



Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

H/Γ
586

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



Επιβλέπων Καθηγητής: ΤΣΙΩΛΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ
Σπουδαστής: ΚΟΣΜΑΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΑΜ:28176
Σπουδαστής: ΚΡΗΤΙΚΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΑΜ:27121

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Κ. Τσιώλη για την πολύτιμη βοήθεια του κατά την διάρκεια της παρούσας εργασίας. Επίσης την υποψήφια διδάκτωρ του τμήματος Διαχείρισης περιβάλλοντος και φυσικών πόρων του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων κ. Πλένιου Μαγδαλινή για την συμπαράστασή της όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, την γιαγιά μου, τον παππού μου και την θεία μου για όλα όσα μου έχουν προσφέρει.

Η παρούσα εργασία αφιερώνεται στον Πέτρο, τη Βάλια και τον Νίκο.

Κοσμάς Σπύρος

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Κ.Τσιώλη για τις συμβουλές και την καθοδήγησή του κατά την διάρκεια της εργασίας. Επίσης την οικογένειά μου για την βοήθεια της καθ' όλη την διάρκεια της φοίτησής μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γιώργο, για την στήριξη που μου πρόσφερε όλα αυτά τα χρόνια.

Κρητικός Νίκος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	i
Ευχαριστίες	2
Περιεχόμενα	3
Περιεχόμενα	3
Λίστα σχημάτων	4
Λίστα πινακων	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
Summary	8
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.2 Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία διεθνώς	10
1.3 Εισαγωγή στα φωτοβολταϊκά (PV).....	12
1.4 Τύποι φωτοβολταϊκών και παραγωγική διαδικασία	15
1.4.1 Τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων πυριτίου <<μεγάλου πάχους>>	15
1.4.1.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (single Crystalline Silicon, sc-Si)	15
1.4.1.2 Φωτοβολταϊκά κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Multicrystalline Silicon, mc-Si)	18
1.4.1.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon silicon)	20
1.4.2 Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών επιστρώσεων. Thin film	21
1.4.2.1 Δισεληνοΐνδιούχος χαλκός (CuInSe2 ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)	21
1.4.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin Silicon, a-Si).....	21
1.4.4 Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)	22
1.4.5 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)	23
1.4.6 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία	24
1.4.7 Άλλες τεχνολογίες.....	25
1.5 Αρχή Λειτουργίας	25
1.5.1 Αρχές της παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας	29
1.5.2 Σχεδίαση Διάταξης.....	30
1.5.1.1 Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας	30
1.5.1.2 Γωνία της διεύθυνσης του ήλιου με το έδαφος.....	31
1.5.1.3. Θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων	31
1.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ	33
1.6.1. Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας	34
1.6.2. Θερμοκρασία κυττάρου	35
1.6.3. Ταχύτητα του ανέμου.....	35
1.6.4.Ρύπανση	35
1.6.5.Γήρανση	36
1.7 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	36
1.7.1. Οπτικές απώλειες	36
1.8 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα	37
1.9 Το λειτουργικό μοντέλο (effective solar cell model).....	41
1.10 Διατάξεις φωτοβολταϊκών πλαισίων	42

1.11 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ	45
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ	47
2.1 Εισαγωγή - ΣΚΙΑΣΗ.....	47
2.2 ΣΚΙΑΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΔΙΑΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΣΕ ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ...	49
2.2.1 Γεωμετρία Σκίασης.....	49
2.2.2.Σκίαση από Κατακόρυφο Στύλο.....	50
2.2.3. Σκίαση από Κατακόρυφο Συλλέκτη.....	53
2.2.4 Σκίαση από Κεκλιμένο Στύλο.....	54
2.2.5 Σκίαση από Κεκλιμένο Συλλέκτη.....	55
2.2.6. Ύψος και Εμβαδό Σκίασης.....	56
2.3 Μεταβολές Σκίασης στην Επιφάνεια φβ Συλλεκτών	58
2.4 Σκιασμένη Επιφάνεια Φβ Συλλέκτη	59
2.5 Συμπεράσματα και Περαιτέρω Έρευνα.....	62
2.6 Επίδραση σκίασης στην ηλεκτρική απόκριση φωτοβολταϊκών στοιχείων	63
2.6.1 Ηλεκτρική Απόκριση υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης.....	63
2.7 Λειτουργία χωρίς δίοδο bypass.....	65
2.8 Επίδραση διόδου bypass.....	68
2.9 Μελέτη σκίασης με χρήση του λογισμικού PSPICE	70
2.9.1 Ιδανικό Ισοδύναμο Κύκλωμα	71
2.9.2 Μοντέλο PSpice Ιδανικού φβ Στοιχείου.....	71
2.9.3 Γενικευμένο Μοντέλο φβ Στοιχείου.....	74
2.10 Μοντέλο PSpice φβ Πλαισίου	76
2.11 Μετάβαση σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας.....	79
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ	83
3.1 Ερευνητικά αποτελέσματα.....	83
3.2 Υπολογισμός απόδοσης ηλιακής κυψέλης	85
3.3 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.....	85
4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ	89
4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	89
4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	98
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	99
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	102
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	104

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1: Εξέλιξη της πρωτογενούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε Mtoe(τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου) για τα έτη 1971-2005. Πηγή www.iea.org	9
Εικόνα 2:Συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την Ευρωπαϊκή Ένωση των 15, ανά τομέα για το έτος 2000 και πρόβλεψη για τα έτη 2010 και 2020.	10
Εικόνα 3: Εξέλιξη της παγκόσμιας αγοράς φωτοβολταϊκών σε MWp.	11
Εικόνα 4: Συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην συνολική πρωτογενή παραγωγή στις χώρες της IEA (International Energy Agency) για το έτος 2002. Πηγή www.iea.org	12

Εικόνα 5: Μέθοδος Czochranski	16
Εικόνα 6: Κοπή με τη μέθοδο των πολλαπλών συρμάτων	17
Εικόνα 7: Καταμερισμός του κόστους παραγωγής ενός φ/β στοιχείου ανά διαδικασία. Δεξιά αναλύεται το κόστος δημιουργίας δισκιδίων πυριτίου.	17
Εικόνα 8: Δομικό διάγραμμα της διαδικασίας παρασκευής ενός στοιχείου μονοκρυσταλλικού πυριτίου	18
Εικόνα 9: Μέθοδος Bridgman για την παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου	19
Εικόνα 10: Μέθοδος block casting.	20
Εικόνα 11: Δομή του ηλιακού στοιχείου CIS	21
Εικόνα 12: Δομή του ηλιακού στοιχείου CdTe	23
Εικόνα 13: Μερίδιο αγοράς των διαφόρων τεχνολογιών φ/β κυψελών	24
Εικόνα 14: Τύποι φ/β και αποδοτικότητα	25
Εικόνα 15: Παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος	29
Εικόνα 16:	29
Εικόνα 17: Μεταβολή της χαρακτηριστικής καμπύλης ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.	30
Εικόνα 18: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ισχύ εξόδου της κυψέλης	33
Εικόνα 19: Ισοδύναμο κύκλωμα όταν η κυψέλη δεν απορροφά φως	38
Εικόνα 20: Ισοδύναμο κύκλωμα όταν η κυψέλη απορροφά φως	39
Εικόνα 21: Ισοδύναμο κύκλωμα τυποποιημένου μοντέλου	40
Εικόνα 22	42
Εικόνα 23: Φωτοβολταϊκό στοιχείο, μονάδα, πλαίσιο και διάταξη	43
Εικόνα 24: Παράλληλη σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων	44
Εικόνα 25: Σύνδεση στοιχείων σε σειρά σε ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο	44
Εικόνα 26: Σχηματική παράθεση στοιχείων	44
Εικόνα 27: Βέλτιστες γωνίες σταθερού προσανατολισμού	46
Εικόνα 28: Διάταξη φ/β στοιχείων σε σειρά με ένα σκιαζόμενο	48
Εικόνα 29: Συνιστώσες σκιάς κατακόρυφου στύλου	51
Εικόνα 30: Συνιστώσες σκιάς κατακόρυφου στύλου κατά τον άξονα Βορρά-Νότου συναρτήσει της ώρας	51
Εικόνα 31: Συνιστώσες σκιάς κατακόρυφου στύλου κατά τον άξονα Ανατολής-Δύσης συναρτήσει της ώρας	52
Εικόνα 32	53
Εικόνα 33: Σκίαση κατακόρυφου συλλέκτη κατά το μήνα Ιανουάριο	54
Εικόνα 34: Συνιστώσες σκιάς κεκλιμένου στύλου	55
Εικόνα 35: Σχετική θέση δύο κεκλιμένων συλλεκτών	56
Εικόνα 36: Σκίαση κεκλιμένου συλλέκτη	56
Εικόνα 37: Σκίαση από παρακείμενους συλλέκτες	59
Εικόνα 38: Ολική χαρακτηριστική ρεύματος τάσης	64
Εικόνα 39: I-V χαρακτηριστική για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας	65
Εικόνα 40: I-V χαρακτηριστική για διαφορετικό αριθμό σκιασμένων στοιχείων	66
Εικόνα 41: I-V χαρακτηριστικές ασκίαστων και σκιασμένων στοιχείων συνδεδεμένων εν σειρά:	67
Εικόνα 42: Σκίαση ενός στοιχείου με διαφορετικά ποσοστά	68
Εικόνα 43: Επίδραση της αύξησης του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε μια ακολουθία 18 στοιχείων	69
Εικόνα 44: Επίδραση της αύξησης του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε ένα σύστημα με 3 ακολουθίες των 18 στοιχείων (α) σκιασμένα στοιχεία στην ίδια ακολουθία (β) σκιασμένα στοιχεία σε διαφορετικές ακολουθίες	70

Εικόνα 45: Αναπαράσταση υποκυκλώματος φβ στοιχείου και αντίστοιχο μπλοκ διάγραμμα	72
Εικόνα 46: Κύκλωμα μέτρησης I-V χαρακτηριστικής φβ στοιχείου	72
Εικόνα 47: Υποκύκλωμα δύο διόδων και αντιστάσεων εν σειρά και παράλληλης.....	76
Εικόνα 48: Μοντέλο PSpice για το κύκλωμα φβ πλαισίου	79
Εικόνα 49: Κύκλωμα μετατροπής σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας.....	82
Εικόνα 50: Επιδρασεις του επιπέδου της ηλιακής ακτινοβολίας στη χαρακτηριστική ισχύος -τάσης	83
Εικόνα 51: Επιδράσεις του επιπέδου της ηλιακής ακτινοβολίας στη χαρακτηριστική ισχύος-ρεύματος.....	84
Εικόνα 52: Επιδράσεις της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική ισχύος-τάσης.....	84
Εικόνα 53: Επίδραση της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική τάσης- ρεύματος.....	84

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Σκίαση πλαισίων κατά τη διάρκεια της 21ης Δεκεμβρίου.....	60
Πίνακας 2: Ποσοστά του χρόνου κατά τη διάρκεια της 21ης Δεκεμβρίου στα όποια το πλαίσιο ήταν εντελώς ασκίαστο	60
Πίνακας 3: Άμεση προσπίπτουσα σε ένα πλαίσιο ακτινοβολία σε kWh κατά την 21 ^η Δεκεμβρίου	60
Πίνακας 4: Σύγκριση πλαισίων που υπόκεινται σε σκίαση για τις δύο διαμορφώσεις	61

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα μελετήσουμε την επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Μέσω πληθώρας μετρήσεων συνολικής διάρκειας 1 έτους θα προσπαθήσουμε να καταλήξουμε σε πολύτιμα συμπεράσματα και να κατανοήσουμε τον σημαντικό ρόλο που έχουν οι περιβαλλοντικοί παράγοντες και κυρίως η θερμοκρασία, στην απόδοση των συστημάτων αυτών. Επίσης γίνεται μια θεωρητική προσέγγιση στο φαινόμενο της σκίασης και την αρνητική επιρροή που αυτή έχει στην λειτουργία των συστημάτων.

Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στα φωτοβολταϊκά συστήματα, στον τρόπο λειτουργίας τους, στην διαδικασία παραγωγής τους και στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αυτά παρουσιάζουν.

Στο 2^ο κεφάλαιο μελετάτε το φαινόμενο της σκίασης ή φαινόμενο hot-spot και γίνεται μια προσπάθεια κατανόησης του μέσω μιας αναλυτικής παρουσίασής.

Στο 3^ο κεφάλαιο καταγράφονται συμπεράσματα και μαθηματικοί τύποι οι οποίοι είναι αποτέλεσμα χρόνιων μελετών από διάφορους ερευνητές.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η έρευνά μας μέσω χιλιάδων μετρήσεων και η προσπάθεια εξεύρεσης αλγορίθμου που να εκφράζει την θερμοκρασία λειτουργίας του φ/β συναρτήσει της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Επίσης σχολιάζονται τα αποτελέσματα και τα γραφήματα.

Τέλος, έχουμε μια καταγραφή των συμπερασμάτων μας, και τις απόψεις μας για τυχόν μελλοντική έρευνα.

SUMMARY

In this thesis we will study the impact of the environmental temperature in the operation of photovoltaic systems. Through multiple measurements lasting a total of 1 year, we will try to reach valuable conclusions and understand the important role which environmental factors and in particular, temperature, have in the performance of these systems. There is also a theoretical approach to the hot-spot phenomenon and the influence which has in operation of these systems.

Initially, we have an introduction to pv systems, in their operation mode, production progress and , advantages and disadvantages that they are showing.

In chapter 2 we will meet the hot-spot phenomenon and make an attempt to understand it through an analytical presentation.

In chapter 3 we register conclusions and mathematical formulas which are the result of years of scientific researches.

In final chapter we are representing our research through thousands of measurements and the effort of finding an algorithm which expresses the connection between pv and environmental temperature. Moreover, results and graphs are explained.

Finally we have our conclusions about this research and our opinion for further research in the future.

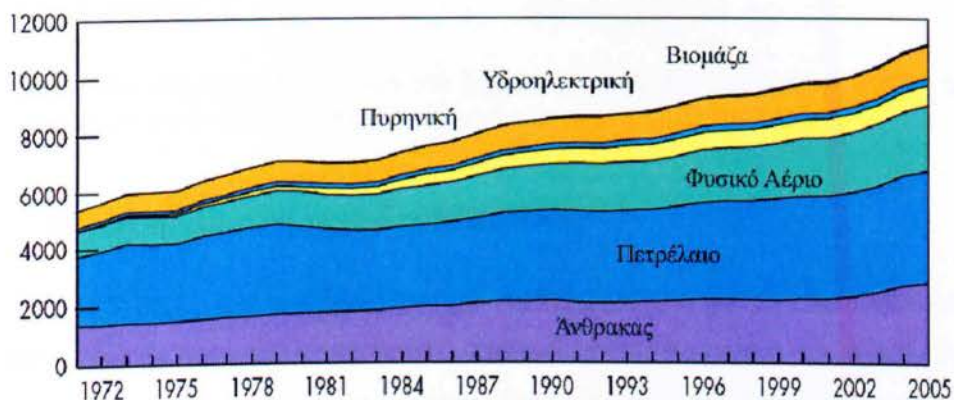
Keywords: Photovoltaics, PV Temperature, Environmental Temperature, Hot-Spot phenomenon, Algorithm

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τελευταίες εξελίξεις στο περιβάλλον καθιστούν το μέλλον του πλανήτη αβέβαιο. Πιο πολύ από ποτέ ο άνθρωπος έχει αρχίσει να συνειδητοποιεί ότι οι παρεμβάσεις στο περιβάλλον δεν μπορούν να συνεχίσουν να είναι ανεξέλεγκτες. Από τα μεγαλύτερα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα σήμερα είναι η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας.

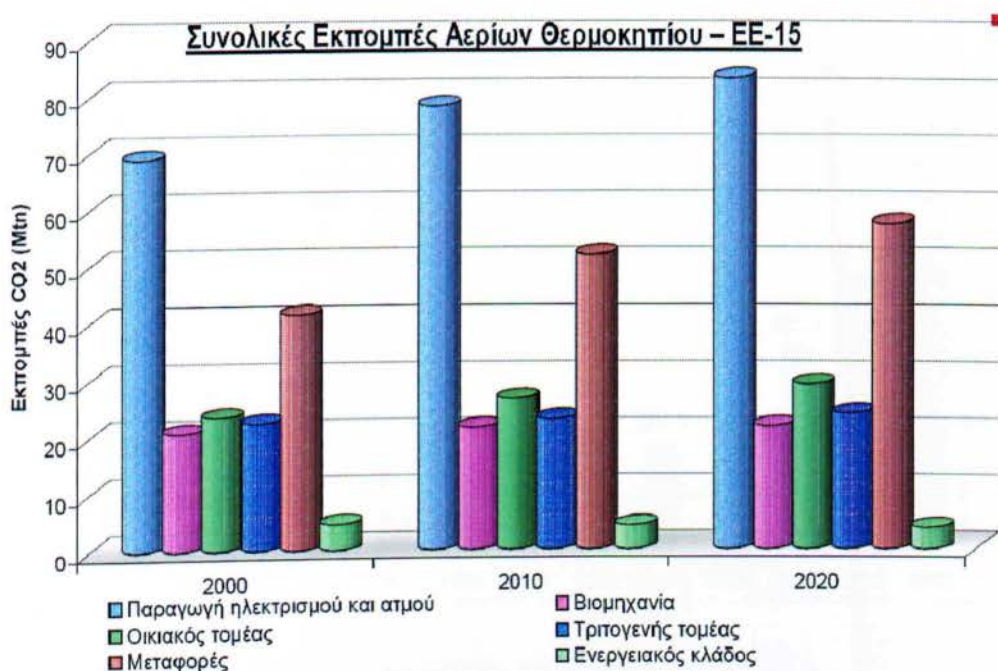
Οι συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες αναγνωρίζονται ευρέως ως το κύριο αίτιο της καταστροφής του περιβάλλοντος, από την άποψη τόσο της εξάντλησης των φυσικών πόρων όσο και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Υπάρχουν ολοένα και ισχυρότερες ενδείξεις ότι η κλιματική αλλαγή οφείλεται στις εκπομπές του αερίου του θερμοκηπίου, οι οποίες προέρχονται σε μεγάλο βαθμό από τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και από τις μεταφορές (Εικόνα 1). Είναι επομένως επιτακτική ανάγκη, η στροφή σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας και κυρίως στις ανανεώσιμες, οι οποίες και εντελώς φιλικές προς το περιβάλλον είναι και ανεξάντλητες. Αντίθετα το πετρέλαιο και τα ορυκτά καύσιμα, αν και βραχυπρόθεσμα υπάρχουν ακόμα αρκετά αποθέματα, σε βάθος χρόνου ίσως και ενός αιώνα θα εξαντληθούν, ενώ η πλήρης εξάρτηση από αυτά δημιουργεί σοβαρά οικονομικά προβλήματα σε κάθε αύξηση των τιμών τους.



Εικόνα 1: Εξέλιξη της πρωτογενούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε Mtoe(τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου) για τα έτη 1971-2005. Πηγή www.iea.org

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή ήπιες μορφές ενέργειας προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες και μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδατοπτώσεις
- Βιομάζα
- Γεωθερμική ενέργεια
- Ενέργεια από παλίρροιες
- Ενέργεια από κύματα
- Ενέργεια από τους ωκεανούς



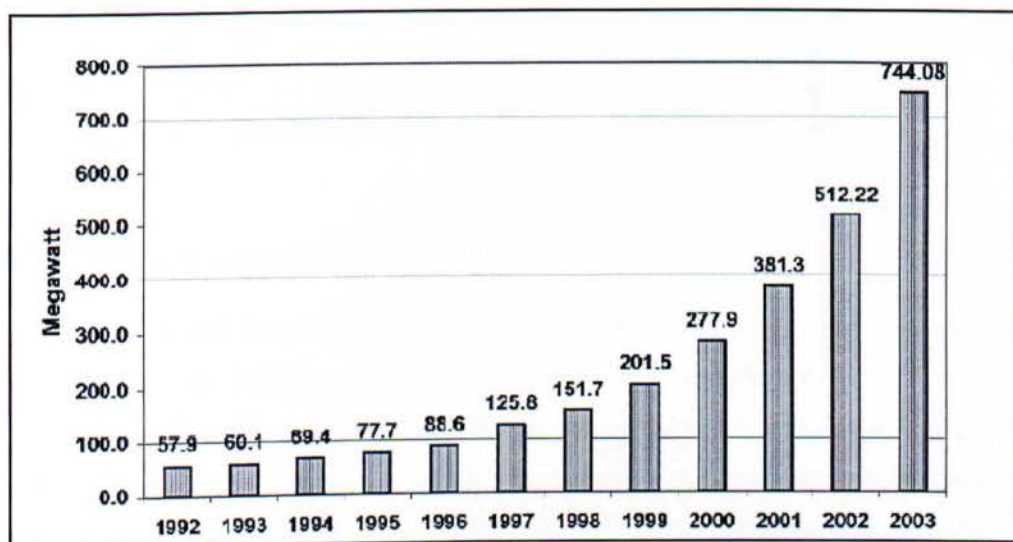
Εικόνα 2: Συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την Ευρωπαϊκή Ένωση των 15, ανά τομέα για το έτος 2000 και πρόβλεψη για τα έτη 2010 και 2020.

