

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

---

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών



**Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της  
σκίασης στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε  
τεχνολογίες φωτοβολταϊκών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Στέφανος Η. Μουγάκος**

Επιβλέπων:

Γεώργιος Πανάρας

Λέκτορας

Κοζάνη, Μάρτιος 2018

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

---

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών



**Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της  
σκίασης στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε  
τεχνολογίες φωτοβολταϊκών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Στέφανος Η. Μουγάκος**

Επιβλέπων:

Γεώργιος Πανάρας

Λέκτορας

Κοζάνη, Μάρτιος 2018

Λέξεις κλειδιά: *φωτοβολταϊκά στοιχεία, γήρανση, πειραματικός προσδιορισμός παραμέτρων, ηλιακή ενέργεια, μερική σκίαση, συνδεσμολογία, βαθμός απόδοσης*

**Στέφανος Η. Μουγάκος**

Μηχανολόγος Μηχανικός ΠΔΜ

Copyright © ΣΤΕΦΑΝΟΣ Η. ΜΟΥΓΑΚΟΣ, 2018

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 Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών πλαισίων υπό διαφορετικές συνθήκες με στόχο να εξαχθούν κρίσιμα και σημαντικά αποτελέσματα για την απόδοση. Πιο συγκεκριμένα, ελέγχθησαν φωτοβολταϊκά πλαίσια δύο διαφορετικών τύπων για χρονικό διάστημα 3 μηνών τόσο σε πλήρη έκθεση στον ήλιο όσο και υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Σε κάθε περίπτωση εξήχθη η καμπύλη μέγιστης ισχύος. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στην ηλιακή ενέργεια, την ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατροπή της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εκτεταμένη αναφορά στα είδη των φωτοβολταϊκών στοιχείων, στο πως δομείται ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο καθώς και στις σημαντικότερες συνδέσεις.

Ως τρίτο κεφάλαιο ορίζεται η καμπύλη I-V και αναλύονται οι παράγοντες που την επηρεάζουν.

Το τέταρτο κατά σειρά κεφάλαιο είναι ο προσδιορισμός του βαθμού απόδοσης καθώς και οι παράγοντες που τον επηρεάζουν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται το φαινόμενο της μερικής σκίασης και το πώς αυτό επιδρά στη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή της πειραματικής διάταξης.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος.

Το όγδοο κεφάλαιο αποτελεί την περιγραφή των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία.

Το τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τους πίνακες με τις ημερήσιες μετρήσεις, καθώς και εκτενή βιβλιογραφία στην οποία ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει για οποιαδήποτε περαιτέρω πληροφόρηση.

## **Abstract**

This diploma thesis aims to study the behavior of different types of photovoltaic panels under different conditions in order to extract critical and important results for their performance. In particular, photovoltaic panels of three different types were tested for a period of 3 months, both in full sunlight and under partial shade conditions. In each case, the maximum power curve was exported.

The first chapter is an introduction to solar energy, solar radiation and the conversion of solar energy to electricity.

In the second chapter there is an extensive reference to the types of photovoltaic elements, to how to construct a photovoltaic panel as well as to the most important connections.

The third chapter defines the curve I-V and analyzes the factors that affect it.

The fourth chapter is to determine the degree of performance and the factors that affect it.

In the fifth chapter, the phenomenon of partial shading and how it affects the operation of the photovoltaic panel, is analyzed.

The sixth chapter describes the experimental layout.

The seventh chapter presents the results of the experiment.

The eighth chapter is a description of the conclusions that emerged from the experimental process.

The last chapter includes tables with daily measurements, as well as extensive bibliography in which the reader can refer to for any further information

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Γεώργιο Πανάρα, επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, καθώς και τον κ. Εμμανουήλ Σουλιώτη για την καθοδήγηση και τη βοήθειά τους. Ιδιαίτερες ευχαριστίες αξίζουν στην οικογένεια μου για τη στήριξη, την ενθάρρυνση και τη συμπαράσταση σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου.

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	4
Abstract .....	5
Ευχαριστίες .....	6
Λίστα Σχημάτων -Εικόνων .....	11
Λίστα Πινάκων.....	13
1 Εισαγωγή.....	14
2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία και φωτοβολταϊκά πλαίσια .....	30
2.1 Δομή φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	30
2.2 Συνδέσεις φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	31
2.3 Διαφορετικά είδη και τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	33
2.3.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου μεγάλου πάχους.....	33
2.3.1.1 Μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si ).....	33
2.3.1.2 Πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si) .....	34
2.3.1.3 Ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon).....	35
2.3.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων (Thin Film).....	36
2.3.2.1 Δισεληνοϊνδούχος χαλκός (CuInSe <sub>2</sub> ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS) 36	
2.3.2.2 Άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si) .....	37
2.3.2.3 Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe) .....	38
2.3.2.4 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs) .....	39

2.3.3	Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	40
2.3.4	Φωτοβολταϊκά στοιχεία άλλων τεχνολογιών.....	41
2.4	Φωτοβολταϊκά πλαίσια – Δομή και λειτουργία.....	43
3	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	45
3.1	Καμπύλη I-V .....	45
3.1.1.1	Γενικά.....	45
3.1.2	Παράγοντες που επηρεάζουν την καμπύλη I-V.....	46
3.1.2.1	Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας G.....	46
3.1.2.2	Η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου T.....	47
3.1.2.3	Ο συντελεστής κατασκευής και ποιότητας A.....	48
3.1.2.4	Η αντίσταση σειράς $R_s$ .....	48
3.1.2.5	Η παράλληλη αντίσταση $R_{sh}$ .....	50
3.1.2.6	Ανάστροφο ρεύμα κόρου.....	51
3.2	Συντελεστής Πλήρωσης.....	52
4	Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	53
4.1	Ορισμός.....	53
4.2	Παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης.....	54
4.2.1	Γενικά.....	54
4.2.2	Η αντίσταση $R_s$ (Series Resistance).....	55
4.2.3	Η γήρανση.....	55
4.2.4	Οι οπτικές απώλειες.....	56



4.2.5	Η χωροταξική τοποθέτηση.....	57
4.2.6	Η δίοδος αντεπιστροφής.....	57
4.2.7	Η ακτινοβολία .....	58
4.2.8	Η σκίαση .....	58
4.2.9	Η θερμοκρασία.....	59
4.2.10	Ο άνεμος.....	60
4.2.11	Η ρύπανση.....	61
4.2.12	Οι ηλεκτρικές απώλειες.....	61
5	Σκίαση.....	63
5.1	Γενικά .....	63
5.2	Ανάλυση των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων επιπτώσεων που προκαλούνται λόγω σκίασης.....	63
5.2.1	Βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις.....	63
5.2.2	Μακροπρόθεσμες επιπτώσεις (γήρανση).....	64
5.3	Φαινόμενο θερμών κηλίδων ( hot-spot effect ) .....	66
5.4	Δίοδοι διέλευσης και αντεπιστροφής .....	72
5.5	Επίδραση της ποσοστιαίας σκίασης .....	74
5.6	Ιχνηλάτης.....	77
5.7	Επίδραση του αριθμού των σκιασμένων κελιών .....	79
6	Πειραματική διάταξη .....	85
7	Αποτελέσματα.....	89

7.1	Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος ανά δεκαπενθήμερο.....	89
7.2	Διαγράμματα ποσοστού μείωσης ισχύος σε σχέση με το ποσοστό κάλυψης (50%).	93
8	Συμπεράσματα .....	96
	Παράρτημα.....	97

## Λίστα Σχημάτων -Εικόνων

Εικόνα 1: Το ενεργειακό ισοζύγιο της γης [13].....	16
Εικόνα 2: Διαφορά στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ανάλογα με την εποχή του χρόνου [12].....	17
Εικόνα 3: Ετήσια έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία σε kWh/m <sup>2</sup> [14].....	18
Εικόνα 4: Ολική, ετήσια, οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα (kWh/m <sup>2</sup> ) [15] .....	18
Εικόνα 5: Μάζα αέρος Α.Μ. ....	21
Εικόνα 6: Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας σε μέρες με ήλιο και συννεφιά .....	22
Εικόνα 7: Άτομο πυριτίου.....	24
Εικόνα 8: Πρόσμιξη ατόμων βορίου και φωσφόρου στο κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου .....	25
Εικόνα 9: Επαφή p-n.....	25
Εικόνα 10: Συνδεσμολογία ορθής πόλωσης [27].....	26
Εικόνα 11: Συνδεσμολογία ανάστροφης πόλωσης [27].....	26
Εικόνα 12: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V διόδου p-n [28].....	27
Εικόνα 13: Λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων στηριζόμενη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	28
Εικόνα 14: Δομικά μέρη ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	30
Εικόνα 15: Πλάγια όψη φωτοβολταϊκού στοιχείου συμπεριλαμβανομένων: Διαχωρισμός φορτίου (1) , Επανασύνδεση (2), Αχρησιμοποίητη φωτεινή ενέργεια(3), Αγωγή ελάσματα (4). ....	31
Εικόνα 16: Σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων (i) σε σειρά, (ii) σε απλές παράλληλες σειρές, (iii) σε αθροιστικές διατάξεις σταυρωτού δεσμού, (iv) σε διάταξη γεφυρωτής διασύνδεσης και (v) σε διάταξη κυψέλης.....	32
Εικόνα 17: Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου [21].....	34
Εικόνα 18: Κύτταρο πολυκρυσταλλικού πυριτίου.....	35
Εικόνα 19: Φωτοβολταϊκό στοιχείο ταινίας πυριτίου [21] .....	35
Εικόνα 20: Κύτταρο δισεληνοϊνδούχου χαλκού .....	36
Εικόνα 21: Φωτοβολταϊκό στοιχείο τύπου CIS [21].....	37
Εικόνα 22: Φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου [21] .....	38
Εικόνα 23: Φωτοβολταϊκό στοιχείο CdTe [21] .....	39
Εικόνα 24: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο CdTe .....	39
Εικόνα 25: Κύτταρο αρσενιούχου γαλλίου.....	40
Εικόνα 26: Απεικόνιση πολυστρωματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου [21].....	41
Εικόνα 27: Εικονική εφαρμογή εύκαμπτων φωτοβολταϊκών .....	42
Εικόνα 28: Απεικόνιση φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	43
Εικόνα	29:
Χαρακτηριστική P-V: Φωτοβολταϊκού στοιχείου για σταθερή ένταση ακτινοβολίας και θερμο	

κρασίας

Χαρακτηριστική I-V: Φωτοβολταϊκού στοιχείου για σταθερή ένταση ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.....	45
Εικόνα 30: Χαρακτηριστική I-V 3 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου σε σχέση με την ένταση της ακτινοβολίας G [29].....	46
Εικόνα 31: Χαρακτηριστική I-V 4 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από T [22].....	48
Εικόνα 32: Αντιστάσεις που αποτελούν την αντίσταση σειράς του φωτοβολταϊκού στοιχείου [11].....	49
Εικόνα 33: Χαρακτηριστική I-V 5 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από $R_s$ [22].....	50
Εικόνα 34: Χαρακτηριστική I-V 6 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από $R_{sh}$ [22]...	51
Εικόνα 35: Χαρακτηριστική I-V 7 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από $I_o$ [22].....	52
Εικόνα 36: Χαρακτηριστική I-V 8 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από το φως [7]	53
Εικόνα 37: Τρεις συνηθισμένοι τρόποι παράθεσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων στα πλαίσια [7].....	57
Εικόνα 38: Χαρακτηριστική $\eta$ -T 1 : Τυπική καμπύλη της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου σε σχέση με τη θερμοκρασία τους [7].....	60
Εικόνα 39: Γήρανση σε φωτοβολταϊκό πλαίσιο μετά από πολυετή χρήση, λόγω σκίασης. Παρατηρείται το ξεθώριασμα του μπλε χρώματος, καθώς και η οξείδωση στους μεταλλικούς αγωγούς.....	65
Εικόνα 40: Φαινόμενο E.V.A. Browning. Σκίαση σε μεγάλο βαθμό, που προκάλεσε την αλλαγή χρώματος σε καφέ και κατά συνέπεια τη γήρανση του στοιχείου.....	66
Εικόνα 41: Θερμή κηλίδα σε φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	67
Εικόνα 42: Διάταξη φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά.....	68
Εικόνα 43: Τρόπος σύνδεσης (a) Παράλληλα (b) Σε σειρά [34].....	68
Εικόνα 44: Χαρακτηριστική I-V 9: I-V με σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο σε παράλληλη σύνδεση [34].....	69
Εικόνα 45: Χαρακτηριστική I-V 10 : με σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο σε σύνδεση σε σειρά [34].....	69
Εικόνα 46: Φαινόμενο θερμής κηλίδας με διαγνωστική θερμοκάμερα. Τα ανοιχτόχρωμα κομμάτια έχουν υποστεί το φαινόμενο.....	71
Εικόνα 47: Φαινόμενο θερμής κηλίδας.....	71
Εικόνα 48: Διάταξη με στοιχεία που αλληλεπικαλύπτονται [35].....	73
Εικόνα 49: Διάταξη με στοιχεία που δεν αλληλεπικαλύπτονται [35].....	73
Εικόνα 50: Χαρακτηριστική I-V 13 : Επίδραση σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου όταν υπάρχει δίοδος παράκαμψης στο κύκλωμα [34].....	74
Εικόνα 51: Τρεις στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα σκιασμένο στοιχείο [26].....	75
Εικόνα 52: Χαρακτηριστική I-V 14 : Τριών στηλών εξαρτώμενη από την ποσοστιαία σκίαση ενός στοιχείου [26].....	75
Εικόνα 53: Έξι στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα σκιασμένο στοιχείο [26].....	76
Εικόνα 54: Χαρακτηριστική I-V 15 : Έξι στηλών εξαρτώμενη από την ποσοστιαία σκίαση ενός κελιού [ 26].....	76

Εικόνα 55: Χαρακτηριστική P-t 1 : Φωτοβολταϊκή ισχύς συναρτήσει της ώρας της ημέρας [35] .....	77
Εικόνα 56: Χαρακτηριστική I-V 16 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει των σκιασμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων [31].....	80
Εικόνα 57: Τέσσερις στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα ή περισσότερα σκιασμένα στοιχεία σε μία στήλη [26].....	81
Εικόνα 58: Χαρακτηριστική I-V 17 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει των σκιασμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων μιας στήλης [26] .....	82
Εικόνα 59: Τέσσερις στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο σε μία ή περισσότερες στήλες [26] .....	83
Εικόνα 60: Χαρακτηριστική I-V 18 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει ενός σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου σε μία ή περισσότερες στήλες [26].....	84
Εικόνα 61: Φωτοβολταϊκά πλαίσια πειράματος.....	85
Εικόνα 62: Πολύμετρο πειράματος.....	86
Εικόνα 63: Καλυμμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια πειράματος .....	87
Εικόνα 64: Λαμπτήρες σε λειτουργία .....	87
Εικόνα 65:Λαμπτήρες εκτός λειτουργίας.....	88
Εικόνα 66: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 18/3 – 1/4.....	89
Εικόνα 67: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 18/3 – 1/4.....	89
Εικόνα 68: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 2/4 – 16/4.....	90
Εικόνα 69: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 2/4 – 16/4.....	90
Εικόνα 70: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 17/4 – 1/5.....	90
Εικόνα 71: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 17/4 – 1/5.....	91
Εικόνα 72: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 2/5 – 16/5.....	91
Εικόνα 73: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 2/5 – 16/5.....	91
Εικόνα 74: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 17/5 – 31/5....	92
Εικόνα 75: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 17/5 – 31/5....	92
Εικόνα 76: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 1/6 – 15/6.....	92
Εικόνα 77: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 1/6 – 15/6.....	93

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh/(m <sup>2</sup> .mo)] [16]....	19
Πίνακας 2: Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών .....	42
Πίνακας 3: Τύποι υπολογισμού αντίστασης των στοιχείων της R <sub>s</sub> [ 11].....	49

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Ήλιος και ηλιακή ενέργεια

Ο πλανήτης Γη μπορεί να φιλοξενήσει ζωή χάρη στον ήλιο από τον οποίο παίρνει όλη την απαραίτητη για τη ζωή (και όχι μόνο) ενέργεια. Ο ήλιος αποτελεί ένα μέσο αστέρι με μάζα ίση με  $1.99 \cdot 10^{30} \text{kg}$  και αντιπροσωπεύει το 99.8% της μάζας όλου του ηλιακού συστήματος. Ο ήλιος δεν αποτελεί στερεό σώμα αλλά μία «περιστρεφόμενη μπάλα» θερμού πλάσματος. Στο κέντρο του, που ουσιαστικά είναι ένας ισχυρός θερμοπυρηνικός αντιδραστήρας σε συνεχή λειτουργία, επικρατεί τόσο μεγάλη θερμοκρασία (15.6 εκατομμύρια βαθμοί Κελσίου) που ενώνονται οι πυρήνες του υδρογόνου ανά τέσσερις και μετατρέπονται σε πυρήνες ηλίου και ενέργεια [1], [2], [3].

Από το κέντρο του επίσης εκπέμπονται προς όλες τις κατευθύνσεις τεράστιες ποσότητες φωτονίων και σωματιδίων. Ένα μικρό ποσοστό από την ενέργεια που παράγεται στον ήλιο και εκτοξεύεται στο διάστημα φτάνει μέχρι και τη Γη και είναι αυτό που συντηρεί τη ζωή στον πλανήτη. Όσο κι αν αυτό το ποσοστό είναι μικρό, δεδομένης της ποσότητας ενέργειας που παράγεται στον ήλιο, για τη γη είναι τεράστιο και το μέγεθός του γίνεται αντιληπτό καλύτερα αν ληφθεί υπόψη ότι η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια όλων των καυσίμων στον πλανήτη αντιστοιχεί μόλις στην ενέργεια που φτάνει στη γη από τον ήλιο σε μία εβδομάδα [1], [2], [3], [4].

Επιπλέον, ο ήλιος αποτελεί την πρωταρχική πηγή όλης και όλων των ειδών της ενέργειας που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος στον πλανήτη. Τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, κάρβουνο κ.α.) που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος έχουν παραχθεί με την επίδραση του ήλιου στους φυτικούς οργανισμούς της γης. Ακόμα και οι εναλλακτικές και ανανεώσιμες μορφές ενέργειας παράγονται από τον ήλιο. Μία από αυτές για παράδειγμα είναι η αιολική ενέργεια, η οποία παράγεται χρησιμοποιώντας τους ανέμους, οι οποίοι όμως δημιουργούνται από τον ήλιο [4].

Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί την ακτινοβολία του ηλίου που φτάνει στον πλανήτη με θερμικές και φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Όταν η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται σε θερμικές εφαρμογές συλλέγεται προκειμένου να παραχθεί θερμότητα η οποία χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για να θερμανθεί νερό το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε ατμό, ο οποίος κινεί ατμοστρόβιλους. Χρησιμοποιείται όμως και για τη θέρμανση νερού πισινών και διάφορων εσωτερικών χώρων (αλλά και για ψύξη εσωτερικών χώρων), για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, για αφαλάτωση και άλλες παραγωγικές διαδικασίες [5].

Οι φωτοβολταϊκές εφαρμογές περιλαμβάνουν τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων τα οποία συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπουν άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο όρος «φωτοβολταϊκό» αναφέρεται σε κάτι το οποίο σχετίζεται είτε με την ύλη είτε με τη συσκευή, στην οποία παράγεται ηλεκτρισμός ως αποτέλεσμα της έκθεσης στο φως. Βέβαια, υπό το πρίσμα της Φυσικής, ο όρος αναφέρεται ουσιαστικά στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο [6].

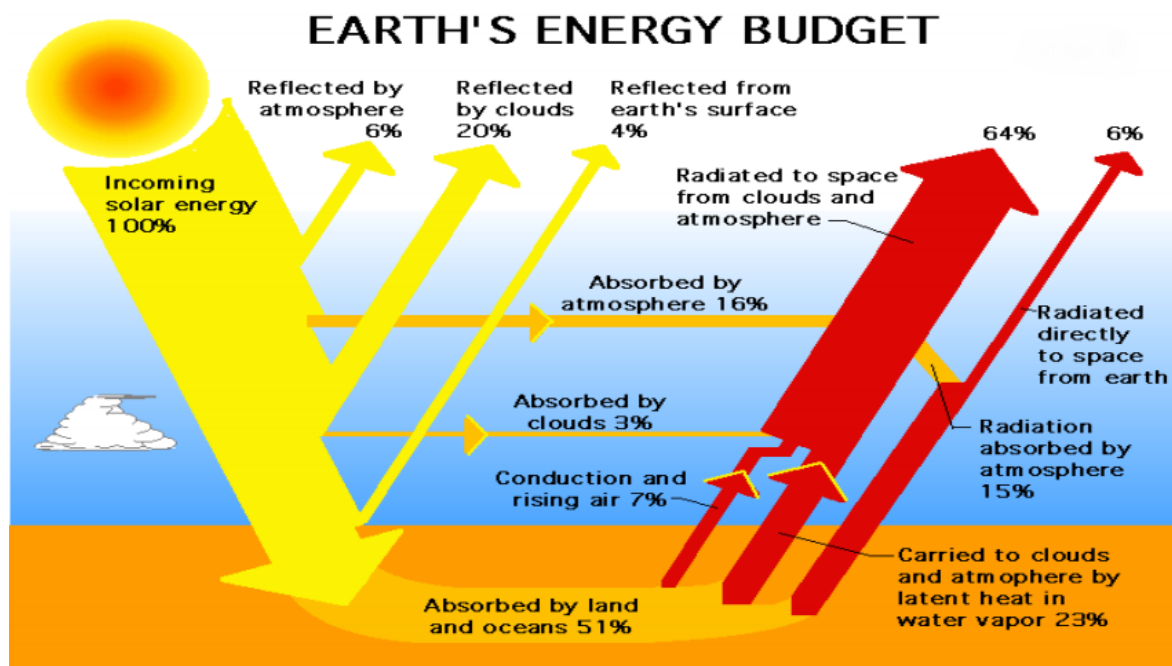
Η έρευνα για το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι αρκετά παλιά καθώς ξεκίνησε το 1839 από το Γάλλο φυσικό E. Becquerel. Το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο (από κρύσταλλο σεληνίου) κατασκευάστηκε το 1883 από τον C. Fitz αλλά η απόδοσή του ήταν μόλις 1% καθώς δεν υπήρχε κατανόηση και ερμηνεία του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Η συγγραφή της πληρέστερης θεωρίας σχετικά με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, από τον A. Einstein το 1904, και η ολοκλήρωσή της από τον Schottky το 1930, επέτρεψε την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων με απόδοση που έφτασε το 6% και τα φωτοβολταϊκά αρχίζουν να βρίσκουν πλέον εξειδικευμένες εφαρμογές. Το 1958 μάλιστα χρησιμοποιήθηκαν στον τεχνητό δορυφόρο Vanguard I, από τις ΗΠΑ για την παροχή βοηθητικής ενέργειας και από το 1969 και μετά χρησιμοποιήθηκαν σε όλους τους τεχνητούς δορυφόρους τόσο των ΗΠΑ όσο και της πρώην Σοβιετικής Ένωσης ως κύρια πηγή ενέργειας [7], [8], [9].

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρόλα αυτά δεν έχουν ευρεία εφαρμογή ακόμα λόγω του κόστους τους, το οποίο μπορεί να έχει μειωθεί αρκετά αλλά και πάλι εξακολουθεί να είναι υψηλό, αλλά χρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές όπου η σύνδεση με το δίκτυο είναι πολύ ακριβή και όχι πάντα αξιόπιστη. Επιπλέον, σε κάποιες περιοχές, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, δίνεται η δυνατότητα σε όσους παράγουν ενέργεια με αυτόν τον τρόπο να την πουλήσουν στη ΔΕΗ [10].

Ο ήλιος αποτελεί εξαιρετικά καλή πηγή ακτινοβολίας και η φασματική κατανομή αυτής εξαρτάται από τη θερμοκρασία του που είναι 5900°C περίπου. Ένταση ακτινοβολίας αποκαλείται η ολική ισχύς που προέρχεται από μία πηγή ακτινοβολίας και η οποία προσπίπτει πάνω σε μία μονάδα επιφάνειας. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στη φωτόσφαιρα ανέρχεται σε  $63.3 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$  ενώ η ένταση στη γη και για την ακρίβεια στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας ανέρχεται σε  $1367 \text{ W/m}^2$  [11], [12].

Η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει σε μία μοναδιαία επιφάνεια που είναι κάθετη στις ακτίνες του ήλιου στο όριο της ατμόσφαιρας ονομάζεται «ηλιακή σταθερά»:  $I_{sc}=1367 \text{ W/m}^2$ . Οι τιμές της ηλιακής σταθεράς που αναφέρονται ποικίλλουν και κυμαίνονται από 1353 έως  $1395 \text{ W/m}^2$  [13].

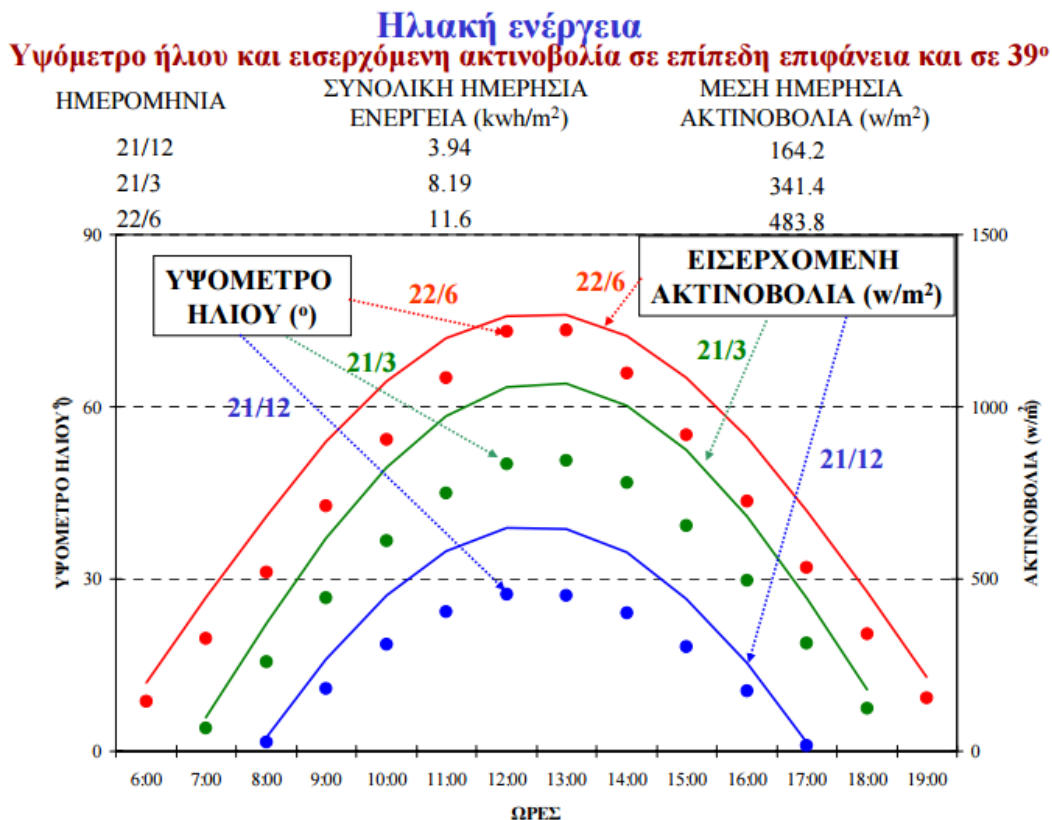
Δεν φτάνει όμως όλη η ακτινοβολία του ήλιου στη γη. Από αυτή που φτάνει στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας φθάνει στην επιφάνεια της γης μόνο το 47%, ενώ το 31% περίπου ανακλάται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (20% περίπου ανακλάται από τα σύννεφα, 6% από την ατμόσφαιρα και 4% από τη γήινη επιφάνεια) και το 23% περίπου συμβάλει στη δημιουργία των ανέμων, των κυμάτων και ρυθμίζει σε γενικές γραμμές το κλίμα. Από την ενέργεια που φθάνει στην επιφάνεια της γης το 33% το απορροφούν οι ωκεανοί, το 0,1% τα φυτά και το 14% η ξηρά (Εικόνα 1) [13].



Εικόνα 1: Το ενεργειακό ισοζύγιο της γης [13]



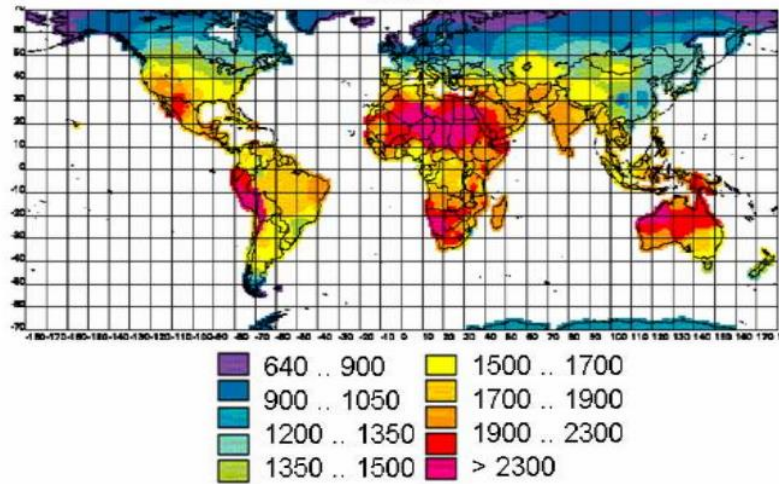
Παρόλα αυτά η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια κάθε σημείου ξεχωριστά διαφέρει σημαντικά και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μεταξύ των οποίων σημαντικότεροι είναι η γεωγραφική θέση, η εποχή του χρόνου και η νεφοκάλυψη. Ένα παράδειγμα της διαφοράς στην εισερχόμενη ακτινοβολία και στη συνολική ημερήσια ενέργεια ανάλογα με την εποχή του χρόνου δίνεται στην κάτωθι εικόνα (Εικόνα 2).



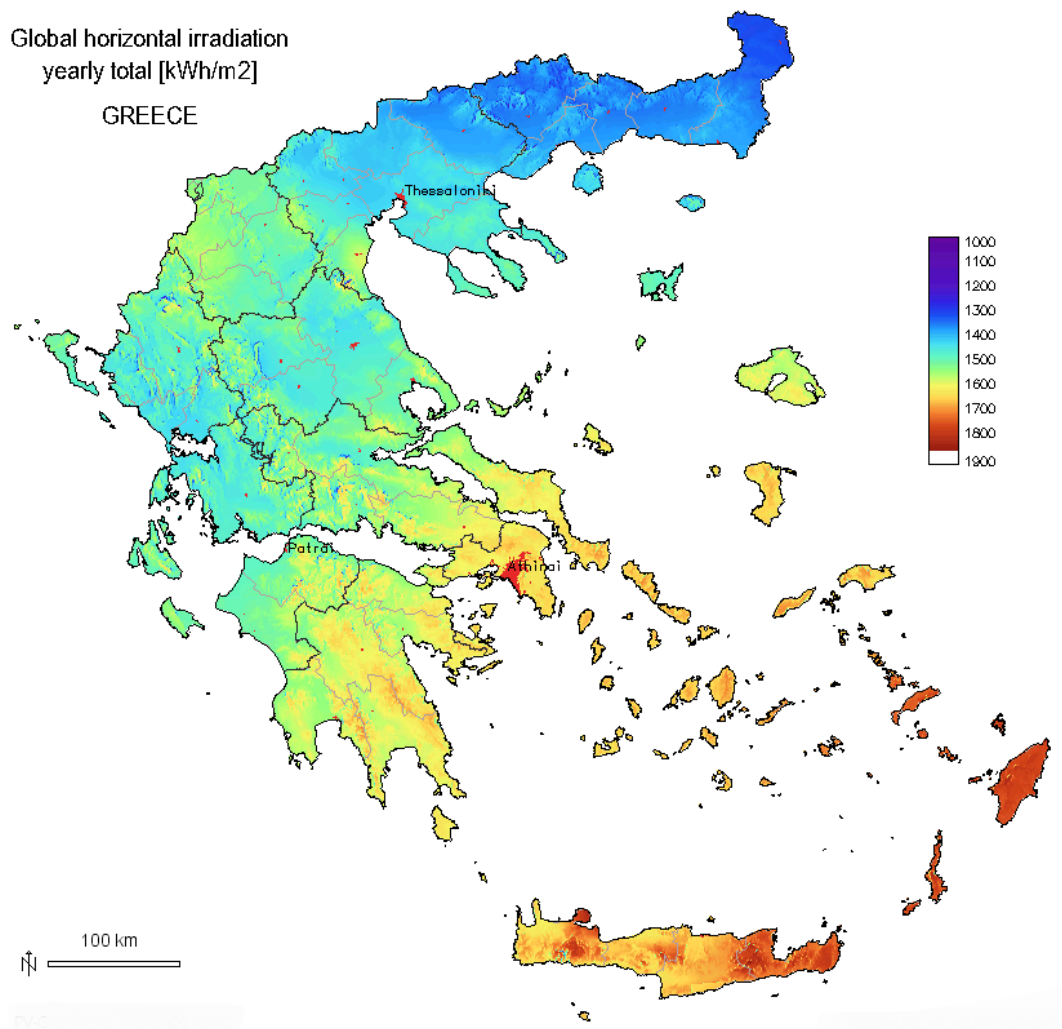
Εικόνα 2: Διαφορά στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ανάλογα με την εποχή του χρόνου [12]

Η γεωγραφική θέση παίζει εξαιρετικά σημαντικό ρόλο, καθώς δεν δέχονται όλες οι περιοχές της γης την ίδια ακτινοβολία, όπως φαίνεται ξεκάθαρα στην κάτωθι εικόνα (Εικόνα 3).

Η ολική ακτινοβολία που δέχεται η Ελλάδα ετησίως στο γεωγραφικό πλάτος που βρίσκεται ανέρχεται σε 1400 kWh/m<sup>2</sup> περίπου (Εικόνα 4). Πρόκειται για ποσότητα ενέργειας ανά τετραγωνικό η οποία αντιστοιχεί σε περίπου 160 λίτρα πετρελαίου θέρμανσης [14].



Εικόνα 3: Ετήσια έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία σε  $kWh/m^2$  [14]



Εικόνα 4: Ολική, ετήσια, οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα ( $kWh/m^2$ ) [15]

Ο συνδυασμός γεωγραφικής θέσης με εποχή του χρόνου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται κάθε περιοχή. Προκειμένου να κατανοηθεί αυτό το γεγονός καλύτερα παρατίθεται ενδεικτικά η μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας (πίνακας 1.1.).

