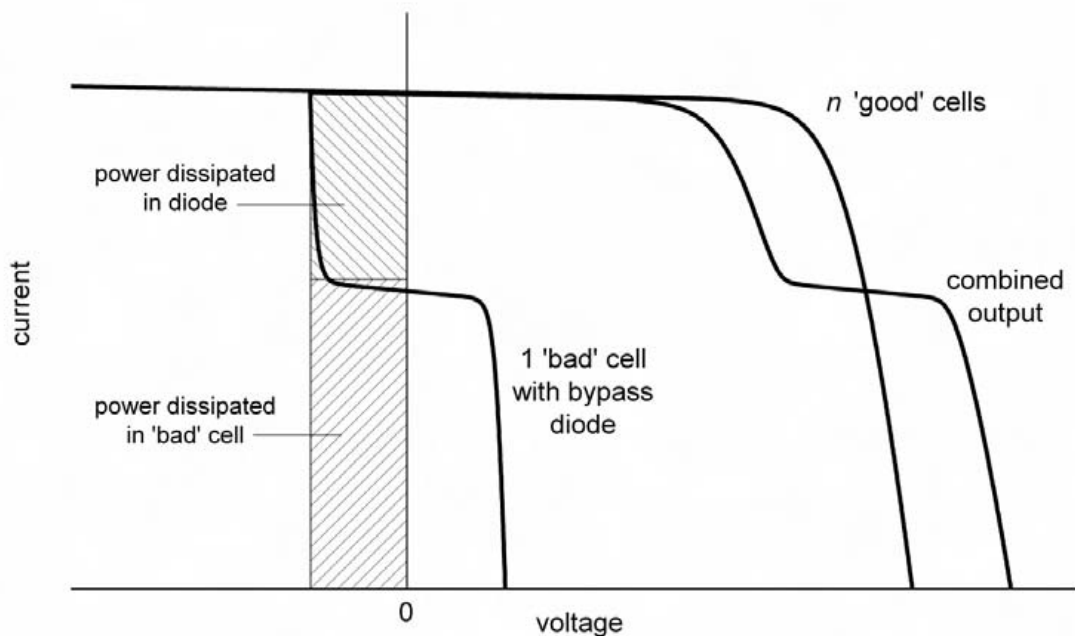


Σχήμα 23: Διάταξη με στοιχεία που αλληλεπικαλύπτονται [30]



Σχήμα 24: Διάταξη με στοιχεία που δεν αλληλεπικαλύπτονται [30]

Όταν το κύκλωμα προστατεύεται από διόδους παράκαμψης τότε η τελική χαρακτηριστική του κυκλώματος είναι σχεδόν ίση με την έξοδο ενός καλού στοιχείου [29].

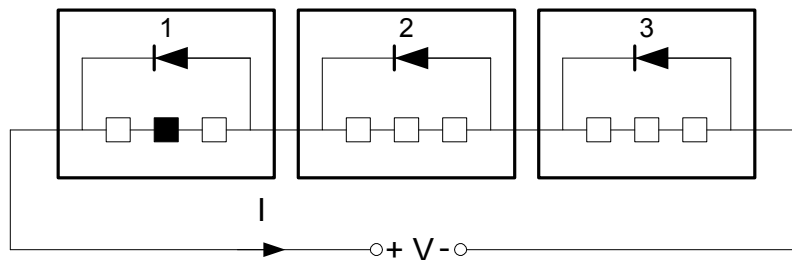


Χαρακτηριστική I-V 13 : Επίδραση σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου όταν υπάρχει διόδος παράκαμψης στο κύκλωμα [29]

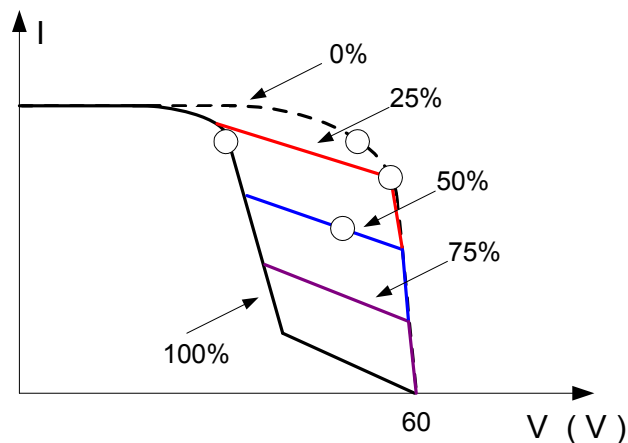
5.3 Επίδραση της ποσοστιαίας σκίασης

Η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου εξαρτώμενη από την μερική σκίαση ενός στοιχείου έχει διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με το ποσοστό της μερικής σκίασης και με το πόσες στήλες είναι συνδεδεμένες σε σειρά μεταξύ τους.

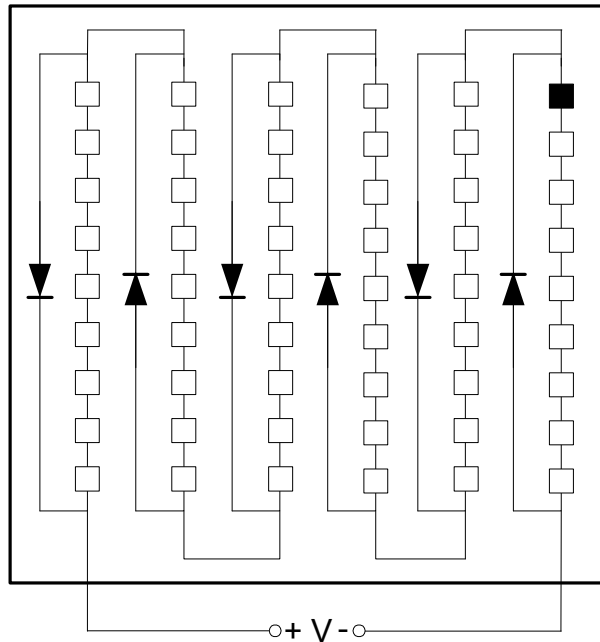
Στα παρακάτω Σχήματα βλέπουμε ένα κύκλωμα με 3 στήλες συνδεδεμένες σε σειρά, ένα κύκλωμα με 6 στήλες συνδεδεμένες σε σειρά καθώς και τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές I-V για διαφορετικό ποσοστό μερικής σκίασης. Οι κύκλοι απεικονίζουν το σημείο μέγιστης ισχύος [17].



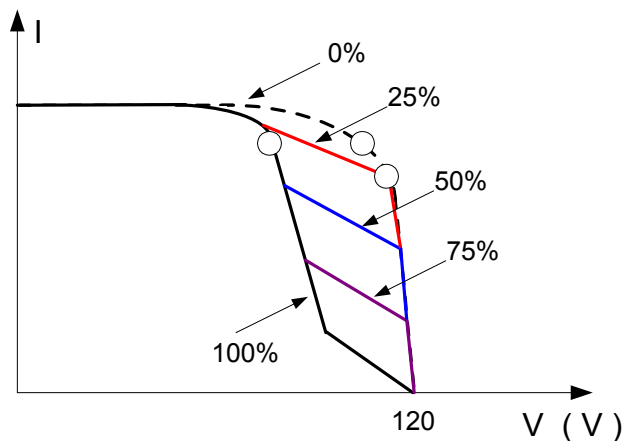
Σχήμα 25: Τρεις στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα σκιασμένο στοιχείο [17]



Χαρακτηριστική I-V 14 : Τριών στηλών εξαρτώμενη από την ποσοστιαία σκίαση ενός στοιχείου [17]



Σχήμα 26: Έξι στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα σκιασμένο στοιχείο [17]



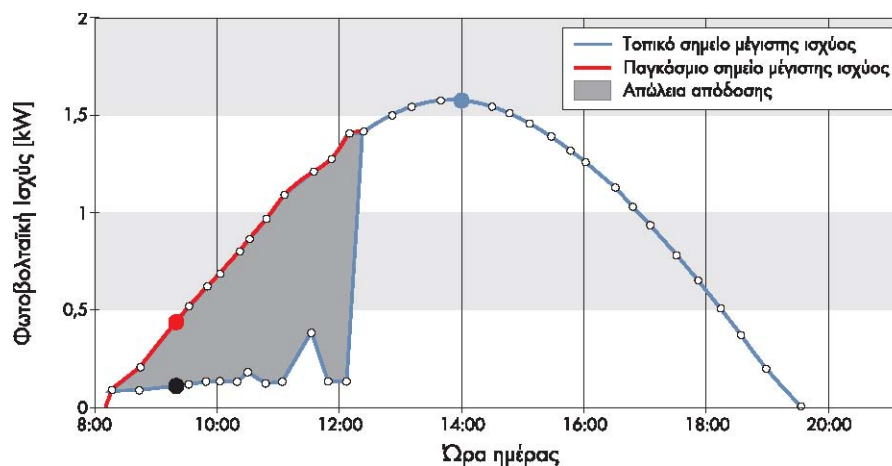
Χαρακτηριστική I-V 15 : Έξι στηλών εξαρτώμενη από την ποσοστιαία σκίαση ενός κελιού [17]

Αυξάνοντας το ποσοστό μερικής σκίασης από 0% σε 100% παρατηρούμε ότι μετατοπίζεται το σημείο μέγιστης ισχύος στην χαρακτηριστική I-V και συγκεκριμένα για ποσοστιαία σκίαση μέχρι 50% μετατοπίζεται προς τα κάτω δηλαδή μειώνεται το ρεύμα βραχυκυκλώματος I_{sc} ενώ για ποσοστιαία σκίαση από 50% έως και 100% το σημείο μέγιστης ισχύος μετατοπίζεται προς τα αριστερά δηλαδή μειώνεται η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} και παραμένει σταθερό για τις τιμές αυτές. Και στις δύο περιπτώσεις η ισχύς του κυκλώματος μειώνεται.

Αυξάνοντας τον αριθμό των στηλών παρατηρούμε ότι αυξάνεται η τάση ανοιχτοκύκλωσης με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η ισχύς άρα και το σημείο μέγιστης λειτουργίας να μετατοπίζεται δεξιότερα.

5.4 Ιχνηλάτης

Σκιαζοντας το φωτοβολταϊκό στοιχείο παρατηρούμε πως υπάρχουν περισσότερα από ένα σημεία μέγιστης λειτουργίας όπως βλέπουμε και στο παρακάτω διάγραμμα.



Χαρακτηριστική P-t 1 : Φωτοβολταϊκή ισχύς συναρτήσει της ώρας της ημέρας [30]

Η παραπάνω χαρακτηριστική μας δείχνει την πορεία του συνολικού και του τοπικού σημείου μέγιστης ισχύος μίας δευτερεύουσας γεννήτριας μίας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης με πρωινή σκίαση. Η γκρι επιφάνεια δείχνει την απώλεια απόδοσης, η οποία προκλήθηκε από τη χρησιμοποίηση του τοπικού αντί του συνολικού σημείου μέγιστης ισχύος.

Για την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο καθώς και για την ελαχιστοποίηση των απωλειών και την επιλογή του μέγιστου σημείου λειτουργίας χρησιμοποιούμε inverter. Όλοι οι μετατροπείς διαθέτουν έναν επονομαζόμενο ιχνηλάτη σημείου μέγιστης ισχύος (MPP-Tracker). Ο ιχνηλάτης αυτός φροντίζει, ώστε η φωτοβολταϊκή γεννήτρια να λειτουργεί πάντοτε στο καλύτερο σημείο λειτουργίας της. Με αυτόν τον τρόπο, η φωτοβολταϊκή γεννήτρια μπορεί να χρησιμοποιήσει όσο το δυνατόν καλύτερα τη διαθέσιμη ισχύ σε συγκεκριμένη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.

Ωστόσο, σε περιπτώσεις που, όπως περιγράφηκε παραπάνω, υπάρχουν 2 διαφορετικά σημεία λειτουργίας εξαιτίας της σκίασης μεμονωμένων φωτοβολταϊκών μονάδων μίας φωτοβολταϊκής γεννήτριας, ο συνδεδεμένος μετατροπέας πρέπει να αποφασίσει σε ποιο από τα δύο αυτά σημεία λειτουργίας πρέπει να λειτουργήσει η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, δηλαδή αν θα λειτουργήσει στο τοπικό σημείο μέγιστης ισχύος (LMPP) ή στο συνολικό σημείο μέγιστης ισχύος (GMPP).

Οι συμβατικοί ιχνηλάτες σημείου μέγιστης ισχύος παρατηρούν απλά την περιοχή κοντά στο τρέχον σημείο λειτουργίας, ώστε να μην χάνουν άσκοπα ενέργεια σε αναζητήσεις. Βρίσουν δηλαδή το τοπικό μέγιστο. Έτσι, όμως, δεν ανιχνεύουν κάποιο εναλλακτικό σημείο λειτουργίας δηλαδή κάποιο πιθανό συνολικό μέγιστο από το τοπικό. Επομένως, η τρέχουσα ισχύς της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης που

διαμορφώνεται βάση της σκίασης ενδέχεται να είναι εμφανώς μικρότερη από ότι θα μπορούσε να είναι.

Υπάρχει όμως και εξελιγμένος ιχνηλάτης λειτουργίας ο οποίος έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί σε κάποιες περιπτώσεις τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια σε μεγάλη απόσταση από το γνωστό σημείο λειτουργίας.

Έτσι, ο μετατροπέας βρίσκει πάντοτε το σημείο λειτουργίας με την τρέχουσα μεγαλύτερη ισχύ και με αυτόν τον τρόπο η ενεργειακή προσφορά των φωτοβολταϊκών μονάδων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν καθ' ολοκληρία κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες.

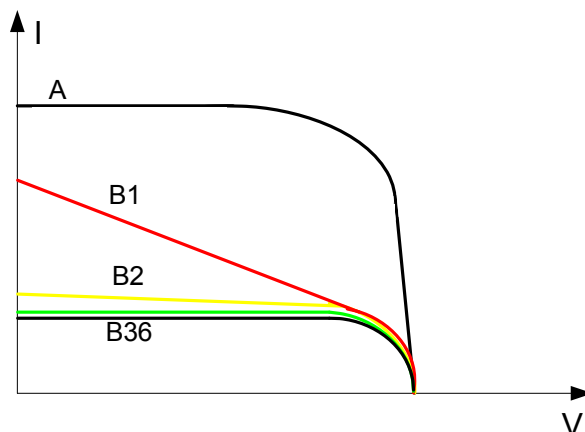
Με την ενέργεια αυτή, οι απώλειες κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της αναζήτησης είναι αναπόφευκτες. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος ιχνηλάτης λειτουργίας κάνει μία διαδικασία αναζήτησης που ειδικεύεται ακριβώς σε αυτό, δηλαδή στη διατήρηση των απωλειών από την αναζήτηση μίας πιθανής δεύτερης μέγιστης ισχύος σε ώρες χωρίς σκιά το πολύ στο 0,2 %. Για να μειωθούν ακόμα περισσότερο οι απώλειες λόγω αναζήτησης, ενδέχεται να είναι χρήσιμο σε μεμονωμένες περιπτώσεις φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων που βρίσκονται σπανίως υπό σκιά να προσαρμοστεί η συχνότητα της διαδικασίας αναζήτησης (χρόνος κύκλου) ανάλογα με την περίπτωση και να μειωθεί [30] .

5.5 Επίδραση του αριθμού των σκιασμένων κελιών

Σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελούμενο από 36 φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους ο αριθμός των σκιασμένων στοιχείων επηρεάζει την απόδοση του. Σε αυτή την περίπτωση έχει σημασία αν τα στοιχεία που είναι σκιασμένα βρίσκονται στην ίδια στήλη ή σε διαφορετική και ο αριθμός αυτών.

Για τα παρακάτω διαγράμματα το A σημαίνει ότι και τα 36 φωτοβολταϊκά στοιχεία του φωτοβολταϊκού πλαισίου δεν είναι σκιασμένα ενώ Bn σημαίνει ότι n φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι σκιασμένα σε σειρά. Για παράδειγμα, B2 σημαίνει ότι 2 φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι σκιασμένα σε σειρά και 34 είναι ασκίαστα ενώ B36 σημαίνει 36 φωτοβολταϊκά στοιχεία σκιασμένα σε σειρά.

Στη παρακάτω χαρακτηριστική φαίνεται η μεταβολή της χαρακτηριστικής I-V συναρτήσεως των σκιασμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων.

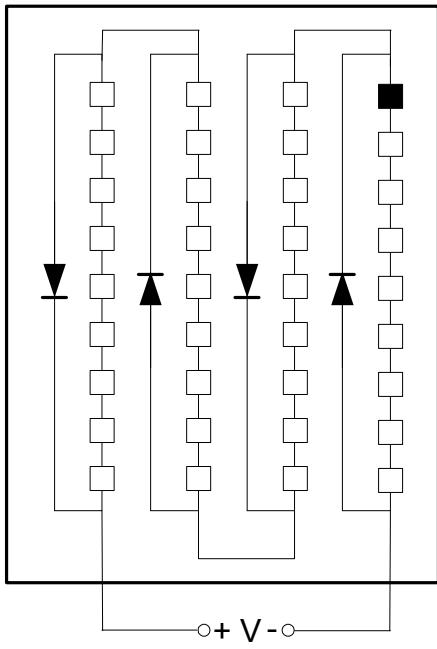


Χαρακτηριστική I-V 16 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει των σκιασμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων [31]

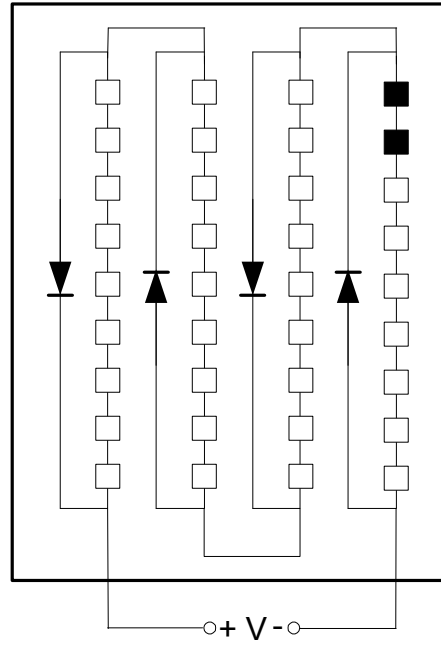
Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των σκιασμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων μειώνεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} ενώ η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} παραμένει σταθερή. Το σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο αντιστοιχεί στην αντίσταση R_s [31].

Τα σκιασμένα στοιχεία μπορεί να βρίσκονται όλα στην ίδια στήλη είτε σε διαφορετικές. Ανάλογα την περίπτωση είναι διαφορετική και η χαρακτηριστική I-V.