1.2 Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία διεθνώς

Είναι γεγονός μια μεγάλη στροφή διεθνώς, όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τόσο από τις κυβερνήσεις όσο και από μεγάλες εταιρίες και επενδυτές. Σε αντίθεση με το παρελθόν η ανάπτυξη σήμερα συνδέεται άμεσα με περιβαλλοντικά ζητήματα, τα οποία αποτελούν σημαντική συνιστώσα σε οποιοδήποτε ενεργειακό επενδυτικό σχέδιο. Η αναγκαιότητα αυτή πηγάζει κυρίως από την μεγάλη αλλαγή, που έχει συμβεί στην

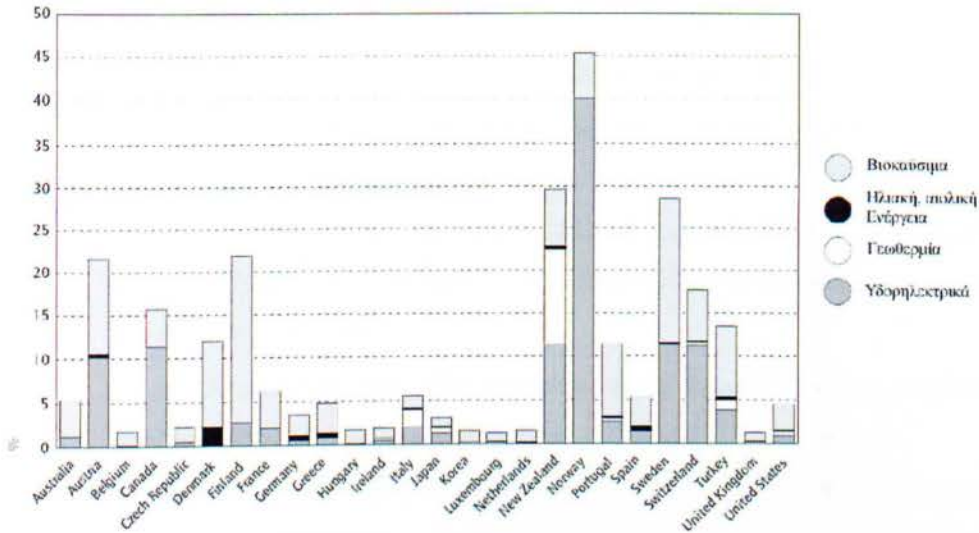
κοινή γνώμη όσον αφορά την περιβαλλοντική συνείδηση και από τις αδιαμφισβήτητες κλιματολογικές αλλαγές, των τελευταίων χρόνων, οι οποίες εκτός των άλλων έχουν σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις. Το αποτέλεσμα είναι, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να μετατραπούν σε λύση πρώτης προτεραιότητας για μια ισορροπημένη ανάπτυξη. Όπως είναι αναμενόμενο, υπάρχουν μεγάλες διαφορές από χώρα σε χώρα, όσον αφορά το ποια μορφή ενέργειας θα χρησιμοποιηθεί. Καθοριστικό ρόλο παίζουν οι γεωλογικές και κλιματολογικές συνθήκες, έτσι ώστε η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να είναι αποδοτική.

Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία εμφανίζει μια ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια διεθνώς, όπως βλέπουμε και παρακάτω(Εικόνα 3)



Εικόνα 3: Εξέλιξη της παγκόσμιας αγοράς φωτοβολταϊκών σε MWp.

Ταυτόχρονα γίνεται μεγάλη προσπάθεια στον τομέα της έρευνας, με σκοπό την εξεύρεση νέων υλικών, αλλά και λιγότερο ενεργοβόρων διαδικασιών παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων, γεγονότα που από την μια θα αυξήσουν την απόδοση και από την άλλη θα μειώσουν το κόστος παραγωγής. Οι δύο τελευταίες παράμετροι αποτελούν και τα κύρια μειονεκτήματα της φ/β τεχνολογίας, τα οποία εμποδίζουν την περαιτέρω ανάπτυξή της. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι παρόλο που η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φ/β στοιχείων τα τελευταία χρόνια είναι πολλαπλάσια αν συγκριθεί με την κατάσταση προ μερικών δεκαετιών, εντούτοις παραμένει σε πολύ χαμηλά ποσοστά, όσον αφορά τη συνεισφορά στην συνολική πρωτογενή παραγωγή (Εικόνα 4).



Εικόνα 4: Συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην συνολική πρωτογενή παραγωγή στις χώρες της IEA (International Energy Agency) για το έτος 2002. Πηγή www.iea.org

1.3 Εισαγωγή στα φωτοβολταϊκά (PV)

Για την εκμετάλλευση των παραπάνω ήπιων μορφών ενέργειας έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες τεχνολογίες. Ανάμεσα στις άλλες τεχνολογίες, οι οποίες εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια είναι και η φωτοβολταϊκή τεχνολογία, η οποία κερδίζει ευρεία αποδοχή ως ένας τρόπος διατήρησης και βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου χωρίς να βλάπτεται το περιβάλλον. Όλο και περισσότερες εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανταποκρίνονται στις επιθυμίες των καταναλωτών συμπεριλαμβάνοντας τα φωτοβολταϊκά στον παραγωγικό μηχανισμό.

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών χρησιμοποιεί ημιαγωγά υλικά σε μορφή κυψέλης (cell) διαφόρων cm^2 σε μέγεθος. Από την όψη της φυσικής στερεάς κατάστασης, μια κυψέλη είναι ουσιαστικά μια εκτεταμένη σε μέγεθος δίοδος p-n, με την ένωση (junction) των δύο στρωμάτων να βρίσκεται κοντά στην πάνω επιφάνεια. Η κυψέλη μετατρέπει άμεσα το ηλιακό φως σε ηλεκτρικό συνεχές ρεύμα. Πολυάριθμες κυψέλες συνδέονται μαζί σε ένα πλαίσιο (module) ώστε να παράγουν την απαιτούμενη ισχύ.

Κύρια πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών είναι:

- Είναι από τους πλέον φιλικούς προς το περιβάλλον τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς δεν εκπέμπονται τοξικά ή άλλα αέρια και δεν επιβαρύνεται το οικοσύστημα με την παραγωγή παραπροϊόντων κατά την διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής.
- Πηγή ενέργειας αποτελεί η ηλιακή ακτινοβολία και ως πρώτη ύλη κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων επιλέγονται υλικά που υπάρχουν σε αφθονία στη φύση.
- Χαρακτηρίζονται από τεράστιο εύρος εφαρμογών και μπορούν να τοποθετηθούν παντού αρκεί να υπάρχει στοιχειώδης ηλιοφάνεια.
- Έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής και δεν απαιτούν συχνές και δαπανηρές συντηρήσεις.
- Ένα φωτοβολταϊκό είναι ανεξάρτητο από ηλεκτρικά δίκτυα διανομής ενώ σε περιπτώσεις αυτόνομων δικτύων υπάρχει το όφελος της μη ύπαρξης απωλειών κατά τη διαδικασία μεταφοράς και διανομής.
- Είναι αθόρυβα
- Η μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συμβαδίζει στις περισσότερες των περιπτώσεων με τη μέγιστη ζήτηση.

Στον αντίποδα υπάρχουν για την ώρα και αρκετά μειονεκτήματα, όπως:

- Υψηλό κόστος κατασκευής του συστήματος λόγω του ότι από μόνη της η διαδικασία παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι δαπανηρή.
- Έχουν χαμηλό βαθμό απόδοσης, κάτι που σημαίνει απαίτηση μεγάλων εκτάσεων και επιφανειών προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική παραγωγή ισχύος.
- Υψηλό κόστος εγκατάστασης, όποτε και σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος αγοράς τους οδηγούν σε μεγάλη χρονική διάρκεια για να γίνει απόσβεση.

Το ενθαρρυντικό στα παραπάνω είναι ότι τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει μεγάλα βήματα προόδου στις τιμές των φωτοβολταϊκών οι οποίες έχουν πέσει αισθητά, όπως και στις αποδόσεις τους οι οποίες εμφανίζουν ανοδική πορεία.

Το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο για να κατασκευαστούν φωτοβολταϊκά στοιχεία στην βιομηχανία είναι το πυρίτιο. Είναι ίσως και το μοναδικό υλικό που παράγεται με τόσο μαζικό τρόπο. Το πυρίτιο σήμερα αποτελεί την πρώτη ύλη για **το 90% της αγοράς** των φωτοβολταϊκών.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του πυριτίου είναι:

- Μπορεί να βρεθεί πάρα πολύ εύκολα στην φύση. Είναι το δεύτερο σε αφθονία υλικό που υπάρχει στον πλανήτη μετά το οξυγόνο. Το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2 ή κοινώς η άμμος) και ο χαλαζίτης αποτελούν το 28% του φλοιού της γης. Είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον.
- Μπορεί εύκολα να λιώσει και να μορφοποιηθεί. Επίσης είναι σχετικά εύκολο να μετατραπεί στην μονοκρυσταλλική του μορφή.
- Οι ηλεκτρικές του ιδιότητες μπορούν να διατηρηθούν μέχρι και στους $125^\circ C$ κάτι που επιτρέπει την χρήση πυριτίου σε ιδιαίτερα δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτός είναι και ο λόγος που τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου ανταπεξέρχονται σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.
- Πολύ σημαντικό στοιχείο που συνέβαλε στην γρήγορη ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων τα τελευταία χρόνια, ήταν η ήδη ανεπτυγμένη τεχνολογία, στην βιομηχανία της επεξεργασίας του πυριτίου, στον τομέα της ηλεκτρονικής (υπολογιστές, τηλεοράσεις κλπ). Το 2007 μάλιστα ήταν η πρώτη χρονιά που υπήρχε μεγαλύτερη ζήτηση (σε τόνους κρυσταλλικού πυριτίου) στην αγορά φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σχέση με αυτήν των ημιαγωγών της ηλεκτρονικής.
- Μία κατηγοριοποίηση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία θα μπορούσε να γίνει με βάση το πάχος του υλικού που χρησιμοποιείται.