Πίνακας 1: Μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [ $kWh/(m^2 \cdot mo)$ ] [16]

Μήνας/ Περιοχή	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα	63,0	79,0	117,7	154,3	195,4	214,0	22,4	202,7	152,6	109,0	70,7	55,7
Αγρίνιο	63,5	78,3	119,4	148,4	189,9	214,1	224,2	200,3	151,3	109,8	69,8	55,1
Αλεξ/πολη	50,7	68,9	107,3	141,8	182,8	205,8	211,6	192,3	144,2	99,4	57,8	43,7
Άργος	68,7	83,6	127,7	159,5	202,5	220,6	229,0	206,4	157,2	115,5	74,8	59,2
Ζάκυνθος	64,2	77,6	110,1	158,8	190,8	200,1	218,5	203,8	154,0	104,3	65,4	52,8
Άρτα	65,5	79,7	120,4	149,1	190,2	211,2	218,1	196,4	150,6	110,0	69,5	56,2
Ηράκλειο	65,6	81,6	125,0	168,5	207,3	222,4	227,1	207,0	163,0	117,3	78,6	61,2
Θες/νίκη	52,6	67,5	103,2	140,7	179,1	198,6	209,5	184,7	136,7	91,4	56,6	45,5
Ιωάννινα	51,8	66,4	105,2	134,9	178,3	202,1	212,0	190,3	136,5	96,1	57,6	45,1
Καλαμάτα	68,2	82,3	126,1	156,2	198,7	216,0	222,0	200,9	154,9	114,5	75,2	59,3
Καστοριά	57,6	71,3	111,2	141,1	173,6	201,8	206,3	185,5	138,5	97,0	60,0	47,7
Κέρκυρα	57,7	73,5	116,7	149,9	195,4	213,6	221,0	197,8	148,2	103,1	64,4	50,7
Κομοτηνή	50,0	65,0	105,0	145,0	188,0	209,0	215,0	193,0	145,0	99,0	58,0	45,0
Κόρινθος	65,4	85,8	123,4	157,9	201,7	218,3	223,2	201,9	154,2	111,9	72,0	55,2
Λαμία	59,4	73,1	113,9	150,5	188,8	210,3	214,1	193,4	145,5	100,3	65,3	52,1
Λάρισα	55,1	71,4	112,1	151,1	190,9	210,8	215,8	194,3	145,9	97,8	61,2	47,8
Μήλος	56,0	67,0	120,0	175,0	213,0	223,0	226,0	205,0	164,0	112,0	77,0	52,0
Μυτιλήνη	52,0	70,0	113,0	156,0	209,0	219,0	223,0	201,0	156,0	109,0	67,0	50,0
Πάτρα	55,0	72,0	124,0	147,0	200,0	215,0	218,0	197,0	153,0	107,0	66,0	53,0
Πύργος	68,4	83,1	127,5	157,9	200,4	215,6	223,8	202,1	155,0	115,9	75,5	59,3
Ρέθυμνο	62,0	81,0	119,0	164,0	211,0	218,0	223,0	204,0	160,0	106,0	81,0	58,0
Ρόδος	69,9	85,1	130,8	164,0	203,0	217,2	225,1	204,3	158,9	120,2	79,2	61,2
Σάμος	64,9	82,1	126,7	162,5	206,8	224,9	230,6	209,6	163,7	120,5	78,6	58,5
Σέρρες	50,8	68,0	105,7	141,0	180,5	202,8	209,7	187,7	140,8	94,7	56,5	43,7
Σύρος	58,0	80,0	121,0	172,0	212,0	219,0	225,0	204,0	160,1	199,0	74,0	57,0
Τρίκαλα (Ημαθίας)	57,3	72,2	105,6	140,2	178,0	202,9	206,4	185,8	138,6	94,0	59,7	49,1
Χανιά	62,0	80,0	124,0	167,0	212,0	220,0	225,0	205,0	161,0	111,0	78,0	59,0
Χίος	55,0	72,0	119,0	161,0	210,0	220,0	225,0	203,0	159,0	116,0	71,0	53,0

## 1.2 Ηλιακή ακτινοβολία

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία η οποία προσπίπτει πάνω σε μία επιφάνεια (οριζόντια ή κεκλιμένη) έχει δύο συνιστώσες: την άμεση και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία. Άμεση ονομάζεται αυτή η οποία φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους απ' ευθείας από τον ηλιακό δίσκο χωρίς να έχει υποστεί κατά τη διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα σκέδαση, δηλαδή αλλαγή κατεύθυνσης. Η άμεση ακτινοβολία εξαρτάται από την απόσταση γης – ήλιου, την

ηλιακή απόκλιση, το ηλιακό ύψος, το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο του τόπου, την κλίση της επιφάνειας επί της οποίας προσπίπτει, την απορρόφηση και διάχυση που υφίσταται στην ατμόσφαιρα [16].

Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία ονομάζεται το ποσό της ακτινοβολίας του ήλιου το οποίο φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους αλλά μετά την ανάκλαση ή σκέδαση μέσα στην ατμόσφαιρα και πάνω στην επιφάνεια της γης. Εξαρτάται από το ηλιακό ύψος, το υψόμετρο του τόπου, τη λευκαύγεια του εδάφους, το ποσό και το είδος των νεφών αλλά και από την παρουσία διαφόρων κέντρων σκέδασης στην ατμόσφαιρα (αερολύματα, υδροσταγόνες κ.α.) [16].

Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι τόσο μικρότερο όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που διανύει μέσα στην ατμόσφαιρα η ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή είναι και η αιτία που η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρότερη το χειμώνα απ' ότι το καλοκαίρι. Τέλος, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη όσο πιο κάθετα προσπίπτει πάνω σε μια επιφάνεια [16].

Για να υπολογιστεί η ολική ακτινοβολία η οποία προσπίπτει σε ένα οριζόντιο επίπεδο προστίθεται η διάχυτη στην άμεση ακτινοβολία, οπότε διαμορφώνεται η εξής σχέση [17]:

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

Όπου:

I: η ολική ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης σε οριζόντιο επίπεδο

I<sub>b</sub>: ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

I<sub>d</sub>: διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας

Στην περίπτωση που η επιφάνεια είναι κεκλιμένη στην προηγούμενη σχέση προστίθεται η ανακλώμενη στο έδαφος ακτινοβολία, οπότε διαμορφώνεται ως εξής [17]:

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

Όπου:

I<sub>T</sub>: ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο επιφάνειας της γης

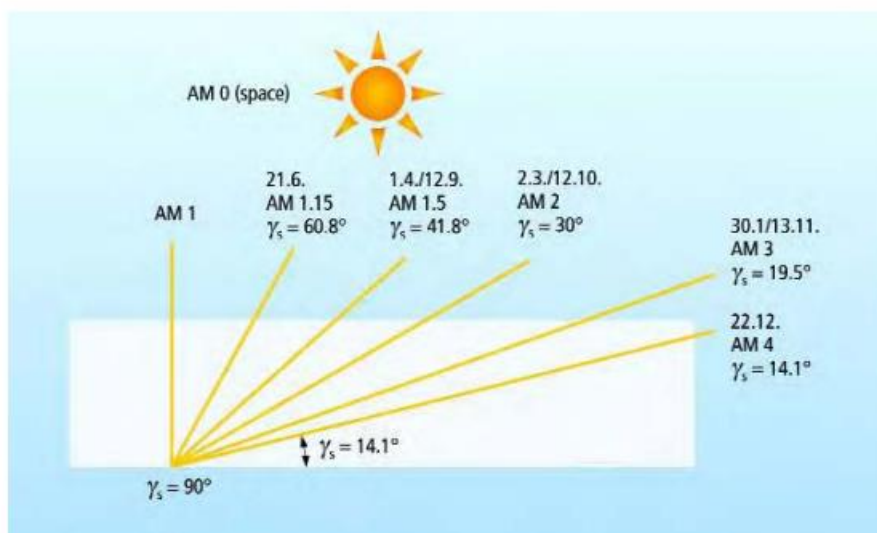
$I_{b,T}$ : ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

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

$I_{ref,T}$ : ανακλώμενη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

Όπως έχει προαναφερθεί, το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας, το οποίο φθάνει στο έδαφος της γης εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων γι' αυτό και είναι ευμετάβλητο. Εκτός από τις μεταβολές της ακτινοβολίας μέσα στην ημέρα αλλά και μέσα στο έτος (εξαιτίας της φαινόμενης τροχιάς του ηλίου), προκύπτουν και μη προβλεπόμενες μεταβολές από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν αλλά και τη γενική ατμοσφαιρική σύσταση. Η μεταβλητότητα αυτή καθιστά απολύτως αναγκαίο να ληφθούν και να μελετηθούν τα μετρούμενα δεδομένα της περιοχής όπου πρόκειται να γίνει η τοποθέτηση, και βάσει αυτών να γίνει ο σχεδιασμός της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης [11].

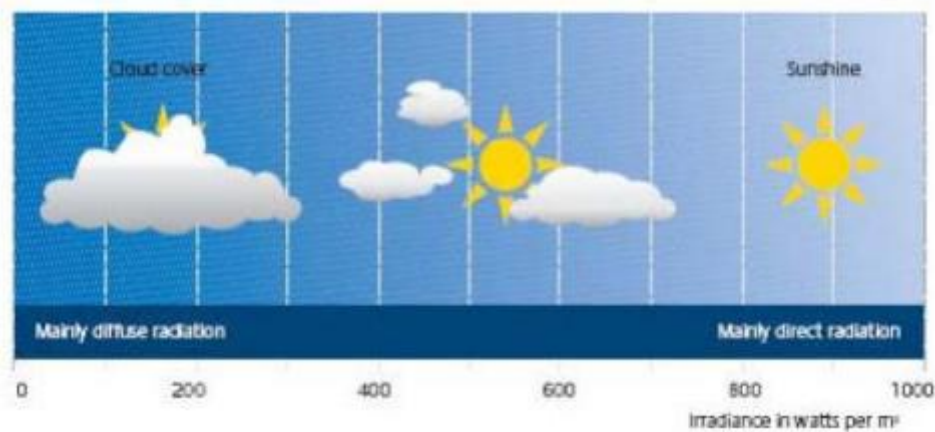
Η επίδραση που ασκεί η καθαρή ατμόσφαιρα στη διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας χαρακτηρίζεται από τη μάζα αέρος (A.M.), η οποία ισούται με το σχετικό μήκος της διαδρομής της άμεσης ακτινοβολίας μέσω της ατμόσφαιρας. Η ακτινοβολία στην επιφάνεια της θάλασσας, μία ηλιόλουστη καλοκαιρινή μέρα, την ώρα που ο ήλιος βρίσκεται κάθετα σε αυτήν (Ζενίθ) ισούται με μάζα αέρος 1. Διαφορετικά, υπολογίζεται κατά προσέγγιση τη μάζα αέρος με τη σχέση  $1/\cos\gamma_s$ , όπου  $\gamma_s$ =γωνία Ζενίθ [11].



Εικόνα 5: Μάζα αέρος A.M.

Η ακτινοβολία, άμεση και διάχυτη, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες συννεφιάς και από τη γωνία στην οποία βρίσκεται ο ήλιος σε σχέση με τη γη. Η άμεση ακτινοβολία αποτελεί τη μεγαλύτερη συνιστώσα της συνολικής ακτινοβολίας τις ημέρες με ηλιοφάνεια. Τις ημέρες όμως που επικρατεί συννεφιά, η ύπαρξη της διάχυτης συνιστώσας αποτελεί σχεδόν το σύνολο της ακτινοβολίας.

Το ποσό της ηλιακής ενέργειας που είναι διαθέσιμο για τα φωτοβολταϊκά συστήματα, εξαρτάται από τη θέση της εγκατάστασης σε σχέση με τον ισημερινό (όσο πιο κοντά, τόσο μεγαλύτερη και η ακτινοβολία), από την ώρα της ημέρας, την εποχή, το κλίμα αλλά και τη ρύπανση της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 6: Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας σε μέρες με ήλιο και συννεφιά

Ωστόσο το ποσό ενέργειας που θα παράξει τελικά ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, πέρα από τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, εξαρτάται και από την απόδοση των στοιχείων στην μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρικό ρεύμα.

### **1.3 Παρουσίαση ημιαγωγών**

Για τον ηλεκτρισμό που προέρχεται από την ενέργεια της ακτινοβολίας του ήλιου, χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν βάσει του φωτοβολταϊκού φαινομένου, κατά το οποίο η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μεταλλάσσεται σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα ή φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι κρυσταλλοδιόδοι οι οποίοι αποτελούνται από ημιαγωγούς (φτιαγμένους από ημιαγώγιμα υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα της φωτοαγωγιμότητας, να απορροφούν δηλαδή φωτόνια και να μεταδίδουν την ενέργεια τους αυτή σε χωριστά ηλεκτρόνια). Το πυρίτιο είναι το πιο διαδεδομένο υλικό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή ημιαγωγών για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους.

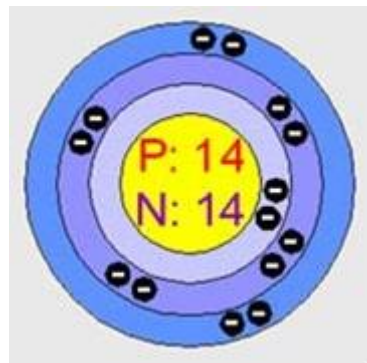
Με την πρόσπτωση ηλιακής ενέργειας στο κύτταρο, ένα μέρος της απορροφάται από τον ημιαγωγό. Επομένως, η ενέργεια του φωτός μεταφέρεται στον ημιαγωγό ελευθερώνοντας ηλεκτρόνια, τα οποία κινούνται ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Στα φωτοβολταϊκά κύτταρα υπάρχουν ακόμα ένα ή και περισσότερα ηλεκτρικά πεδία που αναγκάζουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινούνται προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αυτή η κίνηση των ηλεκτρονίων είναι το ηλεκτρικό ρεύμα και με την τοποθέτηση μεταλλικών επαφών πάνω και κάτω από το κύτταρο γίνεται η εκμετάλλευση για εξωτερική χρήση. Η ισχύς που θα έχει το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται εξαρτάται από το παραπάνω ρεύμα μαζί με την τάση που προέρχεται από τα ηλεκτρικά πεδία στο φωτοβολταϊκό κύτταρο. Για την επίτευξη ακόμα μεγαλύτερης παραγωγής αξιοποιείται η πρόσμιξη και κάποιων άλλων υλικών, όπως ο Φωσφόρος και το Βόριο στο καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που ρέουν. [18].

### **1.4 Η επαφή p-n**

Ένας κρυσταλλικός ημιαγωγός για να εμφανίζει καλά χαρακτηριστικά όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι σημαντικό να είναι αρκετά καθαρός και να μην υπάρχουν δομικές αταξίες στο πλέγμα του. Οι δεσμοί που συνδέουν τα άτομα στα ημιαγώγιμα υλικά είναι ομοιοπολικοί. Υπό συνθήκες πρόσπτωσης ακτινοβολίας ή μεταφοράς θερμότητας, το αποτέλεσμα την απελευθέρωση ηλεκτρονίων, οπότε και τη δημιουργία κενών θέσεων, δηλαδή των οπών. Στην πράξη η χρησιμότητα των ημιαγωγών δεν οφείλεται στη δημιουργία

φορέων αλλά στη διάχυση που συμβαίνει μεταξύ τους. Ακόμα για να δημιουργηθεί μια δίοδος επαφής χρειάζονται δύο στρώσεις από ένα ημιαγώγιμο υλικό πχ πυρίτιο.

Όσον αφορά τις χημικές ιδιότητες του κρυσταλλικού πυριτίου παρατηρείται ότι ένα άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια κατανεμημένα σε τρεις διαφορετικές στοιβάδες. Οι δύο πρώτες που είναι και πιο κοντά στο κέντρο, είναι συμπληρωμένες (2 και 8). Στην εξωτερική στοιβάδα όμως υπάρχουν μόνο 4, ενώ θα έπρεπε να υπάρχουν 8. Γι' αυτό μοιράζεται ηλεκτρόνια με τα γειτονικά του άτομα, με αποτέλεσμα να δημιουργείται η κρυσταλλική μορφή του καθαρού πυριτίου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.

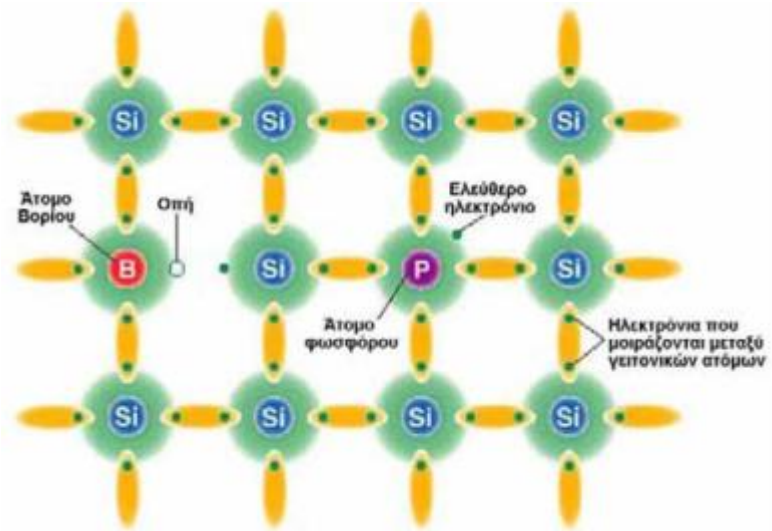


Εικόνα 7: Άτομο πυριτίου

Ο ημιαγωγός τύπου n δημιουργείται αν στον καθαρό ημιαγωγό αφαιρεθούν κάποια από τα άτομά του και προστεθούν κάποια άλλα, όπως ο Φωσφόρος. Έτσι στην εξωτερική στοιβάδα του Φωσφόρου ο αριθμός των ηλεκτρονίων είναι πέντε. Στον αγωγό παρατηρείται ότι ένα ηλεκτρόνιο για κάθε άτομο από αυτά που προστέθηκαν δεν συμμετέχει σε χημικό δεσμό και είναι ελεύθερο. Επομένως, το αποτέλεσμα στο συγκεκριμένο τύπο ημιαγωγού είναι να υπάρχουν περισσότερα ηλεκτρόνια (περίσσεια) σε σχέση με τον καθαρό αγωγό και τα άτομα πρόσμειξης ονομάζονται δότες. Πλέον, από το πυρίτιο στην καθαρή του κρυσταλλική δομή που είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού έχει δημιουργηθεί ένας καλός αγωγός.

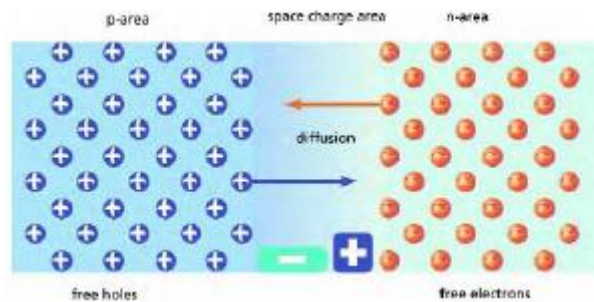
Αντίστοιχα για τη δημιουργία του ημιαγωγού τύπου p, η αντικατάσταση θα γίνει με άτομα κάποιου, όπως το Βόριο. Συνεπώς σ' αυτήν την περίπτωση καλείται αποδέκτης, γιατί έχει την ιδιότητα να μπορεί να δέχεται ένα ηλεκτρόνιο για να συμπληρώσει τον ελεύθερο δεσμό.





Εικόνα 8: Πρόσμιξη ατόμων βορίου και φωσφόρου στο κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου

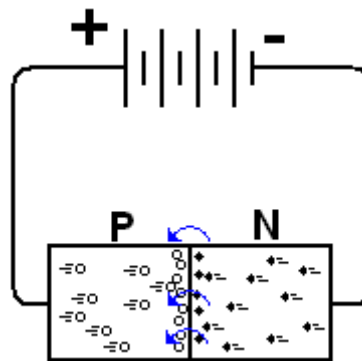
Η διάχυση των ηλεκτρονίων από τον έναν τύπο ημιαγωγού στον άλλον γίνεται όταν αυτές οι δύο επιφάνειες έρθουν σε επαφή. Η διάχυση από το n στο p και αντίστροφα δημιουργεί ένα ηλεκτροστατικό πεδίο [19].



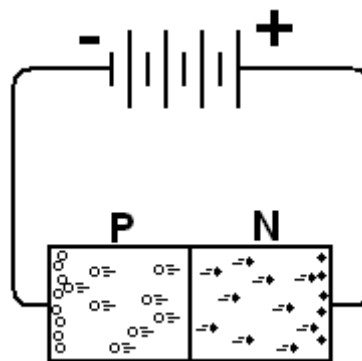
Εικόνα 9: Επαφή p-n

## 1.5 Πόλωση της διόδου - Ορθή και ανάστροφη

Είναι γενικώς αποδεκτό πως υπάρχουν δύο τρόποι σύνδεσης. Στην πρώτη περίπτωση επιβάλλεται στη δίοδο p-n ορθή πόλωση. Αυτό σημαίνει πως ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με το τμήμα τύπου n της διόδου ενώ ο θετικός πόλος με το τμήμα τύπου p. Έτσι, τα ηλεκτρόνια ρέουν χωρίς εμπόδια από την πηγή, από το τμήμα τύπου n, προς την ένωση της διεπαφής, όπου συνδέονται ξανά με τις οπές που δημιουργούνται από την απομάκρυνση ηλεκτρονίων προς το θετικό πόλο της πηγής, μέσω του τμήματος τύπου p.



Εικόνα 10: Συνδεσμολογία ορθής πόλωσης [27]

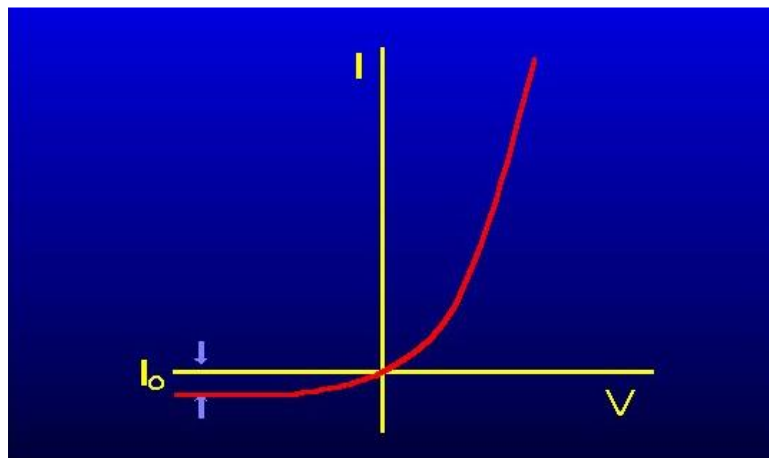


Εικόνα 11: Συνδεσμολογία ανάστροφης πόλωσης [27]

Στη δεύτερη περίπτωση, γνωστή και ως ανάστροφη πόλωση, ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με το τμήμα τύπου p και ο θετικός με το τμήμα τύπου n, γίνεται επανασύνδεση των οπών του τμήματος τύπου p με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την πηγή, και, απεναντίας, απομάκρυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων του τμήματος τύπου n, προς το θετικό πόλο της πηγής. Συνεπώς, υπάρχει μείωση στη συγκέντρωση των φορέων, αύξηση του πάχους της ζώνης εξάντλησης και δημιουργία ενός ισχυρού εσωτερικού ηλεκτροστατικού πεδίου από τα

φορτισμένα άτομα των προσμίξεων, το οποίο έχει αντίθετη φορά από το πεδίο που προκαλεί η πηγή. Εν τέλει, προβάλλεται μεγάλη αντίσταση από τη δίοδο στο ηλεκτρικό ρεύμα. Για παράδειγμα μια δίοδος με αντίσταση  $10 \Omega$  σε ορθή πόλωση μπορεί να γίνει μεγαλύτερη κατά 10 εκατομμύρια φορές στην αντίστροφη πόλωση, δηλαδή  $100 \text{ M}\Omega$ .

Στο ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 10) φαίνεται η ιδιομορφία της μεταβολής στην ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο ρέει μέσω μιας διόδου ένωσης p-n σε σχέση με την τάση και την περίπτωση της πόλωσης [4].



Εικόνα 12: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V διόδου p-n [28]

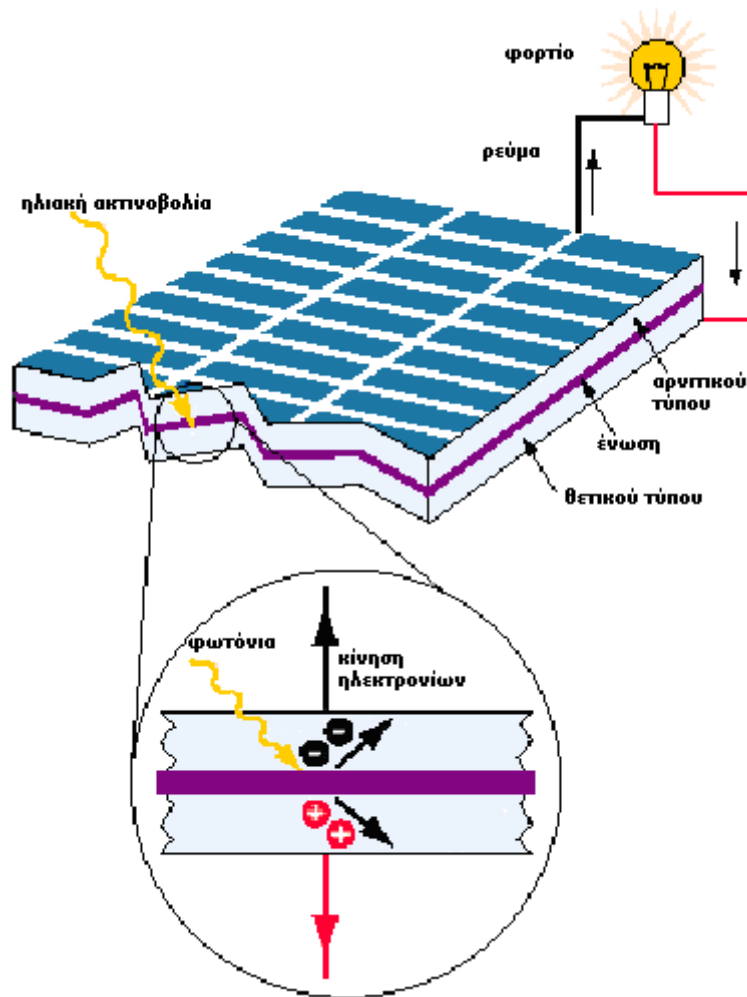
## 1.6 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια ενός υλικού, ένα μέρος της ανακλάται, ένα άλλο διαπερνά αυτό και το υπόλοιπο απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας. Η παραπάνω απορρόφηση του φωτός, ουσιαστικά σημαίνει τη μετατροπή του σε άλλη μορφή ενέργειας (συνήθως θερμότητα). Ωστόσο, οι ημιαγωγοί έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνειά τους, απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ή αλλιώς φωτονίων. Τα φωτόνια είναι ο φορέας μεταφοράς της ηλιακής ενέργειας με χαρακτηριστικό μέγεθος η συχνότητα ή μήκος κύματος.

Κατά την πρόσπτωση των ηλιακών ακτινών σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, παρατηρείται η απελευθέρωση ηλεκτρονίων και η μεταφορά τους στην άλλη πλευρά εξαιτίας του ηλεκτροστατικού πεδίου που έχει σχηματιστεί με την διεπαφή p - n. Στην περίπτωση σύνδεσης των δύο επαφών παρατηρείται στο σύστημα η διαρροή ηλεκτρονίων, όσο χρόνο

έρχεται σε επαφή με το φως του ήλιου και εξαιτίας της σύνδεσης σε αυτούς τους ακροδέκτες κατάλληλου ηλεκτρικού φορτίου, παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος και ισχύος από τη φωτοβολταϊκή διάταξη προς το φορτίο. Αυτό καλείται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο βασίζεται στις ιδιότητες των ημιαγώγιμων υλικών.

Παρακάτω απεικονίζεται σχηματικά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.



Εικόνα 13: Λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων στηριζόμενη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Ο σχηματισμός αυτός που είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο (PV-cell) και το ρεύμα που προκύπτει από αυτή τη διαδικασία ονομάζεται φωτόρευμα. Χρήζει ιδιαίτερης σημασίας να ειπωθεί ότι δεν υπάρχει πλήρης εκματάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας από το φωτοβολταϊκό στοιχείο για δύο λόγους. Ο πρώτος αφορά σε ανάκλαση ενός μέρους της προσπίπτουσας

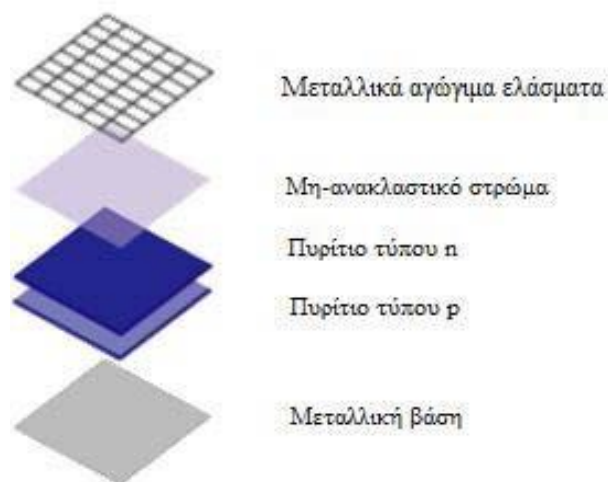
ηλιακής ακτινοβολίας κι ο δεύτερος αφορά στην ίδια την ενέργεια, δηλαδή στη συχνότητα των φωτονίων. Το ποσό αυτό της ηλιακής ακτινοβολίας που δεν απορροφάται, αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια  $h \cdot \nu$  μικρότερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού και δεν μπορεί να αξιοποιηθεί. Η ενέργεια μικρότερης συχνότητας προκαλεί θερμικά αποτελέσματα κατά την απορρόφηση από το φωτοβολταϊκό κελί [19].

## 2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία και φωτοβολταϊκά πλαίσια

### 2.1 Δομή φωτοβολταϊκών στοιχείων

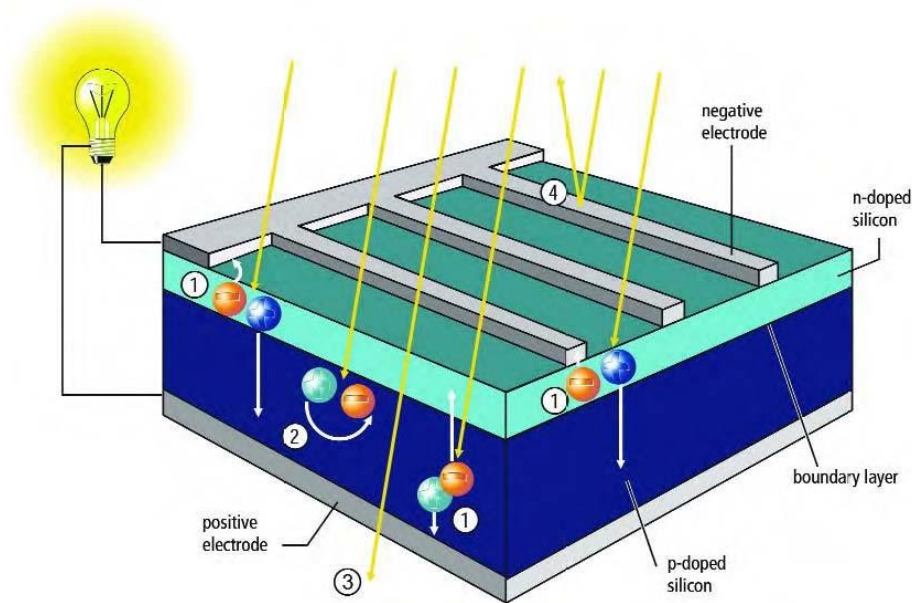
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία για να έχουν μηχανική αντοχή και για να είναι εύκολα στη χρήση τους, έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να περικλείονται στο περίγραμμά τους από ελάσματα ανοδιώμενου αλουμινίου. Είναι υδατοστεγώς κλεισμένα με κατάλληλο μονωτικό πλαστικό και γυαλί, για να μην είναι σε επαφή με το περιβάλλον. Γενικότερα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από:

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



Εικόνα 14: Δομικά μέρη ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Πολλά λεπτά οριζόντια ελάσματα συνθέτουν το φωτοβολταϊκό στοιχείο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14. Ο αριθμός τους είναι μεγαλύτερος από τα κάθετα και είναι αυτά τα στοιχεία που συγκεντρώνουν τα ηλεκτρόνια που διεγείρονται και μας δίνουν το ρεύμα. Έπειτα, τα ηλεκτρόνια διοχετεύονται στα κάθετα παχιά ελάσματα, τα οποία αποκαλούνται “busbars” ή αλλιώς ζυγοί (Εικόνα 15). Με την ένωση των ζυγών μεταξύ τους το αποτέλεσμα είναι να προκύπτουν πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους από τα οποία και αποτελείται το πλαίσιο. Σε κάθε πλαίσιο συναντώνται δύο ακροδέκτες, ο θετικός και ο αρνητικός πόλος.



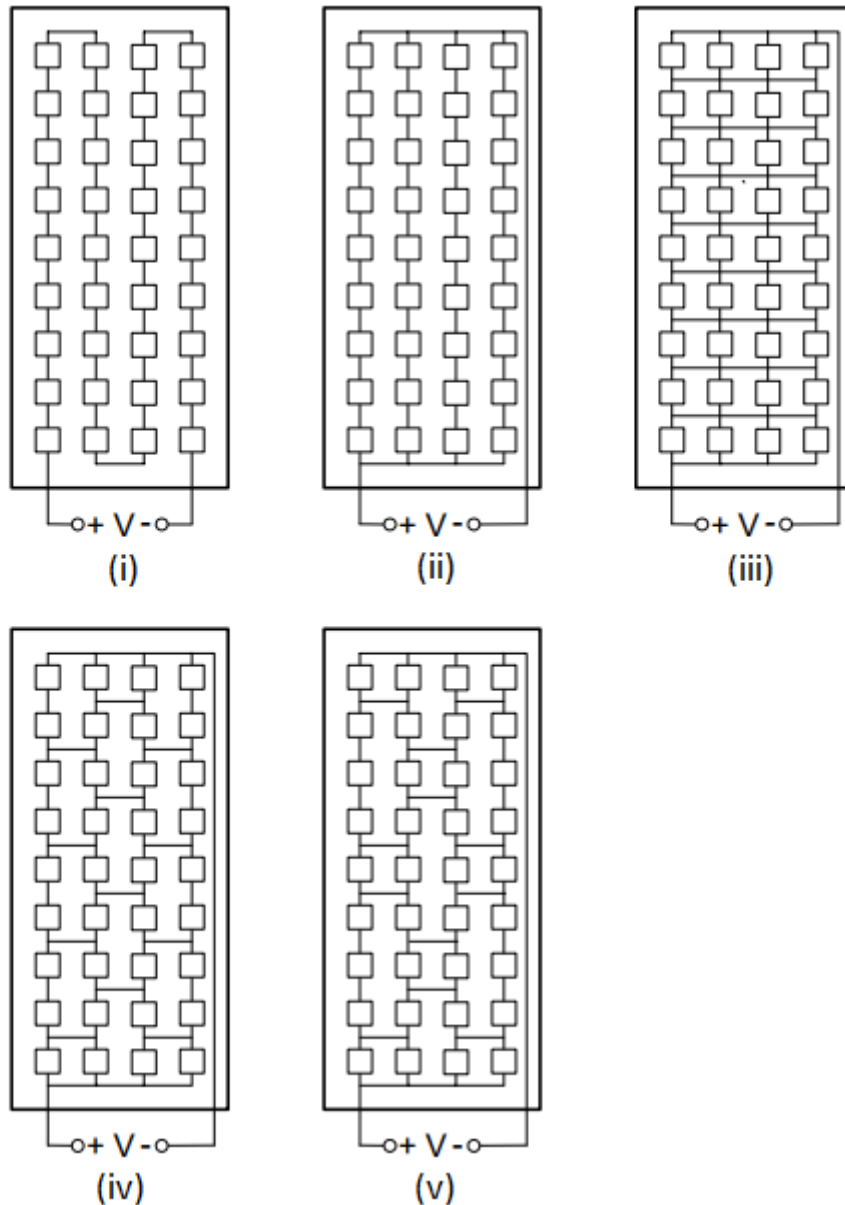
Εικόνα 15: Πλάγια όψη φωτοβολταϊκού στοιχείου συμπεριλαμβανομένων: Διαχωρισμός φορτίου (1) , Επανασύνδεση (2), Αχρησιμοποίητη φωτεινή ενέργεια(3), Αγωγή ελάσματα (4).