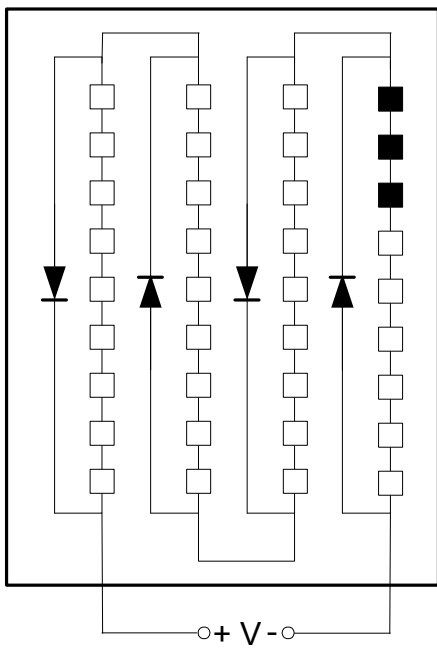
Στην περίπτωση που τα σκιασμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία βρίσκονται στην ίδια στήλη όπως στο Σχήμα 27 και συγκεκριμένα ένα σκιασμένο στοιχείο σε μία στήλη (a), δύο σκιασμένα στοιχεία σε μία στήλη (b), τρία σκιασμένα στοιχεία σε μία στήλη (c), τέσσερα σκιασμένα στοιχεία σε μία στήλη (d) παρατηρούμε ότι στην αντίστοιχη χαρακτηριστική τους I-V (Χαρακτηριστική I-V 17) ότι δεν επηρεάζεται το σημείο μέγιστης ισχύος.



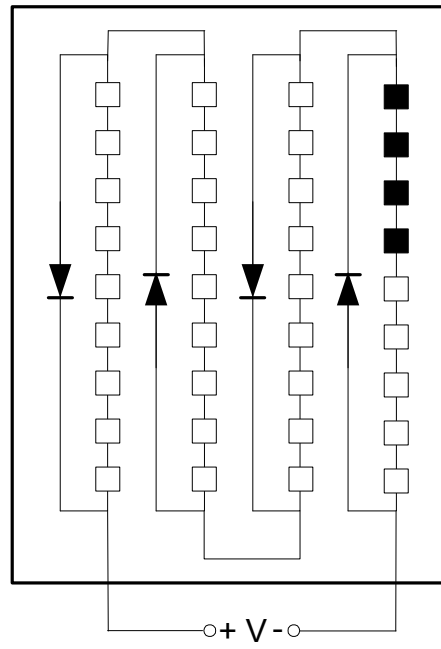
(a)



(b)

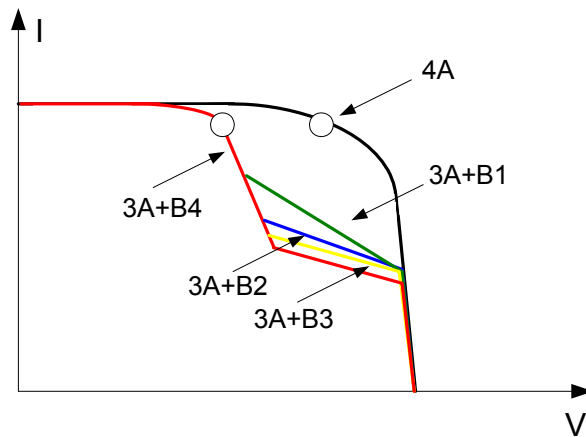


(c)



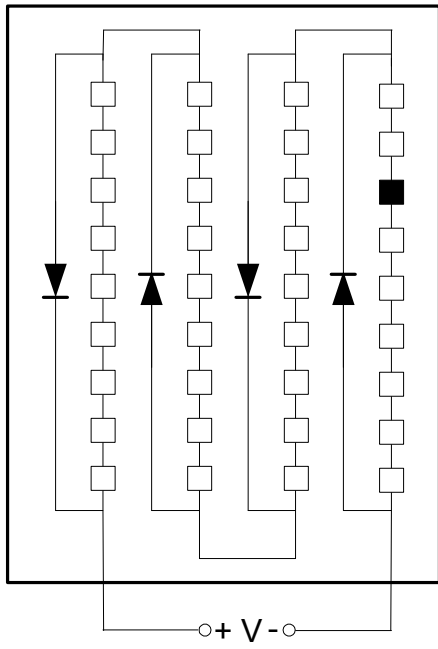
(d)

Σχήμα 27: Τέσσερις στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα ή περισσότερα σκιασμένα στοιχεία σε μία στήλη [17]

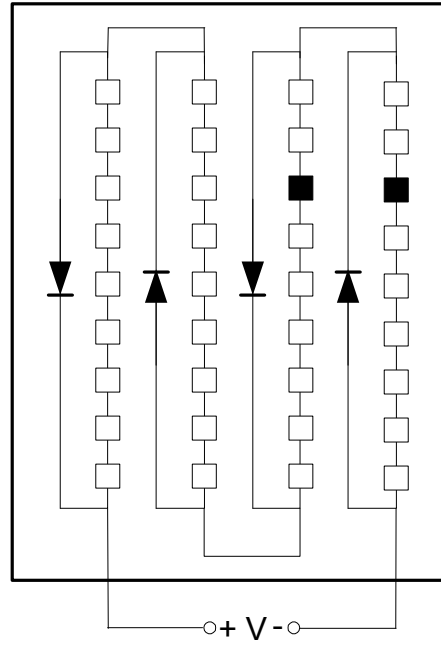


Χαρακτηριστική I-V 17 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει των σκιασμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων μιας στήλης [17]

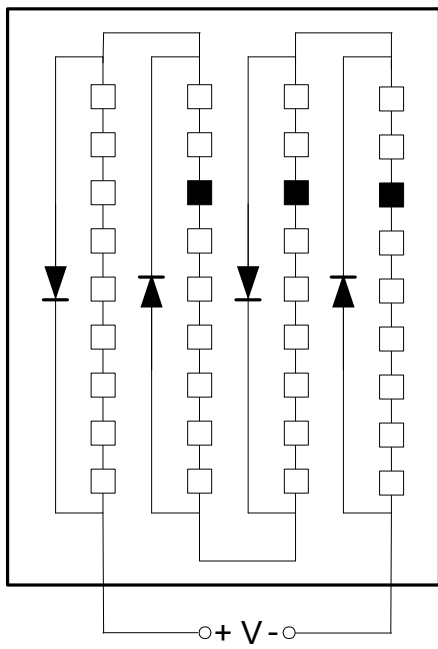
Στην περίπτωση που τα σκιασμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία βρίσκονται σε διαφορετικές στήλες και κάθε στήλη έχει τουλάχιστον ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο όπως στο Σχήμα 28 τότε παρατηρούμε πως στην αντίστοιχη Χαρακτηριστική I-V 18 του φωτοβολταϊκού πλαισίου μετατοπίζεται το σημείο μέγιστης ισχύος και μάλιστα τόσο χαμηλότερα όσο αυξάνει και ο αριθμός στηλών που έχουν τα σκιασμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία.



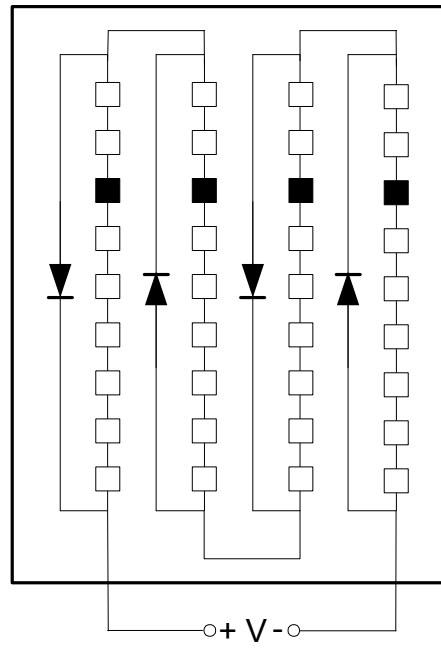
(a)



(b)

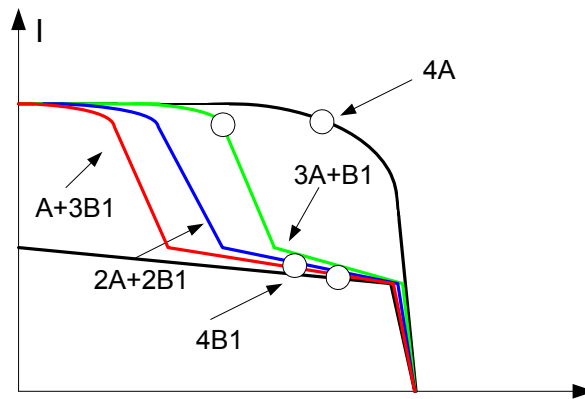


(c)



(d)

Σχήμα 28: Τέσσερις στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο σε μία ή περισσότερες στήλες [17]



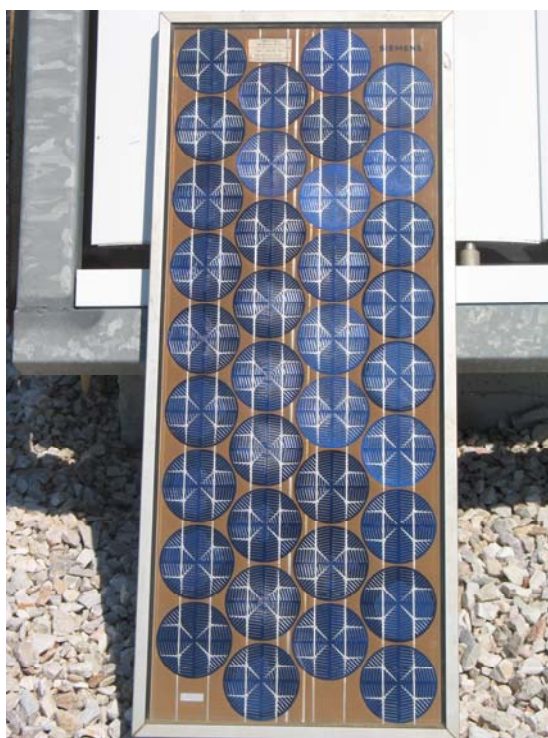
Χαρακτηριστική I-V 18 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει ενός σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου σε μία ή περισσότερες στήλες [17]

6. Πειραματική διαδικασία

6.1 Γενικά

Για την εκπόνηση του πειράματος χρησιμοποιήσαμε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο της Siemens από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, το μοντέλο AG SM36-18H1 12V/33W το οποίο έχει ατσάλενο πλαίσιο και είναι κατασκευασμένο τη δεκαετία του '80. Οι μετρήσεις έγιναν στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, στην ταράτσα του παλαιού κτιρίου Η.Μ.&Μ.Υ. Ε.Μ.Π.. Τα όργανα μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ένα πολυόργανο της Htsolar και ένα πρότυπο όργανο μέτρησης έντασης της ακτινοβολίας.

Σκοπός του πειράματος είναι να δούμε πως μεταβάλλεται η χαρακτηριστική I-V του φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει της έντασης ακτινοβολίας, της ποσοστιαίας σκίασης και της μερικής σκίασης και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων και τις χαρακτηριστικές καμπύλες με τις αντίστοιχες θεωρητικές.



Εικόνα 14: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο Siemens AG SM36-18H1 12V/33W

6.2 Πρότυπο όργανο μέτρησης έντασης ακτινοβολίας

Το συγκεκριμένο όργανο μέτρησης είναι ένα πρότυπο φωτοβολταϊκό μονοκρυσταλλικού πυριτίου βαθμονομημένο ώστε η τάση ανοιχτοκύκλωσής του σε mV να ισούται αριθμητικά με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε mW/cm^2 .



Εικόνα 15: Πρότυπο όργανο μέτρησης έντασης ακτινοβολίας



Εικόνα 16: Πρότυπο όργανο μέτρησης έντασης ακτινοβολίας

6.3 Πολυόργανο HT SOLAR IV400

Το πολυόργανο υπολογίζει τις χαρακτηριστικές I-V, P-V μετρώντας την τάση, την ένταση του ρεύματος, τη θερμοκρασία και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, συγκρίνει τις χαρακτηριστικές με αυτές του κατασκευαστή και έχει τη δυνατότητα να τις συγκρίνει με τα κατασκευαστικά στοιχεία του φωτοβολταϊκού πλαισίου και να μας βγάλει το βαθμό απόδοσης του. Αποτελείται από την κεντρική μονάδα η οποία καταγράφει τις ενδείξεις και τα αποτελέσματα των μετρήσεων και συνδέεται με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, τον αισθητήρα θερμοκρασίας, τον αισθητήρα μέτρησης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας οι οποίοι συνδέονται με την κεντρική μονάδα.



Εικόνα 17: Πολυόργανο μέτρησης HT SOLAR IV400



Εικόνα 18: Αισθητήρας έντασης ηλιακής ακτινοβολίας του πολυόργανου HT SOLAR IV400



Εικόνα 19: Αισθητήρας θερμοκρασίας του πολυόργανου HT SOLAR IV400

6.4 Θερμογραφία

6.4.1 Γενικά

Η θερμογραφία ή η υπέρυθρη φωτογράφιση, ανιχνεύει την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας και προκύπτει οπτική απεικόνιση του θερμικού σήματος (θερμογράφημα). Με την θερμογραφία δεν μέτραται απ' ευθείας η θερμοκρασία μιας επιφάνειας αλλά η μεταβολή της επιφανειακής ακτινοβολίας.

Η θερμογραφία βασίζεται στην αρχή ότι κάθε επιφάνεια εκπέμπει ενέργεια με την μορφή της θερμοκρασιακής ακτινοβολίας. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο και στην περίπτωση πολύ μεγάλων θερμοκρασιών βρίσκεται στο ορατό φάσμα (π.χ. πυρακτωμένη άκρη βελόνας). Στην θερμοκρασία δωματίου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι της τάξεως των 10μm (στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος). Η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλες ανιχνευτικές διατάξεις (θερμοκάμερες) οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας το οποίο με κατάλληλη βαθμονόμηση εκφράζεται σε θερμοκρασία.

Με την θερμογραφία εντοπίζουμε θερμικές γέφυρες στο κέλυφος του κτηρίου, σημεία διαφυγής θερμού αέρα από το κτήριο, αγωγούς θερμού κρύου νερού ή αέρα μέσα στην κατασκευή ενός κτηρίου, διαφορετικά υλικά μέσα σε μία κατασκευή, ύπαρξη νερού μέσα στα υλικά και υποεπιφανειακές ανωμαλίες στα υλικά.

Οι φυσικές παράμετροι που επηρεάζουν την υπέρυθρη ακτινοβολία που μετράται κατά την θερμογράφιση είναι: η ικανότητα εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας της επιφάνειας (εκφράζεται από τον συντελεστή εκπομπής και συγκρίνεται με εκείνη του μέλανος σώματος) η επιφανειακή θερμοκρασία, η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοχωρητικότητα, το πάχος του θερμαινόμενου στρώματος και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι μετρήσεις επηρεάζονται από τον συντελεστή εκπομπής του υλικού.[33]

6.4.2 Θερμοκάμερα FLIR P640

Η θερμοκάμερα έχει ανάλυση εικόνας μέχρι 640*480 pixel, 8x ψηφιακό zoom, θερμική ευαισθησία μέχρι 30mK η οποία επιτρέπει την καταγραφή υψηλής ποιότητας λεπτομερειών και διαφορών στη θερμοκρασία, δείκτη Laser και μεγάλη οθόνη LCD [34].



Εικόνα 20 : Θερμοκάμερα FLIR P640 [34]

6.5 Χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσεως της έντασης ακτινοβολίας

6.5.1 Γενικά

Στο συγκεκριμένο μέρος του πειράματος παίρνουμε μετρήσεις για την χαρακτηριστική I-V για διαφορετικές τιμές της έντασης ακτινοβολίας. Η ένταση ακτινοβολίας μεταβάλλεται ανάλογα με την ώρα μέτρησης, όταν έχει συννεφιά ή είναι καθαρός ο ουρανός αλλά και με την αλλαγή της κλίσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου αφού έτσι αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας..

6.5.2 Μετρήσεις - Χαρακτηριστικές

Στον Πίνακα 3 αναγράφονται οι τιμές των γενικών χαρακτηριστικών κάθε καμπύλης που υπολογίζει το πολυόργανο μέτρησης. Στον Πίνακα 4 αναγράφονται οι τιμές για μία ένταση ακτινοβολίας. Στους Πίνακες 5,6 η μεταβολή της έντασης ακτινοβολίας επιτυγχάνεται με αλλαγή της κλίσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Πίνακας 3 : Γενικά χαρακτηριστικά καμπύλων I-V συναρτήσεως της έντασης ακτινοβολίας

P_{max} (W)	V_{oc} (V)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	I_{sc} (A)	Irradiance (W/m^2)	Module Temperature ($^{\circ}C$)	FF (%)
27,36	19,31	14,77	1,85	2,11	1114,00	25,90	67,00
22,69	19,48	14,77	1,54	1,69	964,00	25,00	69,00
18,58	19,20	15,34	1,21	1,37	821,00	37,60	71,00
20,97	18,71	14,77	1,42	1,60	932,00	33,00	70,00
18,82	18,86	14,77	1,27	1,41	838,00	32,60	71,00

Και αναλυτικότερα οι τιμές I, V και P είναι :

Πίνακας 4 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P συναρτήσει της έντασης ακτινοβολίας

H (W/m ²)	821 W/m ²	
V (Volt)	I (A)	P (W)
2,50	1,37	3,41
3,50	1,36	4,76
4,50	1,36	6,10
5,50	1,35	7,43
6,50	1,35	8,75
7,50	1,34	10,02
8,50	1,33	11,31
9,50	1,33	12,59
10,50	1,32	13,90
11,50	1,32	15,19
12,50	1,31	16,40
13,50	1,29	17,47
14,50	1,26	18,31
15,50	1,19	18,51
16,50	1,05	17,26
17,50	0,82	14,30
18,50	0,34	6,22
18,98	0,17	3,28
19,26	0,00	0,00

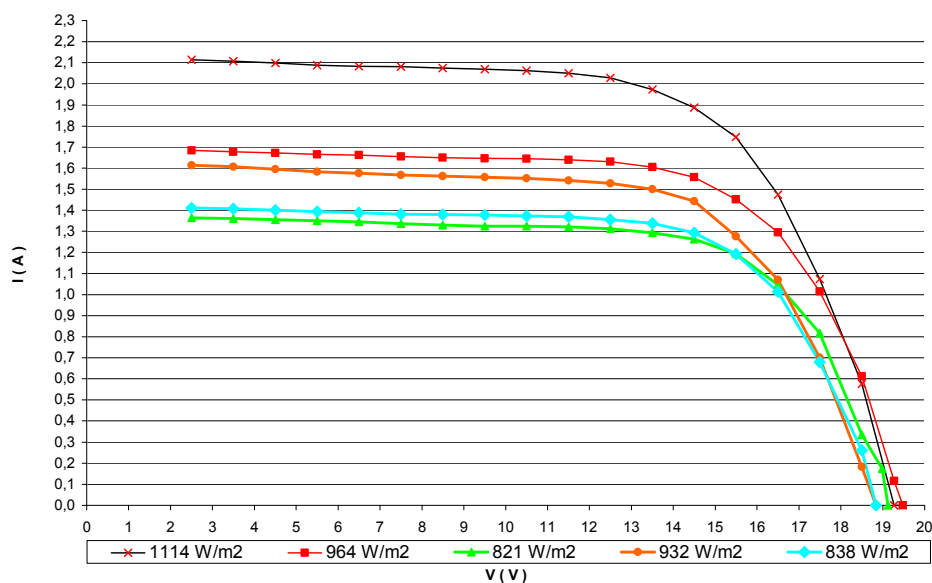
Πίνακας 5 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P συναρτήσει της έντασης ακτινοβολίας