1.4 Τύποι φωτοβολταϊκών και παραγωγική διαδικασία

1.4.1 Τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων πυριτίου <<μεγάλου πάχους>>

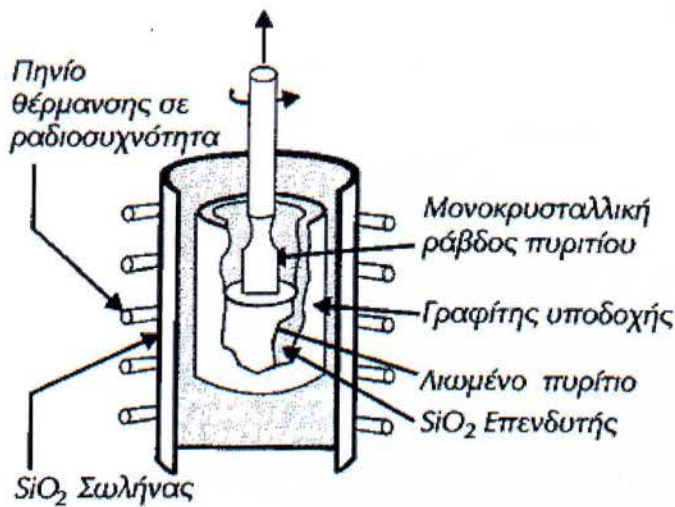
1.4.1.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (*single Crystalline Silicon, sc-Si*)

Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά. Η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 – 18% για το πλαίσιο. Εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας η «ενεργειακής πυκνότητας». Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου.

Παραγωγική Διαδικασία

Το διοξείδιο του πυριτίου κατά την διαδικασία εξευμενισμού του (αφαίρεση των προσμίξεων) θερμαίνεται στους 1800 °C παρουσία άνθρακα. Το μεταλλουργικό πυρίτιο που προκύπτει από αυτή την διαδικασία έχει μια καθαρότητα της τάξης του 98% και μπορεί μεν να χρησιμοποιηθεί στην μεταλλουργική βιομηχανία, είναι δε τελείως ακατάλληλο ως ημιαγωγός. Απαιτείται επομένως περαιτέρω επεξεργασία. Σε πρώτη φάση γίνεται ανάτηξη και στη συνέχεια αντίδραση με υδροχλώριο (HCl), μετατρέποντας το μεταλλουργικό πυρίτιο σε τριχλωροσιλάνιο (SiHCl₃) που είναι ένα πτητικό υγρό. Εν συνεχεία αποχωρίζεται από διάφορες προσμίξεις μέσω κλασματικής απόσταξης (μέθοδος Siemens).

Τέλος ανάγεται με υδρογόνο και συμπυκνώνεται. Πρέπει να τονιστεί ότι οι παραπάνω διαδικασίες είναι εξαιρετικά ενεργοβόρες και συντελούν στο υψηλό κόστος κατασκευής των φ/β στοιχείων. Το τελικό προϊόν είναι ένα υψηλής καθαρότητας πυρίτιο (με συγκέντρωση προσμίξεων μικρότερη από 1 άτομο ανά 10¹² άτομα Si), που δεν έχει όμως την επιθυμητή δομή.

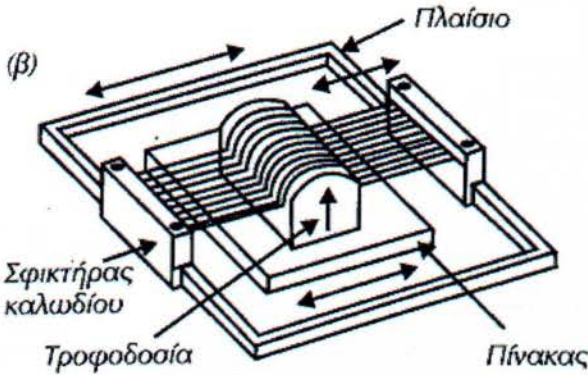


Εικόνα 5: Μέθοδος Czochralski.

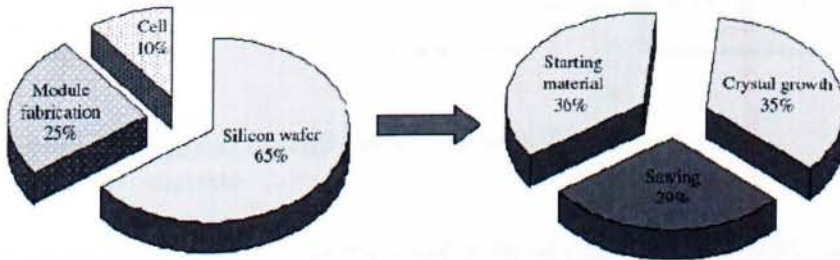
Ακολουθεί η κρυσταλλική ανάπτυξη του πυριτίου συνήθως με την μέθοδο Czochralski (Εικόνα 5), κατά την οποία αρχικά τήκεται αυτό μέσα σε ένα κυλινδρικό δοχείο και σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 1400 °C. Έπειτα ένα πολύ μικρό κομμάτι κρυσταλλικού πυριτίου τοποθετείται σε επαφή με την επιφάνεια του λιωμένου πυριτίου, ενώ το κυλινδρικό δοχείο βρίσκεται σε περιστροφική κίνηση. Το κομμάτι πυριτίου δρα σαν πυρήνας κρυστάλλωσης και έτσι το πυρίτιο επικάθεται σε αυτό με αποτέλεσμα να μεγαλώσει και να σχηματισθεί σταδιακά ένας νέος μεγάλος κρύσταλλος πυριτίου με την συνεχή ανύψωση από το λιωμένο πυρίτιο. Αποτέλεσμα της μεθόδου είναι το πυρίτιο να αποκτήσει μια κυλινδρική μορφή με διάμετρο περίπου 10cm και μήκους 1m. Εν συνεχεία ο κύλινδρος αυτός πρέπει να κοπεί σε πολύ λεπτούς δίσκους (κυλινδρικές πλάκες), πάχους που κυμαίνεται από 150μm μέχρι 500μm για τις ηλιακές εφαρμογές. Η διαδικασία είναι εξαιρετικά δαπανηρή, καθώς το πυρίτιο είναι πολύ σκληρό υλικό και επιπλέον ένα ποσοστό χάνεται κατά την κοπή, που φτάνει μέχρι και το 50%. Μια μέθοδος κοπής που περιορίζει κάπως τις παραπάνω απώλειες φαίνεται στο Σχήμα 1.2 και στηρίζεται στη κοπή με πολύ λεπτή διαμαντένια ίνα. Οι δίσκοι έπειτα λειαινούνται για την απομάκρυνση των ελαττωμάτων της κοπής και διαμορφώνονται σε διόδους τύπου-p ή τύπου-n με επίταξη, διάχυση ή εμφύτευση προσμίξεων.

Το τελικό στάδιο είναι η συγκόλληση των ηλεκτροδίων στην εμπρός και πίσω όψη του δίσκου, η αλληλοσύνδεση των έτοιμων πια στοιχείων, η κάλυψη της εμπρός

επιφανείας τους με ένα ανταναικλαστικό επίστρωμα για την μείωση της ανάκλασης του φωτός και η στεγανή συσκευασία σε πλαίσια.

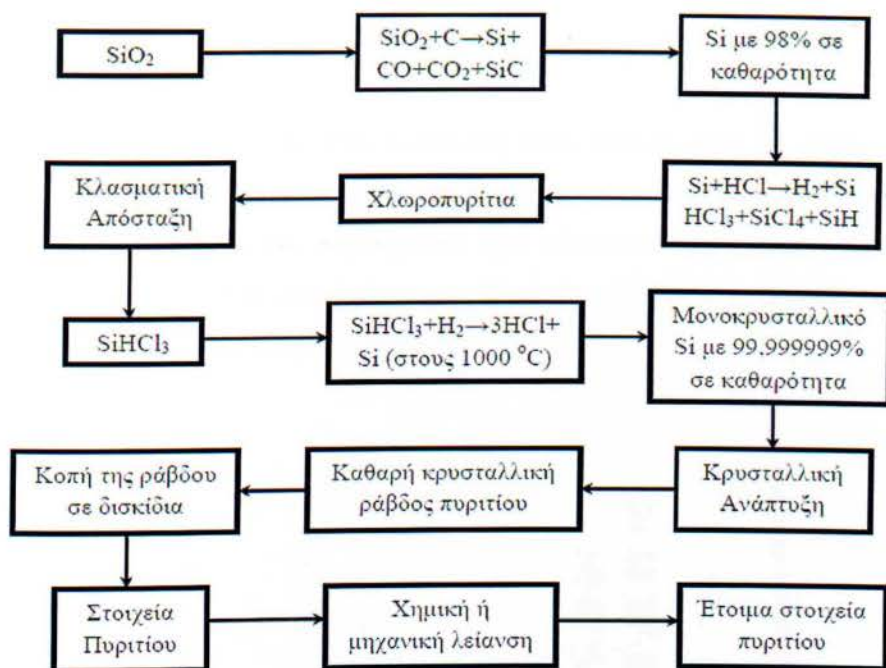


Εικόνα 6: Κοπή με τη μέθοδο των πολλαπλών συρμάτων.



Εικόνα 7: Καταμερισμός του κόστους παραγωγής ενός φ/β στοιχείου ανά διαδικασία. Δεξιά αναλύεται το κόστος δημιουργίας δισκιδίων πυριτίου.

Το κόστος ανά παραγωγική διαδικασία παρουσιάζεται στην εικόνα 7, όπου φαίνεται ότι μεγάλο μέρος αποτελεί η παραγωγή καθαρού πυριτίου σε κρυσταλλική δομή (μέθοδος Czochralski) και η κοπή του σε λεπτά δισκίδια (πλάκες). Συγκεντρωτικά η διαδικασία παραγωγής μονοκρυσταλλικού πυριτίου φαίνεται στο δομικό διάγραμμα στην εικόνα 8.