## 2.2 Συνδέσεις φωτοβολταϊκών στοιχείων

Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης των φωτοβολταϊκών:

- i. Σύνδεση των στοιχείων σε σειρά μεταξύ τους (απλή σειρά).
- ii. Σύνδεση των στοιχείων σε σειρά και αυτές οι σειρές συνδεδεμένες μεταξύ τους παράλληλα (σε απλές παράλληλες σειρές (Series – Parallel, SP). Συνήθως, υπάρχουν 9 στοιχεία σε κάθε σειρά και κάθε πλαίσιο έχει 4 σειρές.

- iii. Σύνδεση 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.
- iv. Σύνδεση όλων των στοιχείων σε διάταξη γεφυρωτής διασύνδεσης (bridge – linked), όπου συνδέονται μεταξύ τους γεφυρωτά.
- v. Σύνδεση σε διάταξη κυψέλης (honeycomb) [26]



Εικόνα 16: Σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων (i) σε σειρά, (ii) σε απλές παράλληλες σειρές, (iii) σε αθροιστικές διατάξεις σταυρωτού δεσμού, (iv) σε διάταξη γεφυρωτής διασύνδεσης και (v) σε διάταξη κυψέλης.



## 2.3 Διαφορετικά είδη και τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα ηλιακά στοιχεία, διαθέτουν υψηλά ποσοστά αξιοπιστίας λειτουργίας και μεγάλη διάρκεια ζωής. Οι κύριοι στόχοι που αφορούν θέματα βελτίωσης παραμένουν η απόδοση και το κόστος τους [7]. Σκοπός, λοιπόν, της εξέλιξης της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών είναι η δημιουργία πλαισίων με υψηλότερο κατά το δυνατό βαθμό απόδοσης και χαμηλότερο κόστος. Οι τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών που συναντώνται σήμερα ποικίλουν ως προς το βασικό υλικό κατασκευής, την ικανότητα μετατροπής και το κόστος τους. Μία συνοπτική αναφορά των κυριότερων χαρακτηριστικών τους παρατίθεται στη συνέχεια.

Αξίζει να σημειωθεί πως το υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων στη βιομηχανία είναι το πυρίτιο. Αποτελεί κατά πάσα πιθανότητα το μοναδικό υλικό που παράγεται με τόσο μαζικό τρόπο. Το πυρίτιο σήμερα αποτελεί την πρώτη ύλη για το 90% της αγοράς των φωτοβολταϊκών. Τα διάφορα είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου παρατίθενται στη συνέχεια.

### 2.3.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου μεγάλου πάχους

#### 2.3.1.1 Μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si )

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο είναι ένα υλικό με εύρος ζώνης 1.12eV [22]. Το πάχος τους είναι περίπου 0.3mm ενώ η απόδοση τους στη βιομηχανία κυμαίνεται από 15-18% για το πλαίσιο. Σε εργαστηριακές δοκιμές έχουν επιτευχθεί μεγαλύτερες αποδόσεις που έχουν αγγίξει το 24.7%. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν ως βασικό τους πλεονέκτημα την καλύτερη σχέση απόδοσης-επιφάνειας ή «ενεργειακής πυκνότητας». Ωστόσο, παρουσιάζουν ένα μειονέκτημα, που δεν μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντο, και είναι το υψηλό κόστος κατασκευής συγκριτικά με τα πολυκρυσταλλικά.

Ως βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών θεωρούνται η μέθοδος Czochralski (CZ) και η μέθοδος float zone (FZ). Και οι δυο έχουν ως βάση την ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό που έχει την πιο υψηλή απόδοση στην αγορά σήμερα, αγγίζει το 18.5%. Είναι μάλιστα το μοναδικό που διαθέτει μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πλαισίου πράγμα που του εξασφαλίζει μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία [21].



Εικόνα 17: Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου [21]

### 2.3.1.2 Πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)

Το πάχος τους είναι, όπως και των μονοκρυσταλλικών, περίπου 0.3mm. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών, γι' αυτό και η τιμή τους είναι από λίγο έως αρκετά χαμηλότερη. Μπορεί κανείς, ακόμα και με μια γρήγορη ματιά, να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές, δηλαδή το μέγεθος των κρυσταλλικών κόκκων. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κύτταρα. Στο χώρο του εργαστηρίου, η απόδοση έχει φτάσει έως και 20% [19], ενώ τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία που συναντώνται στο εμπόριο έχουν απόδοση από 13 έως 15% [19].

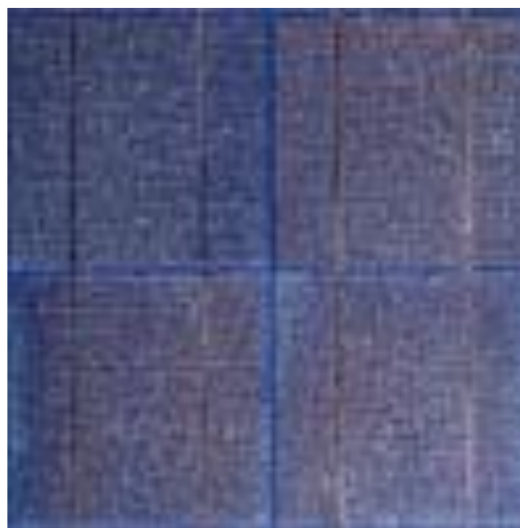
Οι κυριότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι η μέθοδος απευθείας στερεοποίησης, *directional solidification* (DS), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου (“χύτευση”) και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC [21].



Εικόνα 18: Κύτταρο πολυκρυσταλλικού πυριτίου

### 2.3.1.3 Ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)

Στα στοιχεία ταινίας πυριτίου υπάρχει μια νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων, με μείωση έως και 50% στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις γνωστές τεχνικές κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου.



Εικόνα 19: Φωτοβολταϊκό στοιχείο ταινίας πυριτίου [21]

Επιπλέον, αποδίδουν γύρω στο 12-13% (στην αγορά) ενώ το πάχος τους είναι περίπου 0.3mm (όσο δηλαδή και των προηγούμενων δυο κατηγοριών). Η εργαστηριακή του απόδοση έχει φτάσει και το 18% [21].

## 2.3.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων (Thin Film)

### 2.3.2.1 Δισεληνοϊνδούχος χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)

Ο δισεληνοϊνδούχος χαλκός έχει κατά προσέγγιση ενεργειακό διάκενο 1eV [2]. Έχει ιδιότητες που του επιτρέπουν αρκετά καλή απορροφητικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο πλαίσιο, αλλά παρ' όλα αυτά, η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% [19] για το πλαίσιο. Σε εργαστήρια έχει επιτευχθεί απόδοση που φτάνει στο 18.8% [19]. Η απόδοση αυτή είναι η καλύτερη ανάμεσα στις τεχνολογίες λεπτής επίστρωσης (λεπτών υμενίων). Με την πρόσμιξη γαλλίου (CIGS), έχει παρατηρηθεί πως η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Πρόβλημα δημιουργείται εξαιτίας του γεγονότος ότι το ίνδιο το βρίσκεται δύσκολα γιατί είναι περιορισμένο στη φύση. Ωστόσο, αυτό που εκτιμάται και αναμένεται για τα επόμενα χρόνια είναι πως το κόστος του θα μειωθεί αρκετά.



Εικόνα 20: Κύτταρο δισεληνοϊνδούχου χαλκού



Εικόνα 21: Φωτοβολταϊκό στοιχείο τύπου CIS [21]

### 2.3.2.2 Άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)

Το άμορφο πυρίτιο, έχει εύρος ζώνης που με διακύμανση μεταξύ 1.7-1.8eV [24]. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγικού υλικού (πυρίτιο στις περιπτώσεις που αναφέρονται στην παρούσα εργασία), πάνω σε υποστηρικτικό υπόστρωμα που είναι χαμηλού κόστους όπως το γυαλί ή το αλουμίνιο. Συνεπώς, ακόμα μια φορά λόγω της μειωμένης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται, η τιμή τους είναι αρκετά χαμηλότερη πράγμα που τους δίνει ένα συγκριτικό πλεονέκτημα με άλλα ακριβότερα. Χαρακτηρίζεται άμορφο φωτοβολταϊκό, διότι προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι αποδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά αυτού του τύπου, κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6% έως 8% [19], ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14% [19]. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το άμορφο πυρίτιο 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 πλαισίων άμορφου πυριτίου, είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα, κάτι που σημαίνει ότι για να παραχθεί η ίδια ενέργεια χρειάζεται σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης, υπάρχουν διάφορες αμφιβολίες σχετικές με τη διάρκεια ζωής των πλαισίων άμορφου πυριτίου αφού δεν υπάρχουν στοιχεία από παλαιότερες εγκαταστάσεις. Παρ' όλα αυτά, οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης που φθάνουν και τα 20 έτη. Το πάχος του πυριτίου είναι 0.0001mm (πάρα πολύ μικρό), ενώ το υπόστρωμα μπορεί να φθάνει τα 3mm ξεκινώντας από 1mm [21].



Εικόνα 22: Φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου [21]

### 2.3.2.3 Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το τελουριούχο κάδμιο με ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV [21] βρίσκεται αρκετά κοντά στο ηλιακό φάσμα, κάτι που συνεπάγεται σημαντικά πλεονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι η δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται σήμερα και θεωρούνται σύγχρονες, όμως, μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου κοντά στο 6-8% [19]. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φθάσει το 16% [19].

Αναμένεται στο άμεσο μέλλον αρκετή μείωση του κόστους. Ανασταλτικός παράγοντας στη διάδοση της χρήσης του είναι κάποιες έρευνες, που σύμφωνα με αυτές το κάδμιο είναι καρκινογόνο. Ακόμα, η έλλειψη του τελούριου δε βοηθά στη διάδοσή του. Μια πολύ σημαντική χρήση του είναι η ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό, κατάλληλο για ενσωμάτωση στα κτίρια (BIPV, Building Integrated Photovoltaic) [21].



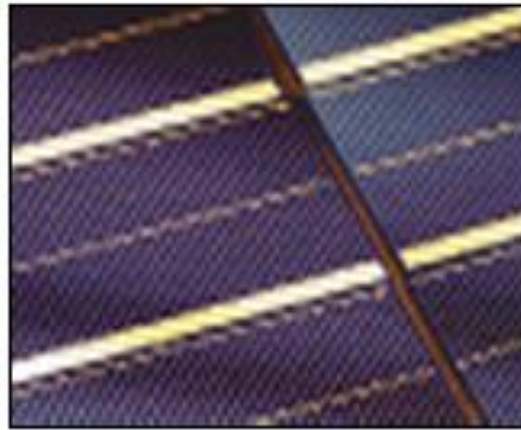
Εικόνα 23: Φωτοβολταϊκό στοιχείο CdTe [21]



Εικόνα 24: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο CdTe

#### 2.3.2.4 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Το γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν που προέρχεται από τη ρευστοποίηση μετάλλων, όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος και βρίσκεται στη φύση πιο δύσκολα και από το χρυσό. Αντίθετα, το αρσενικό δεν είναι σπάνιο, άλλα υστερεί στο ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1.42 eV [11] που το καθιστά ιδανικό για την απορρόφηση του φωτός. Η υψηλότερη απόδοση που έχει φθάσει είναι το 29%, όταν είναι στη μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) [19]. Κύριο πλεονέκτημα των φωτοβολταϊκών στοιχείων GaAs είναι πως παρουσιάζονται εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες, κάτι που τα καθιστά τα πλέον κατάλληλα για εφαρμογές συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή στις υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης που έχουν προτιμούνται για εφαρμογές στο διάστημα. Σημαντικό μειονέκτημα όμως αποτελεί το πολύ μεγάλο κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος [19].



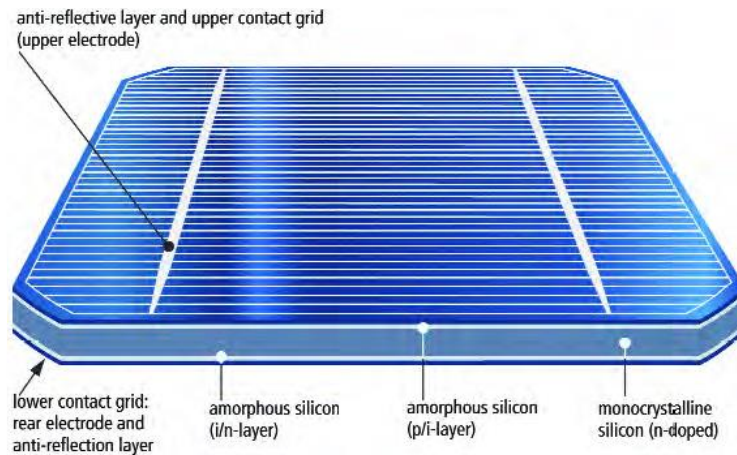
Εικόνα 25: Κύτταρο αρσενιούχου γαλλίου

### 2.3.3 Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που κατασκευάζονται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών HIT (Heterojunction with Intrinsic Thinlayer– Ετεροενώσεις με ενδογενή λεπτά στρώματα) αποτελούν μια άλλη κατηγορία εξίσου σημαντική. Ως τα πιο γνωστά εμπορικά πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία ορίζονται αυτά που κατασκευάζονται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (μια πάνω και μια κάτω), ενώ ενδιάμεσα έχουν και μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Η τεχνολογία αυτή έχει ως μεγάλο της πλεονέκτημα τον υψηλό βαθμό απόδοσης του πλαισίου (μέχρι και 17.2%). Ως αποτέλεσμα, απαιτείται λιγότερη επιφάνεια για να επιτευχθεί η ίδια εγκατεστημένη ισχύς. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία λειτουργούν με βαθμό απόδοσης 19.7%.

Επιπλέον, ως βασικά πλεονεκτήματα για τα πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία ορίζονται τόσο η υψηλή απόδοση που έχουν σε υψηλές θερμοκρασίες, όσο και η σημαντική τους απόδοση στην ακτινοβολία που προέρχεται από διάχυση. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα οδηγούν σε ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα σχετικό με την αύξηση του κόστους συγκριτικά με άλλα πιο συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια [21].

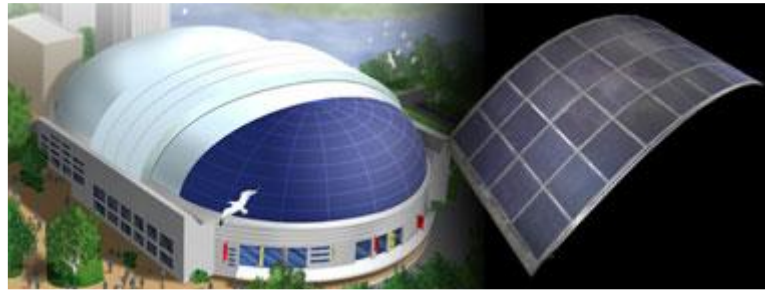




Εικόνα 26: Απεικόνιση πολυστρωματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου [21]

### 2.3.4 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άλλων τεχνολογιών


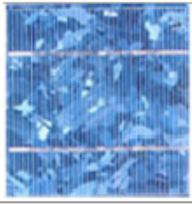
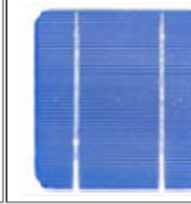
Μία νέα και ανερχόμενη τεχνολογία , αποτελεί το πρωτοποριακό προϊόν spheral solar, που βασίζεται σε υλικό που αντίθετα με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά κύτταρα, δεν επικάθεται σε άκαμπτη βάση πυριτίου αλλά είναι φτιαγμένο από χιλιάδες σφαιρίδια πυριτίου, εγκλωβισμένα ανάμεσα σε δύο φύλλα αλουμινίου. Τα σφαιρίδια αυτά, κατασκευάζονται από υπολείμματα πυριτίου που προκύπτουν από τη βιομηχανία των chips των ηλεκτρονικών υπολογιστών πράγμα που προσφέρει μικρότερο κόστος σε μια τέτοια κατασκευή. Κάθε σφαιρίδιο, λειτουργεί ως ανεξάρτητο μικροσκοπικό φωτοβολταϊκό κύτταρο, απορροφώντας την ηλιακή ακτινοβολία και μετατρέποντάς την σε ηλεκτρισμό. Τα φύλλα αλουμινίου εξασφαλίζουν στο υλικό τη φυσική αντοχή που χρειάζεται, του επιτρέπουν να είναι εύκαμπτο αλλά και ελαφρύ, ενώ ταυτόχρονα παίζουν το ρόλο ηλεκτρικής επαφής. Η γεμάτη φυσαλίδες επιφάνεια που δημιουργούν τα σφαιρίδια επιτρέπει πολύ μεγαλύτερη απορρόφηση ηλιακού φωτός, χαρίζοντας στο υλικό αποδοτικότητα που φθάνει το 11% [25]. Οι εφευρέτες του υποστηρίζουν ότι μπορεί να καλύψει οποιοδήποτε σχήματος επιφάνειες, αυξάνοντας κατά πολύ τους χώρους όπου μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια και δίνοντας στους αρχιτέκτονες τη δυνατότητα να σχεδιάσουν κτήρια με καμπύλες που θα μπορούν να είναι εξοπλισμένα με φωτοβολταϊκά, χωρίς μάλιστα να απαιτούνται ενισχυμένες κατασκευές για την στήριξή τους όπως αυτό στην



Εικόνα 27: Εικονική εφαρμογή εύκαμπτων φωτοβολταϊκών

Στον πίνακα που ακολουθεί απεικονίζονται οι ευρέως διαδεδομένες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων που υπάρχουν στις μέρες μας. Γίνεται μία σύγκριση μεταξύ τους, όσον αφορά την απόδοση, την απαιτούμενη επιφάνεια ανά kWp, τη μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας σε kWh ανά kWp και σε kWh ανά m<sup>2</sup>, καθώς και τη μέση ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Πίνακας 2: Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών

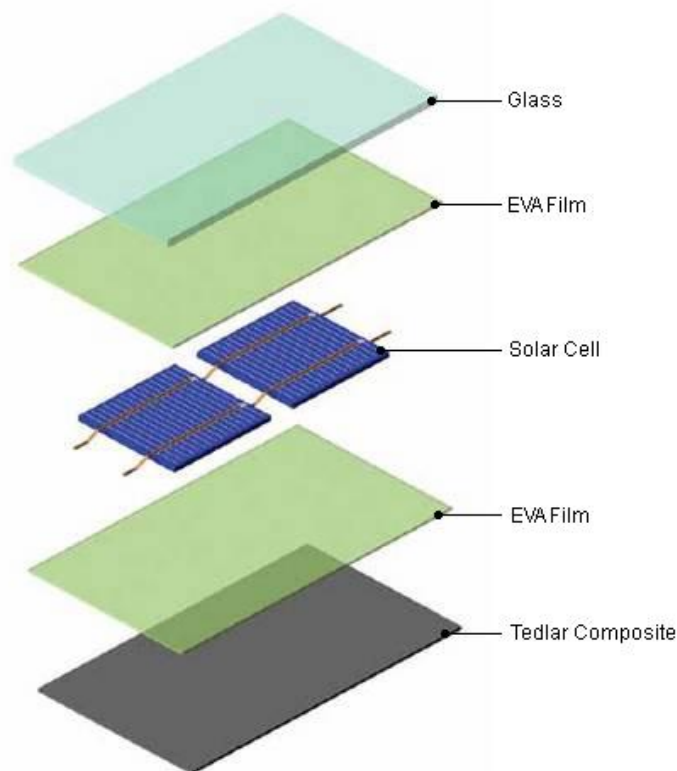
Τύπος	Thin Film	Πολυκρυσταλικά	Μονοκρυσταλικά
Εμφάνιση			
Απόδοση	Άμορφα: 5-7% CIS: 7-10% CdTe: 8-9%	11~14%	13~16%
Απαιτούμενη επιφάνεια ανά kWp	10~20 m <sup>2</sup>	8~10 m <sup>2</sup>	7~8 m <sup>2</sup>
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά kWp)	1300~1400	1300	1300
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά m <sup>2</sup> )	65~140	130~160	160~185
Ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (kg CO <sub>2</sub> ανά kWp)	1380~1485	1380	1380

Στο σημείο αυτό δεν μπορεί να αμεληθεί το γεγονός πως η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και σε διάφορα εργαστήρια σε όλο τον κόσμο παρουσιάζονται και ερευνώνται νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες στα φωτοβολταϊκά στοιχεία που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία

η χρήση τους είναι τα νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si) και τα Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία [21].

## 2.4 Φωτοβολταϊκά πλαίσια – Δομή και λειτουργία

Ένας αριθμός φωτοβολταϊκών στοιχείων συνθέτουν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Προκρινόμενου να λειτουργήσει το πλαίσιο θα πρέπει να υπάρχει ειδική μέριμνα προστασίας των στοιχείων από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι πλαισίων που έχουν δοκιμαστεί στην πράξη που εξαρτώνται αφενός από το είδος των φωτοβολταϊκών στοιχείων και αφετέρου από το είδος της εφαρμογής.



Εικόνα 28: Απεικόνιση φωτοβολταϊκού πλαισίου

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από κάποια στρώματα, που παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω ενώ απεικονίζονται στην Εικόνα 28 :

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

- Ηλιακά στοιχεία
- Συμπυκνωμένο υλικό (EVA)
- Μονωτικό υλικό

Ο συνήθης τρόπος είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία να περικλείονται από δυο κομμάτια γυαλιού ή ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικού, ενώ αρκετές είναι οι φορές όπου περικλείονται συνολικά από πλαστικό. Για μεγαλύτερη απόδοση χρησιμοποιούνται είδη γυαλιών που είναι διαφανή, χρωματισμένα και με ιδιότητα την αντανάκλαση της θερμότητας. Το συμπυκνωμένο υλικό είναι συνήθως EVA, υλικό που ως κύρια χαρακτηριστικά έχει την πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση και τη μεγάλη διαπερατότητα στο φως.

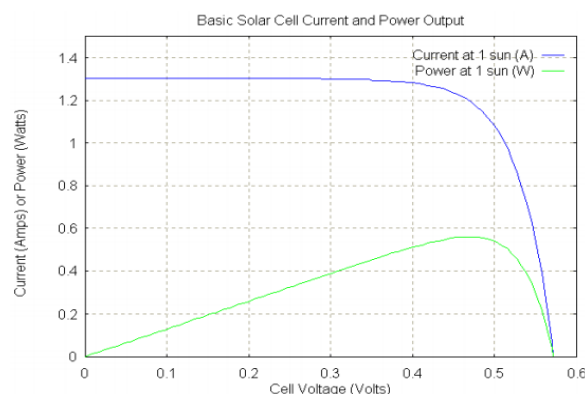
## 3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων

### 3.1 Καμπύλη I-V

#### 3.1.1.1 Γενικά

Παρατηρείται μια ιδιαιτερότητα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο στη συμπεριφορά του σε σχέση με άλλες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα ακόμα κι αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η τάση μεταβάλλεται αρκετά και μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που παρέχουν στο κύκλωμα, σε αντίθεση με τις περισσότερες ηλεκτρικές πηγές που η τάση τους διατηρείται σταθερή στην περιοχή κανονικής λειτουργίας.

Έχοντας σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και μεταβάλλοντας τις τιμές της αντίστασης του κυκλώματος που τροφοδοτεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο, λαμβάνονται ενδιάμεσες τιμές της τάσης και της έντασης του ρεύματος του φωτοβολταϊκού στοιχείου ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (Βραχυκυκλωμένο κύκλωμα με μέγιστη τιμή ρεύματος  $I_{sc}$  και μηδενική τάση) και σε άπειρη αντίσταση (Ανοιχτοκυκλωμένο κύκλωμα με μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης  $V_{oc}$ ), όπως φαίνεται στην παρακάτω χαρακτηριστική.



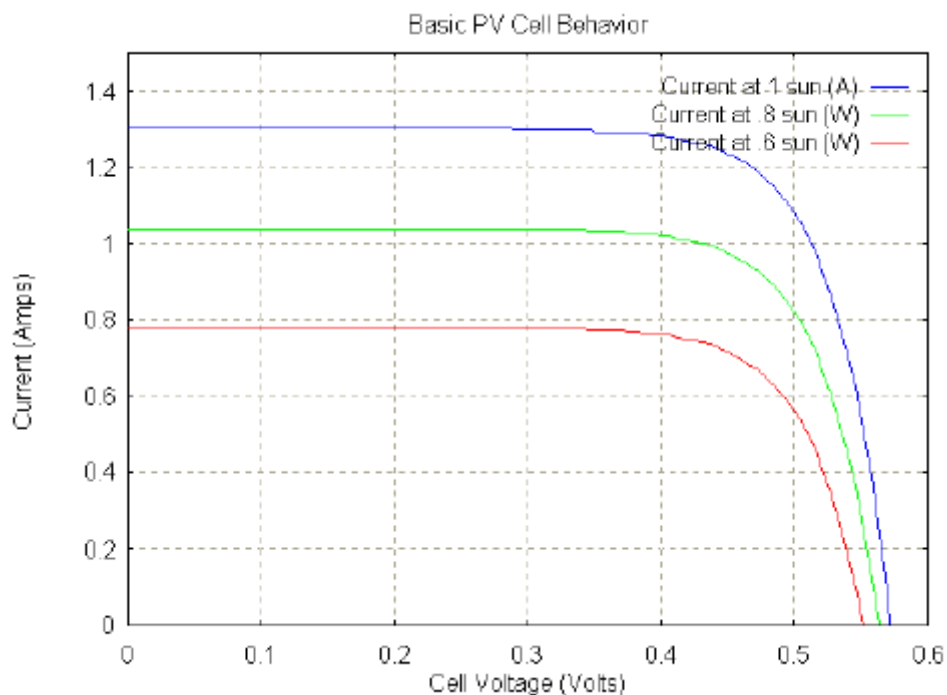
Εικόνα 29:

Χαρακτηριστική P-V: Φωτοβολταϊκού στοιχείου για σταθερή ένταση ακτινοβολίας και θερμοκρασίας  
Χαρακτηριστική I-V: Φωτοβολταϊκού στοιχείου για σταθερή ένταση ακτινοβολίας και θερμοκρασίας

### 3.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την καμπύλη I-V

#### 3.1.2.1 Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας G

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο προσδίδει στο κύκλωμα μια ένταση ρεύματος, η οποία είναι ανάλογη προς την ποσότητα της ακτινοβολίας που δέχεται. Ειδικότερα είναι ανάλογη προς το γινόμενο της έντασης (της πυκνότητας της ισχύος) της ακτινοβολίας επί το εμβαδόν της επιφάνειάς του.



Εικόνα 30: Χαρακτηριστική I-V 3 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου σε σχέση με την ένταση της ακτινοβολίας G [29]

Η μεταβολή του ρεύματος βραχυκυκλώματος  $I_{sc}$  με την ποσότητα της ακτινοβολίας είναι γραμμική, σε αντίθεση με την τάση του ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  που παραμένει σχεδόν σταθερή όταν μεταβάλλεται η ακτινοβολία για μεγάλες σχετικά τιμές ακτινοβολίας. Με μαθηματική προσέγγιση παρατηρείται ότι η εξάρτηση τάσης-ακτινοβολίας είναι λογαριθμική, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα από τη σχέση :

$$V_L = V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o}\right) \quad (3.1)$$

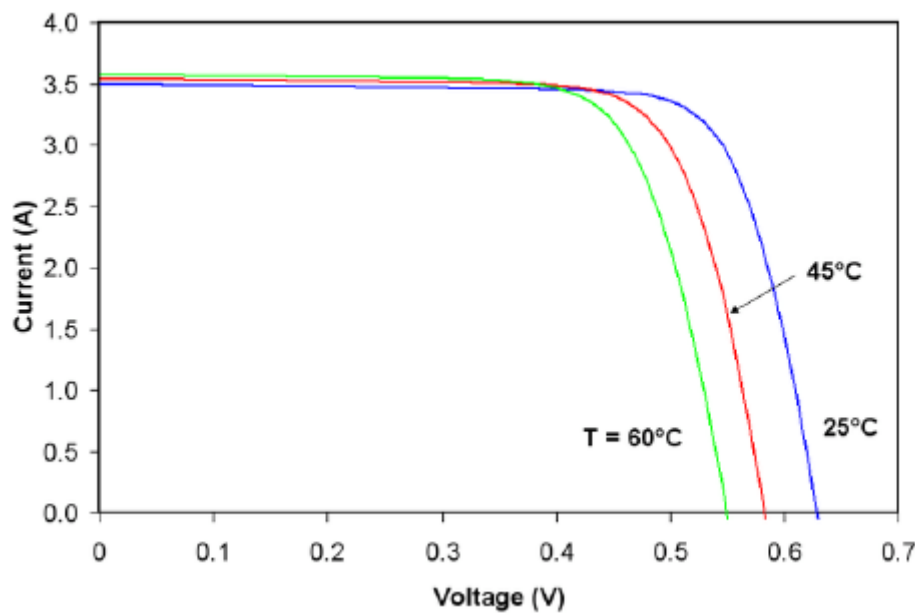
### **3.1.2.2 Η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου T**

Η χαρακτηριστική I-V επηρεάζεται από τη θερμοκρασία άμεσα αλλά και έμμεσα. Στον εκθετικό όρο της χαρακτηριστικής εξίσωσης 3.1 βρίσκεται το T κι έτσι η χαρακτηριστική I-V επηρεάζεται άμεσα, ενώ έμμεσα επηρεάζεται μέσω της επίδρασης του  $I_0$ . Με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται ότι μειώνεται το μέγεθος του εκθέτη, αλλά το μέγεθος του  $I_0$  αυξάνεται εκθετικά. Στην περίπτωση γραμμικής μείωσης της  $V_{oc}$  με την αύξηση της θερμοκρασίας, θεωρείται πως η επίδραση είναι πιο σωστή. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, οι μικρότερες μειώσεις της τάσης παρατηρούνται στα φωτοβολταϊκά στοιχεία με τις υψηλότερες τιμές της  $V_{oc}$ . Επομένως το μέγεθος αυτής της μείωσης είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την  $V_{oc}$ .

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

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].

Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, λόγω της αύξησης της κίνησης των φορέων στο φωτοβολταϊκό στοιχείο παρατηρείται μια αργή αύξηση στην τιμή του φωτορεύματος  $I_{ph}$ . Η παραπάνω επίδραση θεωρείται μικρή και είναι 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. Για να υπολογιστεί η γενική επίδραση που έχει η θερμοκρασία στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων θα χρησιμοποιηθούν αυτοί οι παράγοντες σε σχέση με τη χαρακτηριστική εξίσωση. Παρ' όλα αυτά λαμβάνοντας υπόψιν ότι η αλλαγή στην τάση είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν στο ρεύμα, η γενική επίδραση στην απόδοση τείνει να μοιάζει με αυτήν στην τάση. Κατά πλειοψηφία υπάρχει μείωση στην απόδοση κατά  $0.50\%/^{\circ}\text{C}$  για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου και  $0.15-0.25\%/^{\circ}\text{C}$  για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου.



Εικόνα 31: Χαρακτηριστική I-V 4 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από T [22]

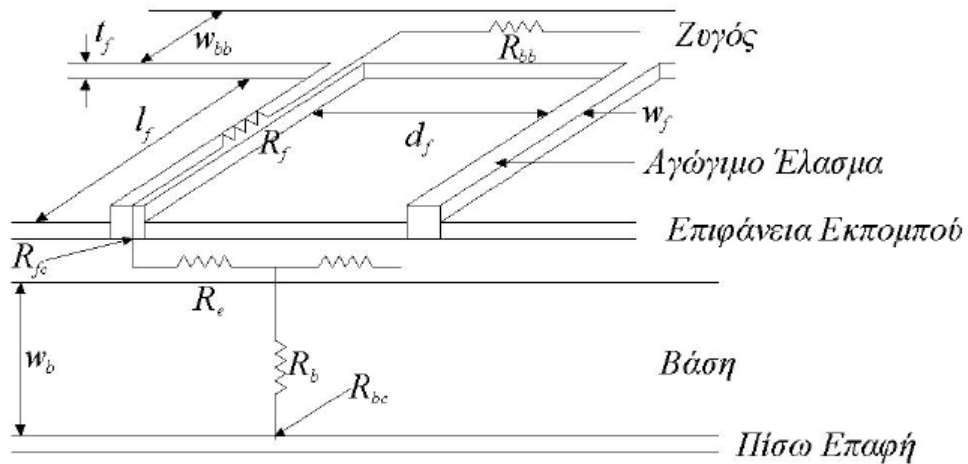
### 3.1.2.3 Ο συντελεστής κατασκευής και ποιότητας A

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει αρχικά να ορισθεί ο συντελεστής κατασκευής και ποιότητας A. Συνεπώς, ο συντελεστής κατασκευής και ποιότητας A εκφράζει πόσο πλησιάζει η συμπεριφορά της διόδου την θεωρητική, όπου η επαφή p-n είναι ιδανική και δεν παρουσιάζεται καμία επανασύνδεση φορέων εντός της περιοχής ανταλλαγής φορτίου. Επομένως, από τον ορισμό μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι όταν ο συντελεστής είναι 1 μπορεί να γίνει η υπόθεση της ύπαρξης ιδανικής διόδου, ενώ όταν ο συντελεστής κατασκευής και ποιότητας προσεγγίζει το 2 σημαίνει πως υπάρχει σε μεγάλο βαθμό επανασύνδεση φορέων.

### 3.1.2.4 Η αντίσταση σειράς $R_s$

Από το θεωρητικό υπόβαθρο που εξετάστηκε παραπάνω το συμπέρασμα ήταν πως η διέλευση των φορέων μέσα από τον εκάστοτε ημιαγωγό εμποδίζεται κατά κύριο λόγο από την αντίσταση σειράς  $R_s$ . Για να είναι πιο κατανοητή η δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου, παραθέεται το παρακάτω σχήμα. Επίσης, στην Εικόνα 32 διαφαίνονται και αναλυτικότερα ακόμα και οι αντιστάσεις από τις οποίες αποτελείται η αντίσταση σειράς.