H (W/m ²)	1114 W/m ²		964 W/m ²	
V (Volt)	I (A)	P (W)	I (A)	P (W)
2,50	2,12	5,29	1,69	4,21
3,50	2,11	7,37	1,68	5,87
4,50	2,10	9,44	1,67	7,52
5,50	2,09	11,48	1,67	9,16
6,50	2,08	13,55	1,66	10,80
7,50	2,08	15,61	1,66	12,41
8,50	2,08	17,64	1,65	14,03
9,50	2,07	19,67	1,65	15,64
10,50	2,06	21,66	1,64	17,26
11,50	2,05	23,59	1,64	18,86
12,50	2,03	25,35	1,63	20,38
13,50	1,97	26,65	1,61	21,67
14,50	1,89	27,36	1,56	22,58
15,50	1,75	27,09	1,45	22,51
16,50	1,48	24,34	1,30	21,37
17,50	1,07	18,80	1,02	17,76
18,50	0,58	10,67	0,61	11,32
19,27	0,00	0,00	0,12	2,22
19,48	0,00	0,00	0,00	0,00

Πίνακας 6 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P συναρτήσει της έντασης ακτινοβολίας

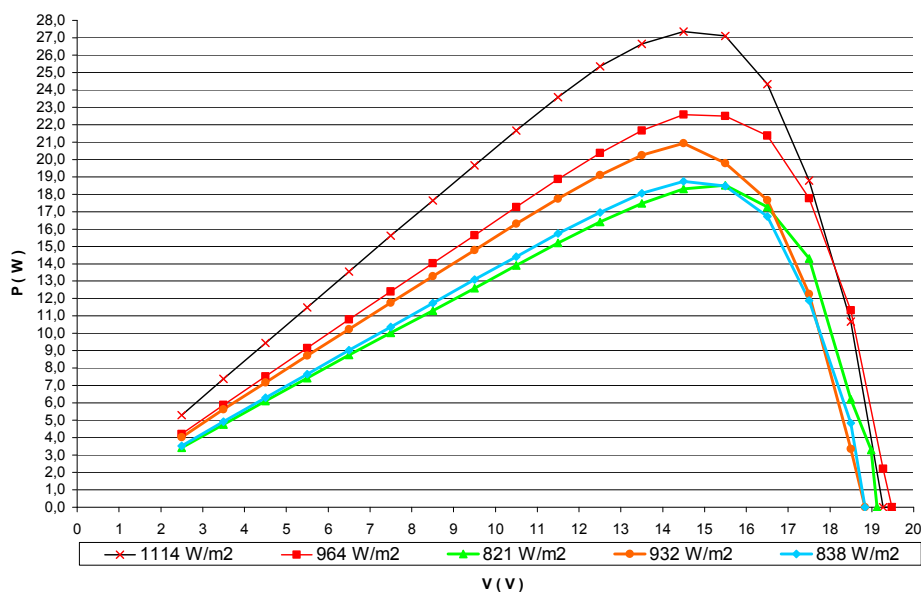
H (W/m ²)	932 W/m ²		838 W/m ²	
V (Volt)	I (A)	P (W)	I (A)	P (W)
2,50	1,61	4,03	1,41	3,53
3,50	1,61	5,62	1,41	4,92
4,50	1,60	7,18	1,40	6,30
5,50	1,58	8,71	1,39	7,66
6,50	1,58	10,24	1,39	9,02
7,50	1,57	11,76	1,38	10,36
8,50	1,56	13,28	1,38	11,73
9,50	1,56	14,79	1,38	13,09
10,50	1,55	16,30	1,37	14,42
11,50	1,54	17,73	1,37	15,74
12,50	1,53	19,10	1,36	16,95
13,50	1,50	20,25	1,34	18,06
14,50	1,44	20,92	1,29	18,75
15,50	1,28	19,78	1,19	18,48
16,50	1,07	17,66	1,01	16,73
17,50	0,70	12,27	0,68	11,88
18,50	0,18	3,37	0,26	4,83
18,84	0,00	0,00	0,00	0,00

Χαρακτηριστική I-V συναρτήσει της έντασης ακτινοβολίας



Χαρακτηριστική I-V 19 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει της έντασης ακτινοβολίας

Χαρακτηριστική P-V συναρτήσει της έντασης ακτινοβολίας



Χαρακτηριστική P-V 2 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου εξαρτώμενη από ένταση ακτινοβολίας

6.5.3 Συμπεράσματα

Παρατηρούμε πως όσο μειώνεται η ένταση ακτινοβολίας μειώνεται και το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} ενώ η τάση ανοιχτού κύκλου V_{oc} παραμένει σχεδόν σταθερή.

Επίσης παρατηρούμε πως όταν το πλαίσιο βρίσκεται υπο κλίση δέχεται μεγαλύτερη ένταση ακτινοβολίας σε σύγκριση με όταν είναι οριζοντιωμένο. Αυτό οφείλεται στη γωνία πρόσπτωσης της φωτεινής ακτινοβολίας.

6.6 Χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσεως της ποσοστιαίας μερικής σκίασης

6.6.1 Γενικά

Για να μελετήσουμε την επίδραση της ποσοστιαίας μερικής σκίασης στην χαρακτηριστική καμπύλη I-V σκιάζουμε το 3^ο στοιχείο της 1^{ης} στήλης με διαφορετικά υλικά κυκλικού σχήματος διαμέτρου 10cm. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε μαύρο χαρτόνι, ένα πράσινο διαφανές πλαστικό καθώς και μπλε διαφάνεια.

Για το καθένα από αυτά τα υλικά υπολογίσαμε τον συντελεστή διαφάνειας μετρώντας την ένταση της ακτινοβολίας με το πρότυπο όργανο χωρίς το υλικό και μετά με το υλικό πάνω σε αυτό.

6.6.2 Μετρήσεις - Χαρακτηριστικές

Από τις μετρήσεις βγάλαμε τον παρακάτω πίνακα τιμών.

Πίνακας 7 : Συντελεστής διαφάνειας υλικών

ΥΛΙΚΟ	G (mW/cm ²)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΦΑΝΕΙΑΣ
ΠΡΑΣΙΝΟ ΠΛΑΣΤΙΚΟ	31,0	0,27
ΜΑΥΡΟ ΧΑΡΤΟΝΙ	1,2	0,01
1 ΜΠΛΕ ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ	75,0	0,65
2 ΜΠΛΕ ΔΙΑΦΑΝΕΙΕΣ	56,0	0,48
ΧΩΡΙΣ ΥΛΙΚΟ	116,0	

Ο συντελεστής διαφάνειας υπολογίστηκε διαιρώντας την τιμή της έντασης ακτινοβολίας με το υλικό με την τιμή της έντασης της ακτινοβολίας χωρίς το υλικό. Το πολυόργανο μας έβγαλε τα εξής δεδομένα :

Πίνακας 8 : Γενικά χαρακτηριστικά καμπύλων I-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσεως της ποσοστιαίας μερικής σκίασης

ΜΕΤΡΗΣΗ	P _{max} (W)	V _{oc} (V)	V _{mpp} (V)	I _{mpp} (A)	I _{sc} (A)	Irradiance (W/m ²)	Module Temperature (°C)	FF (%)
Χωρίς	26,50	19,45	15,34	1,73	1,99	1064,00	26,3	68,00
Μαύρο	17,99	19,35	10,13	1,77	1,97	1054,00	26,2	47,00
Πράσινο	18,05	19,38	10,49	1,72	1,98	1051,00	26,1	47,00
Μπλε	20,72	19,45	16,70	1,24	1,99	1059,00	25,9	53,00
2 Μπλε	18,71	19,41	10,13	1,85	2,04	1096,00	25,7	47,00

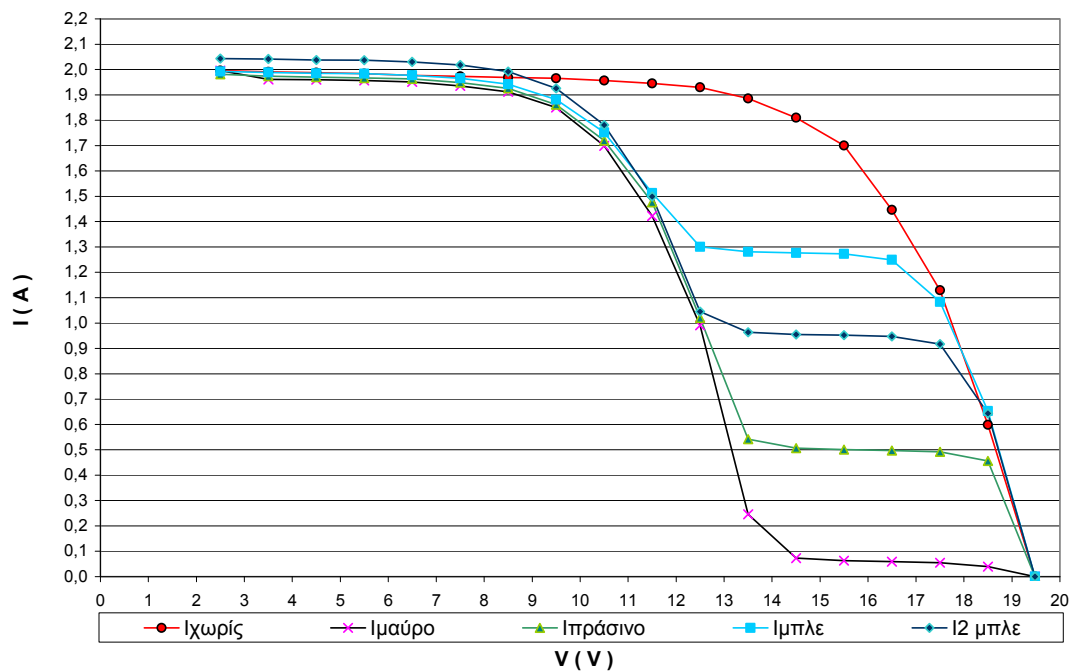
Ακολουθούν ο αναλυτικός πίνακας τιμών και οι χαρακτηριστικές I-V και P-V.

Πίνακας 9 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσει της ποσοστιαίας μερικής σκίασης

V (V)	I _{χωρίς} (A)	I _{μαύρο} (A)	I _{πράσινο} (A)	I _{μπλε} (A)	I _{2 μπλε} (A)	P _{χωρίς} (W)	P _{μαύρο} (W)	P _{πράσινο} (W)	P _{μπλε} (W)	P _{2 μπλε} (W)
2,500	1,996	1,996	1,981	1,993	2,043	4,990	4,990	4,953	4,983	5,108
3,500	1,991	1,961	1,974	1,989	2,042	6,969	6,864	6,909	6,962	7,147
4,500	1,988	1,960	1,970	1,985	2,038	8,946	8,820	8,865	8,933	9,171
5,500	1,984	1,957	1,967	1,984	2,037	10,912	10,764	10,819	10,912	11,204
6,500	1,977	1,951	1,963	1,977	2,030	12,851	12,682	12,760	12,851	13,195
7,500	1,973	1,936	1,949	1,966	2,018	14,798	14,520	14,618	14,745	15,135
8,500	1,969	1,912	1,926	1,942	1,992	16,737	16,252	16,371	16,507	16,932
9,500	1,966	1,850	1,861	1,882	1,926	18,677	17,575	17,680	17,879	18,297
10,500	1,957	1,699	1,720	1,752	1,781	20,549	17,840	18,060	18,396	18,701
11,500	1,945	1,422	1,476	1,513	1,499	22,368	16,353	16,974	17,400	17,239
12,500	1,930	0,991	1,020	1,301	1,045	24,125	12,388	12,750	16,263	13,063
13,500	1,886	0,246	0,542	1,281	0,964	25,461	3,321	7,317	17,294	13,014
14,500	1,810	0,073	0,507	1,277	0,955	26,245	1,059	7,352	18,517	13,848
15,500	1,701	0,063	0,501	1,273	0,952	26,366	0,977	7,766	19,732	14,756
16,500	1,447	0,059	0,497	1,249	0,947	23,876	0,974	8,201	20,609	15,626
17,500	1,129	0,055	0,492	1,084	0,917	19,758	0,963	8,610	18,970	16,048
18,500	0,599	0,039	0,456	0,653	0,644	11,082	0,722	8,436	12,081	11,914
19,483	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

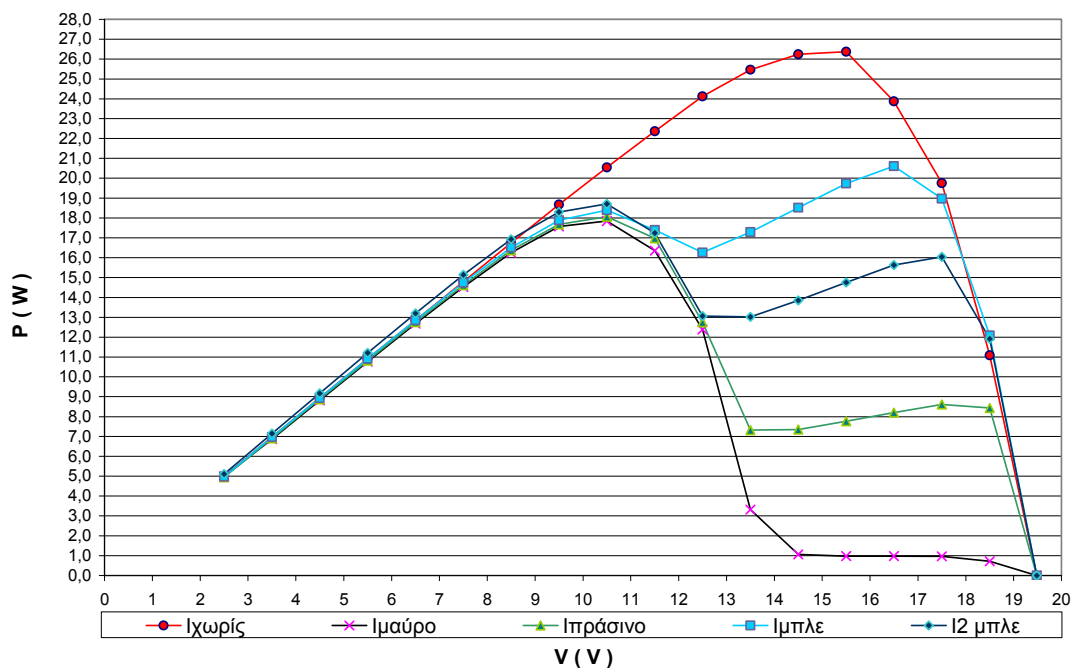
Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που προκύπτουν από τους παραπάνω πίνακες μετρήσεων είναι :

Χαρακτηριστική I-V συναρτήσει ποσοστιαίας μερικής σκίασης



Χαρακτηριστική I-V 20 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσει της ποσοστιαίας μερικής σκίασης

Χαρακτηριστική P-V συναρτήσεϊ ποσοστιαίας μερικής σκίασης



Χαρακτηριστική P-V 3 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσεϊ της ποσοστιαίας μερικής σκίασης

6.6.3 Συμπεράσματα

Στις χαρακτηριστικές P-V παρατηρούμε πως υπό μερική σκίαση υπάρχουν 2 διαφορετικά τοπικά μέγιστα ισχύος, όπου η ισχύς στο τοπικό σημείο μέγιστης ισχύος είναι εμφανώς μικρότερη από το συνολικό σημείο μέγιστης ισχύος.

Συγκεκριμένα το τοπικό μέγιστο που αντιστοιχεί στη χαμηλότερη τάση έχει πάντοτε την ίδια περίπου τιμή ενώ το άλλο μέγιστο μεταβάλλεται ανάλογα με το ποσοστό της σκίασης και το ολικό σημείο της μέγιστης ισχύος είναι άλλοτε το πρώτο όταν υπάρχει υψηλός βαθμός σκίασης και άλλοτε το δεύτερο όταν υπάρχει χαμηλός βαθμός σκίασης.

6.7 Χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσεων ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου και μίας παρακαμπτήριας διόδου

6.7.1 Γενικά

Σε αυτό το μέρος του πειράματος βλέπουμε την επίδραση της παρακαμπτήριας διόδου στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V όταν σκιάζουμε με μαύρο χαρτόνι (ώστε να έχουμε πλήρη σκίαση) ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο της στήλης. Όπως αναφέραμε και παραπάνω το συγκεκριμένο πλαίσιο έχει 4 παρακαμπτήριες διόδους όπου η κάθε μία αντιστοιχεί και σε μία στήλη. Πρώτα βγάλαμε όλες τις διόδους και μετρήσαμε χωρίς σκίαση και με σκίαση στο 3^ο στοιχείο κάθε στήλης. Έπειτα αφήσαμε μόνο τη παρακαμπτήρια δίοδο της 1^{ης} στήλης και μετρήσαμε χωρίς σκίαση, με πλήρη σκίαση στο 3^ο στοιχείο της 1^{ης} στήλης, με σκίαση στο 3^ο στοιχείο της 2^{ης} στήλης, με πλήρη σκίαση στο 3^ο στοιχείο της 3^{ης} στήλης και με σκίαση στο 3^ο στοιχείο της 4^{ης} στήλης. Μετά αφήσαμε μόνο τη παρακαμπτήρια δίοδο της 2^{ης} στήλης και μετρήσαμε χωρίς σκίαση, με πλήρη σκίαση στο 3^ο στοιχείο της 1^{ης} στήλης, με πλήρη σκίαση στο 3^ο στοιχείο της 2^{ης} στήλης, με πλήρη σκίαση στο 3^ο στοιχείο της 3^{ης} στήλης και με πλήρη σκίαση στο 3^ο στοιχείο της 4^{ης} στήλης. Επαναλάβαμε την ίδια διαδικασία και για τις δύο υπόλοιπες στήλες.

Από την παραπάνω διαδικασία θα προσδιορίσουμε αν κάποια στήλη έχει σκιασμένα στοιχεία ή στοιχεία τα οποία να αποδίδουν λιγότερο και αυτό θα φανεί από τις χαρακτηριστικές I-V,P-V αφού τώρα δεν θα υπάρχει η παρακαμπτήρια δίοδος ώστε να αποκόπτει τη στήλη από το υπόλοιπο κύκλωμα.