Εικόνα 8: Δομικό διάγραμμα της διαδικασίας παρασκευής ενός στοιχείου μονοκρυσταλλικού πυριτίου

1.4.1.2 Φωτοβολταϊκά κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Multicrystalline Silicon, mc-Si)

Το πάχος του είναι επίσης 0.3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτή των μονοκρυσταλλικών, γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά

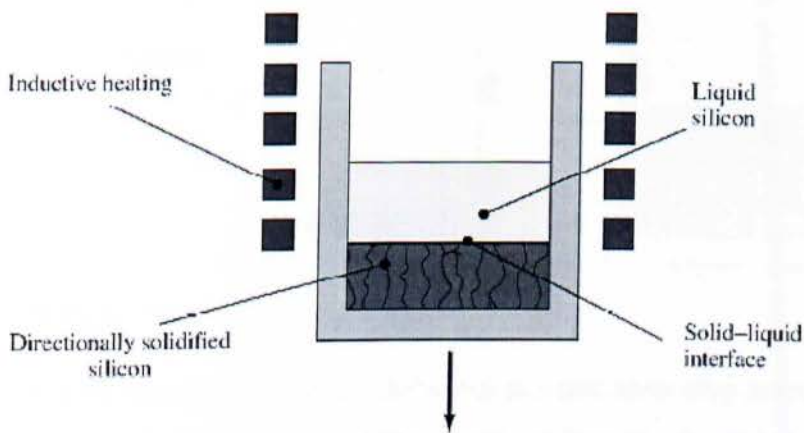
Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13%-15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ). Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου («χύτευση») και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.

Παραγωγική Διαδικασία

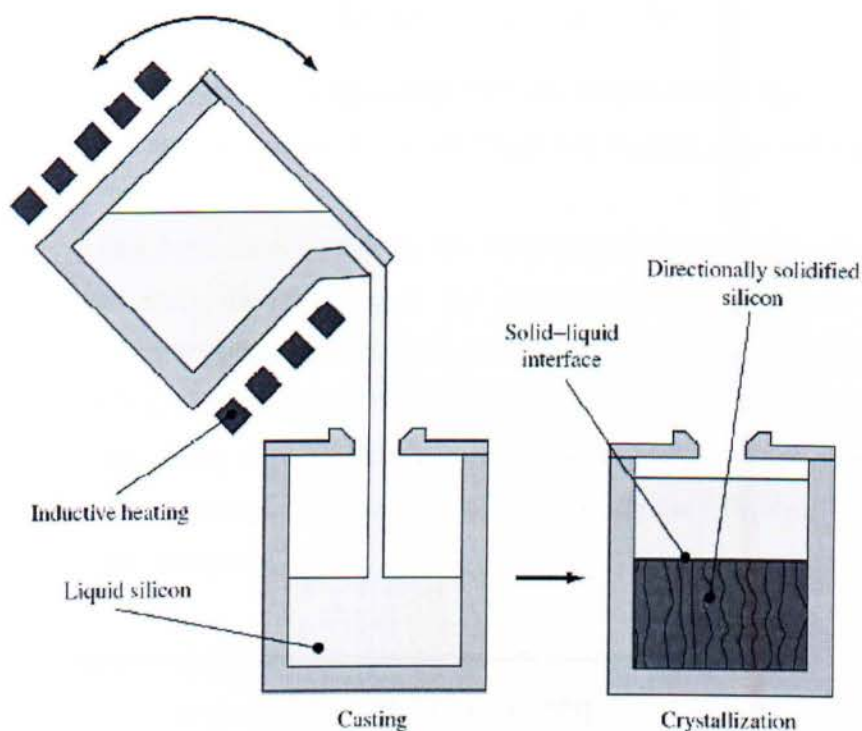
Η παραγωγή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου διαφοροποιείται από την παραπάνω διαδικασία στο γεγονός ότι αντί της μεθόδου Czochranski για την επίτευξη «τέλειας»

κρυσταλλικής δομής, το υψηλής καθαρότητας πυρίτιο, απλά τήκεται και τοποθετείται σε ένα δοχείο με τετραγωνική βάση, όπου και αφήνεται να στερεοποιηθεί (μέθοδος Bridgman) (Σχήμα 1.5).

Εναλλακτικά χρησιμοποιείται η μέθοδος block casting, όπου το πυρίτιο τήκεται σε ένα δοχείο και έπειτα μεταφέρεται σε ένα δεύτερο όπου και στερεοποιείται (Σχήμα 1.6). Το στερεό πυρίτιο που δημιουργείται έχει πολυκρυσταλλική δομή. Ακολουθεί η κοπή με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω και η διαδικασία ολοκληρώνεται με τον ίδιο τρόπο με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.



Εικόνα 9: Μέθοδος Bridgman για την παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου.



Εικόνα 10: Μέθοδος block casting.

Η διαδικασία παραγωγής πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι φθηνότερη από αυτή του μονοκρυσταλλικού. Επιπλέον οι τετραγωνικές πλάκες που προκύπτουν από την κοπή πλεονεκτούν στο γεγονός ότι μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή τετραγωνικών φ/β στοιχείων σε αντίθεση με τους δίσκους που είναι κυκλικοί. Αυτό έχει σαν συνέπεια τον μεγαλύτερο δείκτη κάλυψης του φ/β πλαισίου. Από τη άλλη εμφανίζουν μικρότερη απόδοση, όπως έχει αναφερθεί κα παραπάνω.

1.4.1.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon silicon)

Πρόκειται για μία σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών κυψελών πυριτίου.

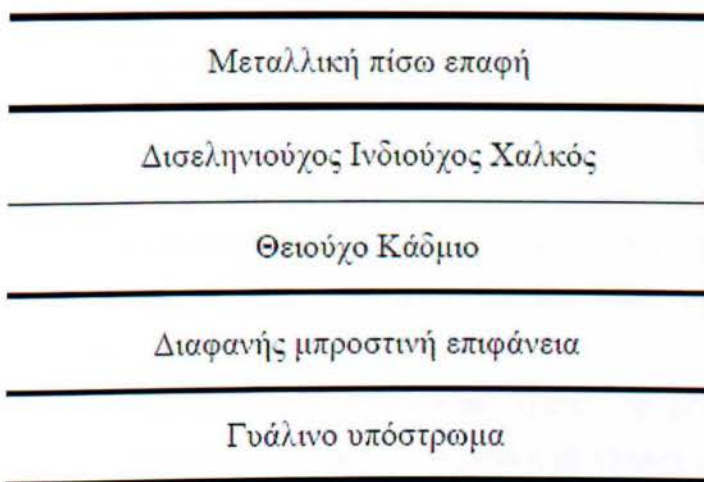
Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον στο 12%-13% ενώ το πάχος ου είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.

1.4.2 Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών επιστρώσεων. Thin film

1.4.2.1 Δισεληνοΐνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη γάλλιου CIGS)

Ο δισεληνοΐνδιούχος χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο).

Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18.8% ή οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γάλλιου η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο CIGS. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο. η δομή του ηλιακού στοιχείου CIS είναι αυτή που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 11: Δομή του ηλιακού στοιχείου CIS

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

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

Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι αποδόσεις που επιτυγχύνονται με χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά thin films πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6% - 8% ενώ εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%.

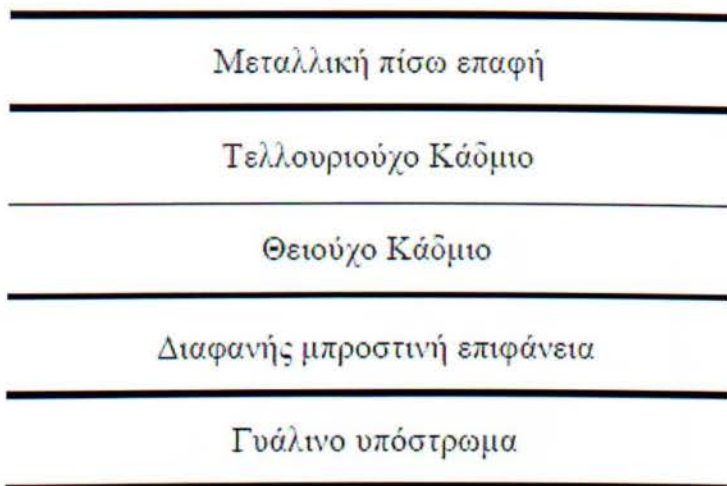
Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούργια. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι 1 έως 3 χιλιοστά.

1.4.4 Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το τελουριούχο κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Εργαστηριακά η απόδοση έχει φτάσει στο 16%.

Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Τροχοπέδη για την χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Ήδη η Greenpeace έχει εναντιωθεί στην χρήση του. Επίσης προβληματίζει ή έλλειψη του Τελουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι η ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό (BIVP building Integrated Photovoltaic). Η δομή του παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 12: Δομή του ηλιακού στοιχείου CdTe

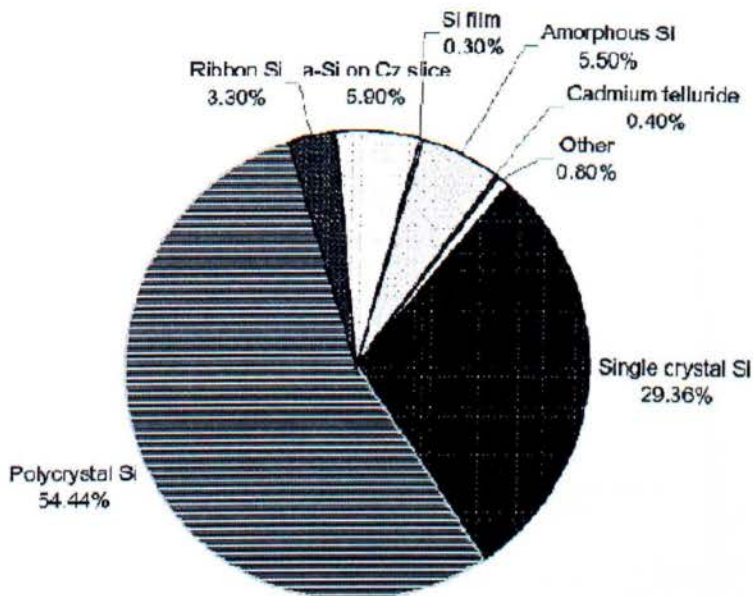
1.4.5 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Το γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το αρσένιο δεν είναι σπάνιο αλλά έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες.

Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

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

Το μερίδιο αγοράς όλων των παραπάνω υλικών κατασκευής φ/β στοιχείων για το έτος 2002 φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Είναι ξεκάθαρο ότι το πυρίτιο ως ημιαγώγιμο υλικό κατέχει την συντριπτική πλειοψηφία της αγοράς φ/β στοιχείων και συγκεκριμένα την πρωτιά κατέχει το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο που αποτελεί το 54% αυτής.