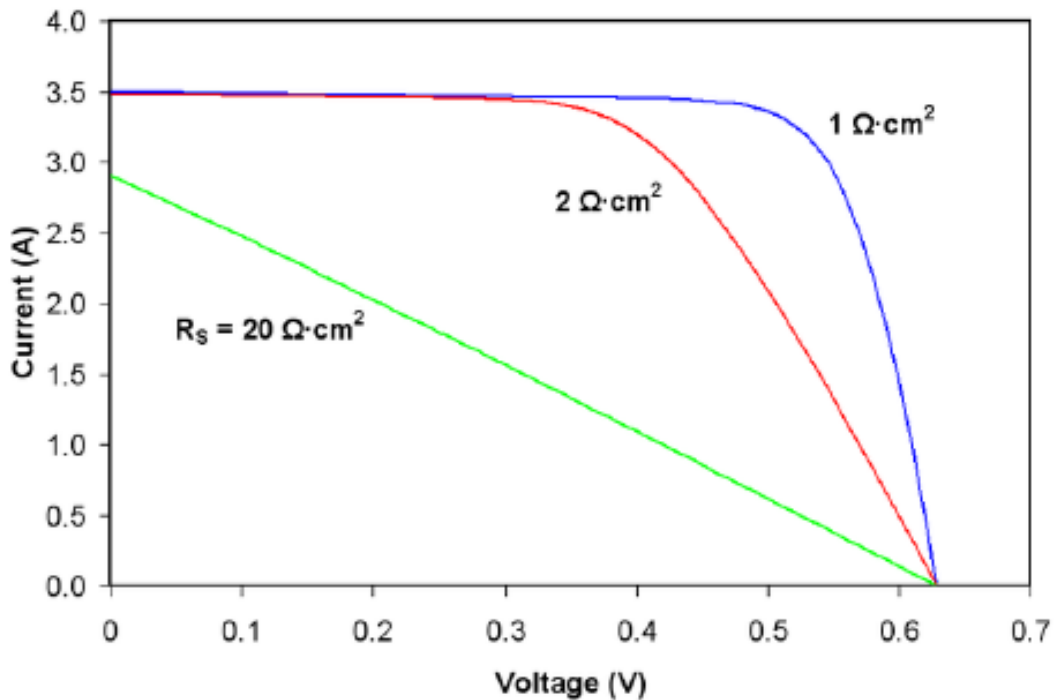
Εικόνα 32: Αντιστάσεις που αποτελούν την αντίσταση σειράς του φωτοβολταϊκού στοιχείου [11]

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3) θα αναλυθούν οι εκφράσεις για τις διάφορες αντιστάσεις, οι οποίες όπως είναι γνωστό αποτελούν την αντίσταση της σειράς  $R_s$ . Οι Tomas Markvart & Luis Castaner αναφέρουν πιο συγκεκριμένα πως «η  $R_{sp}$  είναι η αντίσταση επιφάνειας του εκπομπού (  $\Omega$ /τετράγωνο ),  $\rho_{cf}$  και  $\rho_{cr}$  είναι οι ειδικές αντιστάσεις της μπροστινής και της πίσω επαφής,  $\rho_b$  είναι η ειδική αντίσταση της βάσης και  $\rho_m$  είναι η ειδική αντίσταση των μπροστινών αγώγιμων ελασμάτων» .

Πίνακας 3: Τύποι υπολογισμού αντίστασης των στοιχείων της  $R_s$  [ 11]

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	$R_f$	$R_f = \frac{l_f\rho_m}{3t_fW_f}$
Αντίσταση ζυγού	$R_{bb}$	$R_{bb} = \frac{\rho_m}{3t_fW_{bb}}$

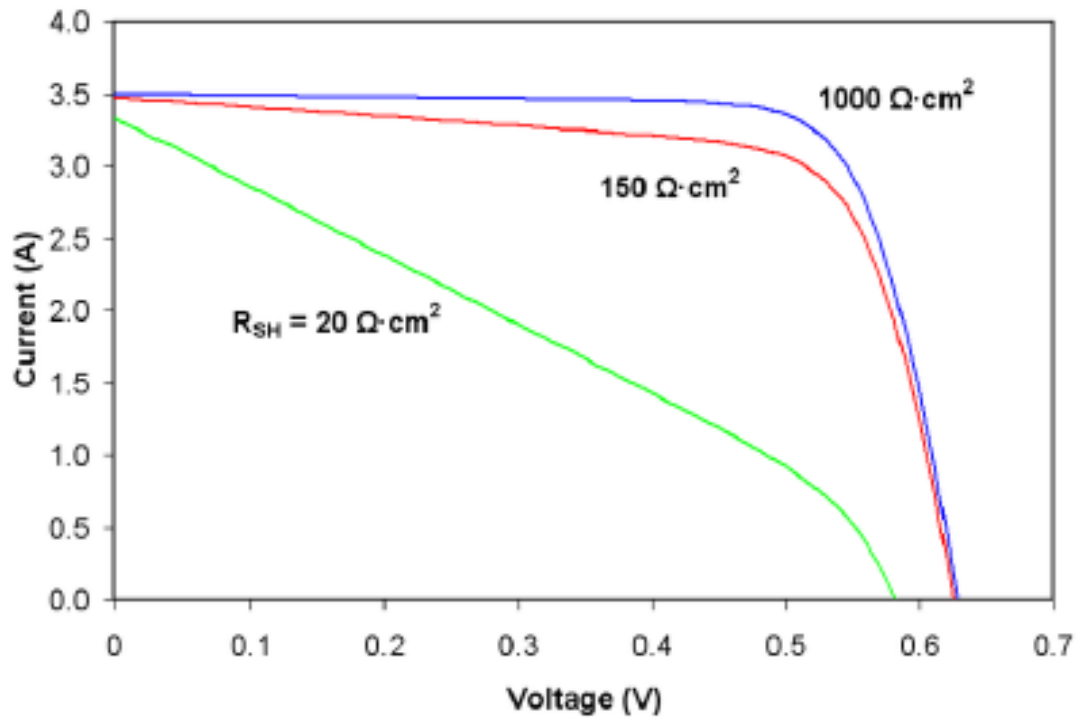
Θεωρώντας ότι η τιμή της αντίστασης σειράς αυξάνεται, τότε η πτώση τάσης στα άκρα της αυξάνεται για την ίδια τιμή της έντασης του ρεύματος, με αποτέλεσμα να μειωθεί η τάση  $V$  στα άκρα του φορτίου άρα και του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  για μεγάλες τιμές της  $R_s$ , ενώ η τάση ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$  παραμένει αμετάβλητη. Οι απώλειες υπολογίζονται από τη σχέση  $P=I^2R_s$  και αυξάνονται όσο αυξάνεται το  $I_{ph}$ , δηλαδή όσο αυξάνεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας [22].



Εικόνα 33: Χαρακτηριστική  $I-V$  5 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από  $R_s$  [22]

### 3.1.2.5 Η παράλληλη αντίσταση $R_{sh}$

Θεωρώντας ότι μειώνεται η παράλληλη αντίσταση, τότε θα συμβεί αύξηση της έντασης του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση  $R_{sh}$  για δεδομένη τιμή της τάσης  $V$  στα άκρα της, με αποτέλεσμα να μειωθεί η τιμή της έντασης του ρεύματος φορτίου  $I_L$  και συνεπώς της τάσης  $V_{oc}$ . Για μικρές τιμές της  $R_{sh}$  παρατηρείται αρκετή μείωση της τάσης  $V_{oc}$  [22].



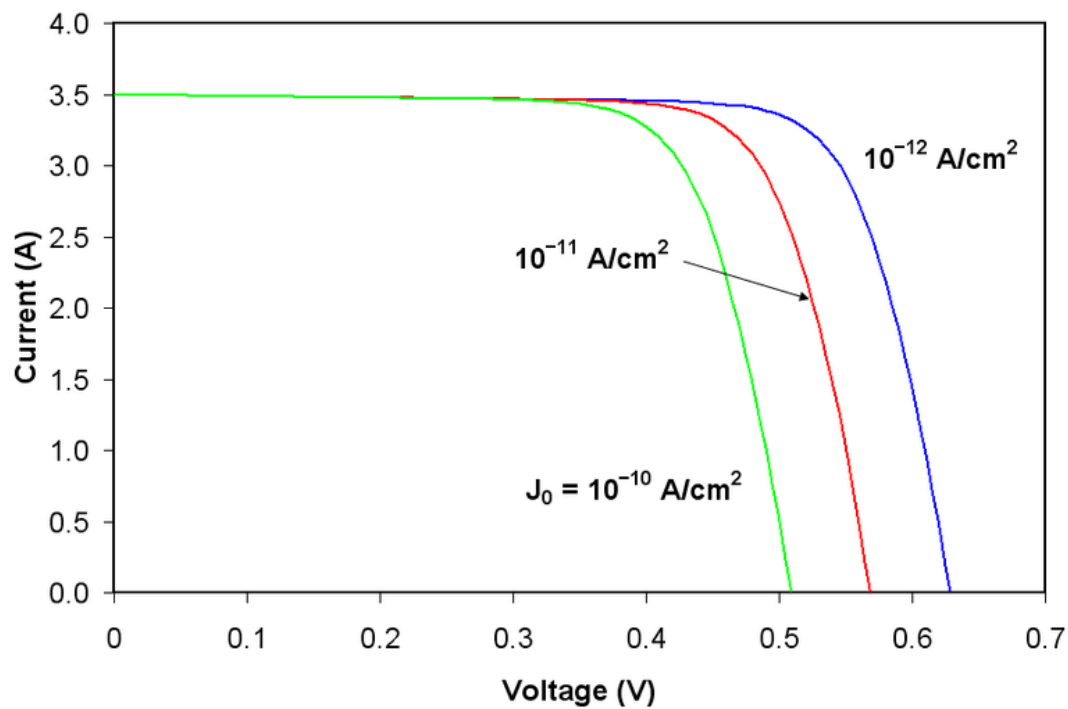
Εικόνα 34: Χαρακτηριστική I-V 6 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από Rsh [22]

### 3.1.2.6 Ανάστροφο ρεύμα κόρου

Θεωρώντας ότι η παράλληλη αντίσταση είναι άπειρη, τότε η χαρακτηριστική εξίσωση του κυκλώματος μπορεί να λυθεί ως προς  $V_{oc}$  :

$$V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (3.2)$$

Οπότε μία αύξηση του ρεύματος κόρου έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί η  $V_{oc}$ , η οποία είναι ανάλογη του αντίστροφου του λογαρίθμου.



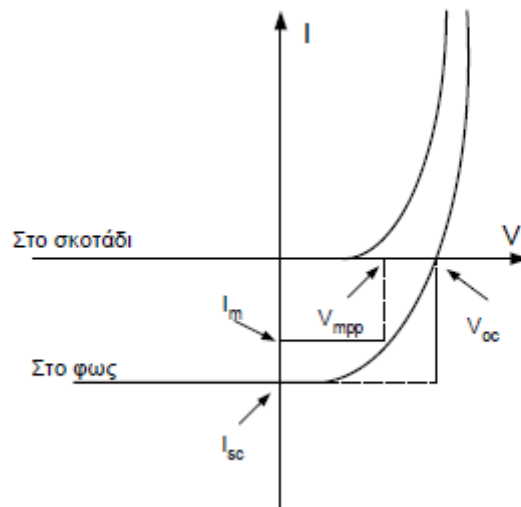
Εικόνα 35: Χαρακτηριστική I-V 7 : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από  $I_0$  [22]

### 3.2 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 καλείται συντελεστής πλήρωσης FF ( Fill Factor ).

$$FF = \frac{P_{mmp}}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{I_{m,pp} V_{m,pp}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (3.3)$$

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 36) ο συντελεστής πλήρωσης FF προσδιορίζεται 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  $V_{oc}$  [7].



Εικόνα 36: Χαρακτηριστική I-V δ : Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από το φως [7]

## 4 Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων

### 4.1 Ορισμός

Ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών ορίζεται ως «ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $P_{mmp}$  προς το γινόμενο της επιφάνειας  $A$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου και της έντασης ακτινοβολίας  $G$ ».

$$\eta = \frac{P_{mmp}}{AG} = \frac{I_{m\,pp} V_{mmp}}{AG} = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{AG} \quad (4.1)$$

Ακόμα «η απόδοση αυτή είναι πάντοτε μικρότερη από τη μέγιστη θεωρητική απόδοση  $\eta_{max,th}$ », η οποία ορίζεται από την παρακάτω σχέση.

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

Όπου :

- Με  $\phi$  ( $E_g$ ) συμβολίζεται η ροή των φωτονίων που έχουν ενέργεια με μεγαλύτερη τιμή από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού,
- Με  $\phi$  συμβολίζεται η συνολική φωτονική ροή στην ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο
- Με  $E_m$  συμβολίζεται η μέση ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας.

Επιπρόσθετα στην ηλιακή ακτινοβολία είναι γνωστό πως περίπου τα 2/3 των φωτονίων έχουν μεγαλύτερη ενέργεια από το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου (1,1eV), και πως η  $V_m$  των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου ίση με το 1/3 της  $E_m$  της ηλιακής ακτινοβολίας. Άρα, το συμπέρασμα είναι πως η μέγιστη θεωρητική απόδοση των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι περίπου :

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

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι μεταβλητός και καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη σύσταση της ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, από δύο δέσμες ακτινοβολίας με την ίδια ισχύ, η πρόσπτωση της δέσμης με τα περισσότερα φωτόνια θα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό στοιχείο [7].

## 4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης

### 4.2.1 Γενικά

Υπάρχουν ποικίλοι παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται ο βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, και μπορούν να διαχωριστούν είτε σε εσωτερικούς είτε εξωτερικούς.

Ως εσωτερικοί παράγοντες μπορούν να οριστούν:

1. τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού στοιχείου  $R_s$
2. τις οπτικές απώλειες

3. τη γήρανση
4. τη χωροταξική τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο
5. και τέλος την δίοδο αντεπιστροφής.

Ενώ, ως εξωτερικοί παράγοντες μπορούν να ορισθούν:

1. η ακτινοβολία
2. η σκίαση
3. η θερμοκρασία
4. ο άνεμος
5. η ρύπανση
6. και τέλος οι ηλεκτρικές απώλειες.

#### 4.2.2 Η αντίσταση $R_s$ (Series Resistance)

Η  $R_s$  (series resistance) δηλαδή η σειριακή αντίσταση αφορά την αντίσταση που παρουσιάζει η επαφή κατά τη δίοδο του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τη δίοδο και μέσα από τα ηλεκτρόδια της επαφής και τους μεταλλικούς κλάδους αυτών. Για την συγκεκριμένη εργασία είναι φρόνιμο να ληφθεί το  $R_s$  ως ένας παράγοντας που διαδραματίζει ιδιαίτερο και σημαντικό ρόλο στο βαθμό απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου καθώς «όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ της όψης του στοιχείου και της ένωσης  $p-n$ , τόσο αυξάνεται και η αντίσταση, συνεπώς και οι απώλειες ισχύος». Άρα, το συμπέρασμα είναι πως για να είναι δυνατόν να ληφθεί ο μέγιστος βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η σειριακή αντίσταση  $R_s$ .

#### 4.2.3 Η γήρανση

Η πάροδος του χρόνου όπως σε όλα τα συστήματα επιφέρει φθορές. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η φθορά που υφίστανται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και γενικότερα η φθορά που υφίστανται όλα τα αναπόσπαστα μέρη που απαρτίζουν και ολοκληρώνουν το σύνολο του φωτοβολταϊκού συστήματος επιφέρουν βαθμιαία μικρή πτώση στην ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος της τάξεως 1% έως 2% κατ' έτος [7].

#### **4.2.4 Οι οπτικές απώλειες**

Αρχικά, ορίζονται οι οπτικές απώλειες ως η διαφορά που παρατηρείται στην ανακλαστικότητα του φωτοβολταϊκού πλαισίου (υαλοπίνακας, αντανακλαστικό επίστρωμα και υλικό των φωτοβολταϊκών στοιχείων) από την αντίστοιχη σε STC (Standard Testing Conditions). Γενικότερα, η ανακλαστικότητα ενός οπτικού συστήματος όψεως φωτοβολταϊκού πλαισίου, σε σχέση με την αντίστοιχη και δεδομένη τιμή σε Π.Σ.Α (Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς) είναι ανάλογη της γωνίας πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στην επιφάνεια του, και συγκεκριμένα η ανακλαστικότητα αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η γωνία πρόσπτωσης και κυρίως αν οι γωνίες αυτές είναι μεγαλύτερες των 60 μοιρών.

Επιπρόσθετα, είναι καλό να επισημανθεί πως οπτικές απώλειες μπορούν να προκύψουν και με τη διαφοροποίηση του φάσματος της ακτινοβολίας. Δηλαδή, το  $A.M.=1.5$  ηλιακό φάσμα που ορίζεται από τις Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς, χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για να διαμορφωθούν οι προδιαγραφές απόδοσης των πλαισίων. Είναι ορθό να σημειωθεί πως στα φωτοβολταϊκά ευρείας φασματικής περιοχής η ετήσια παραγωγή του πλαισίου θεωρείται σχετικά ανεξάρτητη από τις μεταβολές του ηλιακού φάσματος, κυρίως καθώς οι διακυμάνσεις που διαφαίνονται στον βαθμό απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά την διάρκεια της ημέρας είναι σχετικά πολύ μικρές, με αποτέλεσμα αν τις εξεταστούν σε ετήσια βάση οριακά να εξαλείφονται.

Σε αντίθεση με τα ευρείας φασματικής περιοχής, το παραπάνω δεν ισχύει και για φωτοβολταϊκά στενής φασματικής περιοχής, όπου οι απώλειες κατά τη διάρκεια του έτους είναι σαφώς μεγαλύτερες άρα και σημαντικότερες.

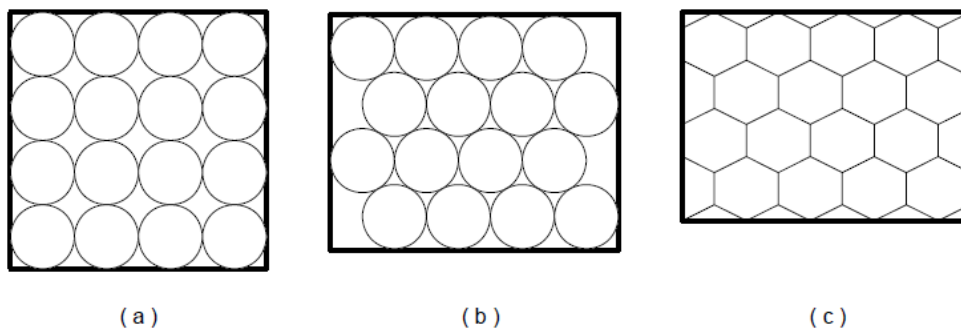
Επιπλέον υπάρχουν απώλειες και από άλλους παράγοντες, όπως οι απώλειες που προκύπτουν από την διαφοροποίηση της πόλωσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας, η οποία ποσοστιαία διαμορφώνεται περίπου στο 2% και ακόμα παρατηρούνται οπτικές απώλειες εξαιτίας των σχετικά χαμηλών τιμών της πυκνότητας που παρουσιάζει η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, η απόδοση ενός ηλιακού στοιχείου φαίνεται πως μειώνεται στις πολύ χαμηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, και μεγαλύτερη μείωση παρατηρείται σε τιμές μικρότερες των  $200 \text{ W/m}^2$ .



Βέβαια αν εξεταστούν πλαίσια υψηλής ποιότητας, αποδεικνύεται πως οι οπτικές απώλειες είναι μικρές, αν όχι άνευ σημασίας. Σε διαφορετικές περιπτώσεις οι παραπάνω απώλειες είναι σημαντικές και φτάνουν το 3% κατά μέσο όρο στην διάρκεια ενός έτους [22].

#### 4.2.5 Η χωροταξική τοποθέτηση

Η χωροταξική τοποθέτηση είναι σημαντικό να εξετάζεται καθώς είναι ο πλέον πιο σημαντικός παράγοντας, καθώς όσο πιο κοντά είναι τοποθετημένα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μεταξύ τους, τόσο μεγαλύτερος θα είναι και ο  $\sigma_k$  του πλαισίου, δηλαδή ο συντελεστής κάλυψης. Ως συντελεστής κάλυψης μπορεί να οριστεί «ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας του ημιαγωγού στον οποίο λαμβάνει χώρα η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, προς την συνολική επιφάνεια του πλαισίου».



Εικόνα 37: Τρεις συνηθισμένοι τρόποι παράθεσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων στα πλαίσια [7]

Ο συντελεστής κάλυψης παίρνει τιμές γύρω στο 0,78 για κυκλικά στοιχεία σε παράλληλα στοιχισμένες σειρές (a), 0,88 για κυκλικά στοιχεία που συγχωνεύονται μεταξύ τους (b) και πλησιάζει το 0,98 για υψηλότερου κόστους τετραγωνικά ή εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία (c) [7].

#### 4.2.6 Η διόδος αντεπιστροφής

Η εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή μέσω του φωτοβολταϊκού πλαισίου περιορίζεται και εμποδίζεται από την διόδο αντεπιστροφής. Συγκεκριμένα, όταν δεν προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία στο πλαίσιο το αποτέλεσμα είναι να προκαλείται απώλεια ενέργειας που αγγίζει και το 1%. Γενικότερα, ο συντελεστής διόδου της αντεπιστροφής είναι  $\sigma_d=0,99$  [30].

### **4.2.7 Η ακτινοβολία**

Η γεωγραφική θέση της εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς συνδέεται άμεσα με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, από την οποία εξαρτάται η ενέργεια που δύναται να παραχθεί στην διάρκεια ενός έτους από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Επίσης, σημαντικός είναι και ο προσανατολισμός που έχει το συγκεκριμένο πλαίσιο ως προς την θέση του ήλιου, καθώς επηρεάζει άρα και εξαρτάται από αυτή η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει εν τέλει στην επιφάνεια ενός συλλέκτη. Από τους παραπάνω παράγοντες οι οποίοι επισημάνθηκαν ως σημαντικοί, εξαρτάται η βελτιστοποίηση και η μεγιστοποίηση της ηλιακής ενέργειας που είναι εφικτό να προσληφθεί και για το λόγο αυτό, η τοποθέτησή του στην βέλτιστη γωνία κλίσης, καθώς και ο ορθός και κατάλληλος ως προς το περιβάλλον προσανατολισμός του θεωρείται ζωτικός για την επίτευξη του σκοπού εγκατάστασής τους, αν δεν είναι εφικτό να εφαρμοστούν στρεφόμενες βάσεις ενός ή δύο αξόνων. Θεωρείται δεδομένο, λοιπόν, πως ο τελικός σκοπός της εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι η αύξηση της πρόσληψης ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, και κατά συνέπεια σε μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ.

### **4.2.8 Η σκίαση**

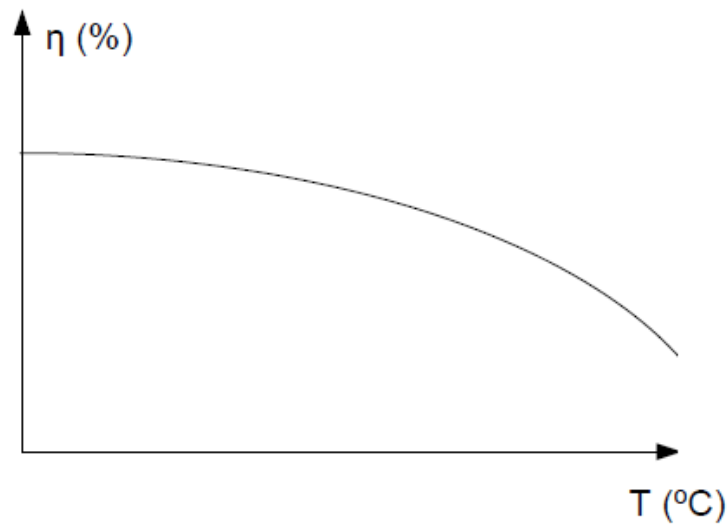
Σε αυτό το σημείο θα αναλυθεί πώς επιδρά σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο η σκίαση που αποτελεί ακόμα έναν εξωτερικό παράγοντα, ο οποίος θα πρέπει να μελετάται πριν την εγκατάσταση του συστήματος, καθώς επηρεάζει την τελική απόδοσή του. Η σκίαση εμφανίζεται όταν στον περιβάλλοντα χώρο ή γενικότερα στον ορίζοντα παρατηρούνται εμπόδια όπως είναι πυκνή και ψηλή βλάστηση, κτίρια κοκ, ή ακόμη και σε περιπτώσεις μικρής έκτασης της εγκατάστασης όπου παρουσιάζεται σκίαση από την μία σειρά φωτοβολταϊκών πλαισίων στην επόμενη. Τέτοια περίπτωση παρουσιάζεται όταν εγκαθίστανται τα πλαίσια στις στέγες κτιρίων, και είναι συνετό να προηγείται λεπτομερής σχεδιασμός και προσδιορισμός των απωλειών που προκαλεί η συγκεκριμένη διάταξη, καθώς η τελική επίπτωση της σκίασης ή ακόμα και μίας μεμονωμένης βλάβης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορεί να επιφέρει ολική αχρήστευση του συνολικού πλαισίου, δεδομένου ότι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, τουλάχιστον τυπικό, αποτελείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία ίδιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών συνδεδεμένων σε σειρά.

Ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο, μπορεί να υποτεθεί ότι κατά βάση λειτουργεί όπως η απλή δίοδος  $p-n$ , κατά την οποία, όταν ένα κύκλωμα είναι κλειστό δέχεται από τα υπόλοιπα υγιή φωτοβολταϊκά στοιχεία μία υψηλή και ανάστροφη τάση. Με τον κίνδυνο όμως, σε περίπτωση που τα υπόλοιπα φωτιζόμενα στοιχεία του πλαισίου είναι μεγάλου αριθμού, και τελικά η τάση αγγίζει την τάση διάσπασης της σκιασμένης διόδου, να καταστραφούν. Σε κάθε περίπτωση τουλάχιστον για τα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, μπορούν να περιγραφούν τα σκιασμένα στοιχεία ως μια μεγάλη αντίσταση, όπου τους αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν τα υπόλοιπα.

Γενικότερα όμως, όπως αναφέρεται παρακάτω ενέχει πάντα ο κίνδυνος του φαινομένου Hot Spot ή κατάστασης θερμής κηλίδας, όπου ο συνεχής σκιασμός ενός στοιχείου, πάντοτε σε συνδυασμό με έντονα φωτιζόμενα άλλα στοιχεία, οδηγεί σε καταστροφή του στοιχείου αυτού και μάλιστα χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασής του, αρά καταστρέφεται με αυτό τον τρόπο το συνολικό πλαίσιο. Σαν αντίμετρο λοιπόν, και με σκοπό να μην ενέχει αυτό το ενδεχόμενο, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι εξοπλισμένο με διόδους παράκαμψης, οι οποίες είναι παράλληλα συνδεδεμένες σε τμήματα των κυττάρων τα οποία είναι επίσης συνδεδεμένα σε σειρά. Ο λόγος που έχουν δημιουργηθεί οι συγκεκριμένες ‘παρακάμψεις’ είναι για να είναι εφικτό το φωτοβολταϊκό πλαίσιο να είναι χρηστικό, παρότι μπορεί ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο να έχει καταστραφεί, ή και να υστερεί γενικότερα.

#### **4.2.9 Η θερμοκρασία**

Η θερμοκρασία είναι επίσης σημαντικός παράγοντας για την ομαλή λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται ότι παρουσιάζεται και ανάλογη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού. Αυτό το γεγονός είναι υπεύθυνο για την πραγματοποίηση περισσότερων επανασυνδέσεων φορέων. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ισχυρό ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της  $V_{oc}$  και του FF. Ταυτόχρονα παρατηρείται και μείωση της τελικής απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Εικόνα 38: Χαρακτηριστική  $\eta-T$  : Τυπική καμπύλη της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου σε σχέση με τη θερμοκρασία τους [7]

Αυτό προκύπτει από την κάτωθι σχέση, δηλαδή αν ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία (π.χ.  $20^{\circ}\text{C}$ ) είναι  $\underline{\eta}$ , τότε η τιμή του σε μία διαφορετική θερμοκρασία  $\underline{\theta}$  προκύπτει:

$$\eta_{\theta} = \eta * \sigma_{\theta}$$

όπου  $\sigma_{\theta}$  είναι ένας αδιάστατος θερμοκρασιακός συντελεστής διόρθωσης της απόδοσης. Στη συγκεκριμένη θερμοκρασία το  $\sigma_{\theta}=1$  και μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης θερμοκρασίας, για τα τυπικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου που συναντώνται στο εμπόριο [7].

#### 4.2.10 Ο άνεμος

Εξετάζοντας ως παράγοντα τον άνεμο, για τον τρόπο που επηρεάζει τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου, προκύπτει πως η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει σημαντικά τη θερμοκρασία του στοιχείου. Και αυτό καθώς μεγάλες ταχύτητες ανέμου επιφέρουν και πιο χαμηλές θερμοκρασίες στην λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Γνωρίζοντας πως οι βόρειοι κυρίως άνεμοι είναι ψυχρότεροι, προκύπτει πως σε αυτή την περίπτωση τα φωτοβολταϊκά θα λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες πάντοτε σε σχέση με αυτές που θα λειτουργούσαν αν επικρατούσε άπνοια, κάτω από την ίδια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας. Το αντίστροφο αποτέλεσμα προκύπτει για ζεστούς ανέμους [26].

#### **4.2.11 Η ρύπανση**

Σημαντικός παράγοντας της μείωσης της ηλεκτροπαραγωγής των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η ρύπανση της επιφάνειάς τους από ποικίλους παράγοντες, όπως είναι για παράδειγμα η επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από την θάλασσα, εντόμων ή ακόμα και διάφορες ακαθαρσίες που προκύπτουν από περιβαλλοντικούς και άλλους παράγοντες. Μεγαλύτερη μείωση παρατηρείται, όπως είναι φυσικό, σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές, κυρίως εξαιτίας της αιθάλης που παράγεται από τους ρύπους και βρίσκεται στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα να προσκολλάται στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων χωρίς να μπορεί να ξεπλυθεί από το νερό της βροχής σε μεγάλο βαθμό. Για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις απαιτείται τακτικός καθαρισμός των πλαισίων με κατάλληλο απορρυπαντικό. Φυσικά, σε άλλες περιοχές, που εκτός από τους ρύπους υπάρχουν ζητήματα με συχνές χιονοπτώσεις ή ακόμα και με ανεμοθύελλες, τα πλαίσια τοποθετούνται κάθετα δηλαδή με κλίση  $90^\circ$  για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, και στις περιπτώσεις που δεν είναι εφικτό τοποθετούνται με κλίση τουλάχιστον  $45^\circ$  έτσι ώστε να μην συκρατείται σκόνη.

Πάντοτε, όταν το περιβάλλον στο οποίο τοποθετείται η φωτοβολταϊκή γεννήτρια εκτιμάται πως έχει υψηλό βαθμό ρύπανσης είναι αναγκαίο να μελετάται, ώστε να προβλεφθεί στους υπολογισμούς και η αναμενόμενη μείωση ηλεκτροπαραγωγής από τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο συντελεστής  $\sigma_p$ , ο οποίος είναι αδιάστατος συντελεστής καθαρότητας. Ο συντελεστής  $\sigma_p$  «είναι ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από ένα πλαίσιο με ρύπους στην επιφάνειά του ως προς την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει ένα απόλυτα καθαρό πλαίσιο». Η τιμή του συντελεστή καθαρότητας είναι τόσο μικρότερη από την μονάδα ( $\sigma_p < 1$ ), όσο μεγαλύτερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη κλίση έχει το πλαίσιο, όσο πιο σπάνιες είναι οι βροχοπτώσεις στην περιοχή και λοιπά [7].

#### **4.2.12 Οι ηλεκτρικές απώλειες**

Τέλος, εκτός από τους άνωθι παράγοντες που είναι απαραίτητο να μελετηθούν και να ληφθούν υπόψιν κατά την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, θα πρέπει να προβλεφθούν επίσης και οι ηλεκτρικές απώλειες των αγωγών που συνδέουν τα πλαίσια στις συστοιχίες, καθώς και οι συνδέσεις τους με τα υπόλοιπα τμήματα του συνολικού

συστήματος. Τέτοιου είδους συνδέσεις είναι για παράδειγμα οι διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, οι συσσωρευτές, οι μετατροπείς κ.ο.κ.

Άρα, είναι απαραίτητο, στο στάδιο κατά το οποίο υπολογίζεται η απαιτούμενη επιφάνεια για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, να συνυπολογίζεται και να προβλέπεται ανάλογα, βεβαίως, και με την περίπτωση και η κάλυψη των παραπάνω αναφερόμενων απωλειών. Η συγκεκριμένη πρόβλεψη είναι απαραίτητη, καθώς το ποσοστό των συγκεκριμένων απωλειών αγγίζει περίπου το 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή ακόμα μπορεί και να το ξεπεράσει.

## 5 Σκίαση

### 5.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση του παράγοντα της σκίασης, που όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τελική απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, άρα και την επιθυμητή παραγόμενη ισχύ. Ο συγκεκριμένος παράγοντας μπορεί να επηρεάζει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ακόμα και για μικρό χρονικό διάστημα από τυχαίο γεγονός, όπως για παράδειγμα συσσωρευμένη σκόνη σε κάποιο σημείο του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ιδιαίτερα στην κάτω ακμή του λόγω της κλίσης στην οποία έχει ενδεχομένως τοποθετηθεί, χώμα ή φύλλα, αν βρίσκεται παραπλήσια σε γεωργική έκταση, περιττώματα πουλιών ή ακόμα και από ρύπους που μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα από εργοστάσια που πιθανόν να συνορεύουν με το σημείο εγκατάστασης της φωτοβολταϊκής διάταξης. Επίσης, σκίαση μπορεί να προκληθεί και κατόπιν της εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, για παράδειγμα από την ανάπτυξη ενός δένδρου ή την τοποθέτηση στύλου της ΔΕΗ ή του ΟΤΕ ή κάποια μόνιμη εξωτερική κατασκευή, ακόμη και από χιόνι. Εν κατακλείδι, παρά τον αρχικό σχεδιασμό για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ενδέχεται μέρος αυτών ή ακόμα και ένα στοιχείο αυτών να παρουσιάσει σκίαση από παράγοντες που δεν είχαν υπολογιστεί, συνεπώς να μειωθεί η παραγόμενη ισχύς, παρόλο που το υπόλοιπο τμήμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να εκτίθεται σε κανονικές συνθήκες, δηλαδή σε μεγάλη ένταση ακτινοβολίας έως και  $1000\text{W/m}^2$ .

### 5.2 Ανάλυση των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων επιπτώσεων που προκαλούνται λόγω σκίασης

#### 5.2.1 Βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις

Όπως παρατηρείται επάνω στην επιφάνεια του πάνελ που προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία, υπάρχει ένα μεταλλικό πλέγμα επειδή είναι απαραίτητη η παρουσία ηλεκτροδίων και στις δύο επιφάνειες τύπου n και p. Σκοπός του παραπάνω μεταλλικού πλέγματος είναι η μείωση των ωμικών φαινομένων, αφού αυξάνονται τα σημεία απαγωγής των φορέων, δηλαδή οι ηλεκτρικές επαφές και πετυχαίνεται λιγότερη αντίσταση στην επιφανειακή τους κίνηση. Το

μεταλλικό πλέγμα παρ' όλα αυτά εκτρέπει την ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει επάνω στην επιφάνεια του πάνελ σε ποσοστό 5-15%.