Εικόνα 21 : Παρακαμπτήριες διόδους φωτοβολταϊκού πλαισίου

6.7.2 Μετρήσεις - Χαρακτηριστικές

Οι μετρήσεις έχουν αριθμηση I_{xy} όπου x η στήλη την οποία προστατεύει η παρακαμπτήρια δίοδος και y η στήλη που βρίσκεται το σκιασμένο στοιχείο. Όταν το x ή y είναι μηδέν τότε δεν υπάρχει δίοδος ή σκιασμένο στοιχείο. Από τις παραπάνω μετρήσεις βγήκαν τα παραπάνω δεδομένα από το πολυόργανο .

Πίνακας 10 : Γενικά χαρακτηριστικά καμπύλων I-V φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου και μίας διόδου bypass

ΜΕΤΡΗΣΗ	P_{max} (W)	V_{oc} (V)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	I_{sc} (A)	Irradiance (W/m ²)	Module Temperature (°C)	FF (%)
I00	20,93	18,38	14,06	1,49	1,66	912,00	40,10	69,00
I01	4,96	18,36	5,50	0,90	1,37	921,00	40,40	20,00
I02	3,17	18,23	6,57	0,48	0,85	933,00	40,20	21,00
I03	11,26	18,21	8,14	1,38	1,65	929,00	40,00	37,00
I04	11,33	18,31	8,14	1,39	1,66	938,00	39,80	37,00
I10	22,01	19,34	14,84	1,48	1,62	850,00	26,10	70,00
I11	15,10	19,25	10,42	1,45	1,60	843,00	26,10	49,00
I12	3,56	19,24	6,49	0,55	0,90	844,00	25,90	20,00
I13	12,16	19,11	9,35	1,30	1,59	845,00	25,50	40,00
I14	12,08	19,17	9,06	1,33	1,59	843,00	25,70	40,00
I20	21,49	19,31	14,70	1,46	1,58	849,00	27,00	70,00
I21	5,57	19,20	6,07	0,92	1,42	847,00	27,00	20,00
I22	14,97	19,24	10,63	1,41	1,58	842,00	26,40	49,00
I23	12,12	19,21	8,85	1,37	1,56	839,00	25,20	40,00
I24	12,04	19,24	9,13	1,32	1,56	835,00	24,40	40,00
I30	21,41	19,44	15,27	1,40	1,57	824,00	25,20	70,00
I31	5,71	19,37	6,07	0,94	1,43	825,00	26,50	21,00
I32	3,67	19,35	6,78	0,54	0,92	826,00	26,40	21,00
I33	14,76	19,30	10,42	1,42	1,55	823,00	26,90	49,00
I34	12,00	19,30	9,21	1,30	1,54	823,00	27,10	40,00
I40	21,34	19,50	15,42	1,38	1,54	811,00	25,90	71,00
I41	15,31	19,53	17,13	0,89	1,11	811,00	26,80	69,00
I42	3,79	19,44	7,07	0,54	0,94	812,00	26,60	21,00
I43	12,17	19,33	9,42	1,29	1,52	811,00	27,10	41,00
I44	14,61	19,38	10,49	1,39	1,54	811,00	27,50	49,00

Στις ακόλουθες ενότητες παρουσιάζουμε αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων και τις χαρακτηριστικές I-V, P-V για κάθε δίοδο η οποία είναι συνδεδεμένη στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

6.7.2.1 Μετρήσεις και χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου χωρίς παρακαμπτήρια δίοδο συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

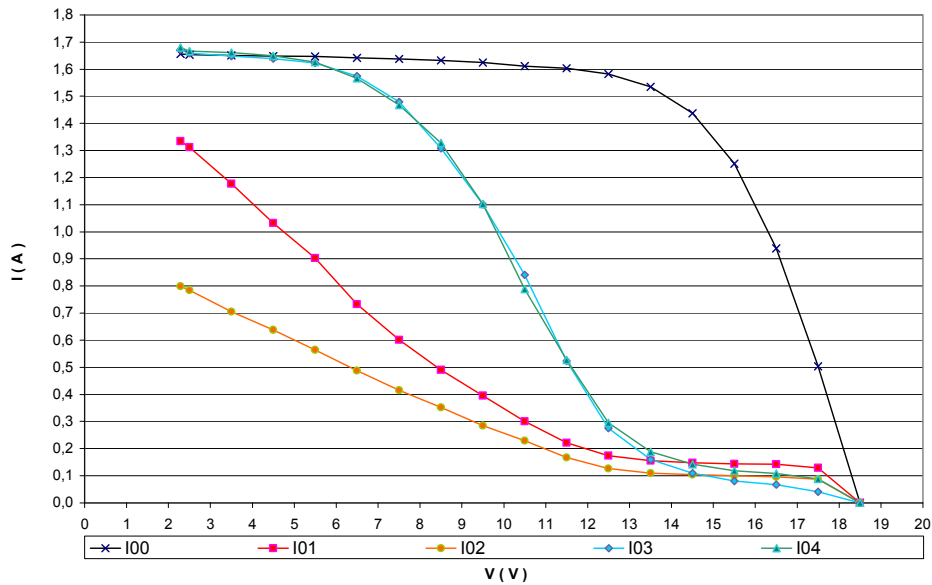
Στις παρακάτω μετρήσεις δεν υπήρχε δίοδος συνδεδεμένη στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και μετρήσαμε χωρίς σκίαση και με σκίαση ενός στοιχείου σε κάθε στήλη.

Ακολουθούν ο πίνακας τιμών και οι χαρακτηριστικές I-V και P-V.

Πίνακας 11 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P φωτοβολταϊκού πλαισίου χωρίς παρακαμπτήρια δίοδο συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

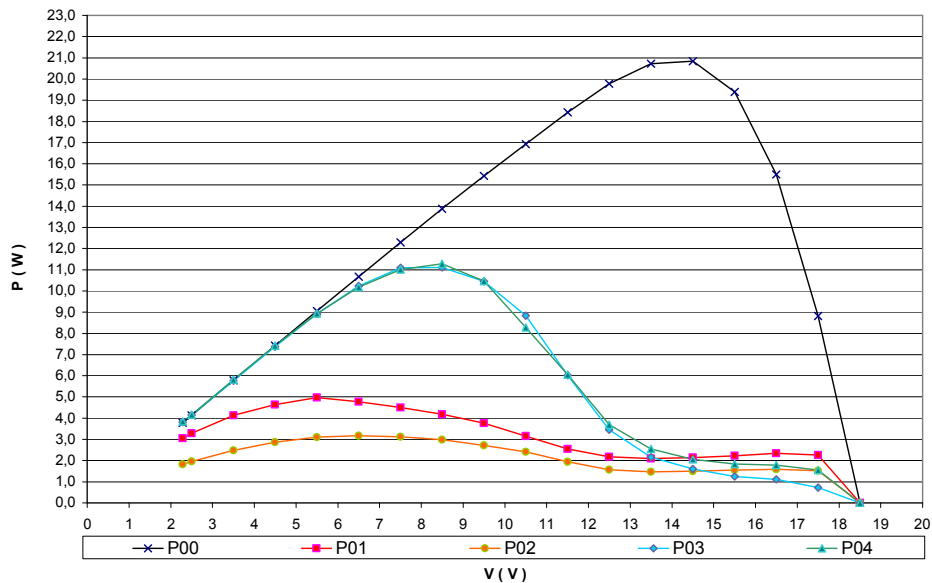
V (V)	I ₀₀ (A)	I ₀₁ (A)	I ₀₂ (A)	I ₀₃ (A)	I ₀₄ (A)	P ₀ (W)	P ₀₁ (W)	P ₀₂ (W)	P ₀₃ (W)	P ₀₄ (W)
2,284	1,656	1,335	0,799	1,672	1,680	3,782	3,049	1,825	3,819	3,837
2,500	1,653	1,312	0,785	1,659	1,667	4,133	3,280	1,963	4,148	4,168
3,500	1,651	1,178	0,706	1,649	1,661	5,779	4,123	2,471	5,772	5,814
4,500	1,649	1,032	0,638	1,639	1,650	7,421	4,644	2,871	7,376	7,425
5,500	1,647	0,903	0,565	1,623	1,626	9,059	4,967	3,108	8,927	8,943
6,500	1,642	0,733	0,488	1,575	1,567	10,673	4,765	3,172	10,238	10,186
7,500	1,638	0,601	0,416	1,479	1,468	12,285	4,508	3,120	11,093	11,010
8,500	1,633	0,491	0,352	1,308	1,328	13,881	4,174	2,992	11,118	11,288
9,500	1,624	0,396	0,285	1,101	1,102	15,428	3,762	2,708	10,460	10,469
10,500	1,612	0,301	0,229	0,841	0,788	16,926	3,161	2,405	8,831	8,274
11,500	1,603	0,222	0,168	0,524	0,527	18,435	2,553	1,932	6,026	6,061
12,500	1,582	0,174	0,126	0,276	0,296	19,775	2,175	1,575	3,450	3,700
13,500	1,535	0,155	0,109	0,160	0,189	20,723	2,093	1,472	2,160	2,552
14,500	1,437	0,148	0,104	0,110	0,142	20,837	2,146	1,508	1,595	2,059
15,500	1,251	0,144	0,100	0,081	0,119	19,391	2,232	1,550	1,256	1,845
16,500	0,939	0,142	0,096	0,067	0,108	15,494	2,343	1,584	1,106	1,782
17,500	0,504	0,129	0,087	0,041	0,089	8,820	2,258	1,523	0,718	1,558
18,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Χαρακτηριστική I-V χωρίς παρακαμπτήρια δίοδο



Χαρακτηριστική I-V 21 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου χωρίς παρακαμπτήρια δίοδο συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου

Χαρακτηριστική P-V χωρίς παρακαμπτήρια δίοδο



Χαρακτηριστική P-V 4 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου χωρίς παρακαμπτήρια δίοδο συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου

Στην χαρακτηριστική P-V 4 παρατηρούμε πως όταν δεν υπάρχει σκίαση το φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει τη μέγιστη ισχύ. Σκιάζοντας μόνο ένα στοιχείο της 2^{ης} στήλης έχει την ελάχιστη ισχύ. Σκιάζοντας μόνο ένα στοιχείο της 1^{ης} στήλης έχει λίγο μεγαλύτερη ισχύ σε σύγκριση με αυτή της 2^{ης} στήλης. Σκιάζοντας μόνο ένα στοιχείο της 3^{ης} ή της 4^{ης} στήλης έχει σχεδόν την ίδια ισχύ μεταξύ τους και είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτής της 1^{ης} στήλης.

Αν βάλουμε κατά φθίνουσα σειρά τις ισχύς P_n όπου n είναι η στήλη που έχει το σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο και P_0 όταν δεν έχει σκιαστεί τότε έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα : $P_0 > P_4 \geq P_3 > P_1 > P_2$

6.7.2.2 Μετρήσεις και χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 1^η στήλη συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

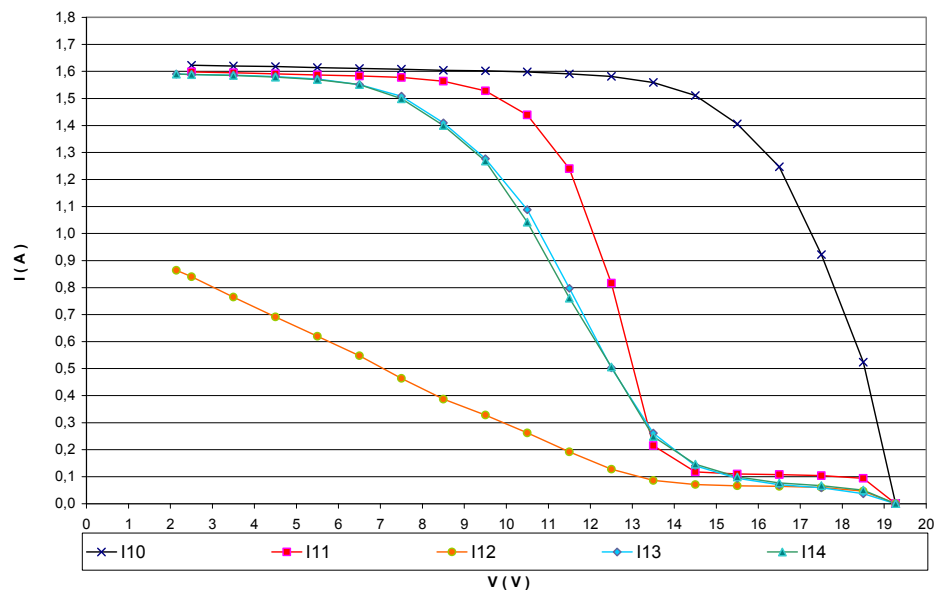
Στις παρακάτω μετρήσεις υπήρχε μία δίοδος συνδεδεμένη στα άκρα της 1^{ης} στήλης του φωτοβολταϊκού πλαισίου και μετρήσαμε χωρίς σκίαση και με σκίαση ενός στοιχείου σε κάθε στήλη.

Ακολουθούν ο πίνακας τιμών και οι χαρακτηριστικές I-V και P-V.

Πίνακας 12 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 1^η στήλη συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

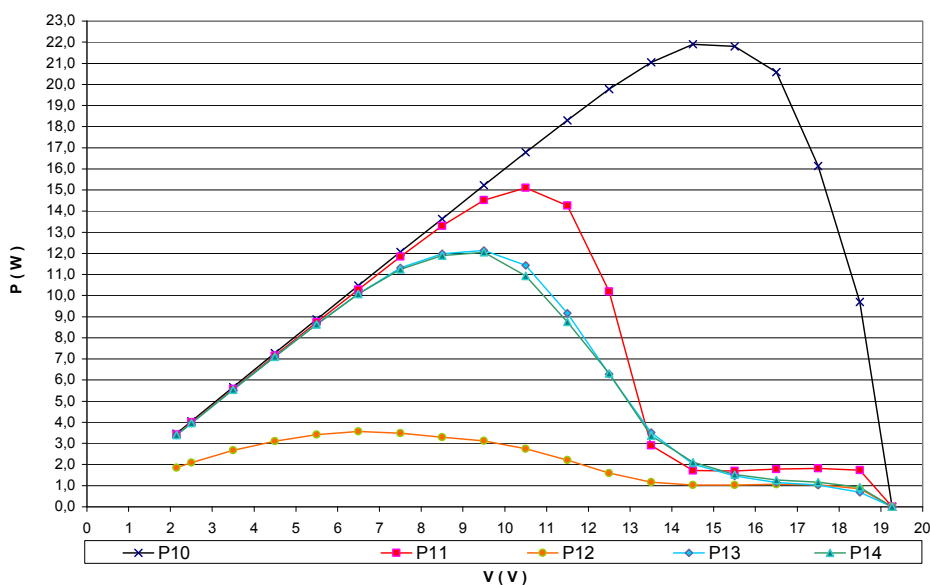
V (V)	I ₁₀ (A)	I ₁₁ (A)	I ₁₂ (A)	I ₁₃ (A)	I ₁₄ (A)	P ₁ (W)	P ₁₁ (W)	P ₁₂ (W)	P ₁₃ (W)	P ₁₄ (W)
2,141	1,620	1,599	0,864	1,590	1,590	3,468	3,423	1,850	3,404	3,404
2,500	1,623	1,598	0,840	1,588	1,588	4,058	3,995	2,100	3,970	3,970
3,500	1,620	1,595	0,765	1,586	1,585	5,670	5,583	2,678	5,551	5,548
4,500	1,618	1,591	0,691	1,581	1,579	7,281	7,160	3,110	7,115	7,106
5,500	1,614	1,587	0,620	1,572	1,570	8,877	8,729	3,410	8,646	8,635
6,500	1,611	1,583	0,548	1,551	1,551	10,472	10,290	3,562	10,082	10,082
7,500	1,608	1,578	0,464	1,508	1,499	12,060	11,835	3,480	11,310	11,243
8,500	1,604	1,564	0,387	1,410	1,400	13,634	13,294	3,290	11,985	11,900
9,500	1,602	1,528	0,328	1,277	1,268	15,219	14,516	3,116	12,132	12,046
10,500	1,598	1,439	0,262	1,088	1,042	16,779	15,110	2,751	11,424	10,941
11,500	1,591	1,240	0,192	0,797	0,761	18,297	14,260	2,208	9,166	8,752
12,500	1,582	0,816	0,128	0,503	0,506	19,775	10,200	1,600	6,288	6,325
13,500	1,559	0,215	0,086	0,261	0,249	21,047	2,903	1,161	3,524	3,362
14,500	1,511	0,118	0,071	0,140	0,146	21,910	1,711	1,030	2,030	2,117
15,500	1,406	0,110	0,066	0,094	0,099	21,793	1,705	1,023	1,457	1,535
16,500	1,247	0,108	0,064	0,070	0,077	20,576	1,782	1,056	1,155	1,271
17,500	0,922	0,104	0,060	0,059	0,067	16,135	1,820	1,050	1,033	1,173
18,500	0,524	0,094	0,046	0,037	0,050	9,694	1,739	0,851	0,685	0,925
19,269	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Χαρακτηριστική I-V με παρακαμπτήρια δίοδο στην 1^η στήλη



Χαρακτηριστική I-V 22 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 1^η στήλη συναρτήσε ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

Χαρακτηριστική P-V με παρακαμπτήρια δίοδο στην 1^η στήλη



Χαρακτηριστική P-V 5 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 1^η στήλη συναρτήσε ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

Στην χαρακτηριστική P-V 5 παρατηρούμε πως όταν δεν υπάρχει σκίαση το φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει τη μέγιστη ισχύ. Σκιάζοντας μόνο ένα στοιχείο της 2^{ης} στήλης έχει την ελάχιστη ισχύ.. Σκιάζοντας μόνο ένα στοιχείο της 3^{ης} ή της 4^{ης} στήλης έχει σχεδόν την ίδια ισχύ μεταξύ τους και είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με

αυτής της 2^{ης} στήλης. Σκιαζοντας μόνο ένα στοιχείο της 1^{ης} στήλης έχει μεγαλύτερη ισχύ σε σύγκριση με αυτή της 3^{ης} και 4^{ης} στήλης.