Εικόνα 13: Μερίδιο αγοράς των διαφόρων τεχνολογιών φ/β κυψελών

1.4.6 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

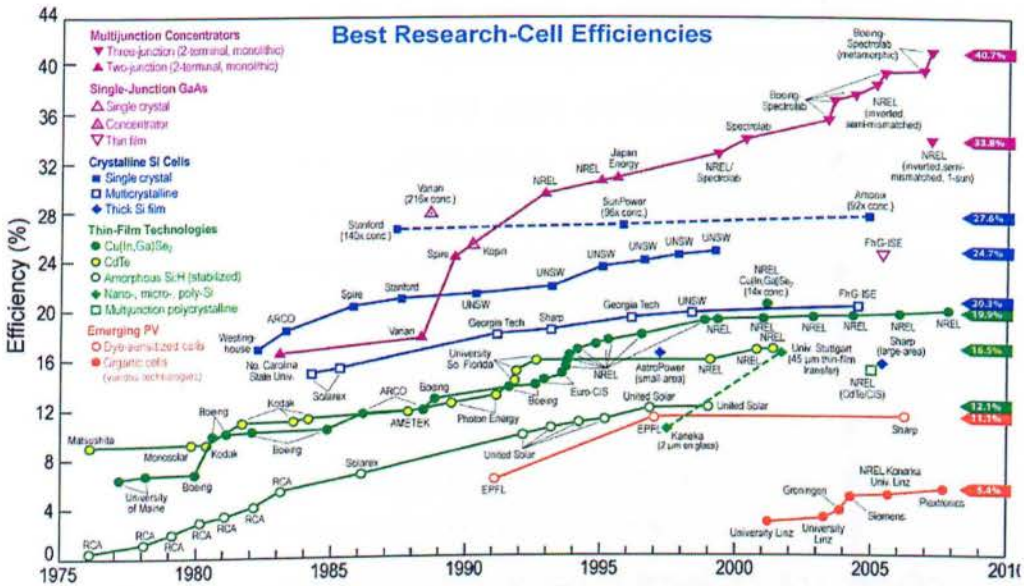
Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών

➤ HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer). Τα πιο γνωστά εμπορικά υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μία στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές το 17,2% και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Άλλα πλεονεκτήματα για τα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρει τόσα πολλά, το υβριδικό φωτοβολταϊκό είναι κάπως ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

1.4.7 Άλλες τεχνολογίες

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν συνεχώς νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες στα φωτοβολταϊκά στοιχεία που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους είναι:

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



Εικόνα 14: Τύποι φ/β και αποδοτικότητα

1.5 Αρχή Λειτουργίας

Ο Γάλλος φυσικός Edmond Bequerel περιέγραψε πρώτος το φωτοβολταϊκό φαινόμενο το 1839. Η ανακάλυψη στην οποία προέβη είχε να κάνει με το γεγονός ότι ορισμένα υλικά παρουσίαζαν την ικανότητα παραγωγής μικρών ποσοτήτων ηλεκτρικού ρεύματος όταν βρίσκονταν εκτεθειμένα σε ηλιακή ακτινοβολία. Το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε αρχικά σε στερεά υλικά, όπως το σελήνιο, από τον Heinrich Hertz τη δεκαετία του 1870. Σε σύντομο χρονικό διάστημα, φωτοβολταϊκά στοιχεία από σελήνιο μετέτρεπαν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια σε ποσοστό 1% με 2%. (Η ικανότητα μετατροπής ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτελεί το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική).

Τις δεκαετίες του '40 και του '50 πραγματοποιήθηκαν τα πρώτα βήματα προς την κατεύθυνση της εμπορικής αξιοποίησης των φωτοβολταϊκών με την ανάπτυξη της μεθόδου Czochralski για την παραγωγή κρυσταλλικού πυριτίου υψηλής καθαρότητας.

Μία σημαντική ανακάλυψη έγινε επίσης το 1949 όταν οι Mott και Schottky ανέπτυξαν την θεωρία της διόδου κατάστασης. Το 1954, οι επιστήμονες των εργαστηρίων Bell βασιζόμενοι στη μέθοδο Czochralski κατασκεύασαν το πρώτο φωτοβολταϊκό (ή αλλιώς ηλιακό) στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου, με ικανότητα μετατροπής 6%.

Παρόλο που έγιναν αρκετές προσπάθειες τη δεκαετία του '50 για τη χρήση των στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου σε εμπορικές εφαρμογές, η πρώτη βασική εφαρμογή αποτελούσε μέρος ενός αεροδιαστημικού προγράμματος. Το 1958, ο δορυφόρος Vanguard περιελάμβανε μια μικρή φωτοβολταϊκή συστοιχία για την τροφοδότηση του ασυρμάτου ραδιοπομπού του. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λειτούργησαν τόσο καλά που η φωτοβολταϊκή τεχνολογία αποτέλεσε σημαντικό τμήμα των διαστημικών προγραμμάτων από τότε και στο εξής. Στη σημερινή εποχή τα φωτοβολταϊκά τροφοδοτούν ουσιαστικά όλους τους δορυφόρους, συμπεριλαμβανομένων αυτών που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες, τα συστήματα άμυνας και την επιστημονική έρευνα. Ο διαστημικός στόλος των Ηνωμένων Πολιτειών χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκές συστοιχίες για την παραγωγή μεγάλου τμήματος της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η βιομηχανία των υπολογιστών και ιδιαίτερα η τεχνολογία των ημιαγωγίων τρανζίστορ, συνέβαλε σημαντικά στην ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τα τρανζίστορ και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από συναφή υλικά και η λειτουργία τους διέπεται από αρχές παρόμοιων φυσικών μηχανισμών. Η πρόοδος, συνεπώς, στην έρευνα γύρω από τα τρανζίστορ αποτελεί σταθερή πηγή άντλησης πληροφοριών για την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Στις ημέρες μας ωστόσο, αυτή η άντληση πληροφοριών λειτουργεί και αντίστροφα, δηλαδή τα επιτεύγματα στον τομέα των φωτοβολταϊκών πολλές φορές υιοθετούνται από τη βιομηχανία των ημιαγωγών.

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, τα φωτοβολταϊκά τη δεκαετία του 1970 παρέμεναν πολύ ακριβά για τις περισσότερες επίγειες εφαρμογές. Στα μέσα της δεκαετίας του '70, η αύξηση του κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, εξαιτίας της πετρελαϊκής κρίσης, ανανέωσε το ενδιαφέρον για την προώθηση των φωτοβολταϊκών και τη μείωση του κόστους τους. Από τότε, οι κυβερνήσεις, η βιομηχανία και οι

ερευνητικοί οργανισμοί έχουν επενδύσει τεράστια κεφάλαια στην έρευνα, την ανάπτυξη και την παραγωγή φωτοβολταϊκών. Μεγάλο τμήμα αυτής της προσπάθειας επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη των ιδιοτήτων του πολυκρυσταλλικού πυριτίου, του υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή των πρώτων φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Στη σημερινή εποχή, τα φωτοβολταϊκά συστήματα του εμπορίου έχουν ικανότητα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική που κυμαίνεται από 5% έως 15%. Επίσης, διαθέτουν αρκετά υψηλό βαθμό αξιοπιστίας και η διάρκεια ζωής τους είναι μεγαλύτερη από 20 χρόνια. Το κόστος της παραγόμενης από φωτοβολταϊκά συστήματα ενέργειας έχει μειωθεί πλέον σημαντικά (15 με 20 φορές σε σύγκριση με παλαιότερα) ενώ τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στοιχίζουν γύρω στα 4.7 EUR ανά Watt και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με περίπου 0.2 EUR ανά kWh.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μια κυψέλη φωτοβολταϊκού μοιάζει αρκετά από άποψη λειτουργίας με την κλασική δίοδο ένωσης p-n. Όταν το ηλιακό φως απορροφάται από την ένωση, η ενέργεια των απορροφημένων φωτονίων μεταφέρεται στο υλικό της κυψέλης και έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία φορτισμένων φορέων που βρίσκονται διασκορπισμένοι στην ένωση. Οι φορτισμένοι φορείς μπορεί να είναι ζεύγη τύπου ηλεκτρόνιο-ιόν σε υγρό ηλεκτρολύτη ή ζεύγη τύπου ηλεκτρόνιο-οπή σε ένα στερεό ημιαγωγό. Οι φορτισμένοι φορείς στην περιοχή της ένωσης δημιουργούν ένα δυναμικό, επιταχύνονται κάτω από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου και ρέουν καθώς το ρεύμα ρέει σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Το ρεύμα στο τετράγωνο επί την αντίσταση του κυκλώματος δίνει την ισχύ που μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό. Η υπόλοιπη ενέργεια των φωτονίων ανεβάζει την θερμοκρασία της κυψέλης.

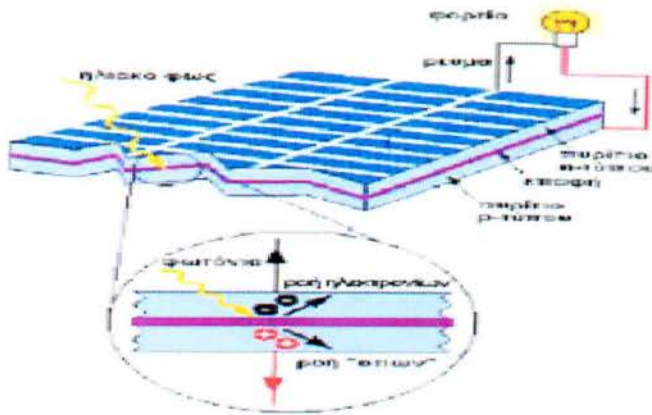
Η προέλευση του φωτοβολταϊκού δυναμικού είναι η διαφορά στο χημικό δυναμικό, που ονομάζεται στάθμη Fermi, των ηλεκτρονίων ανάμεσα στα δύο απομονωμένα υλικά. Όταν ενωθούν, η ένωσή τους προσεγγίζει μια νέα θερμοδυναμική ισορροπία. Μια τέτοια ισορροπία μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν οι στάθμες Fermi των δύο υλικών είναι ίσες. Αυτό προκύπτει από την ροή των ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο μέχρις ότου δημιουργηθεί μια διαφορά τάσης ανάμεσα στα δύο υλικά, η οποία έχει δυναμικό ακριβώς ίσο με την αρχική διαφορά στις στάθμες Fermi των υλικών. Αυτό το δυναμικό οδηγεί το φωτο-ρεύμα.