Οι ηλεκτρικές επαφές που συνδέονται σε διάφορα σημεία στο φωτοβολταϊκό είναι υπεύθυνες για τις απώλειες λόγω της ηλεκτρικής αντίστασης. Επιλέγοντας ηλεκτρικές επαφές με αγωγούς μεγαλύτερης διατομής μειώνεται η αντίσταση, όμως ταυτόχρονα δεσμεύεται και ωφέλιμη επιφάνεια, αφού οι μεγαλύτεροι αγωγοί θα εμπόδιζαν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Στις ηλεκτρικές επαφές της επάνω επιφάνειας δίνεται η μορφή πλέγματος με μεγάλο αριθμό λεπτών αγωγίμων δαχτύλων σαν μία αραιή μεταλλική σχάρα.

Είναι απαραίτητο να γίνεται συλλογή φορέων και από τα δύο υλικά τύπου n και p. Ακόμα, λόγω της αυξημένης αντίστασης της επιφανειακής κίνησης των φορέων που παρατηρείται στην επάνω επιφάνεια του στοιχείου είναι πολύ σημαντικός ο μεγάλος αριθμός επαφών για να μπορεί να γίνει συλλογή φορέων από αρκετά σημεία. Με την παρουσία του ολόκληρου πλέγματος, οι απώλειες λόγω σκίασης αυξάνονται, καθώς το 5-15 % του φωτός που πέφτει στο πάνελ χάνεται λόγω εκτροπής. Με αυτόν τον τρόπο οι απώλειες εξαιτίας της σκίασης είναι γύρω στο 10 % της ισχύος εισόδου από την ηλιακή ακτινοβολία. Παρ' όλα αυτά η κατασκευή ενός μεταλλικού πλέγματος το οποίο συνδυάζει καλή ηλεκτρική επαφή με το στοιχείο και αντίσταση στις φθορές εξαιτίας των μεταβολών της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Σε αντίθεση με την επάνω επιφάνεια, στην πίσω επιφάνεια του πάνελ τα πράγματα είναι πιο απλά, αφού συνήθως αποτελείται από ένα απλό μεταλλικό στρώμα. Διαφορετικά, κάποιες φορές συναντώνται όλα τα εξαρτήματα τοποθετημένα στην πίσω επιφάνειά του.

Τέλος, ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει αρνητικά την απόδοση των φωτοβολταϊκών είναι η παρουσία σκόνης, φύλλων, περιττωμάτων πουλιών και άλλων ακαθαρσιών στην επιφάνειά τους, οπότε ανά τακτά χρονικά διαστήματα πρέπει να καθαρίζονται.

## **5.2.2 Μακροπρόθεσμες επιπτώσεις (γήρανση)**

Το φωτοβολταϊκό κύτταρο αποτελεί μέρος του φωτοβολταϊκού πλαισίου, οπότε μια υποβάθμισή του συνεπάγεται ταυτόχρονα και υποβάθμιση ολόκληρου του πλαισίου έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσής του. Αυτή η μείωση της απόδοσης, άρα και της ισχύος αιχμής ορίζεται ως γήρανση του φωτοβολταϊκού πάνελ. Κάποιες από τις αιτίες που προκαλούν γήρανση είναι κάποια ρωγμή στη γυάλινη επιφάνεια, ο αποχρωματισμός των



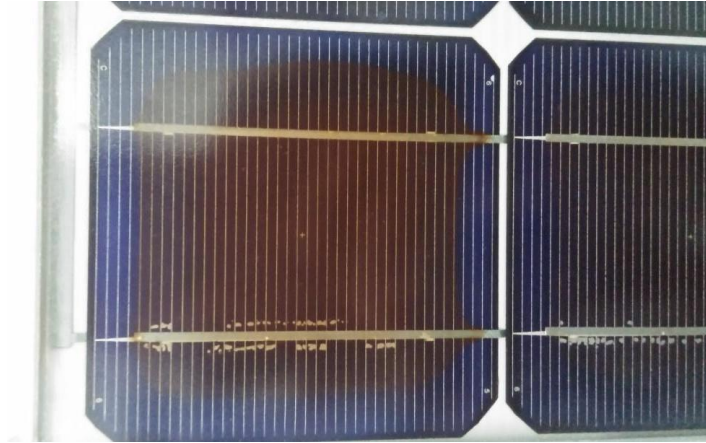
στοιχείων, προβλήματα στη λειτουργία των καλωδιώσεων και των συνδέσεων του κιβωτίου (πχ φαινόμενο θερμής κηλίδας ή hot spot) και η υγρασία που προκαλεί διαχωρισμό στο ειδικό πλαστικό μόνωσης.

Παρόλα αυτά οι παραπάνω αιτίες δεν αχρηστεύουν το πάνελ στο σύνολό του, αλλά μειώνουν την παραγωγή ισχύος. Άρα, θεωρείται σκόπιμο κατά το σχεδιασμό μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης να υπολογίζεται και η επικείμενη μείωση απόδοσης με την πάροδο του χρόνου με βάση έναν τυπικό συντελεστή γήρανσης. Σύμφωνα με μετρήσεις στην πάροδο μεγάλου χρόνου συμπεραίνεται ότι ο τυπικός συντελεστής γήρανσης είναι -1% ανά έτος.



*Εικόνα 39: Γήρανση σε φωτοβολταϊκό πλαίσιο μετά από πολυετή χρήση, λόγω σκίασης. Παρατηρείται το ξεθώριασμα του μπλε χρώματος, καθώς και η οξείδωση στους μεταλλικούς αγωγούς.*

Εκτός από τη σκίαση και ο ανθρώπινος παράγοντας παίζει ρόλο στη γήρανση των φωτοβολταϊκών. Σε περίπτωση που αμεληθεί ο τακτικός έλεγχος και συντήρησή τους θα παρουσιαστούν αρκετά προβλήματα που με την πάροδο του χρόνου θα συσσωρευτούν και θα προκαλέσουν ζημιές στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά μέρη της εγκατάστασης. Επίσης μπορεί ο άνθρωπος να μην προκαλεί άμεσα βλάβη στα πάνελ αλλά και αυτά επηρεάζονται αρνητικά αν η όλη εγκατάσταση δε λειτουργεί σωστά. Ακόμα, με το πέρασμα του χρόνου τα φαινόμενα του καιρού και κυρίως η σκόνη, η τέφρα και άλλα που εμπεριέχονται στον αέρα προκαλούν επίσης προβλήματα στην εγκατάσταση.



Εικόνα 40: Φαινόμενο E.V.A. Browning. Σκίαση σε μεγάλο βαθμό, που προκάλεσε την αλλαγή χρώματος σε καφέ και κατά συνέπεια τη γήρανση του στοιχείου.

Το συμπέρασμα λοιπόν είναι ότι εκτός από την πάροδο του χρόνου και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες που προκαλούν αναπόφευκτα μείωση της απόδοσης και ο άνθρωπος αν δε συντηρεί σωστά την εγκατάσταση με διόρθωση των βλαβών που εμφανίζονται και καθαρισμό τους όταν αυτός απαιτείται συμβάλει στη γήρανση της εγκατάστασης.

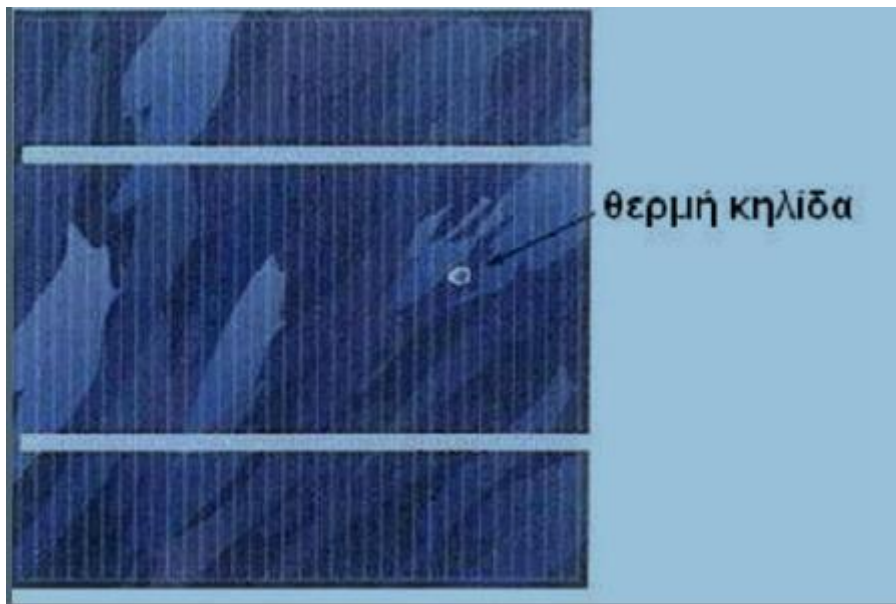
### 5.3 Φαινόμενο θερμών κηλίδων ( hot-spot effect )

Αποτέλεσμα του παράγοντα της σκίασης, μπορεί να είναι το φαινόμενο των θερμών κηλίδων, ή όπως απαντάται στην αγγλική ορολογία Hot-Spot effect. Το συγκεκριμένο φαινόμενο, αξίζει να σημειωθεί πως παρατηρήθηκε με τα πρώτα κιόλας βήματα του ανθρώπου στο διάστημα, καθώς τα πρώτα φωτοβολταϊκά πλαίσια κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν προς εκμετάλλευση της ανεξάντλητης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μέσω των ταξιδιών αυτών που χρησιμοποιήθηκαν και ως τα πρώτα πειράματα της λειτουργίας τους, εξακριβώθηκε και με τεκμήρια πλέον σε σχετικά περιορισμένο χρόνο το φαινόμενο των θερμών κηλίδων. Δηλαδή το hot-spot effect μπορεί να δημιουργηθεί από αστοχία του υλικού ενός από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία από τα οποία αποτελείται μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια, ή από μερική σκίαση ή ακόμη και από τη μη ορθή σύνδεση της πολικότητας των στοιχείων.

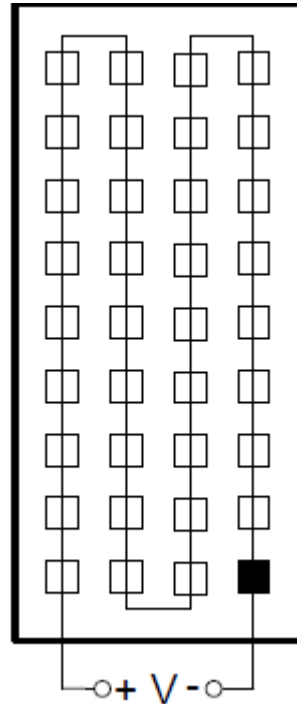
Μπορεί να αναφερθεί πως αποτέλεσμα του φαινομένου των θερμών κηλίδων είναι η υπερθέρμανση των μερικώς κατεστραμμένων ή μη ορθά λειτουργικών στοιχείων, γεγονός

που οδηγεί στην ολική καταστροφή αυτών. Αξίζει, επίσης να σημειωθεί πως το hot-spot effect λαμβάνει χώρα όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο παράγει πιο χαμηλό ρεύμα, σε σχέση με τα άλλα που είναι συνδεδεμένα σε σειρά [32], [33].

Στην παρακάτω Εικόνα 41 φαίνεται ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο έχει σκιασθεί και συνδέεται σε σειρά με τα υπόλοιπα στοιχεία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Ως χαρακτηριστική του κυκλώματος ορίζεται ένας συνδυασμός της χαρακτηριστικής των καλών στοιχείων με αυτήν του σκιασμένου στοιχείου.

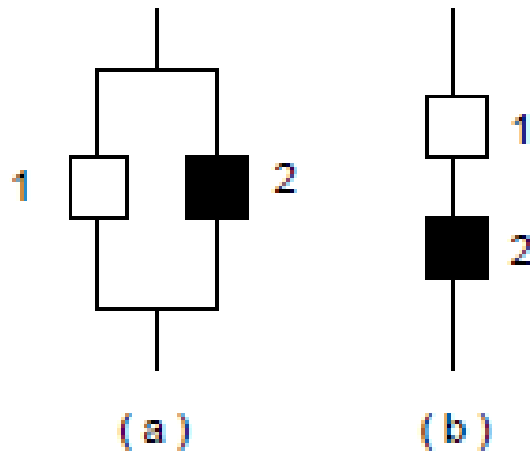


*Εικόνα 41: Θερμή κηλίδα σε φωτοβολταϊκό στοιχείο*

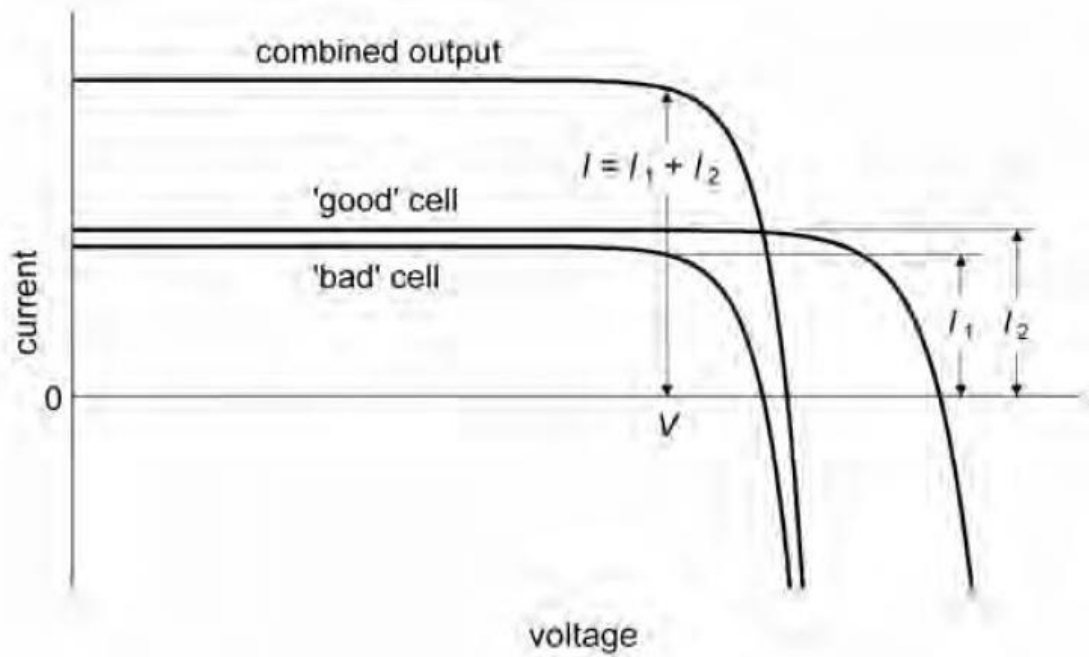


Εικόνα 42: Διάταξη φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά

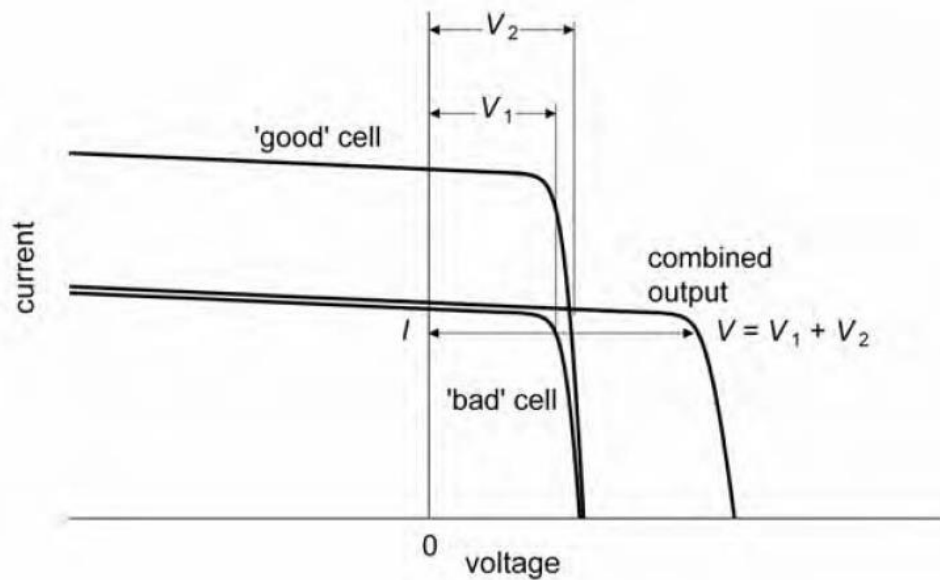
Ο τρόπος που έχει συνδεθεί το σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο με τα υπόλοιπα, δηλαδή σε σειρά ή παράλληλα, καθορίζει και τη χαρακτηριστική εξόδου του κυκλώματος [34].



Εικόνα 43: Τρόπος σύνδεσης (a) Παράλληλα (b) Σε σειρά [34]



Εικόνα 44: Χαρακτηριστική I-V 9: I-V με σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο σε παράλληλη σύνδεση [34]

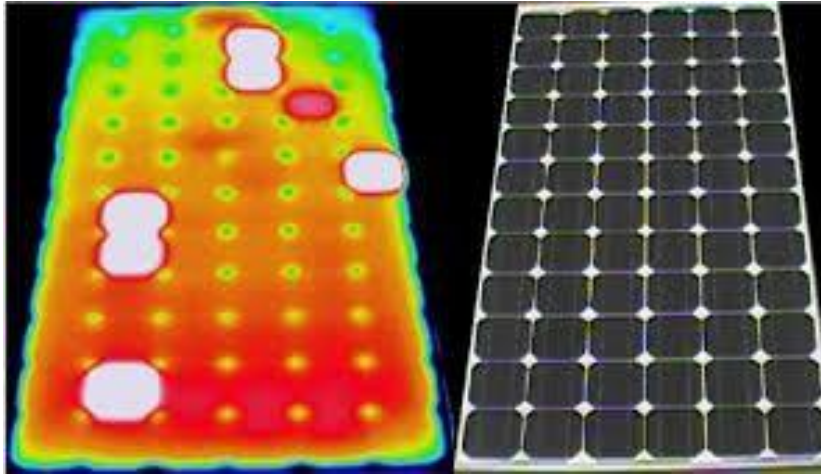


Εικόνα 45: Χαρακτηριστική I-V 10 : με σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο σε σύνδεση σε σειρά [34]

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  $V_{oc2}$ .

Όπως διαφαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα αλλά και από εκείνα που θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες, ένα σκιασμένο στοιχείο, το οποίο συνδέεται με τα υπόλοιπα στοιχεία του πλαισίου σε σειρά, μειώνει το ρεύμα διαμέσου των μη σκιαζόμενων στοιχείων, με αποτέλεσμα τα πλήρως λειτουργικά στοιχεία να παράγουν υψηλότερη τάση. Αποτέλεσμα αυτής της υψηλότερης τάσης μπορεί να είναι η αναστροφή της πόλωσης του σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου, κάτι που επιτρέπει να περνάει πολύ ρεύμα. Το αποτέλεσμα είναι η αυξημένη κατανάλωση ισχύος πάνω στο κακό φωτοβολταϊκό στοιχείο, με άλλα λόγια η παραγόμενη ισχύς από τα καλά στοιχεία καταναλώνεται από το κακό στοιχείο. Έτσι, η ενέργεια που διαρρέει το σκιασμένο στοιχείο μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια, δηλαδή σε θερμότητα, και είναι πιθανό να προκαλέσει ράγισμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου ή ακόμα και να το λιώσει αν ληφθεί υπόψιν πως οι θερμοκρασίες μπορούν να αγγίξουν και τους  $150^{\circ}\text{C}$ . Είναι αντιληπτό λοιπόν, πως θερμοκρασίες αυτής της τάξεως δεν είναι καθόλου επιθυμητές για ευρείας χρήσης τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Πλέον, λειτουργεί σαν μια μικρή αντίσταση ή διαφορετικά σαν ένα φορτίο το οποίο παίρνει ισχύ από τα υπόλοιπα (καλά) στοιχεία. Η πιο δύσκολη περίπτωση είναι όταν μια ολόκληρη αλυσίδα βραχυκυκλωθεί και η τάση των καλών στοιχείων εφαρμόζεται απ' ευθείας στο σκιασμένο. Σε αντίθεση με την περίπτωση της υπερθέρμανσης, όπου μόνο ένα στοιχείο σκιάζεται ή δε λειτουργεί σωστά, στην περίπτωση των δύο σκιασμένων στοιχείων ή μη λειτουργικών η θέρμανση δεν είναι πια τόσο τοπική και βρίσκεται ακόμα σε ανεκτά επίπεδα.

Εάν καταστραφεί το ένα από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του πλαισίου οδηγείται σε ολική του αχρήστευση, διότι δεν μπορεί να γίνει μεμονωμένη αντικατάσταση του ενός μόνο στοιχείου.



Εικόνα 46: Φαινόμενο θερμής κηλίδας με διαγνωστική θερμοκάμερα. Τα ανοιχτόχρωμα κομμάτια έχουν υποστεί το φαινόμενο.



Εικόνα 47: Φαινόμενο θερμής κηλίδας

Για το λόγο αυτό, κατέστη απαραίτητο να εξευρεθεί λύση, έτσι ένα μεμονωμένο ‘κακό’ στοιχείο να μην καταστρέφει ολικά το πλαίσιο. Η λύση που εφαρμόστηκε, ήταν ουσιαστικά η δημιουργία και η χρήση μιας παρακαμπτήριας διόδου.

## **5.4 Δίοδοι διέλευσης και αντεπιστροφής**

Όταν γίνεται η τοποθέτηση των πλαισίων μας πρέπει η θέση τους να είναι η οριζόντια και όχι η κάθετη. Συνήθως στα πλαίσια υπάρχουν εγκατεστημένοι και δίοδοι bypass που λειτουργούν σε συνθήκες σκίασης ή καταστροφής κάποιων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, οι δίοδοι τοποθετούνται παράλληλα σε κάθε στοιχείο. Όταν σε μια συστοιχία φωτοβολταϊκών στοιχείων παρουσιαστεί βλάβη σε ένα από αυτά ή σκίαση, τότε το ρεύμα ρέει μέσω του ελαττωματικού στοιχείου ή του σκιασμένου, το οποίο λειτουργεί ως αντίσταση για τα υπόλοιπα και υπάρχει σοβαρή πιθανότητα ζημιάς λόγω της υπερθέρμανσης του. Η χρήση της διόδου βοηθά το κύκλωμα παρακάμπτοντας το ελαττωματικό ή σκιασμένο στοιχείο ώστε να μην προκληθεί κάποια ζημία. Επίσης, αν ο λόγος που ένα στοιχείο δε λειτουργεί είναι η σκίαση λόγω φύλλων ή σκόνης, όταν τα παραπάνω απομακρυνθούν, το στοιχείο μας δε θα μπορεί να παράγει τα μέγιστα ποσά ενέργειας βάση προδιαγραφών του λόγω της υπερθέρμανσής του. Ως γνωστόν, η απόδοση των φωτοβολταϊκών κυψελών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας τους. Οι παραπάνω δίοδοι ονομάζονται δίοδοι διέλευσης ή Bypass Diodes.

Όταν λοιπόν η κάτω σειρά του πάνελ είναι σκιασμένη και το πάνελ μας είναι σε οριζόντια θέση, το πάνελ εξακολουθεί να λειτουργεί με ένα ποσοστό ισχύος της τάξης του 50% ή και μικρότερο. Αυτό συμβαίνει επειδή μόνο η μια δίοδος bypass είναι σε λειτουργία. Εάν όμως το πάνελ μας είναι κάθετα τοποθετημένο και είναι σκιασμένη η κάτω σειρά του ολόκληρη ή μέρος της, τότε και οι δύο δίοδοι είναι σε λειτουργία και το ποσοστό ισχύος της εξόδου πλησιάζει το μηδέν.

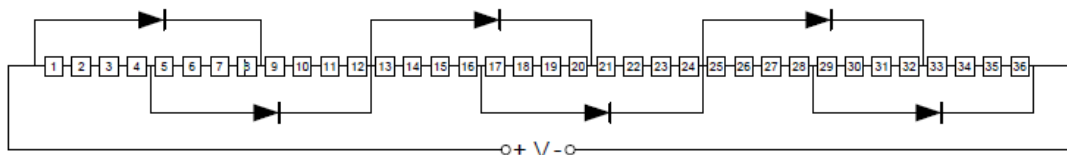
Ακόμα, εάν μετά από μια μελέτη είναι γνωστό ότι σε κάποια πάνελ είναι αδύνατο να αποφευχθεί εντελώς η σκίαση σε ένα σημαντικό ποσοστό είναι χρήσιμο τα συγκεκριμένα πάνελ να συνδεθούν σε διαφορετική ομάδα από τα υπόλοιπα, ώστε να μην επιφέρουν



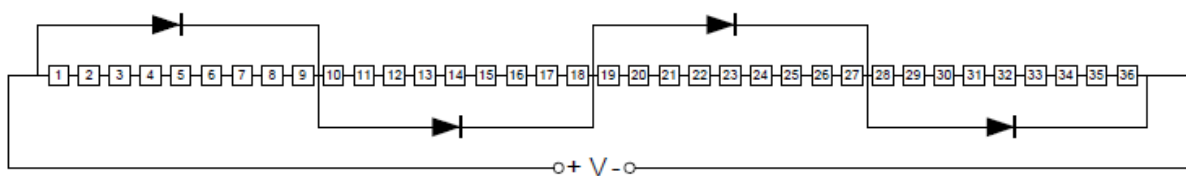
επιπλέον απώλειες σε όλο το σύστημα. Συνηθίζεται όταν δεν είναι εφικτό να περιοριστεί η σκίαση να χρησιμοποιείται άμορφο πυρίτιο που παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε συνθήκες σκίασης.

Κατ' αντιστοιχία είναι σημαντική και η λειτουργία των διόδων αντεπιστροφής. Όταν σουρουπώνει και πριν σκοτεινιάσει εντελώς παρατηρείται ότι τα φωτοβολταϊκά παράγουν τάση μικρότερη από αυτή της μπαταρίας, όπου αποθηκεύεται η παραγόμενη ενέργεια. Σε αυτήν την περίπτωση με την τάση της μπαταρίας να είναι μεγαλύτερη από την παραγόμενη του φωτοβολταϊκού, το ρεύμα θα προσπαθήσει να αντιστρέψει τη φορά του κι εκεί είναι που οι διόδους αντεπιστροφής (Blocking Diodes) δε θα επιτρέψουν αυτό το φαινόμενο, που θα είχε ως συνέπεια την αποφόρτιση της μπαταρίας κατά τις νυχτερινές ώρες. Για να προστατευτεί η φωτοβολταϊκή γεννήτρια θα ήταν εύλογο να δημιουργούνταν μία διάταξη για κάθε ένα στοιχείο ξεχωριστά, κάτι που στην πράξη δεν μπορεί να συμβεί, καθαρά λόγω του υψηλού κόστους.

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

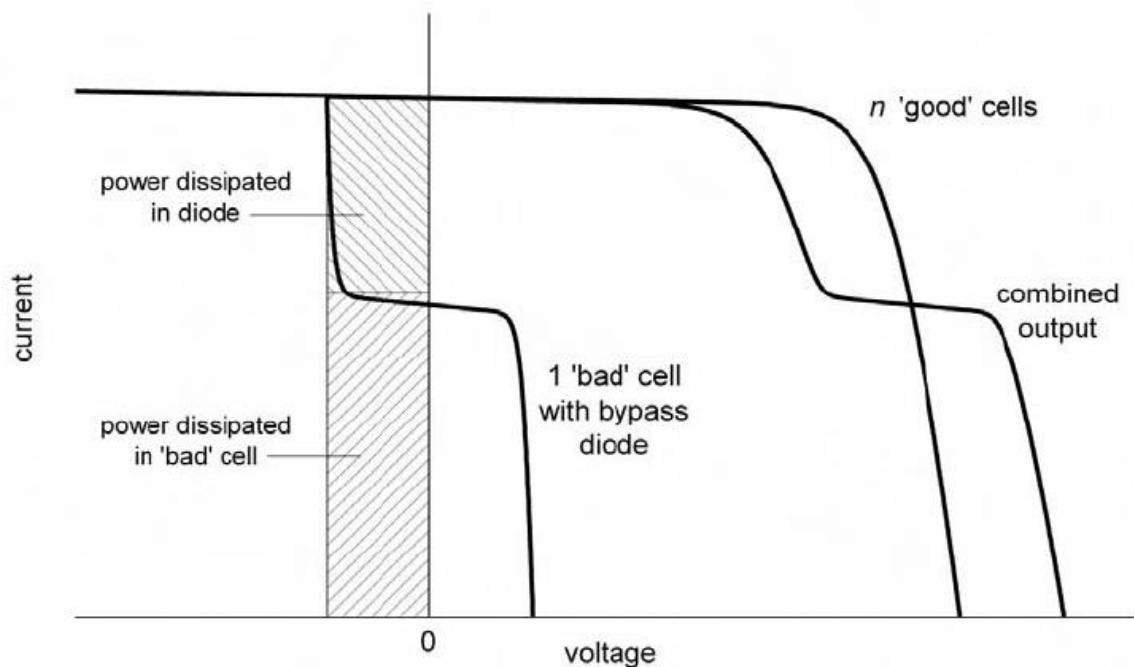


Εικόνα 48: Διάταξη με στοιχεία που αλληλεπικαλύπτονται [35]



Εικόνα 49: Διάταξη με στοιχεία που δεν αλληλεπικαλύπτονται [35]

Όταν το κύκλωμα, λοιπόν, προστατεύεται από διόδους παράκαμψης, τότε η τελική χαρακτηριστική του κυκλώματος είναι σχεδόν ίση με την έξοδο ενός καλού στοιχείου [34].

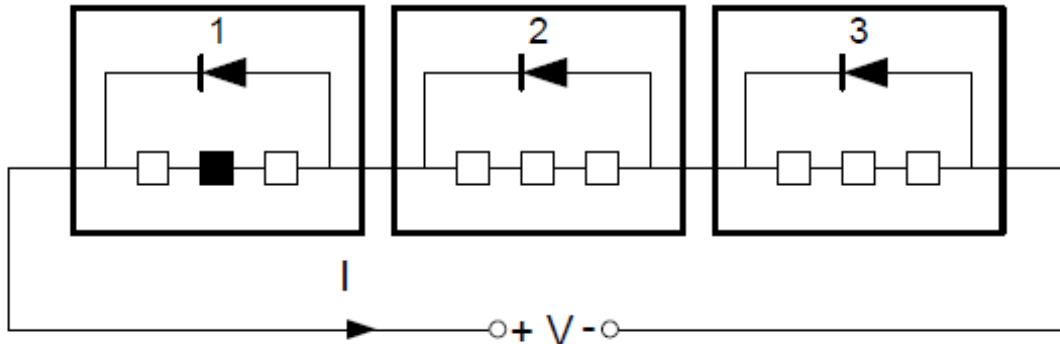


Εικόνα 50: Χαρακτηριστική I-V 13 : Επίδραση σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου όταν υπάρχει διόδος παράκαμψης στο κύκλωμα [34]

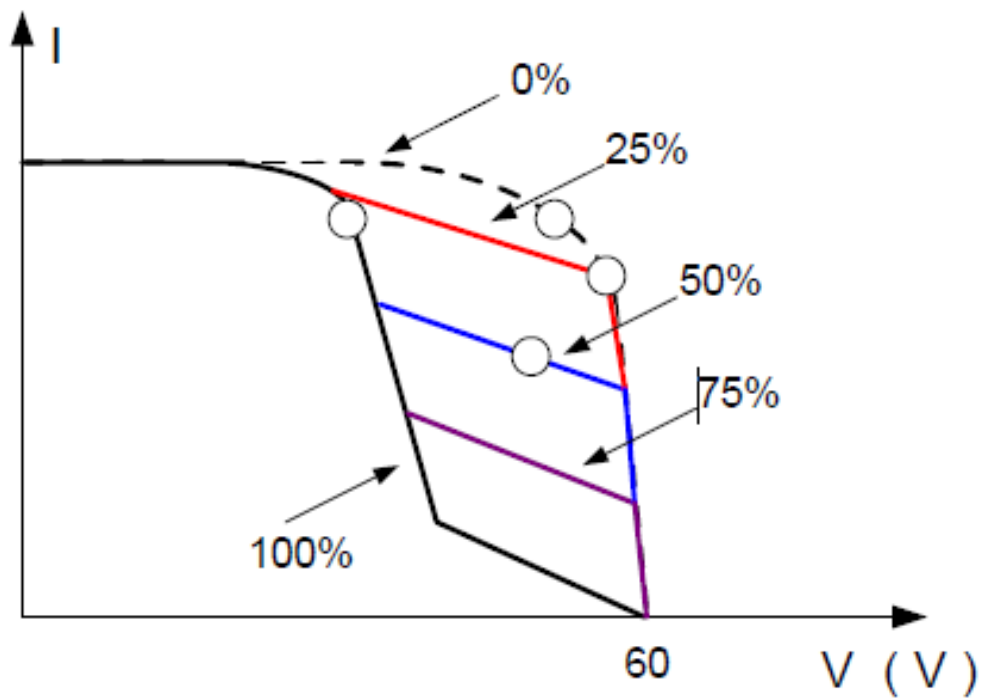
## 5.5 Επίδραση της ποσοστιαίας σκίασης

Η μερική σκίαση ενός στοιχείου επηρεάζει το βαθμό απόδοσης ολόκληρου του πλαισίου, ανάλογα με το ποσοστό της και τον αριθμό των στηλών που είναι συνδεδεμένες σε σειρά μεταξύ τους.

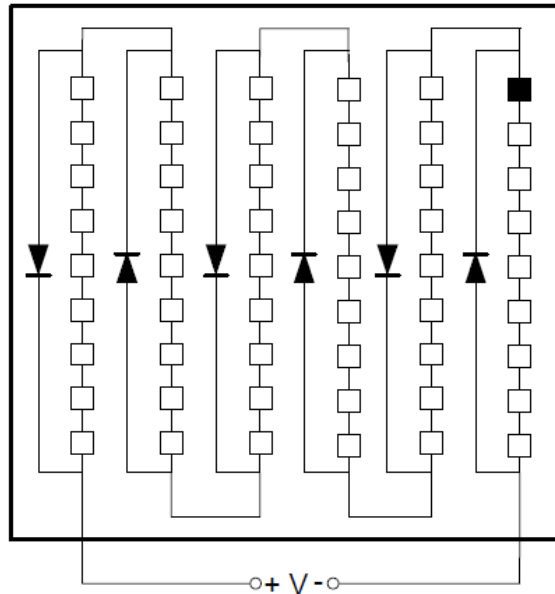
Παρακάτω παρατηρούμε στις εικόνες ένα κύκλωμα με 3 στήλες συνδεδεμένες σε σειρά, ένα κύκλωμα με 6 στήλες συνδεδεμένες σε σειρά καθώς και τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές I-V για διαφορετικό ποσοστό μερικής σκίασης. Στους κύκλους αντιστοιχούν τα σημεία μέγιστης ισχύος [26].