Αν βάλουμε κατά φθίνουσα σειρά τις ισχύς P_n όπου n είναι η στήλη που έχει το σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο και P_0 όταν δεν έχει σκιαστεί τότε έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα: $P_0 > P_1 > P_3 \geq P_4 > P_2$

6.7.2.3 Μετρήσεις και χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 2^η στήλη συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

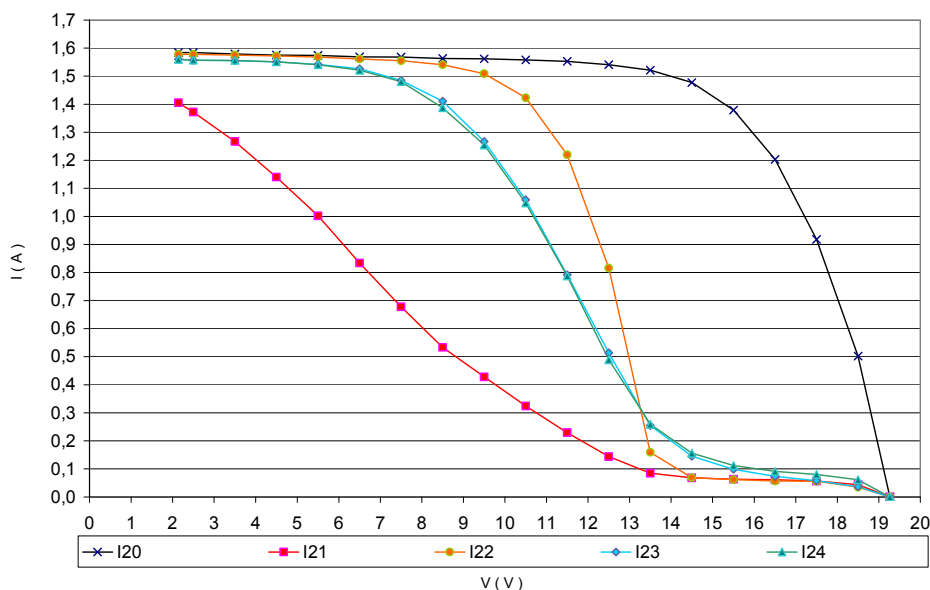
Στις παρακάτω μετρήσεις υπήρχε μία δίοδος συνδεδεμένη στα άκρα της 2^{ης} στήλης του φωτοβολταϊκού πλαισίου και μετρήσαμε χωρίς σκίαση και με σκίαση ενός στοιχείου σε κάθε στήλη.

Ακολουθούν ο πίνακας τιμών και οι χαρακτηριστικές I-V και P-V.

Πίνακας 13 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στη 2^η στήλη συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

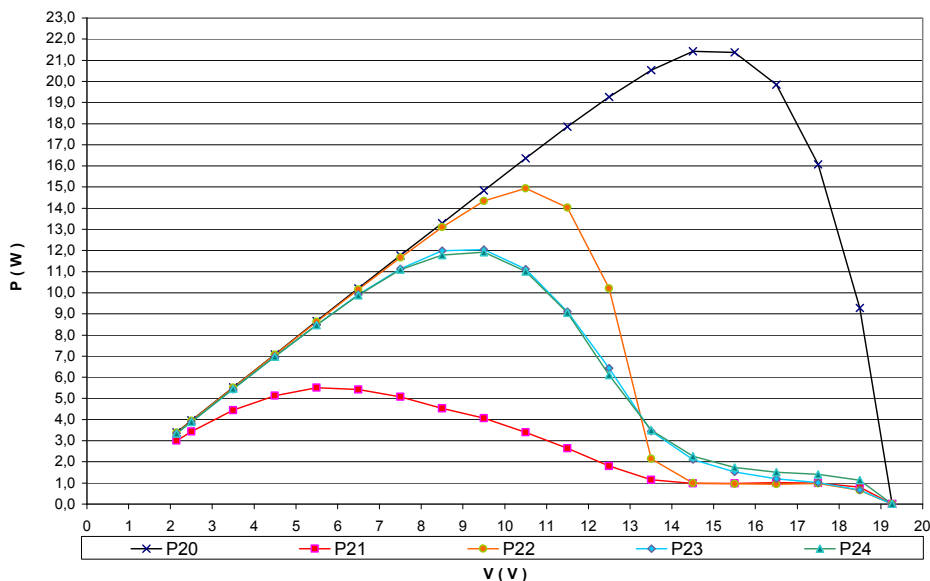
V (V)	I ₂ (A)	I ₂₁ (A)	I ₂₂ (A)	I ₂₃ (A)	I ₂₄ (A)	P ₂ (W)	P ₂₁ (W)	P ₂₂ (W)	P ₂₃ (W)	P ₂₄ (W)
2,141	1,584	1,405	1,578	1,560	1,560	3,391	3,008	3,378	3,340	3,340
2,500	1,584	1,372	1,578	1,557	1,557	3,960	3,430	3,945	3,893	3,893
3,500	1,579	1,267	1,575	1,555	1,556	5,527	4,435	5,513	5,443	5,446
4,500	1,575	1,140	1,572	1,551	1,551	7,088	5,130	7,074	6,980	6,980
5,500	1,574	1,002	1,568	1,542	1,541	8,657	5,511	8,624	8,481	8,476
6,500	1,569	0,834	1,561	1,526	1,521	10,199	5,421	10,147	9,919	9,887
7,500	1,568	0,678	1,555	1,485	1,480	11,760	5,085	11,663	11,138	11,100
8,500	1,563	0,533	1,541	1,411	1,387	13,286	4,531	13,099	11,994	11,790
9,500	1,562	0,428	1,509	1,267	1,255	14,839	4,066	14,336	12,037	11,923
10,500	1,558	0,324	1,423	1,059	1,048	16,359	3,402	14,942	11,120	11,004
11,500	1,553	0,229	1,220	0,792	0,788	17,860	2,634	14,030	9,108	9,062
12,500	1,541	0,144	0,816	0,514	0,489	19,263	1,800	10,200	6,425	6,113
13,500	1,521	0,085	0,159	0,255	0,259	20,534	1,148	2,147	3,443	3,497
14,500	1,477	0,068	0,069	0,145	0,156	21,417	0,986	1,001	2,103	2,262
15,500	1,379	0,063	0,062	0,099	0,112	21,375	0,977	0,961	1,535	1,736
16,500	1,203	0,061	0,057	0,073	0,091	19,850	1,007	0,941	1,205	1,502
17,500	0,918	0,057	0,056	0,058	0,080	16,065	0,998	0,980	1,015	1,400
18,500	0,502	0,044	0,035	0,036	0,061	9,287	0,814	0,648	0,666	1,129
19,269	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Χαρακτηριστική I-V με παρακαμπτήρια δίοδο στη 2^η στήλη



Χαρακτηριστική I-V 23 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στη 2^η στήλη συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

Χαρακτηριστική P-V με παρακαμπτήρια δίοδο στη 2^η στήλη



Χαρακτηριστική P-V 6 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στη 2^η στήλη συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

Στην χαρακτηριστική P-V 6 παρατηρούμε πως όταν δεν υπάρχει σκίαση το φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει τη μέγιστη ισχύ. Σκιάζοντας μόνο ένα στοιχείο της 1^{ης} στήλης έχει την ελάχιστη ισχύ. Σκιάζοντας μόνο ένα στοιχείο της 3^{ης} ή της 4^{ης} στήλης έχει σχεδόν την ίδια ισχύ μεταξύ τους και είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτής της 1^{ης} στήλης. Σκιάζοντας μόνο ένα στοιχείο της 2^{ης} στήλης έχει μεγαλύτερη ισχύ σε σύγκριση με αυτή της 3^{ης} και 4^{ης} στήλης.

Αν βάλουμε κατά φθίνουσα σειρά τις ισχύς P_n όπου n είναι η στήλη που έχει το σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο και P_0 όταν δεν έχει σκιαστεί τότε έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα: $P_0 > P_2 > P_3 \geq P_4 > P_1$

6.7.2.4 Μετρήσεις και χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 3^η στήλη συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

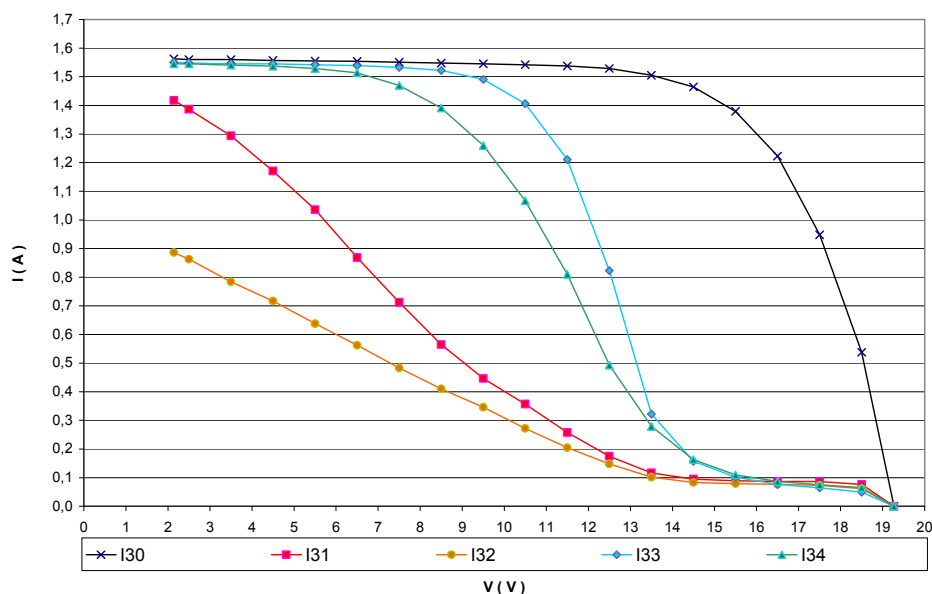
Στις παρακάτω μετρήσεις υπήρχε μία δίοδος συνδεδεμένη στα άκρα της 3^{ης} στήλης του φωτοβολταϊκού πλαισίου και μετρήσαμε χωρίς σκίαση και με σκίαση ενός στοιχείου σε κάθε στήλη.

Ακολουθούν ο πίνακας τιμών και οι χαρακτηριστικές I-V και P-V.

Πίνακας 14 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 3^η στήλη συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

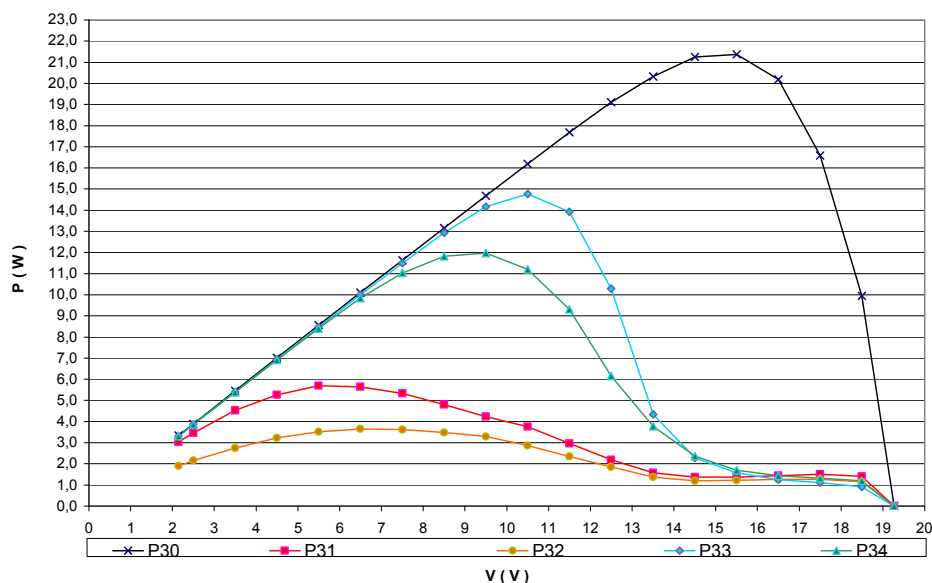
V (V)	I ₃ (A)	I ₃₁ (A)	I ₃₂ (A)	I ₃₃ (A)	I ₃₄ (A)	P ₃ (W)	P ₃₁ (W)	P ₃₂ (W)	P ₃₃ (W)	P ₃₄ (W)
2,141	1,563	1,417	0,886	1,550	1,545	3,346	3,034	1,897	3,319	3,308
2,500	1,560	1,387	0,863	1,548	1,545	3,900	3,468	2,158	3,870	3,863
3,500	1,560	1,294	0,784	1,545	1,541	5,460	4,529	2,744	5,408	5,394
4,500	1,557	1,171	0,717	1,545	1,537	7,007	5,270	3,227	6,953	6,917
5,500	1,555	1,036	0,638	1,542	1,529	8,553	5,698	3,509	8,481	8,410
6,500	1,554	0,869	0,562	1,539	1,514	10,101	5,649	3,653	10,004	9,841
7,500	1,551	0,712	0,483	1,533	1,470	11,633	5,340	3,623	11,498	11,025
8,500	1,548	0,565	0,410	1,522	1,391	13,158	4,803	3,485	12,937	11,824
9,500	1,545	0,446	0,346	1,491	1,260	14,678	4,237	3,287	14,165	11,970
10,500	1,542	0,357	0,272	1,406	1,067	16,191	3,749	2,856	14,763	11,204
11,500	1,538	0,258	0,205	1,211	0,810	17,687	2,967	2,358	13,927	9,315
12,500	1,529	0,175	0,148	0,823	0,493	19,113	2,188	1,850	10,288	6,163
13,500	1,505	0,117	0,102	0,322	0,279	20,318	1,580	1,377	4,347	3,767
14,500	1,465	0,095	0,083	0,157	0,163	21,243	1,378	1,204	2,277	2,364
15,500	1,379	0,089	0,079	0,102	0,110	21,375	1,380	1,225	1,581	1,705
16,500	1,223	0,087	0,077	0,076	0,087	20,180	1,436	1,271	1,254	1,436
17,500	0,948	0,086	0,073	0,064	0,075	16,590	1,505	1,278	1,120	1,313
18,500	0,538	0,076	0,062	0,049	0,065	9,953	1,406	1,147	0,907	1,203
19,269	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Χαρακτηριστική I-V με παρακαμπτήρια δίοδο στην 3^η στήλη



Χαρακτηριστική I-V 24 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 3^η στήλη συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

Χαρακτηριστική P-V με παρακαμπτήρια δίοδο στην 3^η στήλη



Χαρακτηριστική P-V 7 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 3^η στήλη συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

Στην χαρακτηριστική P-V 7 παρατηρούμε πως όταν δεν υπάρχει σκίαση το φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει τη μέγιστη ισχύ. Σκιάζοντας μόνο ένα στοιχείο της 2^{ης} στήλης έχει την ελάχιστη ισχύ. Σκιάζοντας μόνο ένα στοιχείο της 1^{ης} στήλης έχει μεγαλύτερη ισχύ σε σύγκριση με αυτή της 2^{ης} στήλης. Σκιάζοντας μόνο ένα στοιχείο της 4^{ης} στήλης έχει μεγαλύτερη ισχύ σε σύγκριση με αυτή της 1^{ης} στήλης. Σκιάζοντας

μόνο ένα στοιχείο της 3^{ης} στήλης έχει μεγαλύτερη ισχύ σε σύγκριση με αυτή της 4^{ης} στήλης.

Αν βάλουμε κατά φθίνουσα σειρά τις ισχύς P_n όπου n είναι η στήλη που έχει το σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο και P_0 όταν δεν έχει σκιαστεί τότε έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα: $P_0 > P_3 > P_4 > P_1 > P_2$

6.7.2.5 Μετρήσεις και χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 4^η στήλη συναρτήσεως ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου

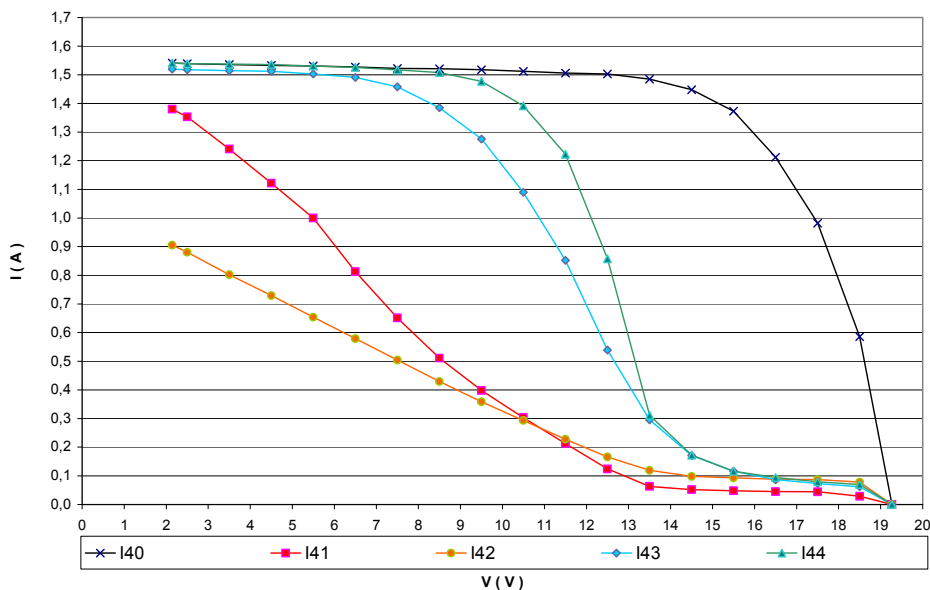
Στις παρακάτω μετρήσεις υπήρχε μία δίοδος συνδεδεμένη στα άκρα της 4^{ης} στήλης του φωτοβολταϊκού πλαισίου και μετρήσαμε χωρίς σκίαση και με σκίαση ενός στοιχείου σε κάθε στήλη.

Ακολουθούν ο πίνακας τιμών και οι χαρακτηριστικές I-V και P-V.