Για την συλλογή του φωτο-ρεύματος χρησιμοποιούνται μεταλλικές επαφές και στις δύο πλευρές της ένωσης οι οποίες θα συλλέξουν το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργήθηκε εξαιτίας των φωτονίων που προσκρούουν στην πάνω επιφάνεια. Στην

κάτω (σκοτεινή) μεταλλική επιφάνεια χρησιμοποιούνται αγωγίμα λεπτά ελάσματα σε όλη την επιφάνεια. Στην πάνω (φωτεινή) επιφάνεια χρησιμοποιούνται τέτοια ελάσματα στην μία άκρη της επιφάνειας. Στην υπόλοιπη πάνω επιφάνεια χρησιμοποιείται ένα λεπτό αγωγίμο δίκτυο για να συλλέξει το ρεύμα αλλά ταυτόχρονα να αφήσει το ηλιακό φως να περάσει. Η διάταξη στον χώρο αυτού του λεπτού δικτύου έχει να κάνει με τον συμβιβασμό της μεγιστοποίησης της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας από την μία και από την άλλη την ελαχιστοποίηση της αντίστασης στην διέλευση του ηλιακού φωτός.

Εκτός από τα βασικά, υπάρχουν και κάποια άλλα πρόσθετα στοιχεία τα οποία περιλαμβάνονται στην κατασκευή. Έτσι για παράδειγμα, στην μπροστά επιφάνεια χρησιμοποιείται επικάλυψη που περιορίζει την αντανάκλαση του φωτός έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απορρόφηση. Η μηχανική προστασία παρέχεται με προστατευτικό γυαλί το οποίο τοποθετείται πάνω από την επιφάνεια με την χρήση διαφανούς υλικού προσκόλλησης. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η φωτοβολταϊκή κυψέλη είναι το βασικό δομικό συστατικό για την δημιουργία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Για την επίτευξη μεγάλης ισχύος πολλαπλές τέτοιες κυψέλες συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα και σε σειρά, δημιουργώντας έτσι ένα πλαίσιο (module).

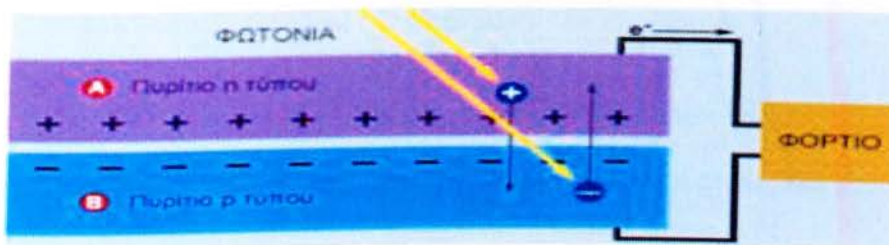
Πολλά τέτοια πλαίσια, που αποτελούν μια διάταξη (array), είναι συνδεδεμένα ηλεκτρικά μεταξύ τους σε σειρά και εν παραλλήλω και δημιουργούν συνδυασμούς ώστε να παραχθεί το απαιτούμενο ρεύμα και η απαιτούμενη τάση. Η στήριξη των πλαισίων μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους χρησιμοποιώντας διαφόρων ειδών βάσεις. Επίσης με την χρήση κατάλληλων στηριγμάτων είναι δυνατή η παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου. Ακόμα σε ορισμένες περιπτώσεις διατάξεις φωτοβολταϊκών χρησιμοποιούνται αντί για στέγαστρα και οροφές κτιρίων και κατοικιών.



Εικόνα 15: Παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος

1.5.1 Αρχές της παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας

Στο παραπάνω σχήμα μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε την επαφή p – n και να κατανοήσουμε πως παράγεται το ηλεκτρικό ρεύμα. Οι φορείς πλειονότητας στις περιοχές p και n είναι τα ηλεκτρόνια και οι οπές αντίστοιχα. Στην περιοχή της επαφής λόγω της θερμοκρασίας της διάταξης και λόγω της εξωτερικής φωτεινής πηγής δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών. Οι πρόσθετοι φορείς φορτίζουν τους χώρους στους οποίους φτάνουν με πλεονάζοντα φορτία. Το δυναμικό στο χώρο p λόγω των επιπλέον οπών γίνεται θετικότερο ως προς το αντίστοιχο του χώρου n όπου έχουν καταλήξει τα ηλεκτρόνια που δημιουργήθηκαν στην επαφή. Η συνεχής κίνηση των φωτο-δημιουργημένων φορέων με την επίδραση του ισχυρού πεδίου αποτελεί ρεύμα με φορά αυτή του ενδογενούς πεδίου, δηλαδή, από τον ημιαγωγό τύπου n στον ημιαγωγό τύπου p. Το φωτοδημιουργημένο ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται **φωτορεύμα**.



Εικόνα 16:

Συνεπώς το φωτορεύμα εξαρτάται από το μεγαλύτερο μέρος των φορέων οι οποίοι είναι αποτέλεσμα των απορροφημένων φωτονίων, δηλαδή της πυκνότητας

ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και του εμβαδού της επαφής των δύο ημιαγωγών της διάταξης. Η διάταξη αυτή λέγεται φωτοβολταϊκό στοιχείο.

1.5.2 Σχεδίαση Διάταξης

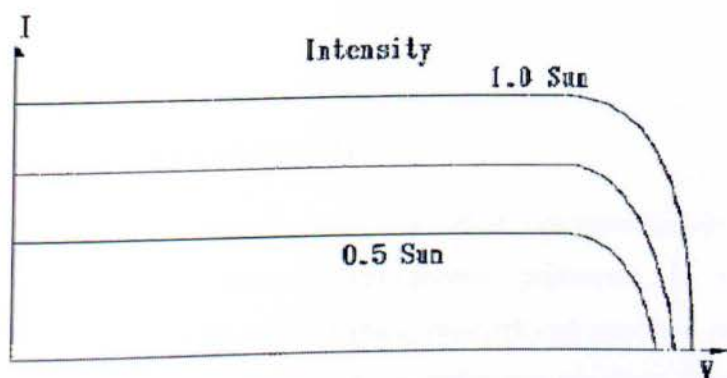
Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική σχεδίαση μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι οι εξής:

- Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Η γωνία της διεύθυνσης του ήλιου με το έδαφος.
- Η θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων.

Οι παράγοντες αυτοί εξετάζονται παρακάτω.

1.5.1.1 Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

Το πλάτος του φωτο-ρεύματος γίνεται μέγιστο κάτω από πλήρη φωτεινό ήλιο. Σε μια μερικώς ηλιόλουστη ημέρα το φωτο-ρεύμα μειώνεται σε αναλογία με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μειωθεί τότε η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης μετατοπίζεται προς τα κάτω όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 17: Μεταβολή της χαρακτηριστικής καμπύλης ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Αξίζει να σημειώσουμε πως ο βαθμός απόδοσης της φωτοβολταϊκής κυψέλης είναι ανεξάρτητος από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο πρακτικό εύρος ακτινοβολίας που μας ενδιαφέρει. Έτσι η κυψέλη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια

το ίδιο αποδοτικά μια ηλιακή ακτινοβολία έντασης 500W/m^2 και μια ηλιακή ακτινοβολία έντασης 1000W/m^2 . Το ότι παίρνουμε λιγότερη ισχύ στην έξοδο οφείλεται στο γεγονός ότι μια συννεφιασμένη ημέρα λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην κυψέλη.

1.5.1.2 Γωνία της διεύθυνσης του ήλιου με το έδαφος

Το ρεύμα εξόδου μιας κυψέλης δίνεται από τον τύπο $I = I_0 \cos\theta$, όπου I_0 είναι το ρεύμα που προκύπτει όταν ο ήλιος είναι κάθετος στο πλαίσιο και αποτελεί το σημείο αναφοράς, και θ είναι η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση της ακτινοβολίας ως προς το σημείο αναφοράς. Ο νόμος του συνημίτονου ισχύει για γωνίες μεταξύ 0 και περίπου 50 μοίρες. Πάνω από τις 50 μοίρες παρατηρείται σημαντική απόκλιση από το νόμο του συνημίτονου και η κυψέλη δεν παράγει καθόλου ισχύ για γωνίες πάνω των 85 μοιρών.

Προκειμένου να επιτυγχάνεται όσον το δυνατό περισσότερη ισχύς εξόδου έχουν κατασκευαστεί στηρίγματα φωτοβολταϊκών πλαισίων με μηχανισμό κίνησης, τα οποία μπορούν να ακολουθούν τον ήλιο. Υπάρχουν δύο είδη:

- Ανιχνευτής ενός άξονα, ο οποίος ακολουθεί τον ήλιο από την ανατολή στη δύση κατά την διάρκεια της ημέρας.
- Ανιχνευτής δύο αξόνων ο οποίος ακολουθεί τον ήλιο από την ανατολή στη δύση κατά την διάρκεια της ημέρας αλλά και από τον Βορά στον Νότο κατά την διάρκεια των εποχών του έτους.

1.5.1.3. Θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων

Με την αύξηση της θερμοκρασίας, το ρεύμα βραχυκύκλωσης της κυψέλης αυξάνεται ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος μειώνεται. Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ισχύ εξόδου της κυψέλης υπολογίζεται ποσοτικά με την εξέταση των επιδράσεων που προκαλεί ξεχωριστά στο ρεύμα και την τάση. Έστω I_0 και V_0 το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτού κυκλώματος στην θερμοκρασία αναφοράς T και α και β είναι οι αντίστοιχοι θερμοκρασιακοί συντελεστές. Εάν η θερμοκρασία λειτουργίας αυξηθεί κατά ΔT , τότε το νέο ρεύμα και η νέα τάση δίνεται από τους τύπους:

$$I_{sc} = I_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \text{ και } V_{oc} = V_0(1 - \beta \cdot \Delta T) \quad (1.1)$$

Εφόσον το ρεύμα και η τάση λειτουργίας αλλάζουν περίπου με την ίδια αναλογία όπως το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτού κυκλώματος αντίστοιχα για την ισχύ θα ισχύει:

$$P = V \cdot I = I_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \cdot V_0(1 - \beta \cdot \Delta T) \quad (1.2)$$

Αγνοώντας τους αμελητέους όρους η παραπάνω σχέση γράφεται:

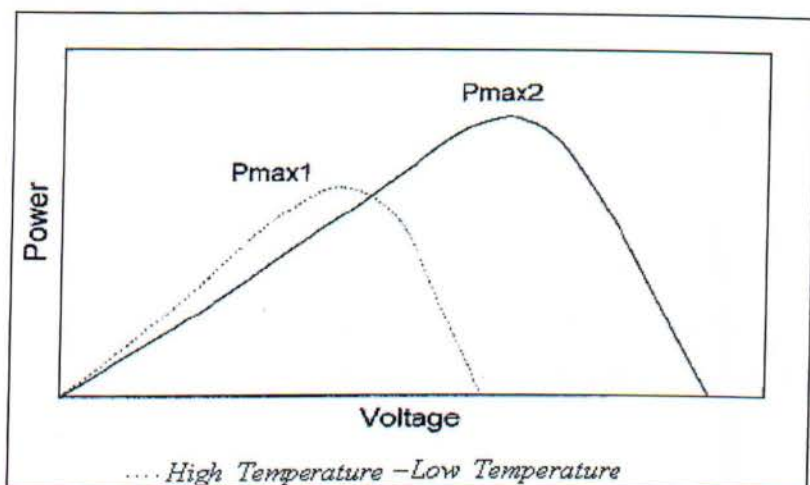
$$P = P_0 \cdot [1 + (\alpha - \beta) \cdot \Delta T] \quad (1.3)$$

Τυπικές τιμές των α και β για το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο είναι 500 μm ανά $^\circ\text{C}$ και 5 μm ανά $^\circ\text{C}$ οπότε και έχουμε:

$$P = P_0 \cdot [1 - 0.0045\Delta T] \quad (1.4)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι για αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας κατά έναν βαθμό Κέλσιου πάνω από την θερμοκρασία αναφοράς, η ισχύς εξόδου της κυψέλης από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο μειώνεται κατά 0.45 %. Εφόσον η αύξηση στο ρεύμα είναι πολύ μικρότερη από την μείωση της τάσης, το τελικό αποτέλεσμα είναι η μείωση της ισχύς εξόδου σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.