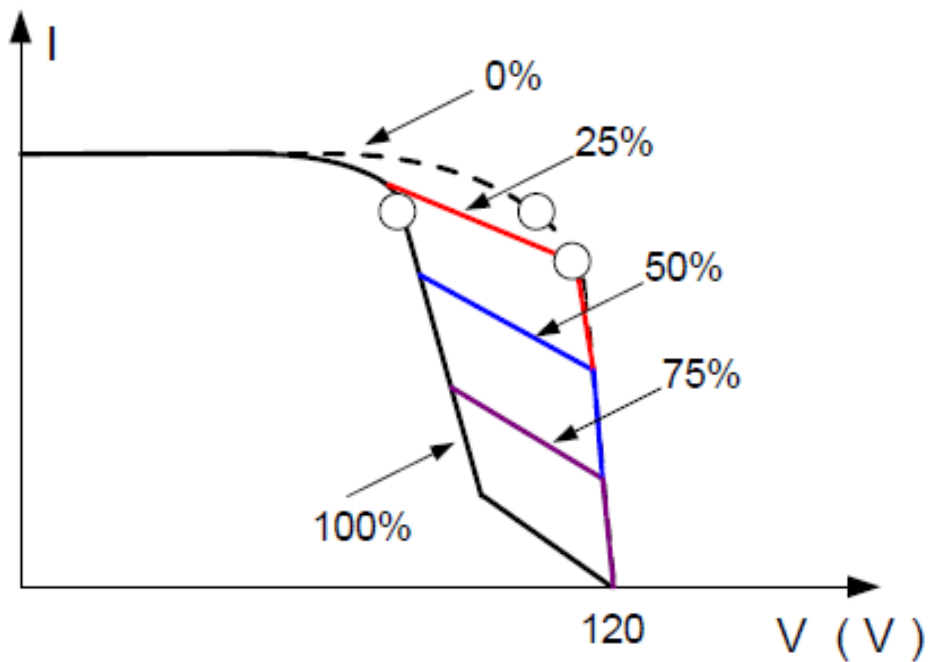
Εικόνα 51: Τρεις στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα σκιασμένο στοιχείο [26]



Εικόνα 52: Χαρακτηριστική I-V 14 : Τριών στηλών εξαρτώμενη από την ποσοστιαία σκίαση ενός στοιχείου [26]



Εικόνα 53: Έξι στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα σκιασμένο στοιχείο [26]



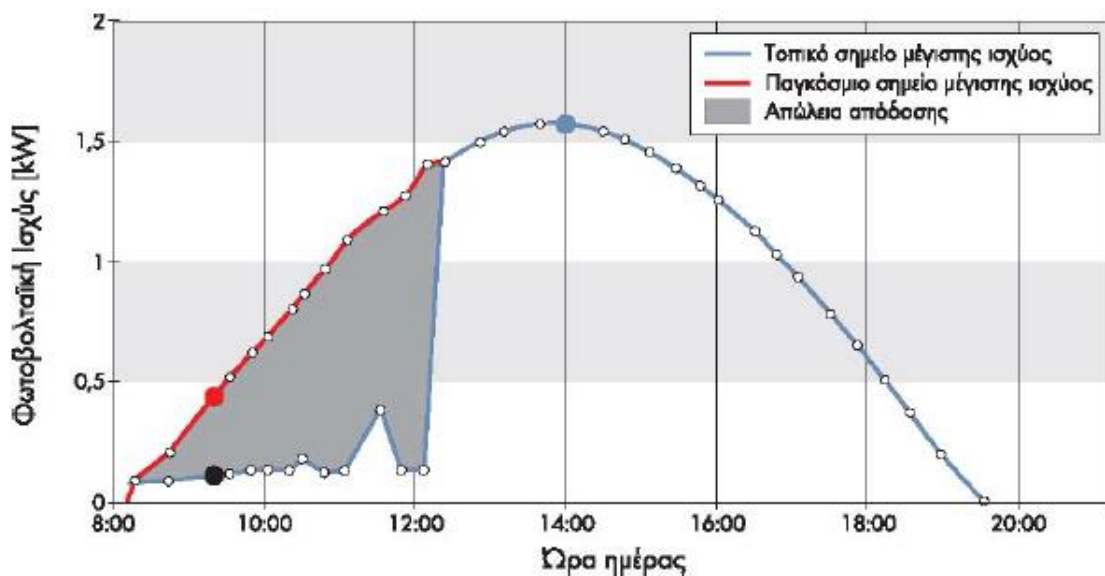
Εικόνα 54: Χαρακτηριστική I-V 15 : Έξι στηλών εξαρτώμενη από την ποσοστιαία σκίαση ενός κελιού [26]

Με την αύξηση του ποσοστού σκίασης από 0% σε 100% φαίνεται ότι συμβαίνει μια μετατόπιση του σημείου μέγιστης ισχύος στην χαρακτηριστική καμπύλη I-V, και ειδικότερα για ποσοστό σκίασης μέχρι 50% η μετατόπιση είναι καθοδική, δηλαδή μείωση του ρεύματος

βραχυκυκλώματος  $I_{sc}$ , ενώ για ποσοστό σκίασης από 50% έως και 100% παρατηρείται μετατόπιση του σημείου μέγιστης ισχύος προς τα αριστερά, δηλαδή μείωση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$  και σταθεροποίηση των τιμών αυτών. Τόσο στη μία περίπτωση, όσο και στην άλλη παρατηρείται μείωση της ισχύος του κυκλώματος. Αν αυξηθεί ο αριθμός των στηλών φαίνεται ότι μεγαλώνει η τιμή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και ως εκ τούτου να μεγαλώνει και η τιμή ισχύος, συνεπώς και μετατόπιση προς τα δεξιά του σημείου μέγιστης λειτουργίας.

## 5.6 Ιχνηλάτης

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί πως αν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο σκιασθεί, εντοπίζεται πλήθος σημείων μέγιστης λειτουργίας, όπως διαφαίνεται από το διάγραμμα που παραθέτεται παρακάτω.



Εικόνα 55: Χαρακτηριστική P-t 1 : Φωτοβολταϊκή ισχύς συναρτήσει της ώρας της ημέρας [35]

Η χαρακτηριστική, λοιπόν, που προκύπτει από το άνωθι διάγραμμα, μας υποδεικνύει την πορεία που έχει το συνολικό αλλά και το τοπικό σημείο μέγιστης ισχύος μιας δευτερεύουσας γεννήτριας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης η οποία σκιάζεται τις πρωινές ώρες. Στο γκρι τμήμα του διαγράμματος μπορεί να εντοπιστεί την απώλεια απόδοσης, η οποία προέκυψε από την χρησιμοποίηση του τοπικού και όχι του συνολικού σημείου μέγιστης ισχύος.

Όσον αφορά την μετατροπή που ήταν απαραίτητο να υπάρξει, για το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο, τη μείωση των απωλειών και την ορθή επιλογή του μέγιστου σημείου λειτουργίας, χρησιμοποιήθηκε inverter. Οι παραπάνω μετατροπείς εμπεριέχουν τον λεγόμενο ιχνηλάτη σημείου μέγιστης ισχύος (MPP- Tracker). Συγκεκριμένα, η ύπαρξη του ιχνηλάτη αυτού είναι αναγκαία καθώς ο ρόλος του είναι να είναι υπεύθυνος ώστε η φωτοβολταϊκή γεννήτρια να λειτουργεί στο βέλτιστο. Δηλαδή, η ύπαρξή του φροντίζει έτσι ώστε η φωτοβολταϊκή γεννήτρια να χρησιμοποιεί με το βέλτιστο δυνατό τρόπο την διαθέσιμη σε αυτή ισχύ, βάσει πάντοτε της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας την δεδομένη εκείνη στιγμή.

Όμως, σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν δύο διαφορετικά σημεία λειτουργίας, όπως παραπάνω, τα οποία προκύπτουν από τη σκίαση μεμονωμένων φωτοβολταϊκών μονάδων μίας φωτοβολταϊκής γεννήτριας, ο inverter, δηλαδή ο συνδεδεμένος μετατροπέας του ρεύματος, θα πρέπει να επιλέξει το σημείο λειτουργίας στο οποίο αυτή θα λειτουργήσει έτσι ώστε να αποδώσει το μέγιστο δυνατό βαθμό. Συνεπώς, η επιλογή θα πρέπει να είναι μεταξύ του τοπικού σημείου μέγιστης ισχύος (LMPP) ή του συνολικού σημείου μέγιστης ισχύος (GMPP).

Αξίζει εδώ να σημειωθεί πως οι κοινοί ιχνηλάτες σημείου μέγιστης ισχύος, είναι πολύ πιθανό να περιοριστούν στην παρατήρηση της περιοχής που συνορεύει με το τρέχον σημείο λειτουργίας λόγω της προσπάθειας μείωσης άσκοπης απώλειας ενέργειας από τυχόν περιττές αναζητήσεις. Αποτέλεσμα της συγκεκριμένης λειτουργίας είναι λοιπόν, να εντοπίζουν απλώς το τοπικό μέγιστο, με τον κίνδυνο να μην είναι ανιχνεύσιμο κάποιο ενδεχόμενο εναλλακτικό σημείο λειτουργίας, όπως μπορεί να είναι κάποιο συνολικό μέγιστο σε σχέση με το τοπικό.

Σε αυτή την περίπτωση τώρα ενέχει το ενδεχόμενο, η τρέχουσα ισχύς που παράγεται από το σύνολο της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, που για την συγκεκριμένη ενότητα εξετάζεται βάση της σκίασης, να είναι σχετικά μικρότερη και όχι η βέλτιστη δυνατή.

Στην προσπάθεια λοιπόν αποφυγής τέτοιου είδους άσκοπου κόστους από περιορισμένων δυνατοτήτων των ιχνηλατών, δημιουργήθηκε ιχνηλάτης, με βασική δυνατότητα να εντοπίζει και να μπορεί να θέτει τη λειτουργία της γεννήτριας σε σημείο το οποίο να απέχει μεγάλη απόσταση από το γνωστό, εκείνης της δεδομένης στιγμής, σημείο λειτουργίας.

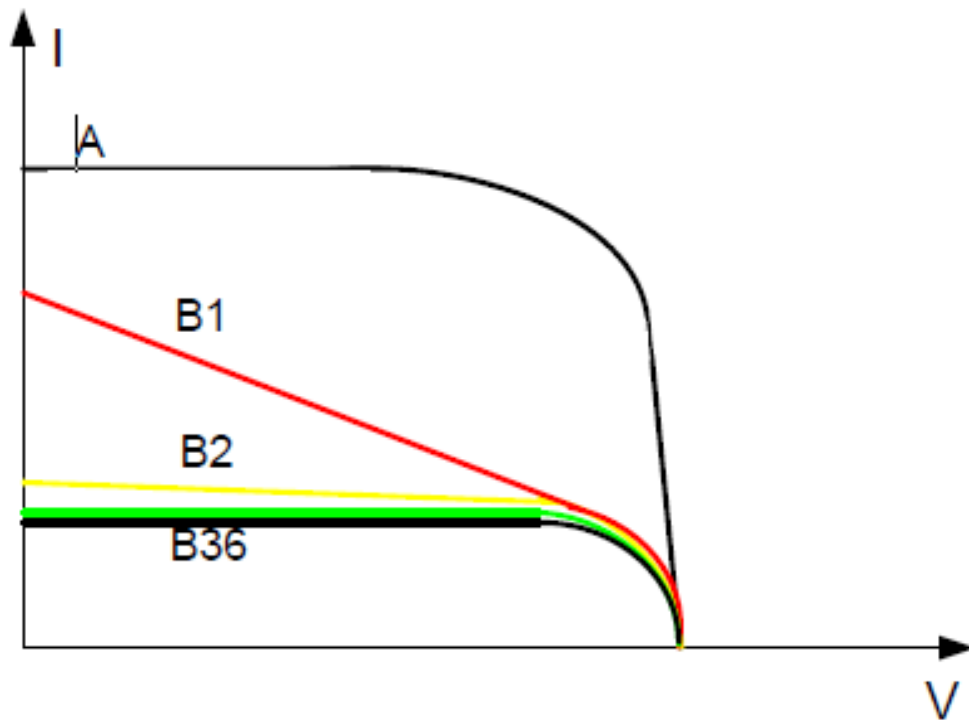
Επομένως, σκοπός του συγκεκριμένου μετατροπέα είναι ο εντοπισμός εκείνου του σημείου λειτουργίας με την μεγαλύτερη ισχύ κάθε στιγμή. Η ύπαρξη της δυνατότητας αυτής, παρέχει το προνόμιο η ενεργειακή προσφορά των φωτοβολταϊκών μονάδων να αξιοποιείται πλήρως και υπό οποιαδήποτε τρέχουσα συνθήκη, χωρίς όμως φυσικά, να υπάρχει η δυνατότητα να εξαλειφθούν οι απώλειες κατά την διάρκεια των συγκεκριμένων αναζητήσεων.

Σαν μέτρο αντιστάθμισης του συγκεκριμένου χαρακτηριστικού, οι συγκεκριμένοι ιχνηλάτες έχουν δημιουργηθεί αποκλειστικά έτσι ώστε τουλάχιστον, να διατηρούνται οι απώλειες που προκύπτουν από την συγκεκριμένη διαδικασία σε διαστήματα της ημέρας χωρίς σκιά μέχρι 0,2%. Βέβαια, σε περιπτώσεις όπου οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σπάνια βρίσκονται υπό σκιά, υπάρχει η δυνατότητα να προσαρμοστεί η συχνότητα της διαδικασίας αναζήτησης (χρόνος κύκλου) ανάλογα με την περίπτωση και να μειωθεί, με αποτέλεσμα να μειωθούν ακόμα περισσότερο οι απώλειες λόγω αναζήτησης [35].

## **5.7 Επίδραση του αριθμού των σκιασμένων κελιών**

Σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο που αποτελείται από 36 φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα οποία συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους, η απόδοση του πλαισίου εξαρτάται από τον αριθμό των σκιασμένων στοιχείων και από το εάν αυτά τα σκιασμένα στοιχεία είναι στην ίδια στήλη ή σε διαφορετική καθώς και από τον αριθμό των στηλών.

Στα διαγράμματα που φαίνεται πιο κάτω (Εικόνα 56) η καμπύλη A είναι και με τα 36 στοιχεία του φωτοβολταϊκού πλαισίου ασκίαστα, ενώ η Bn μας δείχνει τα n σκιασμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά. Για παράδειγμα, στην καμπύλη B2 τα 2 από τα 36 φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι σκιασμένα σε σειρά, ενώ στη B36 και τα 36 φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι σκιασμένα σε σειρά. Στο διάγραμμα I-V που φαίνεται πιο κάτω παρουσιάζεται η μεταβολή της χαρακτηριστικής I-V σε σχέση με τον αριθμό των φωτοβολταϊκών στοιχείων που είναι σκιασμένα.

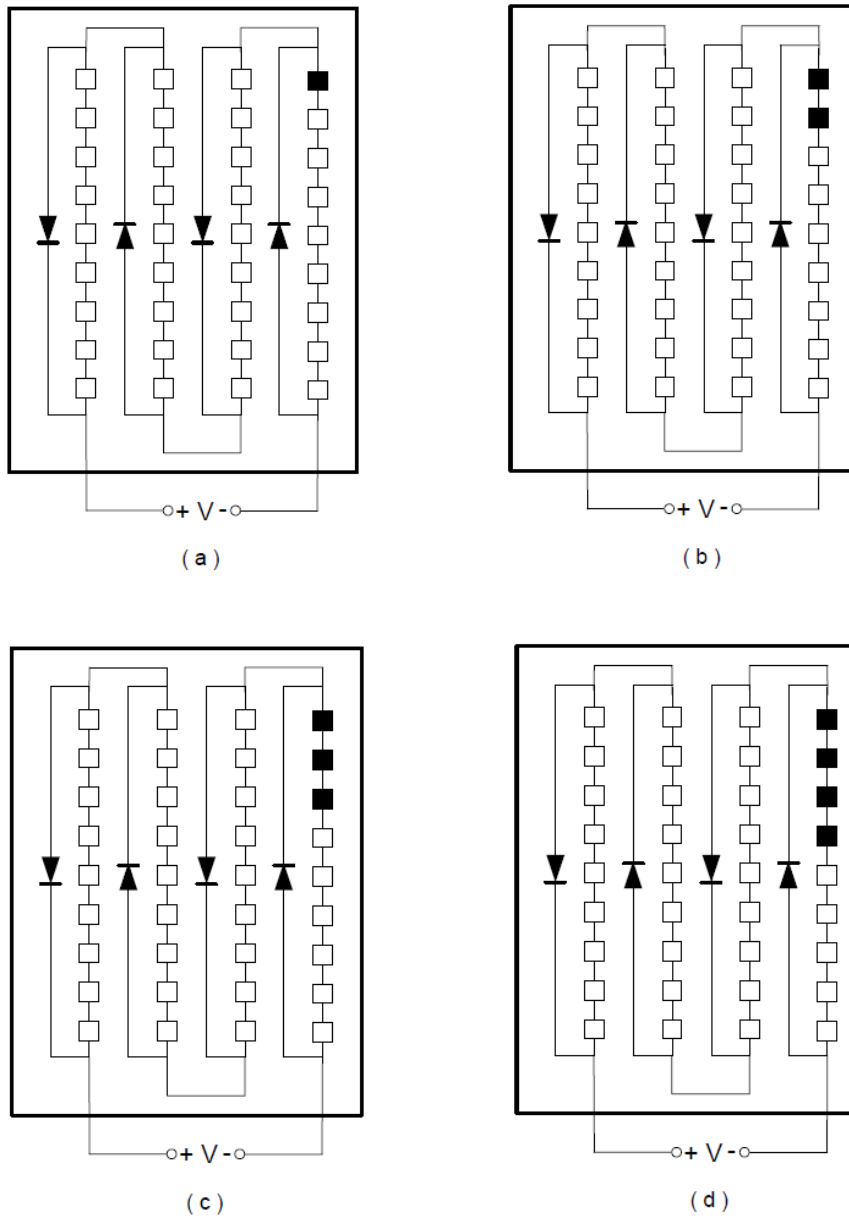


Εικόνα 56: Χαρακτηριστική I-V 16 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει των σκιασμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων [31]

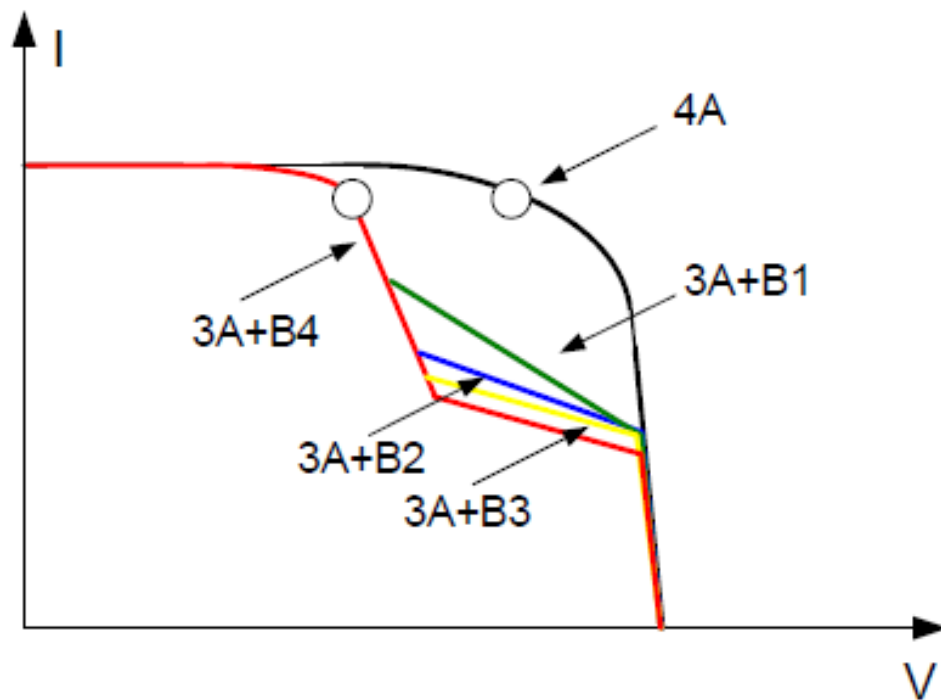
Παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει ο αριθμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων που είναι σκιασμένα μειώνεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  δε μεταβάλλεται. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο που είναι σκιασμένο αντιστοιχεί στην αντίσταση  $R_s$  [31].

Σκιασμένα στοιχεία μπορούν να εντοπιστούν τόσο στην ίδια στήλη όσο και σε διαφορετικές και σύμφωνα με αυτό διαφοροποιείται και η χαρακτηριστική I-V. Στην Εικόνα 57 φαίνονται τέσσερις περιπτώσεις που τα σκιασμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι στην ίδια στήλη και πιο ειδικά στο (a) υπάρχει ένα σκιασμένο στοιχείο σε μία στήλη, στο (b) δύο σκιασμένα στοιχεία, στο (c) τρία σκιασμένα στοιχεία και τέσσερα σκιασμένα στοιχεία στο (d). Αυτό που προκύπτει από την αντίστοιχη χαρακτηριστική τους I-V (17) είναι ότι δεν επηρεάζεται το σημείο μέγιστης ισχύος.



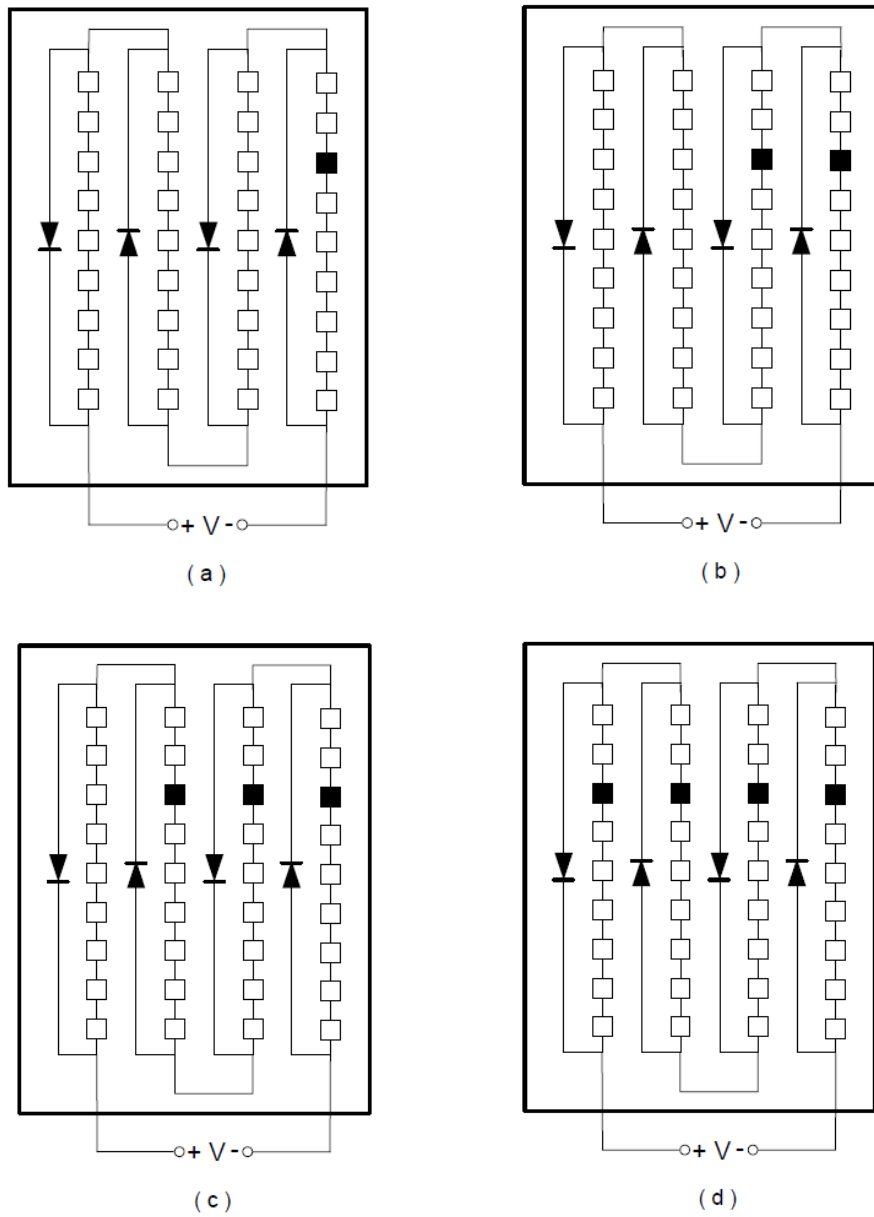


Εικόνα 57: Τέσσερις στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα ή περισσότερα σκιασμένα στοιχεία σε μία στήλη [26]

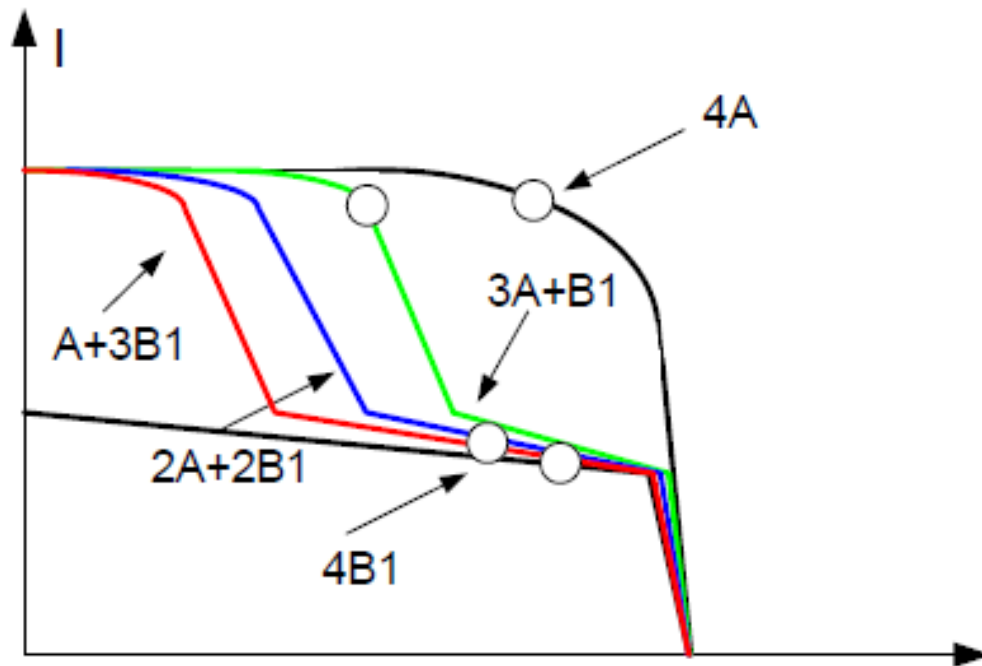


Εικόνα 58: Χαρακτηριστική I-V 17 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει των σκιασμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων μιας στήλης [26]

Αντίθετα, όταν τα στοιχεία που είναι σκιασμένα εντοπίζονται σε διαφορετικές στήλες και υπάρχει τουλάχιστον ένα σε κάθε στήλη, όπως στην Εικόνα 59 το συμπέρασμα από τη χαρακτηριστική τους (Χαρακτηριστική I-V 18) είναι μια μετατόπιση του σημείου μέγιστης ισχύος και συγκεκριμένα όσο μεγαλώνει ο αριθμός των στηλών που βρίσκονται σκιασμένα στοιχεία, τόσο μετατοπίζεται και πιο χαμηλά.



Εικόνα 59: Τέσσερις στήλες συνδεδεμένες σε σειρά με ένα σκιασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο σε μία ή περισσότερες στήλες [26]



Εικόνα 60: `Χαρακτηριστική I-V 18 : Φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει ενός σκιασμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου σε μία ή περισσότερες στήλες [26]

## 6 Πειραματική διάταξη

Για την πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Το πρώτο (No.1 στους πίνακες με τις μετρήσεις) είναι τεχνολογίας λεπτού υμενίου (Thin Film) δισεληνοϊνδούχου χαλκού (CIS). Το δεύτερο (No.2 στις μετρήσεις) είναι πολυκρυσταλλικό. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν δύο μπαταρίες αυτοκινήτου για αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και δύο ρυθμιστές φόρτισης των μπαταριών (*Steca Solsum 10.10F PWM*) που τις προστατεύουν κατά την αποφόρτιση, από υπερφόρτωση, βραχυκύκλωμα, υπερθέρμανση, από την αντίστροφη πολικότητα των φωτοβολταϊκών και από την αντίστροφη πολικότητα των μπαταριών. Ακόμα συνδέθηκαν στους ρυθμιστές δύο λαμπτήρες συνεχούς ρεύματος. Τέλος τοποθετήθηκε κι από ένας διακόπτης σε κάθε λαμπτήρα για την απομόνωση τους από το κύκλωμα της διάταξης μας.

Το πρώτο είναι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο της *Shell Solar (Shell ST20 Module)* με ονομαστική ισχύ  $P_r = 20 \text{ W}$ , τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc} = 22.9 \text{ V}$  και ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc} = 1.54 \text{ A}$ . Το πάνελ μας αποτελείται από δύο τέτοια πλαίσια μαζί.

Το δεύτερο είναι της εταιρίας *SolarWorld (Sunmodule SW 45 poly RGA)* με ονομαστική ισχύ  $P_r = 45 \text{ W}$ , τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc} = 21.8 \text{ V}$  και ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc} = 2.63 \text{ A}$ .



Εικόνα 61: Φωτοβολταϊκά πλαίσια πειράματος

Για το συγκεκριμένο πείραμα έγιναν μετρήσεις στην ένταση του ρεύματος και στην τάση των παραπάνω πλαισίων (μετρήσεις του σημείου μέγιστης ισχύος) καθημερινά τις ώρες 8:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00 και 18:00 από 18 Μαρτίου έως 15 Ιουνίου με το παρακάτω ψηφιακό πολύμετρο (*FLUKE 87*). Σε κάθε μέτρηση λήφθηκαν τιμές του ρεύματος και της τάσης για τα πλαίσια ακάλυπτα και για τα πλαίσια με καλυμμένο το 50% της επιφάνειάς τους με μαύρο χαρτόνι με συντελεστή διαφάνειας 0,01. Με τη χρήση του χαρτονιού θεωρήθηκε ότι δημιουργούνται συνθήκες τεχνητής γήρανσης.