Πίνακας 15 : Μετρήσεις υπολογισμοί I-V-P φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 4^η στήλη συναρτήσεως ενός σκιασμένου στοιχείου

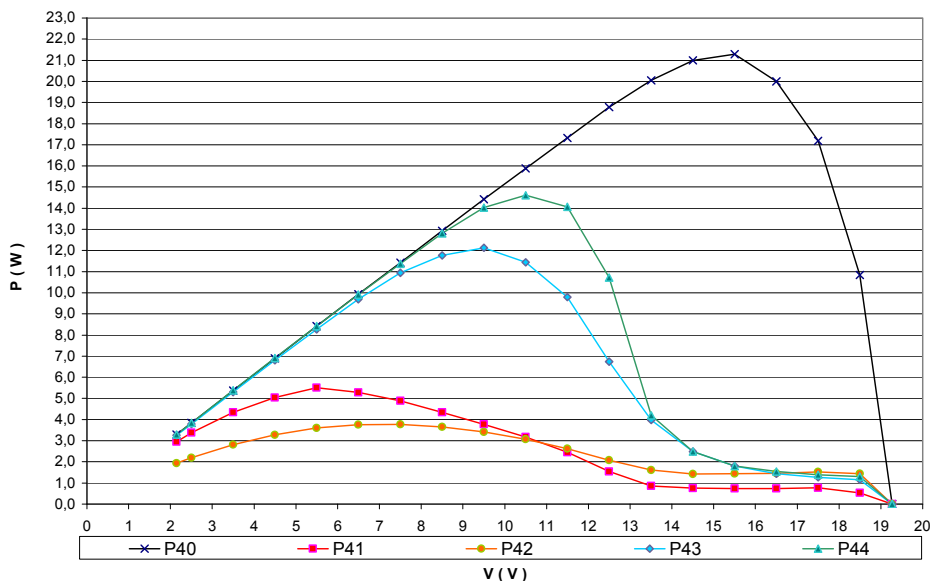
V (V)	I ₄ (A)	I ₄₁ (A)	I ₄₂ (A)	I ₄₃ (A)	I ₄₄ (A)	P ₄ (W)	P ₄₁ (W)	P ₄₂ (W)	P ₄₃ (W)	P ₄₄ (W)
2,141	1,541	1,380	0,905	1,520	1,541	3,299	2,955	1,938	3,254	3,299
2,500	1,539	1,353	0,880	1,518	1,539	3,848	3,383	2,200	3,795	3,848
3,500	1,536	1,241	0,802	1,515	1,537	5,376	4,344	2,807	5,303	5,380
4,500	1,533	1,122	0,729	1,512	1,536	6,899	5,049	3,281	6,804	6,912
5,500	1,531	1,000	0,654	1,503	1,531	8,421	5,500	3,597	8,267	8,421
6,500	1,527	0,813	0,579	1,491	1,526	9,926	5,285	3,764	9,692	9,919
7,500	1,522	0,651	0,504	1,458	1,517	11,415	4,883	3,780	10,935	11,378
8,500	1,521	0,511	0,429	1,385	1,508	12,929	4,344	3,647	11,773	12,818
9,500	1,518	0,398	0,359	1,276	1,477	14,421	3,781	3,411	12,122	14,032
10,500	1,512	0,303	0,293	1,090	1,392	15,876	3,182	3,077	11,445	14,616
11,500	1,506	0,213	0,228	0,852	1,223	17,319	2,450	2,622	9,798	14,065
12,500	1,503	0,124	0,166	0,539	0,858	18,788	1,550	2,075	6,738	10,725
13,500	1,485	0,063	0,119	0,295	0,311	20,048	0,851	1,607	3,983	4,199
14,500	1,448	0,052	0,098	0,171	0,172	20,996	0,754	1,421	2,480	2,494
15,500	1,373	0,048	0,093	0,116	0,116	21,282	0,744	1,442	1,798	1,798
16,500	1,212	0,045	0,088	0,087	0,094	19,998	0,743	1,452	1,436	1,551
17,500	0,982	0,044	0,087	0,073	0,079	17,185	0,770	1,523	1,278	1,383
18,500	0,586	0,029	0,078	0,062	0,070	10,841	0,537	1,443	1,147	1,295
19,269	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Χαρακτηριστική I-V με παρακαμπτήρια δίοδο στην 4^η στήλη



Χαρακτηριστική I-V 25 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 4^η στήλη συναρτήσει ενός σκιασμένου στοιχείου

Χαρακτηριστική P-V με παρακαμπτήρια δίοδο στην 4^η στήλη



Χαρακτηριστική P-V 8 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με παρακαμπτήρια δίοδο στην 4^η στήλη συναρτήσει ενός σκιασμένου στοιχείου

Στην χαρακτηριστική P-V 8 παρατηρούμε πως όταν δεν υπάρχει σκίαση το φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει τη μέγιστη ισχύ. Σκιάζοντας μόνο ένα στοιχείο της 2^{ης} στήλης έχει την ελάχιστη ισχύ. Σκιάζοντας μόνο ένα στοιχείο της 1^{ης} στήλης έχει μεγαλύτερη ισχύ σε σύγκριση με αυτή της 2^{ης} στήλης. Σκιάζοντας μόνο ένα στοιχείο της 3^{ης} στήλης έχει μεγαλύτερη ισχύ σε σύγκριση με αυτή της 1^{ης} στήλης. Σκιάζοντας

μόνο ένα στοιχείο της 4^{ης} στήλης έχει μεγαλύτερη ισχύ σε σύγκριση με αυτή της 3^{ης} στήλης.

Αν βάλουμε κατά φθίνουσα σειρά τις ισχύς P_n όπου n είναι η στήλη που έχει το σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο και P_0 όταν δεν έχει σκιαστεί τότε έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα: $P_0 > P_4 > P_3 > P_1 > P_2$

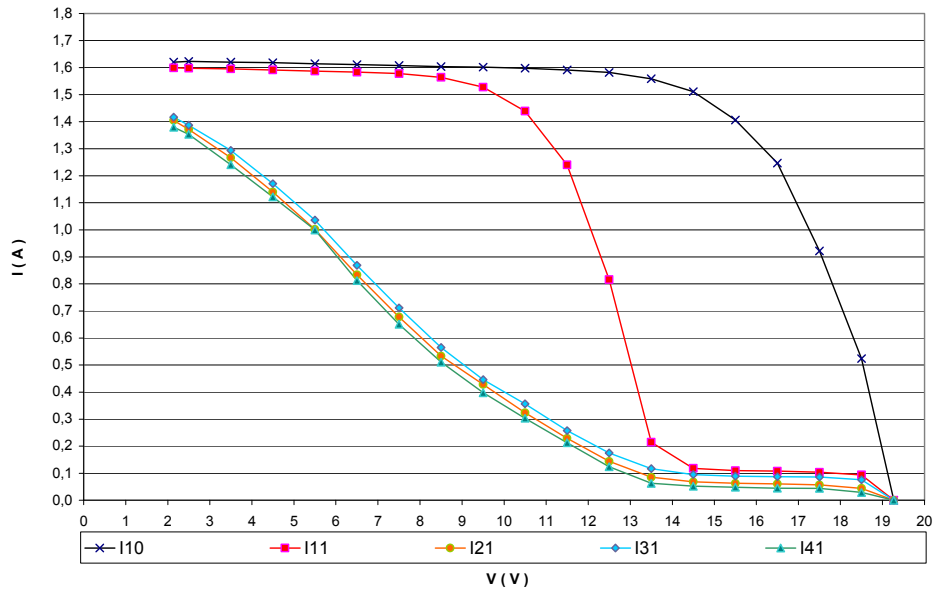
6.7.3 Συμπεράσματα

Παρατηρούμε πως το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποδίδει τη μέγιστη ισχύ όταν δεν υπάρχει κανένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο ανεξαρτήτως αν υπάρχει συνδεδεμένη δίοδος ή όχι.

Από τις επιμέρους παρατηρήσεις σε κάθε καμπύλη ισχύος προκύπτει ότι όταν υπάρχει ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο σε μία στήλη και αυτή προστατεύεται από τη παρακαμπτήρια δίοδο τότε η ισχύς της είναι λίγο μικρότερη από αυτήν που έχει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο χωρίς σκίαση.

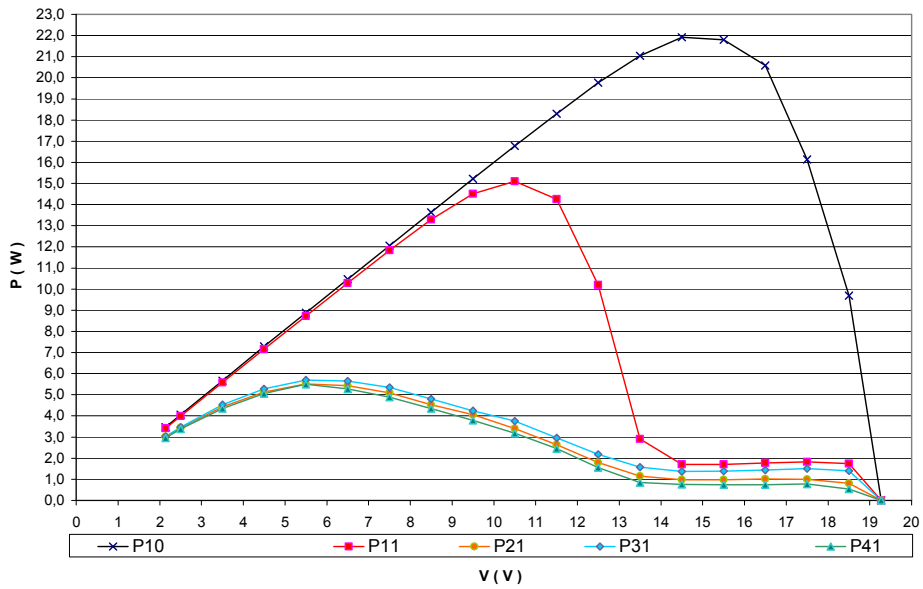
Επίσης παρατηρούμε πως όταν σκιάζουμε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο σε μία στήλη οι χαρακτηριστικές καμπύλες κάθε στήλης είναι διαφορετικές για κάθε στήλη ανεξάρτητα με το ποιά παρακαμπτήρια δίοδος είναι συνδεδεμένη. Παρακάτω συνοψίζουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V του φωτοβολταϊκού πλαισίου χωρίς σκίαση και όταν η στήλη έχει ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο και συνδεδεμένη την καθεμιά από τις τέσσερις παρακαμπτήρια δίοδους, από τους παραπάνω πίνακες τιμών. (Π.χ. Εξετάζουμε την 1^η στήλη χωρίς σκίαση, σκιάζουμε το 3^ο φωτοβολταϊκό στοιχείο της 1^{ης} στήλης του πλαισίου μόνο με την παρακαμπτήρια δίοδο της 1^{ης} στήλης, το ίδιο φωτοβολταϊκό στοιχείο μόνο με την παρακαμπτήρια δίοδο της 2^{ης} στήλης, το ίδιο φωτοβολταϊκό στοιχείο μόνο με την παρακαμπτήρια δίοδο της 3^{ης} στήλης και το ίδιο φωτοβολταϊκό στοιχείο μόνο με την παρακαμπτήρια δίοδο της 4^{ης} στήλης. Ομοίως για τις υπόλοιπες στήλες.)

Χαρακτηριστική I-V 1^{ης} στήλης



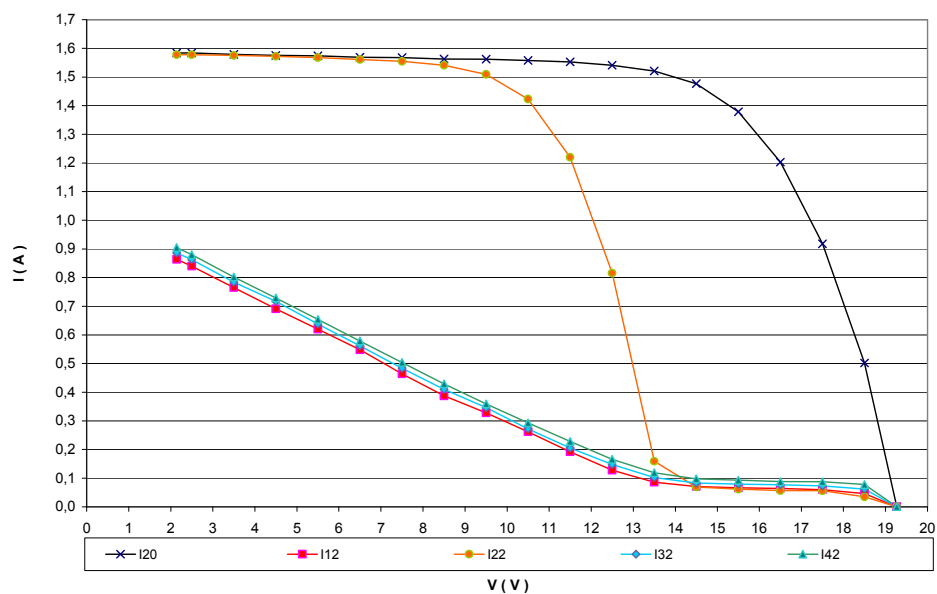
Χαρακτηριστική I-V 26 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στην 1^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου

Χαρακτηριστική P-V 1^{ης} στήλης



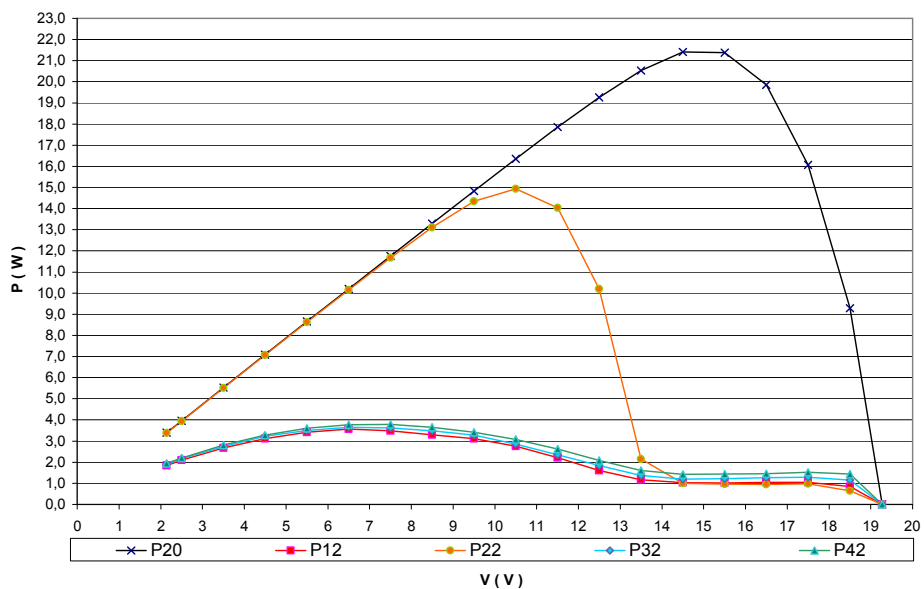
Χαρακτηριστική P-V 9 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στην 1^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου

Χαρακτηριστική I-V 2^{ης} στήλης



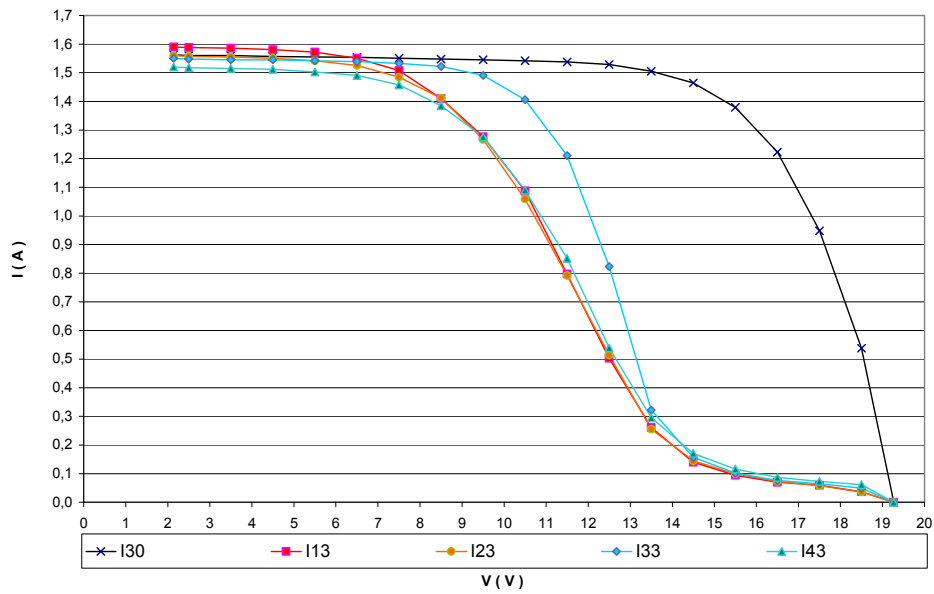
Χαρακτηριστική I-V 27 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στη 2^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου

Χαρακτηριστική P-V 2^{ης} στήλης



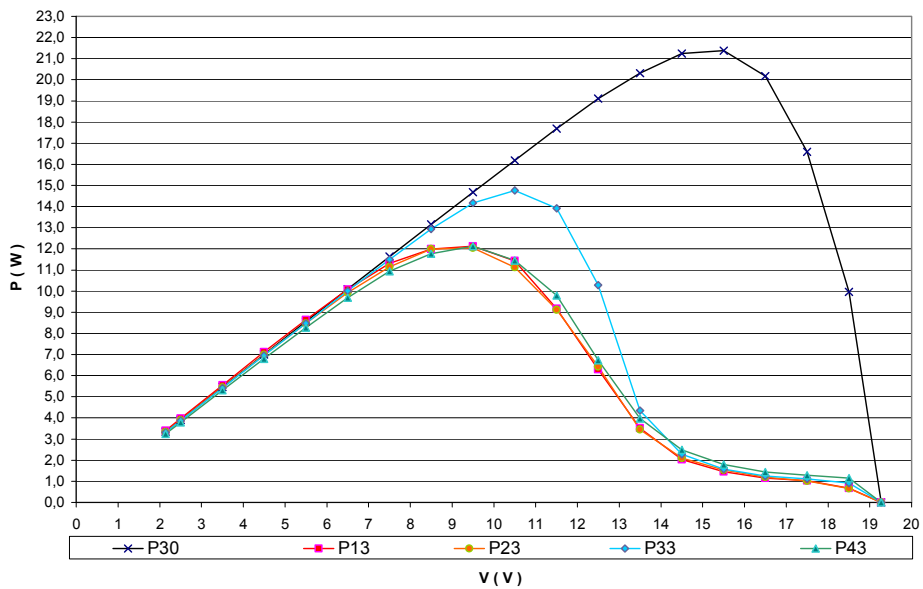
Χαρακτηριστική P-V 10 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στη 2^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου

Χαρακτηριστική I-V 3^{ης} στήλης



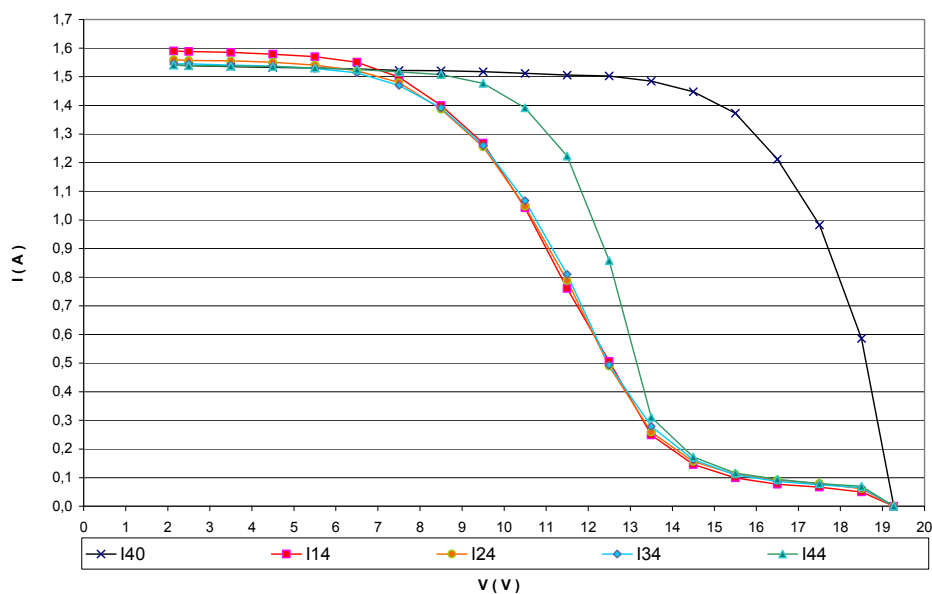
Χαρακτηριστική I-V 28 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στην 3^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου

Χαρακτηριστική P-V 3^{ης} στήλης



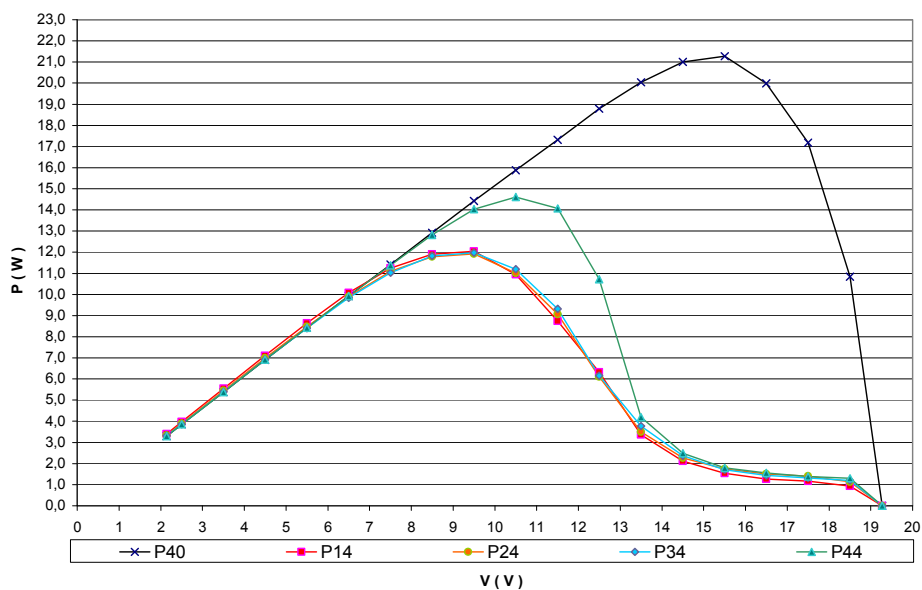
Χαρακτηριστική P-V 11 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στην 3^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου

Χαρακτηριστική I-V 4^{ης} στήλης



Χαρακτηριστική I-V 29 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στην 4^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου

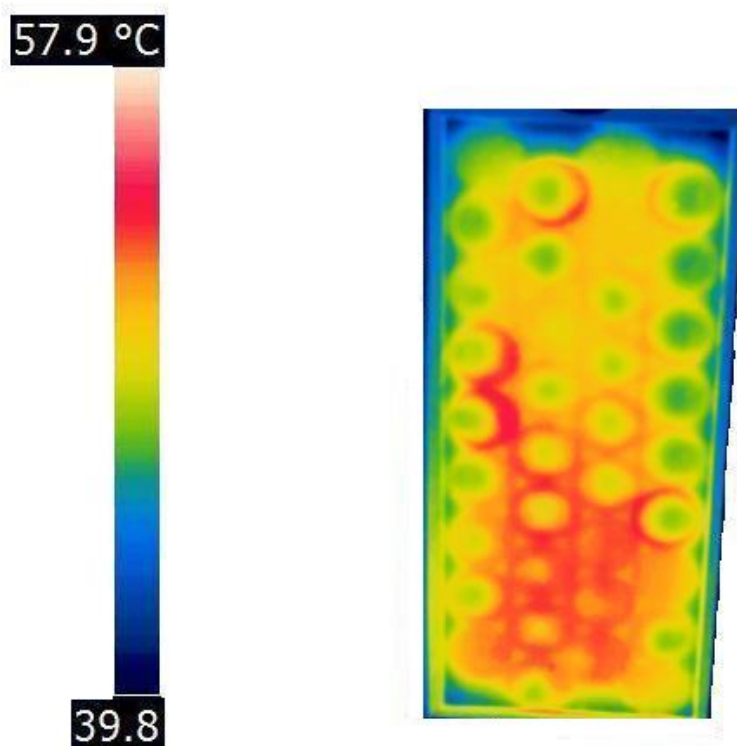
Χαρακτηριστική P-V 4^{ης} στήλης



Χαρακτηριστική P-V 12 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα πλήρες σκιασμένο στοιχείο στην 4^η στήλη ανεξαρτήτως διόδου

Συγκρίνοντας τις Χαρακτηριστικές I-V 26, 27, 28, 29 με την Χαρακτηριστική I-V 18 συμπεραίνουμε πως η 3^η και η 4^η στήλη έχουν περισσότερα σκιασμένα στοιχεία σε σύγκριση με την 1^η και τη 2^η με αποτέλεσμα να έχουν μικρότερη απόδοση. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις αντίστοιχες Χαρακτηριστικές P-V 9,10, 11, 12. Στην περίπτωση που τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λειτουργούσαν σωστά, όταν

σκιάζαμε ένα στοιχείο θα έπρεπε όλες οι χαρακτηριστικές I-V να ήταν ίδιες με μία πάρα πολύ μικρή απόκλιση. Τώρα όμως παρατηρούμε πως 2 χαρακτηριστικές έχουν παραπλήσιες τιμές (Χαρακτηριστικές I-V 28, 29) και οι άλλες 2 χαρακτηριστικές καμπύλες έχουν εντελώς διαφορετικές τιμές (Χαρακτηριστικές I-V 26, 27). Οι σκιασμένες στήλες θα πρέπει να αποδίδουν λιγότερη ισχύ από τις μη σκιασμένες. Άρα στην συγκεκριμένη περίπτωση όταν οι σκιασμένες στήλες είναι οι 3 και 4 και έχω τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο αυτό σημαίνει ότι οι στήλες 1 και 2 έχουν λιγότερα προβληματικά στοιχεία ή κανένα προβληματικό στοιχείο και αποδίδουν περισσότερο. Αντίθετα όταν είναι σκιασμένες οι στήλες 1 και 2 έχω μικρότερη παραγόμενη ισχύ στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και αυτό σημαίνει ότι οι στήλες 3 και 4 έχουν περισσότερα προβληματικά στοιχεία και αποδίδουν λιγότερο σε σύγκριση με τις στήλες 1 και 2. Αυτό επιβεβαιώνεται και με την παρακάτω θερμογραφία.



Εικόνα 22 : Θερμογραφία φωτοβολταϊκού πλαισίου

Στο παρακάτω σχήμα αναγράφουμε μέσα στο κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο τη θερμοκρασία του.

47,5	48,0	49,7	46,9
48,2	47,5	50,4	46,6
48,4	50,3	48,3	46,6
48,4	48,5	48,7	46,7
48,4	49,4	48,9	47,3
48,1	49,7	49,2	47,8
49,5	51,5	52,8	51,4
48,6	50,8	52,3	48,0
51,2	49,0	52,5	49,8

Σχήμα 29 : Βραχυκυκλωμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο με καταγεγραμμένη τη θερμοκρασία κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου

Έχουμε συνδέσει το θετικό πόλο του φωτοβολταϊκού πλαισίου με τον αρνητικό πόλο του φωτοβολταϊκού πλαισίου δηλαδή έχουμε βραχυκυκλώσει τα άκρα του φωτοβολταϊκού πλαισίου για 15 λεπτά ώστε να διαρρέεται από το μέγιστο ρεύμα, το ρεύμα βραχυκυκλώματος.

Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 46,6°C η ελάχιστη έως και 52,5°C η μέγιστη. Προφανώς όλα τα στοιχεία δεν έχουν την ίδια απόδοση αφού λειτουργούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες σύμφωνα με την παράγραφο 2.1.9.

Παρατηρούμε πως η 1^η στήλη έχει 2 φωτοβολταϊκά στοιχεία τα οποία είναι υπερθερμασμένα περιφερειακά (θερμοκρασία γύρω στους 52°C). Στη 2^η στήλη μόνο ένα στοιχείο υπερθερμαίνεται περιφερειακά και ελαφρώς 3 στο εσωτερικό τους (γύρω στους 50°C). Στην 3^η στήλη έχει 3 υπερθερμασμένα στοιχεία και η 4^η στήλη έχει 4 στοιχεία με χαμηλή θερμοκρασία και ένα υπερθερμασμένο περιφερειακά. Άρα η 3^η και η 4^η στήλη έχουν τα περισσότερα προβληματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία με αποτέλεσμα οι δύο στήλες να έχουν μικρότερη απόδοση σε σύγκριση με την 1^η και την 2^η άρα και μικρότερη παροχή ισχύος στο κύκλωμα.

6.8 Χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσεϊ ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου σε μία ή περισσότερες στήλες

6.8.1 Γενικά

Σε αυτό το μέρος μελετάμε τη συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού πλαισίου όταν είναι συνδεδεμένες όλες οι παρακαμπτήριες διόδοι σε αυτό και όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μίας ή περισσότερων στηλών είναι πλήρως σκιασμένο.

6.8.2 Μετρήσεις - Χαρακτηριστικές

Οι μετρήσεις έχουν αριθμό I_x όπου x η στήλη που βρίσκεται το σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Όταν το x είναι μηδέν τότε δεν έχουμε κανένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Από τις παραπάνω μετρήσεις βγήκαν τα παραπάνω δεδομένα από το πολυόργανο .

Πίνακας 16 : Γενικά χαρακτηριστικά καμπύλων I-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσεϊ ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου σε μία ή περισσότερες στήλες

ΜΕΤΡΗΣΗ	P _{max} (W)	V _{oc} (V)	V _{mpp} (V)	I _{mpp} (A)	I _{sc} (A)	Irradiance (W/m ²)	Module Temperature (°C).	FF (%)
I0	24,16	19,73	15,49	1,56	1,75	921,00	30,50	70,00
I1	16,35	19,53	10,56	1,55	1,73	921,00	32,10	48,00
I2	9,24	19,35	5,99	1,54	1,72	921,00	33,00	28,00
I3	2,14	19,08	1,93	1,11	1,11	920,00	33,70	10,00
I4	0,95	19,00	16,06	0,06	0,11	921,00	34,30	45,00

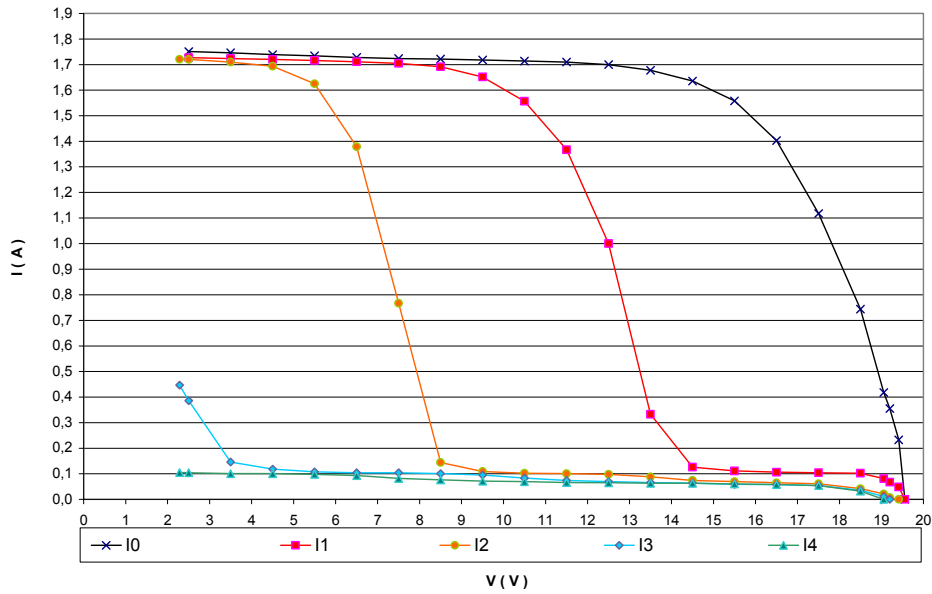
Ακολουθούν ο αναλυτικός πίνακας τιμών και οι χαρακτηριστικές I-V και P-V.

Πίνακας 17 : Μετρήσεις και υπολογισμοί I-V-P φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους σε όλες τις στήλες συναρτήσει ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείου σε μία ή περισσότερες στήλες

V (V)	I ₀ (A)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	I ₃ (A)	I ₄ (A)	P ₀ (W)	P ₁ (W)	P ₂ (W)	P ₃ (W)	P ₄ (W)
2,284	1,751	1,730	1,721	0,447	0,105	3,999	3,951	3,931	1,021	0,240
2,500	1,751	1,727	1,720	0,386	0,104	4,378	4,318	4,300	0,965	0,260
3,500	1,746	1,724	1,710	0,146	0,101	6,111	6,034	5,985	0,511	0,354
4,500	1,739	1,720	1,694	0,118	0,101	7,826	7,740	7,623	0,531	0,455
5,500	1,734	1,716	1,625	0,108	0,098	9,537	9,438	8,938	0,594	0,539
6,500	1,728	1,711	1,379	0,104	0,093	11,232	11,122	8,964	0,676	0,605
7,500	1,724	1,705	0,767	0,104	0,082	12,930	12,788	5,753	0,780	0,615
8,500	1,722	1,692	0,144	0,101	0,076	14,637	14,382	1,224	0,859	0,646
9,500	1,718	1,652	0,109	0,095	0,071	16,321	15,694	1,036	0,903	0,675
10,500	1,714	1,557	0,102	0,083	0,069	17,997	16,349	1,071	0,872	0,725
11,500	1,710	1,367	0,101	0,074	0,066	19,665	15,721	1,162	0,851	0,759
12,500	1,700	1,000	0,098	0,069	0,065	21,250	12,500	1,225	0,863	0,813
13,500	1,678	0,333	0,088	0,066	0,063	22,653	4,496	1,188	0,891	0,851
14,500	1,636	0,126	0,074	0,063	0,063	23,722	1,827	1,073	0,914	0,914
15,500	1,558	0,111	0,069	0,059	0,060	24,149	1,721	1,070	0,915	0,930
16,500	1,403	0,106	0,065	0,057	0,058	23,150	1,749	1,073	0,941	0,957
17,500	1,118	0,104	0,061	0,054	0,054	19,565	1,820	1,068	0,945	0,945
18,500	0,744	0,102	0,042	0,036	0,032	13,764	1,887	0,777	0,666	0,592
19,055	0,418	0,081	0,021	0,011	0,000	7,965	1,543	0,400	0,210	0,000
19,198	0,355	0,067	0,007	0,000		6,815	1,286	0,134	0,000	0,000
19,412	0,233	0,048	0,000			4,523	0,932	0,000	0,000	0,000
19,555	0,000	0,000				0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

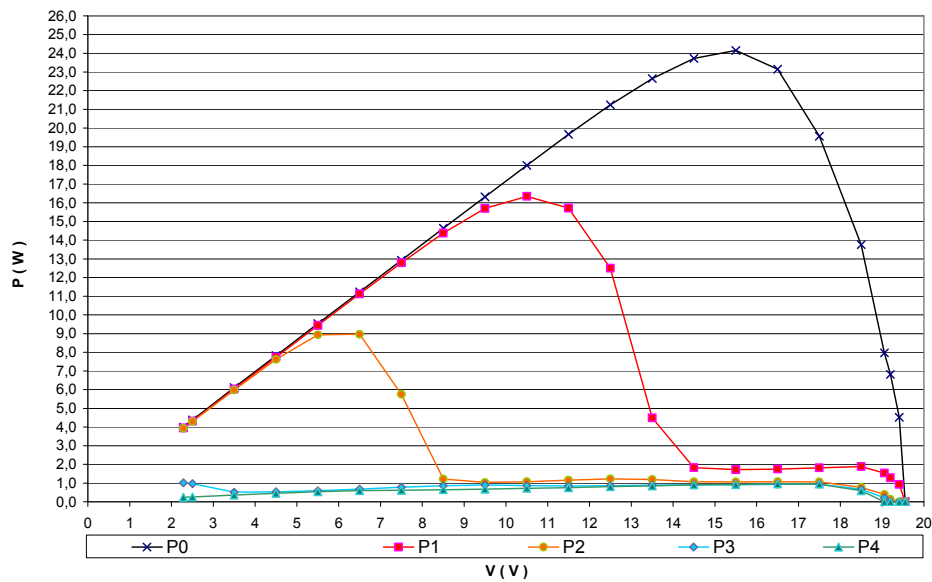
Παρακάτω παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές I-V και P-V όπως προκύπτουν από τον παραπάνω πίνακα τιμών.

Χαρακτηριστική I-V με ένα σκιασμένο στοιχείο σε μία ή περισσότερες στήλες



Χαρακτηριστική I-V 30 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτηθεί ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείο σε μία ή περισσότερες στήλες

Χαρακτηριστική P-V με ένα σκιασμένο στοιχείο σε μία ή περισσότερες στήλες



Χαρακτηριστική P-V 13 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτηθεί ενός πλήρους σκιασμένου στοιχείο σε μία ή περισσότερες στήλες

6.8.3 Συμπεράσματα

Παρατηρούμε πως η Χαρακτηριστική I-V 30 έχει την ίδια μορφή με αυτή της θεωρητικής, τη Χαρακτηριστική I-V 18. Όταν σκιάζουμε το φωτοβολταϊκό στοιχείο μιας στήλης μικραίνει η παροχή ισχύος στο κύκλωμα αφού τώρα αντί το φωτοβολταϊκό στοιχείο να παράγει ισχύ λειτουργεί ως αντίσταση με συνέπεια να καταναλώνει ισχύ άρα και να υπάρχουν περισσότερες ηλεκτρικές απώλειες [29].

Όταν περισσότερες από μία στήλες έχουν από ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο τότε η μείωση της παρεχόμενης ισχύος μειώνεται αθροιστικά. Παρατηρούμε πως όταν όλες οι στήλες έχουν από ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο τότε δεν παράγεται σχεδόν καθόλου ισχύς στο κύκλωμα (Βλέπε Χαρακτηριστική P-V 13).

Το ρεύμα βραχυκυκλώματος στη Χαρακτηριστική I-V 30 έχει την ίδια τιμή είτε υπάρχει μόνο ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο στην 1^η στήλη είτε υπάρχει από ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο στην 1^η και τη 2^η στήλη ενώ όταν υπάρχει από ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο στην 1^η, τη 2^η και την 3^η στήλη είτε υπάρχει από ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο στην 1^η, 2^η, 3^η και 4^η στήλη το ρεύμα βραχυκυκλώματος μειώνεται και μάλιστα στην τελευταία περίπτωση σχεδόν μηδενίζεται.

6.9 Χαρακτηριστικές I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσεως ενός ή περισσότερων πλήρως σκιασμένων στοιχείων σε μία στήλη

6.9.1 Γενικά

Σε αυτό το μέρος μελετάμε τη συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού πλαισίου όταν είναι συνδεδεμένες όλες οι παρακαμπτήριες διόδους σε αυτό και όταν ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία μίας στήλης είναι σκιασμένα.