Εικόνα 62: Πολύμετρο πειράματος

*Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της σκίασης στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε τεχνολογίες φωτοβολταϊκών*



*Εικόνα 63: Καλυμμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια πειράματος*



*Εικόνα 64: Λαμπτήρες σε λειτουργία*



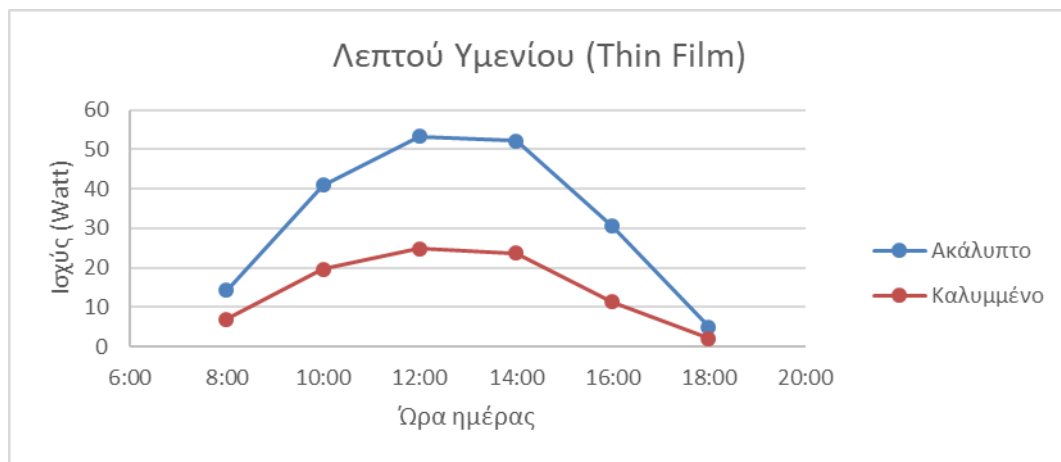


*Εικόνα 65: Λαμπτήρες εκτός λειτουργίας*

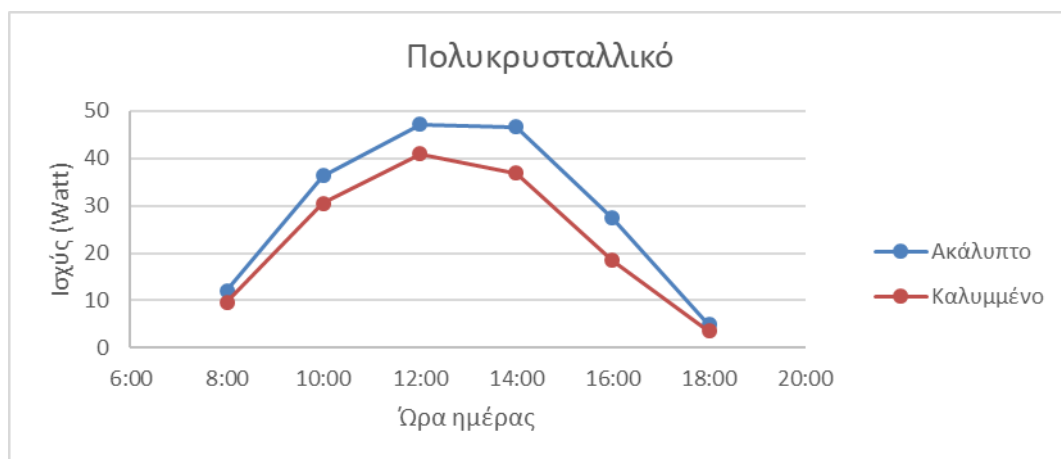


## 7 Αποτελέσματα

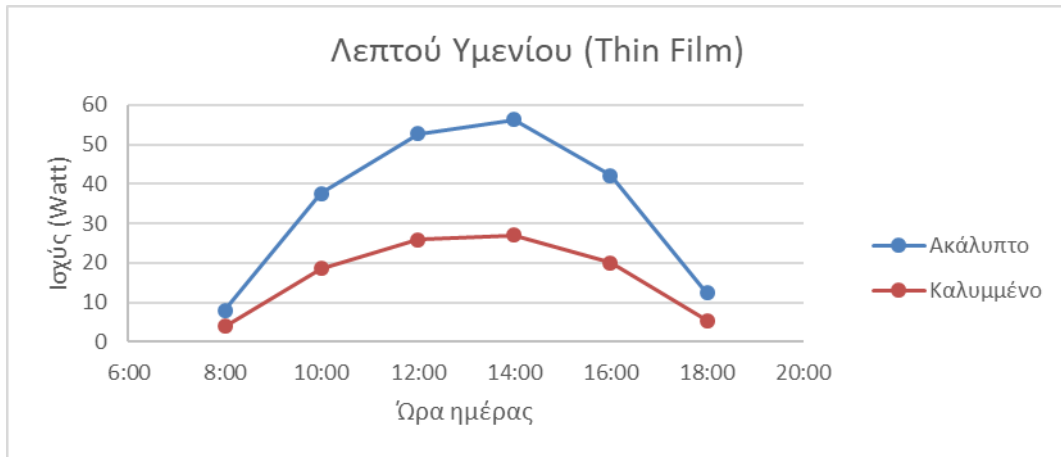
### 7.1 Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος ανά δεκαπενθήμερο



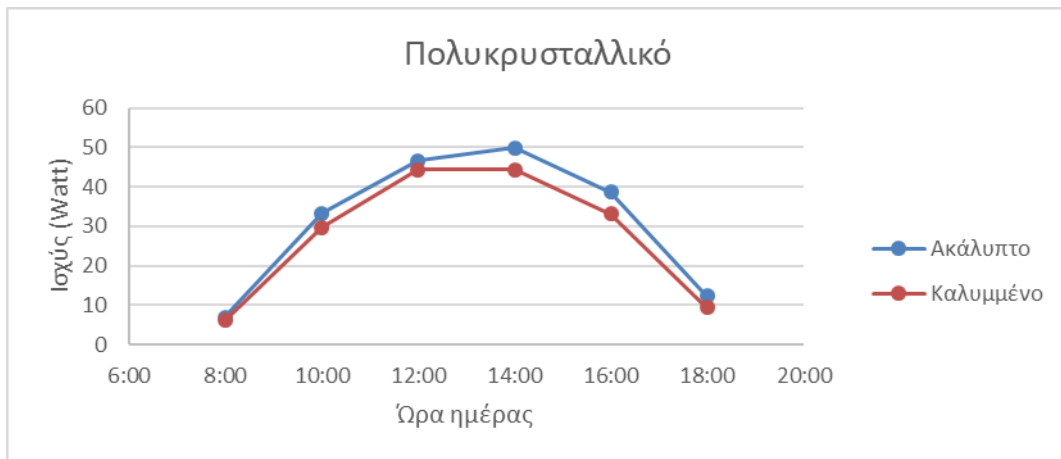
Εικόνα 66: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 18/3 – 1/4



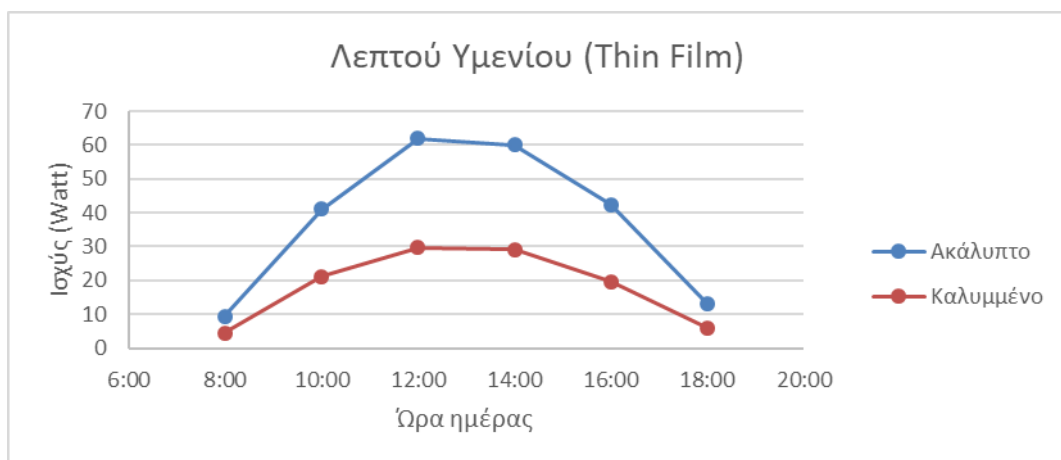
Εικόνα 67: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 18/3 – 1/4



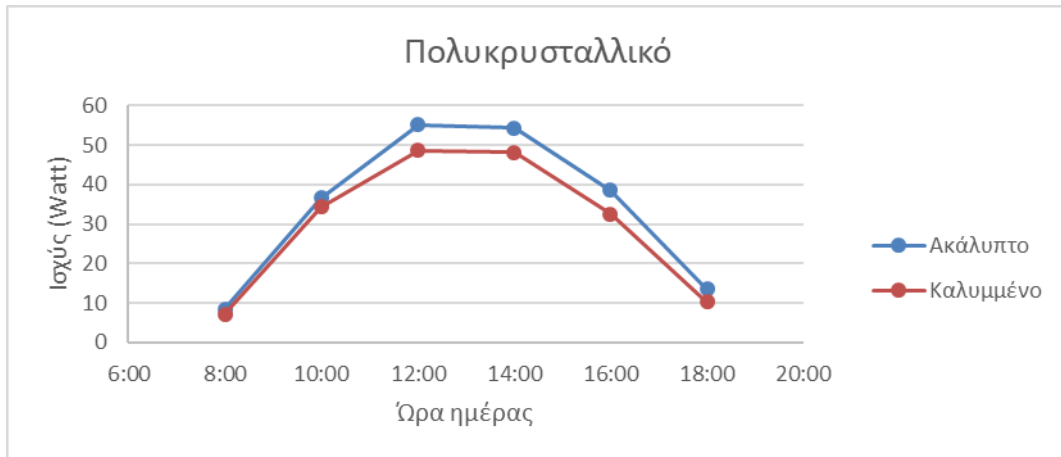
Εικόνα 68: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 2/4 – 16/4



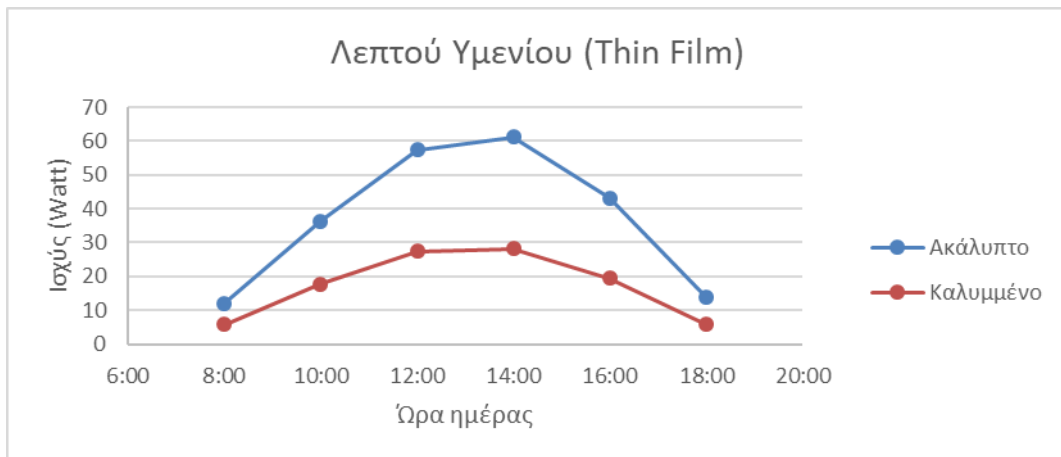
Εικόνα 69: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 2/4 – 16/4



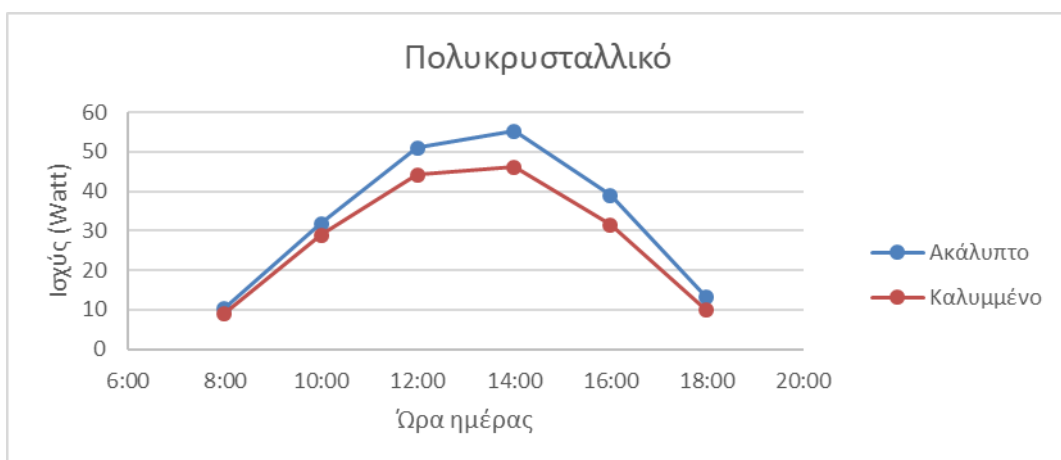
Εικόνα 70: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 17/4 – 1/5



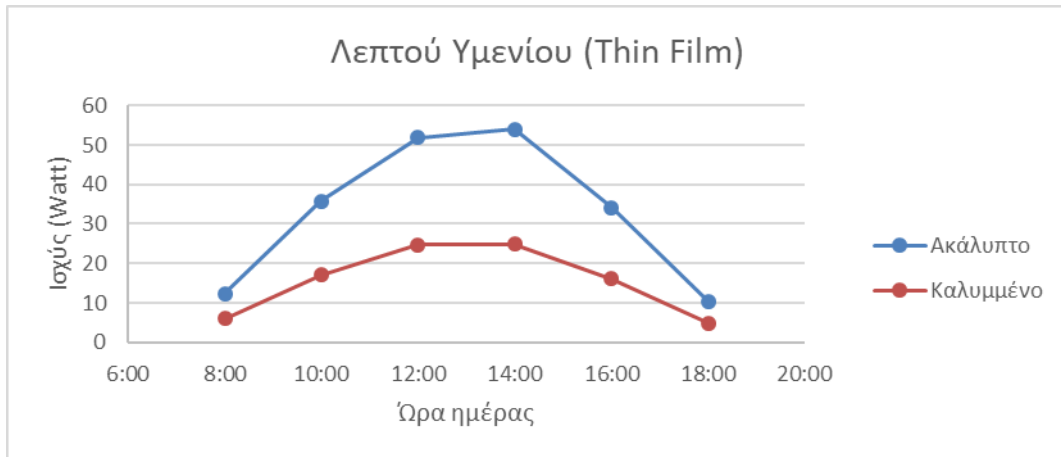
Εικόνα 71: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 17/4 – 1/5



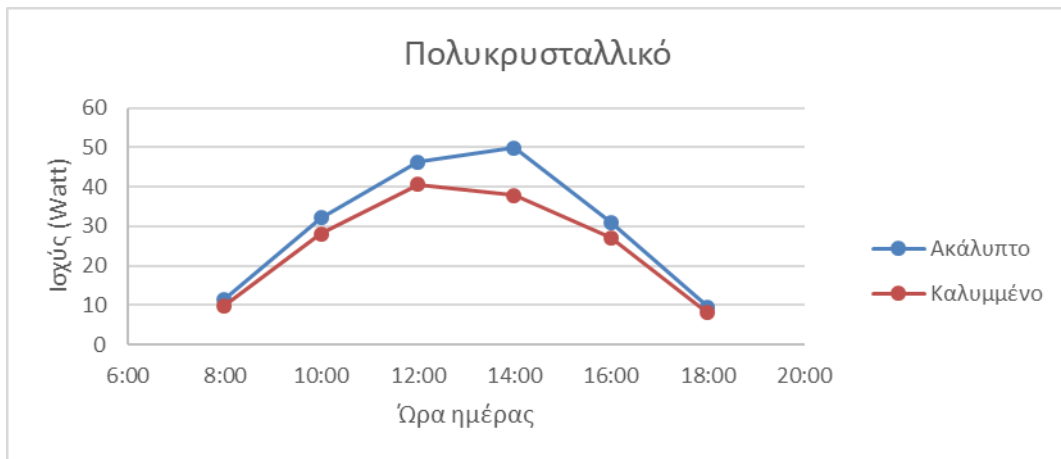
Εικόνα 72: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 2/5 – 16/5



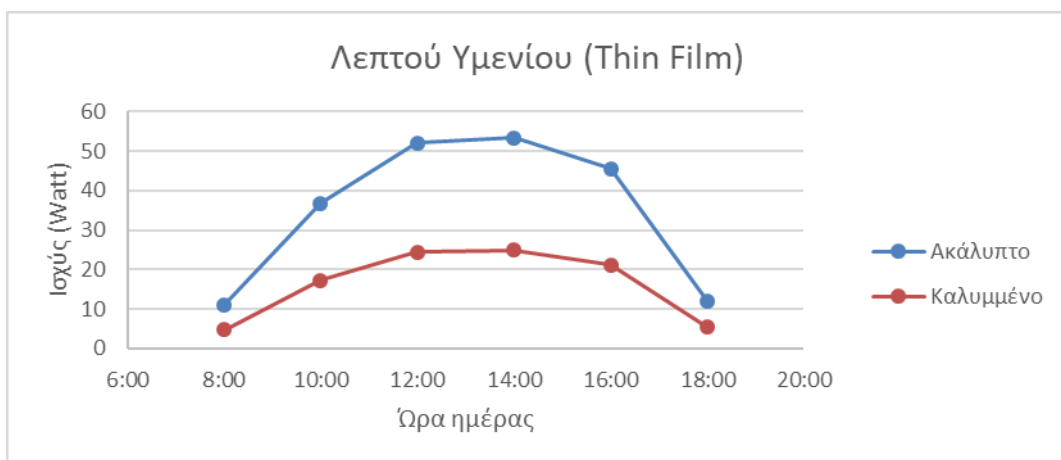
Εικόνα 73: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 2/5 – 16/5



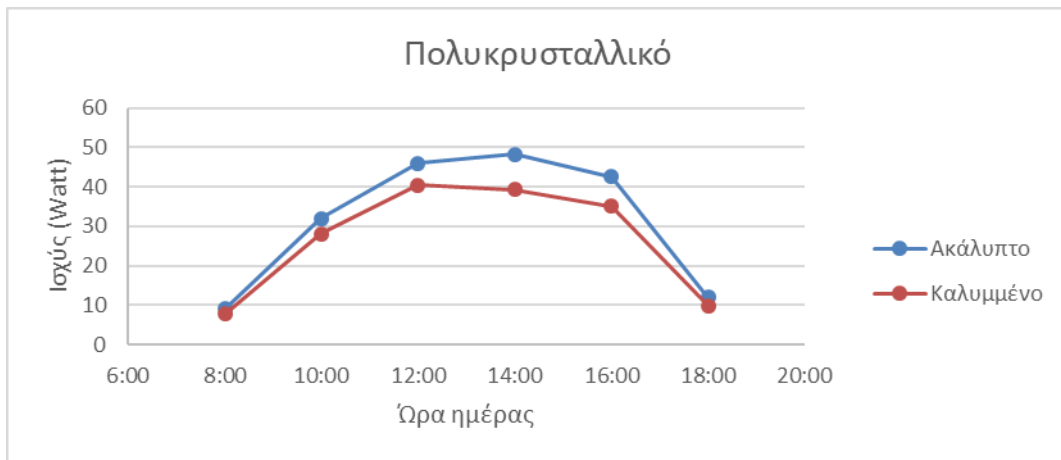
Εικόνα 74: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 17/5 – 31/5



Εικόνα 75: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 17/5 – 31/5

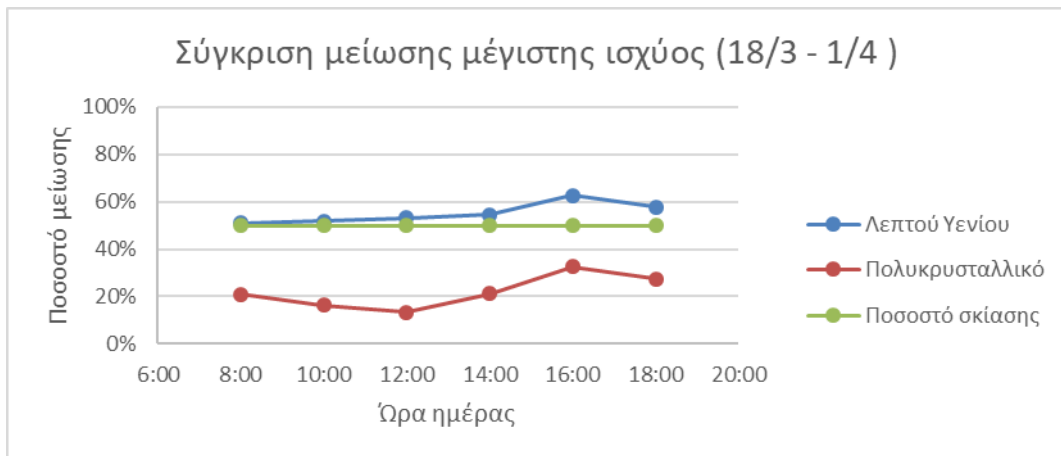


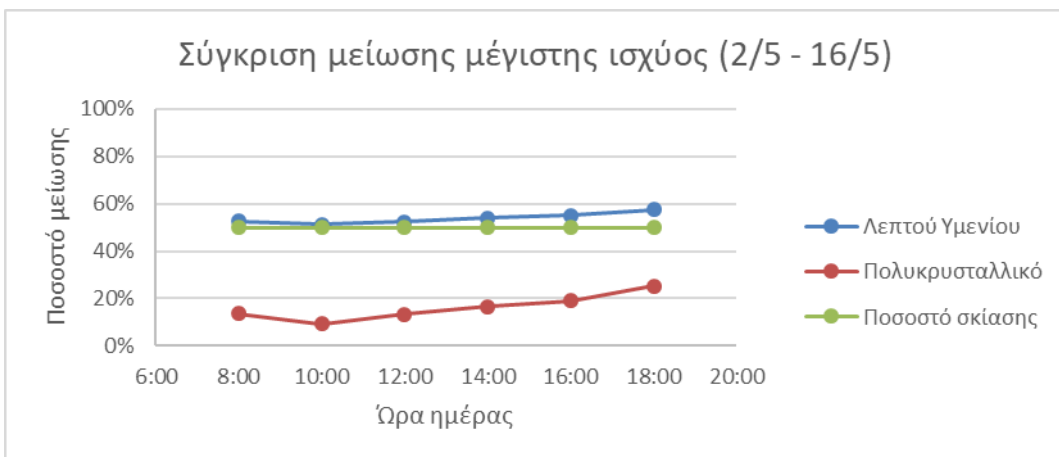
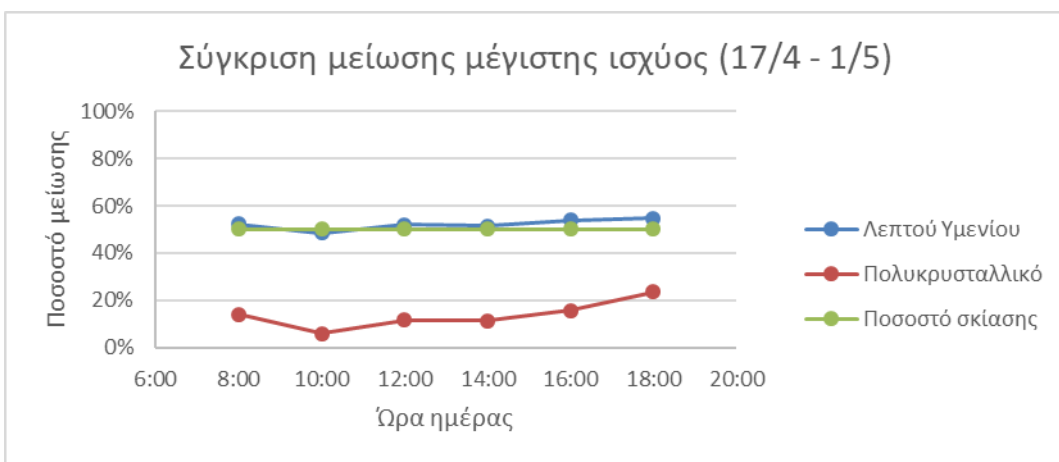
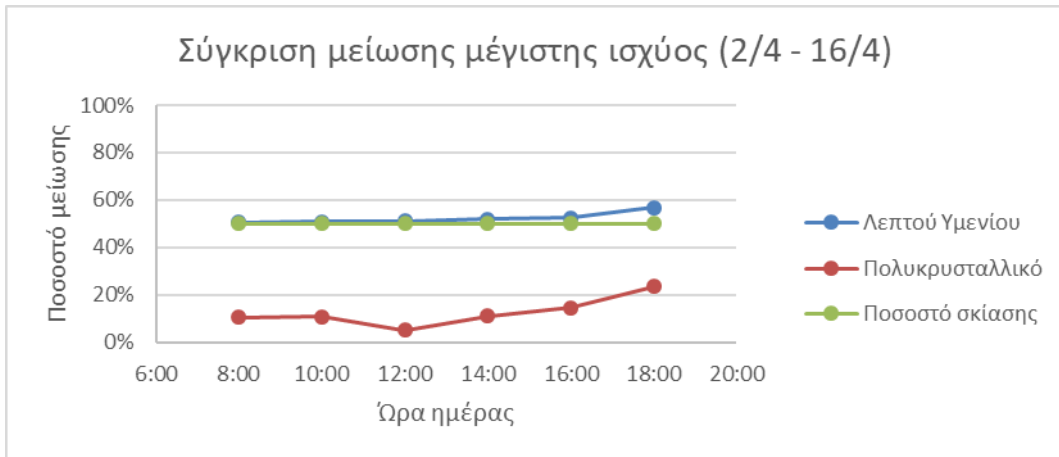
Εικόνα 76: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 1/6 – 15/6

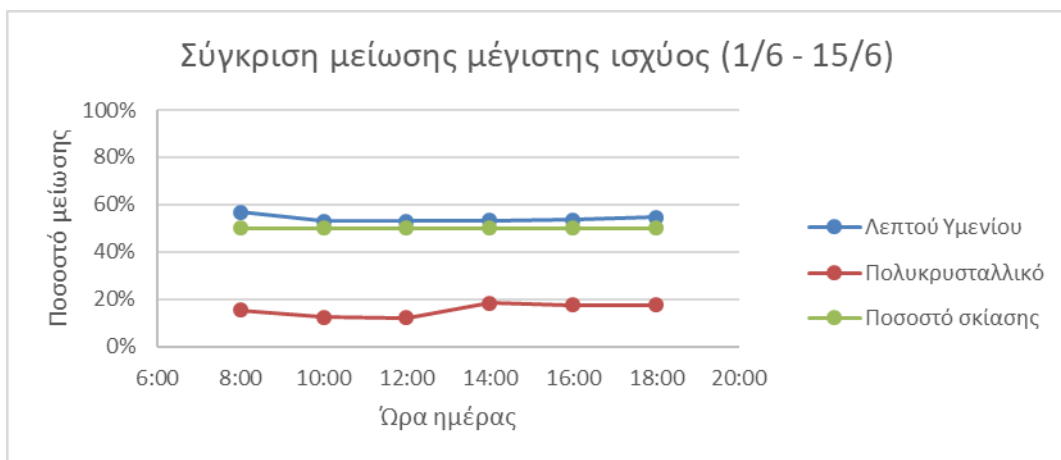
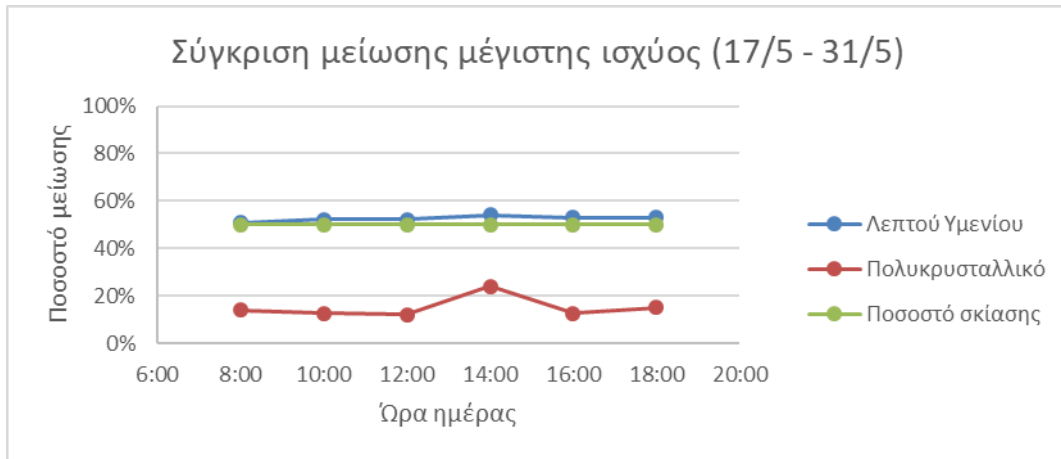


Εικόνα 77: Μέσος όρος ημερήσιας μεταβολής της μέγιστης ισχύος περιόδου 1/6 – 15/6

## 7.2 Διαγράμματα ποσοστού μείωσης ισχύος σε σχέση με το ποσοστό κάλυψης (50%).







## **8 Συμπεράσματα**

Στην πειραματική διάταξη έγιναν μετρήσεις υπό πραγματικές συνθήκες σε δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια (λεπτού υμενίου και πολυκρυσταλλικού πυριτίου). Για κάθε μέτρηση καταγράφονταν οι τιμές της έντασης του ρεύματος και της τάσης στα σημεία μέγιστης ισχύος με τα πλαίσια ακάλυπτα και με τα πλαίσια υπό σκίαση στο μισό της επιφάνειάς τους.

Σκοπός του πειράματος ήταν να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά την παραγωγή ισχύος σε πραγματικές συνθήκες σε σχέση με τη σκίαση. Η αναλυτική εργαστηριακή συμπεριφορά αναφορικά με τη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας έχει μελετηθεί στο παρελθόν και είναι γνωστή και δεν κρίθηκε σκόπιμο να επαναληφθεί η πειραματική διαδικασία που την επιβεβαιώνει. Επομένως, δόθηκε έμφαση στα ποσοστά μεταβολής της παραγόμενης ισχύος σε σχέση με το ποσοστό σκίασης.

Με την εξαγωγή των διαγραμμάτων του μέσου όρου της μέγιστης ισχύος κατά τη διάρκεια της μέρας ανά δεκαπενθήμερο, καθώς και του ποσοστού μείωσής της σε σχέση με το ποσοστό κάλυψης (50%), αυτό που παρατηρήθηκε, είναι ότι η μείωση στην παραγωγή ενέργειας κατόπιν της σκίασης των πλαισίων δεν είναι ανάλογη του ποσοστού σκίασης. Εξίσου σημαντικό φαίνεται να είναι και το γεγονός πως τα δύο πλαίσια του πειράματος έδωσαν αποτελέσματα με αρκετή απόκλιση μεταξύ τους, όσον αφορά το ποσοστό μείωσης της μέγιστης ισχύος, παρότι σκιάστηκαν υπό το ίδιο ποσοστό.

Πιο συγκεκριμένα, το πλαίσιο λεπτού υμενίου εμφάνισε ποσοστά μείωσης από 50% έως και 60%, ενώ το πολυκρυσταλλικό είχε αρκετά χαμηλότερο ποσοστό μείωσης γύρω στο 10% με 20%. Αυτό οφείλεται κυρίως στον τρόπο με τον οποίο συνδέονται οι κυψελίδες σε κάθε πλαίσιο, καθώς επίσης και στον τρόπο που έχουν συνδεθεί οι παρακαμπτήριες δίοδοι. Επομένως, η σκίαση φωτοβολταϊκών πλαισίων και κατ' επέκταση η γήρανσή τους έχει διαφορετική επιρροή στην απόδοση του κάθε τύπου πλαισίου. Θα ήταν αρκετά χρήσιμη μια μελλοντική μελέτη, που να εστιάζει στη σχέση του τρόπου σύνδεσης των κυψελίδων και των παρακαμπτήριων διόδων των πλαισίων με την επίδραση που έχει το φαινόμενο της σκίασης στην παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού πλαισίου.



## Παράρτημα

18-Mar	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2	19-Mar	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		2.118	2.1626	8:00		23.32	19.747
10:00		6.0419	5.768	10:00		53.805	46.86
12:00		16	14.076	12:00		66.56	58.59
14:00		4.7	4.422	14:00		58.667	52.48
16:00		2.85	2.856	16:00		32.96	30.096
18:00		1.431	1.316	18:00		2.358	2.6026

18-Mar	Πάνελ Καλυμμένο	1	2	19-Mar	Πάνελ Καλυμμένο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		0.6	0.8166	8:00		11.3601	18.7016
10:00		3.077	4.8894	10:00		26.1756	42.7714
12:00		4.368	7.0438	12:00		31.4025	52.6884
14:00		1.5048	2.5664	14:00		26.8664	45.7824
16:00		0.8255	1.587	16:00		14.6908	25.2765
18:00		0.3663	0.84	18:00		0.5092	1.1241

20-Mar	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2	21-Mar	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		26.208	22.26	8:00		22.248	19.292
10:00		52.662	46.762	10:00		46.46	41.6
12:00		65.19	57.824	12:00		62.73	55.803
14:00		58.656	52.29	14:00		55.896	50.336
16:00		31.518	28.98	16:00		30.906	28.496
18:00		1.2632	1.3083	18:00		2.7728	2.904

20-Mar	Πάνελ Καλυμμένο	1	2	21-Mar	Πάνελ Καλυμμένο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		13.1521	20.9124	8:00		11.0865	15.939
10:00		25.1503	42.2963	10:00		23.94	35.46
12:00		31.0086	51.5497	12:00		29.7755	49.496
14:00		27.314	35.82	14:00		25.9875	40.926
16:00		13.896	23.218	16:00		13.8627	23.1
18:00		0.3813	0.7482	18:00		0.9006	1.86

22-Mar	Πάνελ	1	2	23-Mar	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		22.77	19.504	8:00		3.1788	3.12
10:00		50.84	44.94	10:00		3.905	3.6917
12:00		62.816	55.493	12:00		10.1439	9.729
14:00		55.208	49.324	14:00		26.368	23.94
16:00		18.0872	15.631	16:00		19.095	17.388
18:00		2.4066	2.31	18:00		0.9186	1.1028
22-Mar	Πάνελ	1	2	23-Mar	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		9.7	0.7168	8:00		1.7886	3.134
10:00		24.381	40.2428	10:00		0.879	1.6181
12:00		30.0033	49.8122	12:00		3.916	6.748
14:00		25.8951	20.9615	14:00		8.9206	13.9293
16:00		6.1005	10.959	16:00		8.6618	14.456
18:00		0.888	1.442	18:00		0.3732	0.6725

25-Mar	Πάνελ	1	2	26-Mar	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		25.5	21.736	8:00		27.008	22.79
10:00		57.266	50.268	10:00		56.964	50.508
12:00		16.4	14.697	12:00		67.089	59.148
14:00		17.2956	15.656	14:00		56.576	50.64
16:00		7.696	7.585	16:00		32.292	29.329
18:00		1.0948	1.125	18:00		0.387	0.531
25-Mar	Πάνελ	1	2	26-Mar	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		12.6522	20.24	8:00		13.333	20.3241
10:00		28.3283	45.617	10:00		27.0652	42.5652
12:00		7.3788	11.6622	12:00		31.995	51.245
14:00		31.1004	50.6664	14:00		26.2238	43.1644
16:00		8.298	13.542	16:00		8.1614	12.7896
18:00		0.2392	0.6235	18:00		0.0916	0.2136

27-Mar	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2	28-Mar	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		6	5.016	8:00		6.633	5.486
10:00		40.986	35.49	10:00		42.848	37.275
12:00		64.066	56.97	12:00		63.135	55.23
14:00		74.52	66.96	14:00		65.94	58.362
16:00		44.1	39.22	16:00		50.64	43.452
18:00		5.481	5.252	18:00		16.564	16.093
27-Mar	Πάνελ Καλυμμένο	1	2	28-Mar	Πάνελ Καλυμμένο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		3.3912	4.592	8:00		3.5758	4.926
10:00		19.695	31.1733	10:00		20.5485	33.0613
12:00		31.136	50.9496	12:00		29.9268	49.8484
14:00		7.38	12.58	14:00		31.0703	50.7824
16:00		11.6937	18.54	16:00		11.8978	18.9315
18:00		2.4388	4.2198	18:00		1.9836	3.4845

29-Mar	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2	30-Mar	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		7.996	6.688	8:00		8.484	7.455
10:00		37.961	33.231	10:00		38.556	34.815
12:00		61.91	54.234	12:00		63.86	58.424
14:00		63.954	57.181	14:00		66.044	58.447
16:00		34.272	30.636	16:00		36.05	31.671
18:00		8.3706	8.073	18:00		9.7853	8.652
29-Mar	Πάνελ Καλυμμένο	1	2	30-Mar	Πάνελ Καλυμμένο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		4.1096	5.978	8:00		4.2987	6.1524
10:00		18.2784	20.5095	10:00		18.4591	20.8495
12:00		29.5137	48.124	12:00		29.7374	47.7345
14:00		30.8191	50.765	14:00		31.047	51.2632
16:00		11.1264	15.162	16:00		11.3622	15.5316
18:00		7.5809	12.5248	18:00		7.7448	12.3525

31-Mar	Πάνελ	1	2	1-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		8.0975	6.831	8:00		9.1402	7.524
10:00		41.4336	37.08	10:00		42.9785	40.976
12:00		61.4	54.468	12:00		63.63	55.555
14:00		62.216	55.555	14:00		64.668	57.474
16:00		42.845	38.896	16:00		42.833	39.36
18:00		8.2259	8.484	18:00		8.649	8.844
31-Mar	Πάνελ	1	2	1-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		4.2412	6.0048	8:00		4.0612	5.8275
10:00		19.9448	33.0681	10:00		19.769	32.6343
12:00		29.233	47.7576	12:00		29.0136	47.481
14:00		29.0853	48.5276	14:00		28.9712	47.5464
16:00		19.4627	32.7418	16:00		18.865	32.5257
18:00		3.15	5.073	18:00		2.792	4.5684

2-Apr	Πάνελ	1	2	3-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		2.712	2.5961	8:00		7.3682	6.355
10:00		43.43	37.904	10:00		41.5459	37.401
12:00		44.0608	37.185	12:00		59.3406	52.836
14:00		42.21	38.522	14:00		60.4485	54.6015
16:00		41.004	37.467	16:00		40.803	37.492
18:00		8.294	7.8	18:00		13.2825	13.13
2-Apr	Πάνελ	1	2	3-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		1.3144	2.4405	8:00		3.8031	5.8684
10:00		17.7444	28.5564	10:00		20.581	33.633
12:00		23.5458	40.6112	12:00		28.23	47.2149
14:00		22.4406	38.5204	14:00		28.5957	49.086
16:00		14.92	24.542	16:00		19.2168	32.328
18:00		3.6603	6.6105	18:00		5.7184	10.4005

4-Apr	Πάνελ	1	2	5-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		6.5824	5.74	8:00		9.0022	7.622
10:00		40.5797	36.05	10:00		38.2912	33.825
12:00		58.0836	51.359	12:00		59.697	52.632
14:00		59.1327	53.448	14:00		60.588	54.607
16:00		36.966	33.948	16:00		42.4	39.155
18:00		10.9269	10.908	18:00		12.256	12.12
4-Apr	Πάνελ	1	2	5-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		3.4276	5.2297	8:00		3.62	5.6496
10:00		19.4792	32.5562	10:00		18.414	30.0384
12:00		27.4449	45.6448	12:00		28.0418	46.488
14:00		27.0976	46.852	14:00		27.795	47.7396
16:00		16.4604	28.4769	16:00		19.3125	32.9406
18:00		4.5994	8.4762	18:00		4.942	9.0471

6-Apr	Πάνελ	1	2	7-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		7.3644	6.15	8:00		5.9334	5.1
10:00		37.411	33.048	10:00		35.552	31.2
12:00		58.9329	52.461	12:00		28.8	26.532
14:00		61	54.607	14:00		58.2	43.86
16:00		37.587	35.397	16:00		25.5712	23.432
18:00		14.2131	14.007	18:00		7.5112	7.0596
6-Apr	Πάνελ	1	2	7-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		3.608	5.7123	8:00		2.8304	4.6224
10:00		17.8771	30.1954	10:00		17.5076	29.0607
12:00		27.585	47.3172	12:00		21.518	37.1484
14:00		28.2521	48.8564	14:00		20.515	34.8424
16:00		19.5391	33.966	16:00		14.84	25.9402
18:00		6.4944	11.8388	18:00		3.0132	5.577

8-Apr	Πάνελ	1	2	9-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		6.6885	5.684	8:00		4.4496	4
10:00		35.476	31.262	10:00		37.014	32.595
12:00		47.6525	39.396	12:00		57.166	50.676
14:00		56.785	50.544	14:00		26.593	23.805
16:00		44.064	40.158	16:00		52.942	48.108
18:00		10.7673	10.374	18:00		14.2788	13.668
8-Apr	Πάνελ	1	2	9-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		4.3776	5.394	8:00		2.082	3.6564
10:00		19.6842	28.2048	10:00		18.13	28.848
12:00		24.5651	42.2429	12:00		21.996	50.5548
14:00		30.5522	44.4645	14:00		16.668	20.9076
16:00		22.0932	32.3312	16:00		23.15	40.062
18:00		4.6953	8.575	18:00		5.8179	11.141

10-Apr	Πάνελ	1	2	11-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		15.276	13.167	8:00		8.847	7.21
10:00		5.3004	5.05	10:00		43.044	37.022
12:00		14.56	14	12:00		65.104	56.91
14:00		66.044	58.447	14:00		64.144	56.816
16:00		43.888	40.512	16:00		45	42.025
18:00		6.57	8.5097	18:00		16.0522	15.15
10-Apr	Πάνελ	1	2	11-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		6.6675	11.6935	8:00		4.1814	6.1776
10:00		2.817	3.9984	10:00		21.692	33.7893
12:00		6.8904	14.2762	12:00		29.0241	50.8599
14:00		34.5649	52.6075	14:00		30.3002	53.39
16:00		21.112	34.4708	16:00		22.1368	36.2202
18:00		3.0924	4.4334	18:00		7.224	12.243

12-Apr	Πάνελ	1	2	13-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		10.2908	8.487	8:00		11.982	10.35
10:00		41.208	36.192	10:00		43.0311	38.335
12:00		61.908	54.94	12:00		58.1019	52.78
14:00		62.418	55.76	14:00		59.7701	53.856
16:00		46.056	41.82	16:00		41.6	38.13
18:00		13.1512	12.61	18:00		18.7104	17.574
12-Apr	Πάνελ	1	2	13-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		5.589	7.8525	8:00		5.7877	8.5776
10:00		21.2343	32.8054	10:00		21.9598	34.656
12:00		31.4736	49.329	12:00		28.9695	47.7891
14:00		31.6728	49.653	14:00		29.14	48.1553
16:00		22.86	36.3	16:00		19.3846	31.7975
18:00		5.7408	7.638	18:00		7.6062	13.1475

14-Apr	Πάνελ	1	2	15-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		5.89	5.278	8:00		7.9622	6.97
10:00		36.839	32.683	10:00		43.846	38.745
12:00		54.27	47.998	12:00		60.6	54.12
14:00		41.004	36.4	14:00		61.8	55.76
16:00		44.268	40.768	16:00		44.6	41
18:00		10.904	11.994	18:00		15.6654	15.352
14-Apr	Πάνελ	1	2	15-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		3.0039	4.8244	8:00		4.1814	6.707
10:00		18.2754	29.9796	10:00		21.692	34.7136
12:00		28.7051	46.1472	12:00		29.0241	48.7844
14:00		17.5584	29.8972	14:00		30.3002	49.7014
16:00		21.432	35.2968	16:00		21.9492	36.2202
18:00		4.9336	8.3055	18:00		7.0434	12.4179

16-Apr	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2
Ώρες		P	P
8:00		10.4781	8.901
10:00		41.976	37.128
12:00		62.712	55.76
14:00		63.114	56.856
16:00		44.8	41.2
18:00		13.8744	13.736
16-Apr	Πάνελ Καλυμμένο	1	2
Ώρες		P	P
8:00		5.3737	8.4647
10:00		20.776	33.411
12:00		30.699	50.3958
14:00		30.429	50.3612
16:00		21.3231	35.7896
18:00		6.0758	10.9683

17-Apr	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2	18-Apr	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		9.95	8.528	8:00		10.746	9.152
10:00		43.6475	39.36	10:00		43.8672	38.964
12:00		61.225	55.284	12:00		60.0492	53.6
14:00		61.2	55.35	14:00		61.5576	55.622
16:00		40.6755	37.944	16:00		40.9136	37.961
18:00		15.6654	15.022	18:00		13.9357	13.869
17-Apr	Πάνελ Καλυμμένο	1	2	18-Apr	Πάνελ Καλυμμένο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		5.2192	8.028	8:00		5.4027	8.4694
10:00		21.2865	34.8096	10:00		21.6801	35.0295
12:00		29.8655	48.9968	12:00		29.232	47.547
14:00		30.7255	50.4777	14:00		29.785	48.9216
16:00		18.9623	32.6508	16:00		19.3515	32.8668
18:00		6.2475	10.8314	18:00		5.8344	10.4554



19-Apr	Πάνελ	1	2	20-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		5.4288	5.0025	8:00		5.679	5.252
10:00		38.5264	34.371	10:00		40.918	36.462
12:00		58.2232	52.059	12:00		59.59	53.199
14:00		59.8262	53.998	14:00		62.109	56.032
16:00		37.0884	33.684	16:00		36.5817	33.415
18:00		13.5894	13.266	18:00		14.7972	14.007
19-Apr	Πάνελ	1	2	20-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		2.776	4.4018	8:00		2.8032	4.6224
10:00		18.8656	31.0068	10:00		20.4157	33.2859
12:00		28.551	46.719	12:00		29.1312	47.6735
14:00		28.5208	47.7312	14:00		29.9079	49.7216
16:00		20.4266	34.0092	16:00		15.792	25.8624
18:00		6.0418	10.7384	18:00		6.1166	10.3014

21-Apr	Πάνελ	1	2	22-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		8.703	7.474	8:00		6.9228	5.916
10:00		34.86	30.033	10:00		43.9782	38.95
12:00		63.327	55.756	12:00		63	55.896
14:00		63.089	56.232	14:00		66.504	59.28
16:00		43.466	39.48	16:00		42.224	38.456
18:00		15.872	15.45	18:00		16.632	16.068
21-Apr	Πάνελ	1	2	22-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		4.3344	7.08	8:00		2.0484	3.352
10:00		21.8772	35.2304	10:00		21.6108	35.2512
12:00		29.8655	48.9968	12:00		30.7255	50.6078
14:00		29.7672	50.2384	14:00		32.844	53.0512
16:00		19.5464	33.0648	16:00		19.812	32.0856
18:00		6.0656	11.0061	18:00		7.7868	13.5888

23-Apr	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2	24-Apr	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		8.6636	8.2	8:00		6.528	5.481
10:00		36.632	32.522	10:00		42.411	37.904
12:00		64.6132	58.344	12:00		61.408	54.234
14:00		59.004	59.488	14:00		17.5864	17.056
16:00		43.672	39.27	16:00		48.822	44.308
18:00		6.992	6.5505	18:00		16.745	15.785
23-Apr	Πάνελ Καλυμμένο	1	2	24-Apr	Πάνελ Καλυμμένο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		5.2388	7.9024	8:00		1.8755	3.5154
10:00		21.6828	35.093	10:00		21.7465	34.9148
12:00		30.6188	52.809	12:00		27.347	44.9943
14:00		33.4647	55.3924	14:00		8.228	12.8304
16:00		20.0025	32.27	16:00		20.7754	32.8232
18:00		2.514	4.1132	18:00		8.7185	13.7753

25-Apr	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2	26-Apr	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		11.7292	8.9232	8:00		12	10.241
10:00		45.269	40.128	10:00		43.89	38.092
12:00		62.32	55.12	12:00		64.999	57.24
14:00		63.549	56.7	14:00		64.355	56.924
16:00		43.665	38.48	16:00		46.575	42.4
18:00		14.7225	14.555	18:00		14.7926	14.076
25-Apr	Πάνελ Καλυμμένο	1	2	26-Apr	Πάνελ Καλυμμένο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		5.9872	8.85	8:00		4.1538	7.257
10:00		22.103	35.435	10:00		21.8772	35.0488
12:00		30.6362	49.1834	12:00		30.051	49.1776
14:00		30.9522	50.2474	14:00		29.7672	49.869
16:00		19.8016	32.0682	16:00		19.362	32.8851
18:00		6.5736	11.3035	18:00		6.244	10.8314

27-Apr	Πάνελ	1	2	28-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		12.726	11.55	8:00		18.4184	18.9
10:00		43.8	39.537	10:00		42.4	38.13
12:00		63.539	56.784	12:00		65.208	57.24
14:00		70.992	63.648	14:00		65.084	57.352
16:00		44.895	40.32	16:00		47.196	42.4
18:00		7.508	7.2	18:00		15.1848	14.283
27-Apr	Πάνελ	1	2	28-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		6.2865	10.2816	8:00		9.144	15.2139
10:00		21.4092	35.319	10:00		20.68	33.9592
12:00		31.0716	50.7507	12:00		30.2528	49.3584
14:00		34.3718	55.8752	14:00		29.5945	49.869
16:00		21.3342	34.776	16:00		19.362	32.7054
18:00		3.2642	5.5275	18:00		6.0622	11.0061

29-Apr	Πάνελ	1	2	30-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		10.945	9.36	8:00		5.2444	4.8072
10:00		44.0425	39.168	10:00		38.1195	34.371
12:00		60.2756	53.8	12:00		57.8298	51.858
14:00		61.7862	55.825	14:00		59.6582	53.998
16:00		41.1312	38.0888	16:00		36.889	33.4835
18:00		14.1266	14.07	18:00		13.7736	13.266
29-Apr	Πάνελ	1	2	30-Apr	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		5.2164	8.2892	8:00		2.9495	4.2325
10:00		21.6801	35.0295	10:00		18.8552	31.0068
12:00		29.232	47.7231	12:00		28.551	46.719
14:00		29.97	48.9216	14:00		28.5208	47.7312
16:00		19.3515	32.6872	16:00		20.4157	34.0092
18:00		6.0112	10.284	18:00		5.8608	10.5652

1-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		8.8918	7.676
10:00		35.07	30.033
12:00		62.816	55.756
14:00		63.089	56.232
16:00		43.672	39.27
18:00		3.966	15.244
1-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		4.515	7.08
10:00		21.8772	35.0295
12:00		30.051	48.9968
14:00		29.7514	50.2384
16:00		19.5464	32.9034
18:00		6.2405	10.8252

2-May	Πάνελ	1	2	3-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		11.952	10.6131	8:00		13.532	10.659
10:00		55.4975	43.05	10:00		48.8566	43.46
12:00		67.252	60.18	12:00		64.2552	57.4
14:00		64.6	57.605	14:00		66.3264	60.792
16:00		47.4288	40.392	16:00		44.1728	39.984
18:00		17.7928	16.443	18:00		17.3992	17.17
2-May	Πάνελ	1	2	3-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		5.592	8.5632	8:00		5.7784	8.154
10:00		21.6567	34.9909	10:00		22.6188	35.672
12:00		30.051	48.9697	12:00		30.162	40.595
14:00		30.914	50.6352	14:00		30.7432	49.5696
16:00		19.3305	33.0096	16:00		20.0996	33.263
18:00		6.6045	11.1872	18:00		7.076	10.9888

4-May	Πάνελ	1	2	5-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		6.1842	5.4135	8:00		10.6535	8.7032
10:00		39.3414	34.8422	10:00		37.0304	31.3845
12:00		59.07	52.5915	12:00		65.5109	57.1356
14:00		60.6798	54.5112	14:00		65.3535	57.591
16:00		37.962	34.102	16:00		44.642	41.516
18:00		14.37	13.702	18:00		17.874	16.929
4-May	Πάνελ	1	2	5-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		2.9512	4.7432	8:00		4.5175	7.4382
10:00		19.0575	31.3808	10:00		22.0745	35.6132
12:00		28.7508	47.1296	12:00		30.0672	49.3857
14:00		28.7215	47.9385	14:00		29.9715	50.6352
16:00		20.625	34.209	16:00		19.7415	33.4242
18:00		6.223	11.0912	18:00		6.2475	11.349

6-May	Πάνελ	1	2	7-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		10.6488	9.2475	8:00		12.935	9.6772
10:00		38.76	33.5984	10:00		46.5328	41.0228
12:00		66.9312	59.4513	12:00		63.643	56.0058
14:00		61.292	60.7026	14:00		66.9256	58.236
16:00		45.954	40.896	16:00		44.9169	39.7662
18:00		8.88	7.5544	18:00		15.9165	15.8081
6-May	Πάνελ	1	2	7-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		5.8063	8.6256	8:00		6.9301	9.396
10:00		22.6576	38.808	10:00		22.8956	36.2586
12:00		31.773	54.2956	12:00		31.4442	50.2163
14:00		35.0661	57.6992	14:00		32.1604	51.138
16:00		21.1788	32.6565	16:00		20.966	33.228
18:00		3.1882	4.5907	18:00		7.312	12.194

8-May	Πάνελ	1	2	9-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		14.021	11.9358	8:00		14.819	13.3119
10:00		46.0338	40.0741	10:00		46.029	40.1781
12:00		67.1853	59.0472	12:00		65.892	58.729
14:00		66.591	58.7182	14:00		73.39	65.626
16:00		48.692	44.2	16:00		47.174	42.24
18:00		16.842	15.7624	18:00		9.44	8.8572
8-May	Πάνελ	1	2	9-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		5.6079	8.673	8:00		7.239	11.934
10:00		23.2125	35.9568	10:00		22.3482	36.966
12:00		31.4002	49.72	12:00		32.2224	52.2379
14:00		30.9632	51.716	14:00		35.3373	57.3456
16:00		20.6864	33.9633	16:00		22.103	36.248
18:00		7.6927	12.229	18:00		3.9514	6.7

10-May	Πάνελ	1	2	11-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		15.6183	11.742	8:00		13.902	12.627
10:00		41.8545	38.148	10:00		34.4265	31.512
12:00		59.1704	53.505	12:00		57.7344	51.765
14:00		59.2	53.56	14:00		48.822	43.05
16:00		43.026	38.916	16:00		50.635	45.144
18:00		13.386	12.586	18:00		12.931	12.928
10-May	Πάνελ	1	2	11-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		6.6636	10.662	8:00		7.46	12.06
10:00		20.4462	33.8688	10:00		19.504	32.399
12:00		28.4088	46.6455	12:00		26.941	43.9285
14:00		28.4031	46.3104	14:00		20.52	33.488
16:00		20.1294	31.71	16:00		18.05	25.55
18:00		5.9367	9.8154	18:00		7.38	12.496

12-May	Πάνελ	1	2	13-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		5.1716	4.9925	8:00		11.0523	10.353
10:00		24.5491	22.22	10:00		30.3	27.117
12:00		51.657	46.33	12:00		61.0182	54.4
14:00		37.3813	34.814	14:00		59.25	53.53
16:00		31.8	30.955	16:00		42.988	39.195
18:00		15.456	14.14	18:00		12.1408	11.4
12-May	Πάνελ	1	2	13-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		2.5515	4.1725	8:00		5.421	8.75
10:00		7.1955	12.278	10:00		14.0625	22.675
12:00		24.635	40.626	12:00		29.344	48.1168
14:00		14.1075	19.767	14:00		28.5208	46.7754
16:00		17.1535	28.6054	16:00		20.5072	33.44
18:00		7.602	12.6936	18:00		5.8179	10.1539

14-May	Πάνελ	1	2	15-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		1.627	1.6974	8:00		26.866	24.128
10:00		7.624	7.272	10:00		6.6312	6.3424
12:00		25.375	21.6864	12:00		26.5186	23.278
14:00		61.1832	54.742	14:00		62.511	56.65
16:00		31.6	29.11	16:00		44.064	39.292
18:00		16.4776	16	18:00		9.5676	9.1678
14-May	Πάνελ	1	2	15-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		0.5564	1.1296	8:00		12.6764	20.6112
10:00		5.0568	8.304	10:00		3.784	6.1938
12:00		14.7686	23.064	12:00		12.3552	20.0256
14:00		18.5823	29.9796	14:00		29.3904	48.7312
16:00		9.5108	15.4088	16:00		20.3732	33.7722
18:00		5.6736	8.9232	18:00		3.7686	6.1938

16-May	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2
Ώρες		P	P
8:00		12.0231	10.918
10:00		42.849	37.98
12:00		60.3	54.234
14:00		63.832	57.546
16:00		42.833	38.502
18:00		9.1679	8.7604
16-May	Πάνελ Καλυμμένο	1	2
Ώρες		P	P
8:00		6.0819	9.8336
10:00		20.496	32.6725
12:00		29.4965	48.4176
14:00		29.6102	49.178
16:00		21.175	34.58
18:00		3.9468	6.716

17-May	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2	18-May	Πάνελ Ακάλυπτο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		15.7605	14.352	8:00		12.2636	11.178
10:00		42.2	38.295	10:00		40.964	37.352
12:00		60.697	53.972	12:00		61.004	54.59
14:00		60.398	54.178	14:00		61.608	55.385
16:00		25.6452	23.575	16:00		45.492	40.768
18:00		1.7622	1.858	18:00		11.3088	10.3428
17-May	Πάνελ Καλυμμένο	1	2	18-May	Πάνελ Καλυμμένο	1	2
Ώρες		P	P	Ώρες		P	P
8:00		8.0539	12.816	8:00		6.1017	9.94
10:00		20.768	34.0527	10:00		20.4129	33.3795
12:00		29.605	48.6024	12:00		30.0812	49.0504
14:00		29.223	47.1108	14:00		29.568	48.2342
16:00		11.7432	18.9283	16:00		21.3675	34.4454
18:00		0.69	1.2753	18:00		4.7216	5.4033



19-May	Πάνελ	1	2	20-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		12.6272	11.592	8:00		5.61	5.226
10:00		15.8112	14.688	10:00		27.1745	23.345
12:00		37.774	33.578	12:00		8.5652	7.932
14:00		17.9816	16.4	14:00		13.6	12.688
16:00		41.1729	37.905	16:00		15.4986	14.42
18:00		13.7243	12.726	18:00		2.7856	2.7188
19-May	Πάνελ	1	2	20-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		6.2764	10.4725	8:00		2.9631	4.9155
10:00		8.2665	13.923	10:00		9.2872	15.1119
12:00		12.2826	19.869	12:00		6.5638	10.8045
14:00		8.1048	13.245	14:00		7.959	13.176
16:00		18.7304	30.8954	16:00		9.0192	14.7518
18:00		2.8577	4.914	18:00		1.0794	1.9864

21-May	Πάνελ	1	2	22-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		2.7824	2.7146	8:00		15.7684	14.214
10:00		12.2016	11.275	10:00		42.411	37.925
12:00		52.89	47.216	12:00		11.97	11.2
14:00		57.268	51.66	14:00		71.196	63.549
16:00		9.7361	9.2825	16:00		44.254	40.56
18:00		14.5484	13.735	18:00		4.5525	4.356
21-May	Πάνελ	1	2	22-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		1.4211	2.3085	8:00		8.0582	12.852
10:00		4.0917	6.7041	10:00		20.574	33.3945
12:00		23.9196	39.4744	12:00		4.3525	7.2756
14:00		10.3704	10.3427	14:00		32.8873	45.7071
16:00		4.8356	8.33	16:00		10.6495	20.3786
18:00		6.5808	11.1258	18:00		1.9908	3.4293

23-May	Πάνελ	1	2	24-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		12.768	11.44	8:00		10.4814	9.588
10:00		41.3793	37.286	10:00		19.62	17.748
12:00		59.094	53.095	12:00		61.1851	54.81
14:00		59.682	53.406	14:00		30.351	40.788
16:00		39.94	36.285	16:00		17.541	15.958
18:00		17.745	16.443	18:00		11.2159	10.6
23-May	Πάνελ	1	2	24-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		6.358	10.3066	8:00		5.0764	8.142
10:00		20.009	33.5616	10:00		9.5732	16.3226
12:00		28.8864	47.814	12:00		31.5336	51.7324
14:00		28.7806	47.2109	14:00		12.0252	19.6914
16:00		18.5526	30.8052	16:00		7.0395	12.1578
18:00		7.8174	13.1475	18:00		4.2888	7.3206

25-May	Πάνελ	1	2	26-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		14.4467	12.978	8:00		8.3893	8.772
10:00		40.1128	36.924	10:00		40.8498	36.72
12:00		59.8	53.915	12:00		58.5414	52.428
14:00		62.109	59.682	14:00		57.2	51.66
16:00		41.006	37.053	16:00		47.235	42.642
18:00		15.6816	13.7655	18:00		15.2391	14.14
25-May	Πάνελ	1	2	26-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		6.8932	11.0502	8:00		3.6729	6.0515
10:00		19.8057	33.1962	10:00		20.0732	33.6154
12:00		29.0136	48.1027	12:00		28.3578	47.0592
14:00		33.3384	55.056	14:00		27.594	45.2931
16:00		19.3698	32.095	16:00		22.4318	37.0668
18:00		7.0668	11.7	18:00		6.7868	11.1345

27-May	Πάνελ	1	2	28-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		13.4826	12.24	8:00		18.4184	18.9
10:00		39.02	35.552	10:00		42.4	38.11
12:00		57.687	52.07	12:00		60.697	53.972
14:00		58.4	52.89	14:00		62.93	56.925
16:00		43.215	38.522	16:00		26.6392	23.575
18:00		18.672	16.968	18:00		2.0826	1.858
27-May	Πάνελ	1	2	28-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		6.5952	11.0112	8:00		9.3394	15.0306
10:00		19.0995	31.684	10:00		20.68	33.9592
12:00		28.35	46.6598	12:00		28.8666	47.547
14:00		28.14	46.1824	14:00		29.8172	35.84
16:00		17.632	32.8485	16:00		19.1568	33.226
18:00		8.9768	13.8606	18:00		5.8377	10.284

29-May	Πάνελ	1	2	30-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		10.945	8.901	8:00		13.736	12.39
10:00		44.2624	38.976	10:00		45	41.193
12:00		60.3064	53.6	12:00		66.178	57.824
14:00		61.7549	56.1	14:00		72.216	65.52
16:00		41.1312	37.758	16:00		46.33	44.1
18:00		14.1192	13.668	18:00		9.37	8.2
29-May	Πάνελ	1	2	30-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		5.2136	8.4694	8:00		6.6675	10.8324
10:00		21.4948	34.848	10:00		21.4092	35.136
12:00		29.232	47.547	12:00		31.0716	50.9366
14:00		29.8011	48.9216	14:00		34.5649	55.6914
16:00		19.3515	33.0464	16:00		21.5264	34.408
18:00		5.6608	10.284	18:00		3.0924	5.36

31-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		18.2728	18.972
10:00		42.9284	38.2395
12:00		60.4989	54.6777
14:00		63.488	57.1564
16:00		26.892	23.2441
18:00		2.2512	1.863
31-May	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		8.7814	14.8716
10:00		20.724	33.8148
12:00		28.9298	47.601
14:00		29.8816	35.88
16:00		19.2088	33.1016
18:00		5.4963	10.29

1-Jun	Πάνελ	1	2	2-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		6.66	5.771	8:00		13.328	10.404
10:00		38.592	33.327	10:00		39.592	33.741
12:00		59.295	52.07	12:00		56.883	50.02
14:00		63	55.622	14:00		58.904	53.244
16:00		46.098	43.442	16:00		43.581	40.795
18:00		15.853	15.246	18:00		13.87	14.673
1-Jun	Πάνελ	1	2	2-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		2.9138	4.78515	8:00		6.0192	8.92164
10:00		18.39754	29.54117	10:00		18.49554	29.34132
12:00		27.7005	46.12286	12:00		27.00288	43.79415
14:00		29.2177	41.1411	14:00		27.5948	44.4168
16:00		21.0335	36.162	16:00		20.2367	33.3421
18:00		7.24175	11.85883	18:00		6.34005	12.92583

3-Jun	Πάνελ	1	2	4-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		5.55	4.975	8:00		8.836	7
10:00		35.244	30.75	10:00		42.188	36.49
12:00		59.295	51.294	12:00		51.282	45.084
14:00		66.33	58.752	14:00		64.26	57.81
16:00		44.2	41.406	16:00		49.5	46.104
18:00		17.28	16.119	18:00		12.474	13.2
3-Jun	Πάνελ	1	2	4-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		2.3996	4.11355	8:00		4.0112	6.01284
10:00		16.44097	27.23949	10:00		19.68738	31.71352
12:00		27.5625	45.47076	12:00		24.1826	39.42259
14:00		31.0586	48.9216	14:00		29.94075	48.04932
16:00		20.54195	34.2463	16:00		23.184	37.7649
18:00		7.9038	12.58961	18:00		5.6991	11.68924

5-Jun	Πάνελ	1	2	6-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		16.791	13.869	8:00		7.998	7.363
10:00		19.2	16.83	10:00		23.912	21.73
12:00		9.858	9.108	12:00		25.273	23.391
14:00		15.936	14.472	14:00		7.36	6.895
16:00		50.18	47.94	16:00		47.28	44.863
18:00		2.873	3.008	18:00		12.096	13
5-Jun	Πάνελ	1	2	6-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		7.806945	11.63815	8:00		3.7066	6.12835
10:00		8.7702	14.95409	10:00		11.14653	19.33357
12:00		4.48552	8.2422	12:00		12.0588	20.89854
14:00		7.6626	10.3899	14:00		3.5763	3.7818
16:00		23.4359	39.8475	16:00		21.7413	37.3756
18:00		1.29744	1.766055	18:00		5.6925	10.01699

7-Jun	Πάνελ	1	2	8-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		11.842	10.504	8:00		12.544	10.045
10:00		40.768	35.148	10:00		39.991	34.68
12:00		66.42	56.304	12:00		57.8	51.294
14:00		47.436	43.054	14:00		62.109	55.62
16:00		56.28	51.294	16:00		64.034	57.886
18:00		17.848	16.646	18:00		9.568	9.85
7-Jun	Πάνελ	1	2	8-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		5.319	8.98934	8:00		5.9072	8.62544
10:00		19.173	30.4773	10:00		18.6557	30.10758
12:00		30.8154	49.38991	12:00		26.97815	44.94435
14:00		22.464	35.10624	14:00		28.93785	46.206
16:00		26.3247	42.2676	16:00		29.75045	48.5361
18:00		7.9965	14.59816	18:00		4.5225	8.876322

9-Jun	Πάνελ	1	2	10-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		11.64	9.135	8:00		11.058	8.932
10:00		39.188	34.138	10:00		38.218	33.734
12:00		57.511	51	12:00		57.036	50.904
14:00		70.149	62.418	14:00		67.2	60.475
16:00		43.956	43.036	16:00		17.572	16.4
18:00		3.344	3.104	18:00		7.955	7.524
9-Jun	Πάνελ	1	2	10-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		5.5986	7.64955	8:00		4.8708	7.66674
10:00		18.6327	30.14161	10:00		17.8088	29.24054
12:00		27.0976	45.14928	12:00		26.58285	44.48651
14:00		32.5554	51.9757	14:00		31.4847	50.3888
16:00		20.7807	35.5722	16:00		8.2955	12.11
18:00		1.51715	1.835055	18:00		3.55395	6.968082

11-Jun	Πάνελ	1	2	12-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		11.712	9.494	8:00		12.288	9.648
10:00		40.6	35.226	10:00		40.976	35.7
12:00		56.628	50.141	12:00		56.26	50.2
14:00		58.305	53.2	14:00		57.23	52.735
16:00		50	45.696	16:00		42.14	39.39
18:00		7.059	6.63	18:00		14.586	15.323
11-Jun	Πάνελ	1	2	12-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		0.54412	7.94685	8:00		5.53257	8.25714
10:00		19.396	31.18537	10:00		19.29165	31.00098
12:00		26.738	44.36222	12:00		26.5482	43.80979
14:00		27.0137	43.9501	14:00		26.8349	43.8732
16:00		23.0516	37.9422	16:00		19.4633	32.449
18:00		3.21165	4.736815	18:00		6.479	13.42891

13-Jun	Πάνελ	1	2	14-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P	Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		12.16	9.6	8:00		11.59	9.2
10:00		38.412	33.165	10:00		38.22	32.724
12:00		55.872	50.049	12:00		55.391	49.352
14:00		55.872	50.8	14:00		49.728	46.168
16:00		48.888	45.426	16:00		29.07	28.314
18:00		14.536	15.288	18:00		14.352	15.015
13-Jun	Πάνελ	1	2	14-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P	Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		5.8212	8.20854	8:00		5.382335	7.68495
10:00		17.8992	28.72368	10:00		18.0774	28.90485
12:00		26.158	43.70635	12:00		25.67136	43.54274
14:00		26.3238	42.1991	14:00		22.9878	37.7797
16:00		22.45	37.8231	16:00		13.1925	22.43375
18:00		6.61625	13.34568	18:00		6.03504	11.64133

15-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Ακάλυπτο	P	P
8:00		12.54	10.2
10:00		36.48	32.039
12:00		55.005	49.2
14:00		56.252	51.106
16:00		50.372	46.258
18:00		15.498	16
15-Jun	Πάνελ	1	2
Ώρες	Καλυμμένο	P	P
8:00		6.0044	8.52945
10:00		17.1496	28.24037
12:00		25.85088	43.4412
14:00		26.419	42.1498
16:00		23.37415	38.02925
18:00		7.07824	12.50054



## Αναφορές -Βιβλιογραφία

1. David R. Brooks, *Bringing the Sun down to Earth: Designing Inexpensive Instruments for Monitoring the Atmosphere*, Springer Science, 2008
2. Ινστιτούτο Αστρονομίας & Αστροφυσικής, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, *Ηλιακό Σύστημα – Ο Ήλιος*, 2004 - 2010. Στο:  
[http://www.astro.noa.gr/journal/Basic/journal\\_solhelios.htm](http://www.astro.noa.gr/journal/Basic/journal_solhelios.htm) .
3. The National Academies of Sciences – Engineering – Medicine, *The Sun*, 2016. Στο:  
<http://needtoknow.nas.edu/energy/energy-sources/the-sun>
4. Paul E. Lydolph, *The Climate of the Earth*, Rowman & Littlefield Publishers Inc, 1989
5. Μάριος Μανώλης, *Ηλιακά Θερμικά Συστήματα – Φωτοβολταϊκά*, Ίδρυμα Ενέργειας Κύπρου
6. Γεώργιος Μπαμπινιώτης, *Λεξικό της Ελληνικής Γλώσσας*, Κέντρο Λεξικολογίας, 2002
7. Κωνσταντίνος Καγκαράκης, *Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία*, Συμμετρία, 1992
8. Αρθούρος Ζερβός, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, Πολυτεχνειακές Εκδόσεις, 2005
9. Ματθαίος Μ. Μιχαλοδημητράκης, *Εισαγωγή στην Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας*, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., 1991
10. Περιβάλλον και Διαχείριση Ενέργειας, *Ηλιακή Ενέργεια*. Στο:  
<http://www.allaboutenergy.gr/HliakiEnergeia.html>
11. Tomas Markvart, (2003), *Ηλεκτρισμός από ηλιακή ενέργεια* , Εκδόσεις ΙΩΝ
12. Νίκος Μαμάσης, *Εισαγωγή στην Ενεργειακή τεχνολογία: Ηλιακή ενέργεια και φωτοβολταϊκά συστήματα*, Τομέας Υδάτινων Πόρων – Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2010. Στο: [http://users.itia.ntua.gr/nikos/energy/ene\\_foto\\_10.pdf](http://users.itia.ntua.gr/nikos/energy/ene_foto_10.pdf)
13. Ελευθέριος Αμανατίδης, *Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Ενότητα 2: Ηλιακή Ενέργεια*, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα, 2015

14. Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης, *Ηλιακή Ενέργεια, Ηλιακοί συλλέκτες*, Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας Τ.Ε.Ι. Κρήτης. Διαθέσιμο στο:  
[http://cyrus.tcdn.teicrete.gr/Portals/23/Shmeioseis/anan\\_piges\\_enegreias/%CE%97%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%BF%CE%AF%20%CF%83%CF%85%CE%BB%CE%BB%CE%AD%CE%BA%CF%84%CE%B5%CF%82.pdf](http://cyrus.tcdn.teicrete.gr/Portals/23/Shmeioseis/anan_piges_enegreias/%CE%97%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%BF%CE%AF%20%CF%83%CF%85%CE%BB%CE%BB%CE%AD%CE%BA%CF%84%CE%B5%CF%82.pdf)
15. Global Energy Network Institute (GENI), *Solar energy in Greece*, 2016. Διαθέσιμο στο: <http://www.geni.org/globalenergy/library/renewable-energy-resources/world/europe/solar-europe/solar-greece.shtml>
16. Τεχνική οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-0/2010, *Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών*, Α΄ έκδοση, Αθήνα, Ιούλιος 2010
17. Duffie, J. A. & Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2<sup>nd</sup> edition, New York, Wiley, 1991
18. Heliosystems Φωτοβολταϊκά συστήματα, Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών. Διαθέσιμο στο: <http://www.selasenergy.gr/fundamentals.php>
19. [http://www.selasenergy.gr/fv\\_panels.php](http://www.selasenergy.gr/fv_panels.php)
20. Yaw-Juen Wang, and Po-Chun Hsu, (2009), «*Analysis of Partially Shaded PV Modules Using Piecewise Linear Parallel Branches Model*»
21. <http://www.energotechniki.gr/site/xpage.asp?sid=211&page=banner2>
22. Ι.Ε Φραγκιαδάκης. “Φωτοβολταϊκά Συστήματα”, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2007
23. Βασιλική Περράκη, “Νέες τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών στοιχείων”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007
24. [en.wikipedia.org/wiki/Main\\_Page](http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page)
25. [www.energypoint.gr](http://www.energypoint.gr)
26. Yaw-Juen Wang, and Po-Chun Hsu, (2009), «*Analysis of Partially Shaded PV Modules Using Piecewise Linear Parallel Branches Model* »

27. <http://electronics-for-beginners.com/pages/page/3010/>
28. <http://openwetware.org/wiki/20.309:DiodePrimer>
29. <http://chuck-wright.com/SolarSprintPV/SolarSprintPV.html>
30. Σταμάτης Δ. Περδίας, (2011), « Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις », Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ-4Μ, 3η Έκδοση
31. [http://www.heliergiaphotovoltaic.gr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=133&Itemid=378&lang=el](http://www.heliergiaphotovoltaic.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=133&Itemid=378&lang=el)
32. 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
33. E. Molenbroek, D. W. Waddington, K.A. Emmery, (1991), « Hot spot susceptibility and testing of PV modules », IEEE
34. Stuart R. Wenham, Martn A. Green, Muriel E. Watt and Richard Corkish, (2007), « Applied Photovoltaics », Earthscan, Secon Edition
35. <http://files.sma.de/dl/7418/GlobalPeak-UGR101210.pdf>
36. <http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/pv-panel.html>