6.9.2 Μετρήσεις - Χαρακτηριστικές

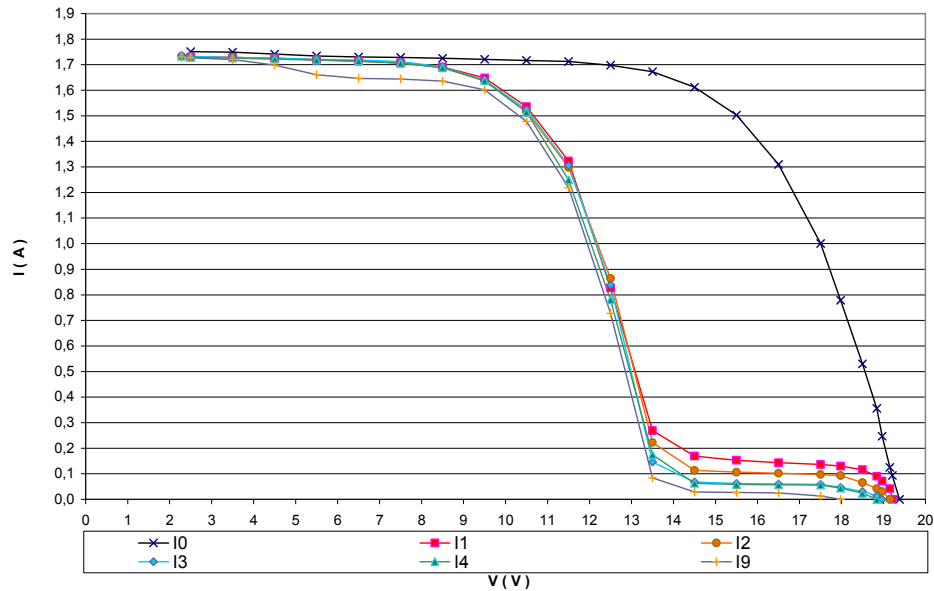
Οι μετρήσεις έχουν αριθμό I_x όπου x ο αριθμός των σκιασμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων που βρίσκονται σε μία στήλη. Όταν το x είναι μηδέν τότε δεν έχουμε κανένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Από τις παραπάνω μετρήσεις βγήκαν τα παραπάνω δεδομένα από το πολυόργανο .

Πίνακας 18 : Γενικά χαρακτηριστικά καμπύλων I-V φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσεως ενός ή περισσότερων πλήρως σκιασμένων στοιχείων σε μία στήλη

ΜΕΤΡΗΣΗ	P _{max} (W)	V _{oc} (V)	V _{mpp} (V)	I _{mpp} (A)	I _{sc} (A)	Irradiance (W/m ²)	Module Temperature (°C).	FF (%)
I0	23,47	19,38	15,13	1,55	1,75	921,00	35,30	69,00
I1	16,13	19,21	10,42	1,55	1,73	926,00	35,60	48,00
I2	16,05	19,15	10,35	1,55	1,73	925,00	35,60	48,00
I3	16,00	18,97	10,56	1,52	1,73	927,00	35,80	49,00
I4	15,97	18,84	10,28	1,55	1,73	924,00	36,10	49,00
I9	15,56	17,98	10,21	1,52	1,73	926,00	37,20	50,00

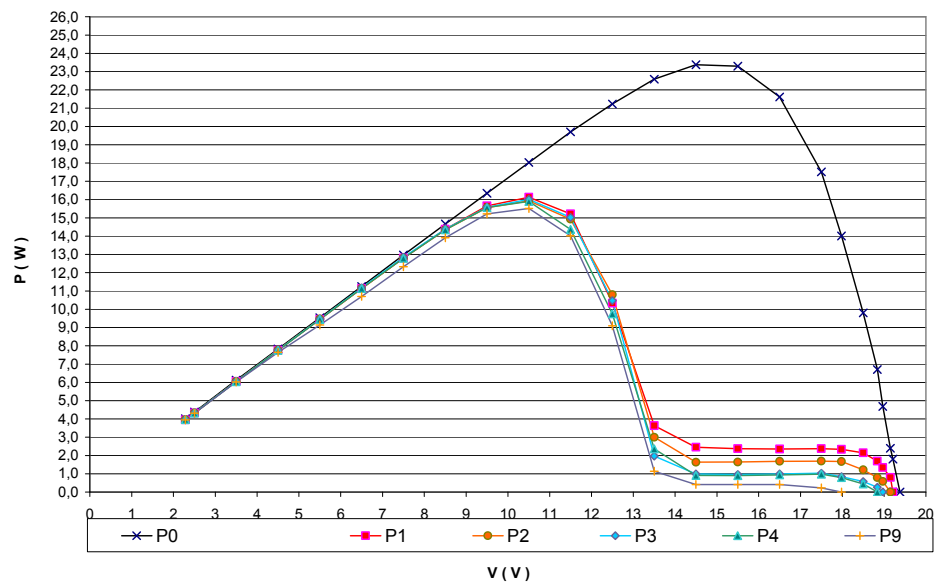
Παρακάτω παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές I-V και P-V όπως προκύπτουν από τον παραπάνω πίνακα τιμών.

Χαρακτηριστική I-V με ένα ή περισσότερα σκιασμένα στοιχεία σε μία στήλη



Χαρακτηριστική I-V 31 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσει ενός ή περισσότερων πλήρως σκιασμένων στοιχείων σε μία στήλη

Χαρακτηριστική P-V με ένα ή περισσότερα σκιασμένα στοιχεία σε μία στήλη



Χαρακτηριστική P-V 14 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου με όλες τις παρακαμπτήριες διόδους συναρτήσει ενός ή περισσότερων πλήρως σκιασμένων στοιχείων σε μία στήλη

6.9.3 Συμπεράσματα

Παρατηρούμε πως η Χαρακτηριστική I-V 31 έχει την ίδια μορφή με αυτή της θεωρητικής, τη Χαρακτηριστική I-V 17. Όταν σκιάζουμε το φωτοβολταϊκό στοιχείο μιας στήλης μικραίνει η παροχή ισχύος στο κύκλωμα αφού τώρα αντί το φωτοβολταϊκό στοιχείο να παράγει ισχύ λειτουργεί ως αντίσταση με συνέπεια να καταναλώνει ισχύ άρα και να υπάρχουν περισσότερες ηλεκτρικές απώλειες [29].

Όταν υπάρχουν περισσότερα από ένα σκιασμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία στην ίδια στήλη η παρεχόμενη ισχύς στο κύκλωμα είναι ίδια με αυτήν που παρέχεται όταν υπάρχει μόνο ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο σε μία (Βλέπε Χαρακτηριστική P-V 13). Αυτό συμβαίνει γιατί όσο και να αυξάνεται η τάση της ανάστροφης πόλωσης λειτουργεί η παρακαμπτήρια δίοδος και αποκόπτει τη συγκεκριμένη στήλη.

Το ρεύμα βραχυκυκλώματος στη Χαρακτηριστική I-V 31 έχει την ίδια τιμή είτε υπάρχει μόνο ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο στην 1^η στήλη είτε περισσότερα στην ίδια στήλη.

Η τάση ανοιχτοκύκλωσης στη Χαρακτηριστική I-V 31 μειώνεται καθώς προστίθενται σκιασμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία στην ίδια στήλη (Βλέπε και Πίνακα 18 στήλη V_{oc}).

6.10 Βαθμός απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου όταν λειτουργεί χωρίς σκίαση, υπό συνθήκες ηλιοφάνειας και στραμμένο στην κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας (κάθετα στις ακτίνες του ήλιου) και υπολογίζεται από την απόδοση κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι :

$$\eta_{\text{στοιχείων}} = \frac{P_{mmp}}{nAG} = \frac{I_{mmp} V_{mmp}}{nAG} = \frac{1,73 \cdot 15,34}{36 \cdot 0,0079 \cdot 1064} = 8,82\% (6.1)$$

όπου $I_{mmp}=1,73A$, $V_{mmp}=15,34V$, $G=1064W/m^2$ και $A=\pi \cdot 0,05^2=0,0079m^2$ η επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και $n=36$ ο αριθμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων του πλαισίου. Οι τιμές της τάσης, της έντασης του ρεύματος και της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι οι τιμές της πρώτης σειράς του Πίνακα 8.

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη μέτρηση αυτή ήταν $26,3^{\circ}C$. Κανονικά ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται για $G=1000W/m^2$ και θερμοκρασία πλαισίου (όχι περιβάλλοντος) $25^{\circ}C$ (Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς, Standard Test Conditions STC) όμως η πλησιέστερη τιμή για ένταση ακτινοβολίας που είχαμε ήταν αυτή που χρησιμοποιήσα αφενός αυτό δεν ήταν τεχνικά εφικτό να πραγματοποιηθεί και αφετέρου η μέτρηση ανταποκρίνεται περισσότερο στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Παρατηρούμε πως ο βαθμός απόδοσης είναι σχεδόν το 1/2 του μέγιστου θεωρητικού βαθμού απόδοσης που έχουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου του εμπορίου σύμφωνα με το κεφάλαιο 2.3.1.1.

Αν χρησιμοποιήσουμε τον τύπο 4.1 και τις διαστάσεις του πλαισίου τότε ο βαθμός απόδοσης είναι :

$$\eta_{\text{πλαίσιου}} = \frac{P_{mmp}}{AG} = \frac{I_{mmp} V_{mmp}}{AG} = \frac{1,73 \cdot 15,34}{1,02 \cdot 0,42 \cdot 1064} = 5,82\% (6.2)$$

όπου $I_{mpp}=1,73A$, $V_{mpp}=15,34V$, $G=1064W/m^2$ και $A=1,02*0,42 m^2$ η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Οι τιμές της τάσης, της έντασης του ρεύματος και της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι οι τιμές της πρώτης σειράς του Πίνακα 8. Σε αυτή την περίπτωση ο βαθμός απόδοσης πλησιάζει το 1/3 του μέγιστου θεωρητικού βαθμού απόδοσης που έχουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου του εμπορίου σύμφωνα με το κεφάλαιο 2.3.1.1.

Η απόκλιση ανάμεσα στις δύο τιμές οφείλεται στο ότι στην πρώτη περίπτωση μετράται μόνο η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών στοιχείων ενώ στη δεύτερη μετράται η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου η οποία είναι και μεγαλύτερη. Η επιλογή της δεύτερης περίπτωσης είναι και η πιο κατάλληλη καθώς υπάρχουν και οι απώλειες προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας μεταξύ των στοιχείων λόγω της χωροταξικής τοποθέτησης.

6.11 Συμπεράσματα

6.11.1 Επίδραση σκίασης

Συνοψίζοντας τις παρατηρήσεις από τα παραπάνω πειράματα προκύπτουν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα :

1. Η πλήρης σκίαση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είτε περισσοτέρων στην ίδια στήλη βγάζει εκτός λειτουργίας όλη τη στήλη με αποτέλεσμα να έχουμε μειωμένο βαθμό απόδοσης.
2. Η πλήρης σκίαση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου σε κάθε στήλη έχει ως αποτέλεσμα να βγαίνει όλο το πλαίσιο εκτός λειτουργίας άρα να έχουμε μηδενικό βαθμό απόδοσης.
3. Η παρακαμπτήρια δίοδος έχει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του κυκλώματος καθώς εάν υπάρχει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο είναι πλήρως σκιασμένο, οπότε λειτουργεί ως αντίσταση και καταναλώνει ισχύ, άγει η δίοδος και αποκόπτεται η στήλη που έχει το σκιασμένο στοιχείο, με αποτέλεσμα να αποδίδεται περισσότερη ισχύς στην έξοδο διαφορετικά μέρος της παραγόμενης ισχύος θα καταναλωνόταν στο σκιασμένο στοιχείο.
4. Η ποσοστιαία μερική σκίαση μπορεί να δημιουργήσει δύο τοπικά μέγιστα στη χαρακτηριστική P-V και ο ιχνηλάτης θα πρέπει να βρίσκει κάθε φορά το πραγματικό βέλτιστο σημείο λειτουργίας και όχι μόνο το τοπικό.

6.11.2 Επίδραση γήρανσης

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο του πειράματος είναι κατασκευασμένο εδώ και είκοσι χρόνια οπότε είναι λογικό να έχει μειωθεί η απόδοσή του λόγω της επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών όπως ο ήλιος, ο αέρας, η βροχή, η σκόνη, τα περιττώματα πουλιών και το χιόνι.

Αν υποθέσουμε ότι έχει μειωμένη απόδοση κατά 2% το χρόνο σύμφωνα με την παράγραφο 4.2.3 και είναι κατασκευασμένο τις αρχές της δεκαετίας του '80 τότε θεωρητικά ο βαθμός απόδοσης από το ελάχιστο θεωρητικό που είναι 15% θα είναι :

$$\eta = \eta_{\min,th} - \eta_{\min,th} \cdot \sigma_{\text{απωλειων}} \cdot t = 15\% - 15\% \cdot 2\% \cdot 30 \cdot 100 = 6,00\%(6.3)$$

όπου $\eta_{\min,th}$ η ελάχιστη θεωρητική απόδοση,
 $\sigma_{απωλειων}$ ο συντελεστής απωλειών και
 t ο αριθμός των ετών.

Παρατηρούμε πως η τιμή της απόδοσης λόγω της γήρανσης της σχέσης 6.3 είναι σχεδόν ίση με την πειραματική της σχέσης 6.2. Άρα το συγκεκριμένο πλαίσιο μπορούμε να υποθέσουμε ότι είχε βαθμό απόδοσης 15% και απώλειες λόγω γήρανσης 2%. Άρα ήταν μια πολύ καλή κατασκευή.

Από το πειραματικό μέρος επιβεβαιώνεται ότι ο μειωμένος βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου οφείλεται στα φωτοβολταϊκά στοιχεία καθώς και στην απόδοση των υλικών του πλαισίου που επικαλύπτουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Στο πειραματικό μέρος όπου αφήνουμε μόνο μία δίοδο συνδεδεμένη στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο συμπεραίνουμε ότι οι παρακαμπτήριες δίοδοι λειτουργούν ορθά και ότι κάποια στοιχεία είναι προβληματικά αφού η κάθε στήλη αποδίδει διαφορετική ισχύ.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορεί να έχουν είτε αυξημένη αντίσταση σειράς R_s λόγω της διάβρωσής τους (Βλέπε 3.2.2.4) είτε μειωμένη παράλληλη αντίσταση R_{sh} λόγω της διάσπασης του μετάλλου διαμέσου της επαφής p-n (Βλέπε 3.2.2.5) είτε λόγω του επιδεινωμένου μη ανακλαστικού επιστρώματος (Σχήμα 9) είτε διάβρωση του υλικού p των ενεργών στοιχείων.

Στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο παρατηρούμε σε κάποια σημεία το συμπυκνωμένο υλικό (Σχήμα 12) να έχει κιτρινίσει κάτι το οποίο μειώνει το βαθμό απόδοσης του πλαισίου. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στην πολύχρονη έκθεση στην ακτινοβολία είτε λόγω των μεταβολών θερμοκρασίας είτε λόγω της υγρασίας.

7. Βιβλιογραφία

- [1] <http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi321.html>
- [2] Tomas Markvart, (2003), « Ηλεκτρισμός από ηλιακή ενέργεια », Εκδόσεις ΙΩΝ
- [3] <http://www.solcomhouse.com/solarpower.htm>
- [4] <http://www.erdgas.gr/iliakixartes.php>
- [5] Κ.Καγκαράκης, (1992), « Φωτοβολταϊκή τεχνολογία », Εκδόσεις Συμμετρία
- [6] <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7f.html>
- [7] Duffie, J. A. & Beckman, W. A., (1991), « *Solar Engineering of Thermal Processes* », 2η Έκδοση, Wiley, New York
- [8] Photovoltaic basics, www.solarwatt.de
- [9] <http://www.selasenergy.gr/fundamentals.php>
- [10] http://gneng.blogspot.com/p/blog-page_19.html
- [11] http://www.alifragis.com.gr/full_product.php?prod_id=Solar&page=1
- [12] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/intrin.html>
- [13] http://www.heliergia-photovoltaic.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=133&Itemid=378&lang=el
- [14] <http://electronics-for-beginners.com/pages/page/3010/>
- [15] <http://openwetware.org/wiki/20.309:DiodePrimer>
- [16] http://www.selasenergy.gr/fv_panels.php
- [17] Yaw-Juen Wang, and Po-Chun Hsu, (2009), « *Analysis of Partially Shaded PV Modules Using Piecewise Linear Parallel Branches Model* »
- [18] <http://www.energotechniki.gr/site/xpage.asp?sid=211&page=banner2>
- [19] Adel El Shahat, , (2005-2010 Jatit), « PV Cell Module Modelling & Ann Simulation for Smart Grid *Applications* », Journal of Theoretical and Applied Information Technology
- [20] Σ.Ν.Καπλάνης, « *Μηχανική των Φωτοβολταϊκών συστημάτων* », Εκδόσεις ΙΩΝ
- [21] <http://chuck-wright.com/SolarSprintPV/SolarSprintPV.html>

- [22] http://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_solar_cell
- [23] Tomas Markvart & Luis Castaner, « Practical Handbook of *Photovoltaics Fundamentals and Applications* », 2η Έκδοση, Elsevier
- [24] Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, (2007), « Φωτοβολταϊκά Συστήματα », Εκδόσεις ΖΗΤΗ
- [25] Σταμάτης Δ. Περδίας, (2011), « Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις », Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ -4Μ, 3^η Έκδοση
- [26] Thomas Carlson,(2001), « Experimental setup for Full Scale Field tests of CdTe and CIS Thin-film PV Modules », Espoo
- [27] Ahmed E. Ghitas, M. Sabry, (2006), « A study of the effect of shadowing location and area on the Si solar cell electrical parameters », National Research Institute of Astronomy and Geophysics
- [28] E. Molenbroek, D. W. Waddington, K.A. Emmery, (1991), « Hot spot susceptibility and testing of PV modules », IEEE
- [29] Stuart R. Wenham, Martn A. Green, Muriel E. Watt and Richard Corkish, (2007), « *Applied Photovoltaics* », Earthscan, Secon Edition
- [30] <http://files.sma.de/dl/7418/GlobalPeak-UGR101210.pdf>
- [32] G.N. Tiwari and Swapnil Dubey, (2010) , « Fundamentals of Photovoltaic Modules and their applications », RSC Publishing
- [33] Αιμ.Γ. Κορωνάιος, Γ.-Φοίβος Σαργέντης, (2002-2003),«*Θερμογραφία*»,Ε.Μ.Π. Σχολή Αρχιτεκτόνων Εργαστήριο Τεχνικών Υλικών, Δημοσίευση Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών, Τεύχος 2
- [34] Flir P640, Expert Level Thermal Imaging Cameras Features & Specifications, brochure, www.flir.com