Η επίδραση της θερμοκρασίας φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα(Εικόνα 18)



Εικόνα 18: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ισχύ εξόδου της κυψέλης

Σύμφωνα με το διάγραμμα η μέγιστη ισχύς που μπορεί να επιτευχθεί στην χαμηλή θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από αυτήν που μπορεί να επιτευχθεί στην υψηλή θερμοκρασία. Επομένως είναι καλύτερο για μια φωτοβολταϊκή κυψέλη να λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία αφού έτσι παράγει περισσότερη ισχύ. Παρατηρούμε ότι τα δύο μέγιστα επιτυγχάνονται σε διαφορετική τάση λειτουργίας. Άρα για να επιτύχουμε την μέγιστη δυνατή απόδοση σε όλες τις θερμοκρασίες πρέπει η σχεδίαση της εγκατάστασης να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η αύξηση της τάσης λειτουργίας σε χαμηλές θερμοκρασίες και ομοίως δυνατή η μείωσή της σε υψηλές θερμοκρασίες.

Άλλος ένας παράγοντας που παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο είναι η **σκίαση** και θα αναλυθεί παρακάτω.

1.6 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Η θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ή ενός φωτοβολταϊκού σταθμού, δεν λαμβάνει υπ' όψιν μία σειρά από παράγοντες οι οποίοι συχνά συνεπάγονται το σημαντικό περιορισμό της. Η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων που πρέπει κατά κύριο λόγο να εξετάζονται κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός συστήματος. Η ετήσια ενεργειακή απόδοση, αποτελεί την πιο κατάλληλη παράμετρο στο σχεδιασμό φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς επίσης και

το καλύτερο μέτρο για την παρακολούθηση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς τους. Οι παράγοντες επίδρασης αυτοί, μπορεί να σχετίζονται με το ίδιο το πλαίσιο ή από τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της θέσης εγκατάστασης. Οι σημαντικότεροι από αυτούς αναλύονται στη συνέχεια.

Πριν όμως αναφερθούμε στους κυριότερους παράγοντες μείωσης της απόδοσης των ηλιακών πλαισίων, να σημειώσουμε πως για λόγους σύγκρισης των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν έχουν καθοριστεί κάποιες συνθήκες αναφοράς (Standard test conditions, STC) , κάτω από τις οποίες δίνονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι τους. Αυτές είναι οι εξής:

❖ **Θερμοκρασία στοιχείου:** 25° C

❖ **Ηλιακή ακτινοβολία:** 1000 W/m²

❖ **A.M (Air mass):** 1.5

Οι κυριότεροι παράγοντες μείωσης της ενεργειακής απόδοσης που πρέπει να λαμβάνουμε υπ' όψιν μας κατά τον σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος αναφέρονται παρά κάτω:

1.6.1. Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας

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

1.6.2. Θερμοκρασία κυττάρου

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών, επηρεάζονται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Ο βαθμός απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία, αναφέρονται σε δοκιμές που έγιναν σε θερμοκρασίες κυττάρου 25° C. Τις περισσότερες φορές όμως, η θερμοκρασία του στοιχείου υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας διαφέρουν σημαντικά κυρίως τους θερινούς μήνες.

Οι μεγάλες θερμοκρασίες κυττάρου έχουν αρνητική επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαφοράς δυναμικού του φωτοβολταϊκού στοιχείου με αποτέλεσμα, όταν ένα φορτίο συνδεθεί στα άκρα του, η διαφορά δυναμικού να είναι αισθητά μειωμένη. Υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας δημιουργούν μικροποσότητες ρεύματος το οποίο αυξάνει την τιμή του ρεύματος σκότους. Κάτω από συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών, το ρεύμα του σκότους που αναπτύσσεται είναι σχεδόν μηδενικό.

1.6.3. Ταχύτητα του ανέμου

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

1.6.4. Ρύπανση

Η ηλεκτροπαραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να μειωθεί από ρύπανση της επιφάνειας τους, από την επικάθηση σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνεται περιοδικός καθαρισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απορρυπαντικό.

Πάντως, σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90ο (κάθετοι) για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, ή τουλάχιστον 45ο για να μην συγκρατείται η σκόνη. Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια βρίσκεται σε μία περιοχή που εκτιμάμε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς μας η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

1.6.5.Γήρανση

Λόγω της φθοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων (και των υπολοίπων μερών ενός φωτοβολταϊκού συστήματος), αναμένεται ότι με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται μία μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος, που συνήθως υπολογίζεται από 1% έως 2% για κάθε έτος.

Η **σκίαση** επηρεάζει επίσης την ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

1.7 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Πέρα από τους διάφορους παράγοντες που αναφέραμε πιο πάνω, πρέπει κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, να προνοήσουμε για τις ηλεκτρικές απώλειες στους αγωγούς που συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στις συστοιχίες, καθώς και τις συνδέσεις τους με άλλα μέρη του συστήματος, όπως διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, συσσωρευτές, μετατροπείς κλπ.

Επομένως, κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας των φωτοβολταϊκών ενός συστήματος, πρέπει να γίνεται πρόβλεψη, ανάλογα με την περίπτωση και για την κάλυψη όλων αυτών των απωλειών, που μπορεί να είναι της τάξης περίπου του 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και περισσότερο.

1.7.1. Οπτικές απώλειες

Με τον όρο οπτικές απώλειες εννοούμε τη διαφοροποίηση της ανακλαστικότητας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (υαλοπίνακας, αντανακλαστικό επίστρωμα, υλικό φωτοβολταϊκών κυττάρων) σε σχέση με την αντίστοιχη σε STC. Η ανακλαστικότητα του οπτικού συστήματος όψεως του φωτοβολταϊκού πλαισίου, σε σχέση με την

αντίστοιχη τιμή σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς, αυξάνει καθώς αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στην επιφάνειά του, ιδιαίτερα σε γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60° .

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

Επιπλέον, υπάρχουν απώλειες λόγω διαφοροποίησης της πόλωσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η μέση ετήσια επίδραση του παράγονται αυτού προσδιορίζεται γύρω στο 2%

Τέλος, οπτικές απώλειες παρατηρούνται και λόγω χαμηλών τιμών της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του ηλιακού κυττάρου μειώνεται στις χαμηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιαίτερα κάτω από την τιμή των 200 W/m^2 . Οι οπτικές απώλειες, αποδεικνύονται μικρής σημασίας για εμπορικά πλαίσια καλής ποιότητας. Σε άλλες όμως περιπτώσεις οι ενεργειακές αυτές απώλειες αποδεικνύονται σχετικά σημαντικές και γενικά υπολογίζονται σε 3%, κατά μέσο όρο στο έτος.

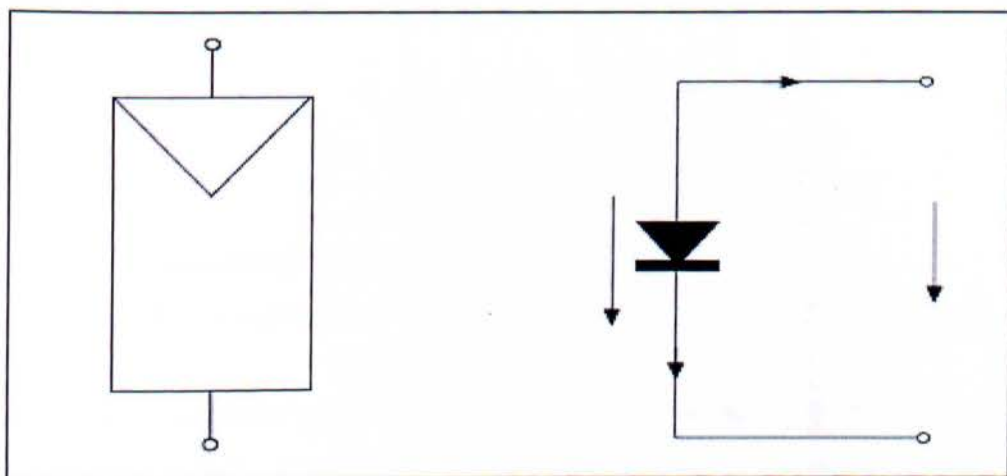
1.8 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Όπως έχει αναφερθεί η φωτοβολταϊκή κυψέλη λειτουργεί σαν μία μεγάλη δίοδος. Έτσι και εδώ συναντάμε ορθή πόλωση. Όταν η άνοδος (περιοχή πρόσμιξης p) έχει θετικό δυναμικό και κάθοδος (η περιοχή πρόσμιξης n) έχει αρνητικό δυναμικό. Όταν η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη, τότε εμποδίζεται η ροή του ρεύματος προς αυτή τη διεύθυνση. Επίσης οι έννοιες κατώφλι τάσης (threshold voltage) και τάση διάσπασης (breakdown voltage) συναντούνται εδώ.

Για μια φωτοβολταϊκή κυψέλη από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, τυπικές τιμές για την τάση ορθής πόλωσης και την τάση διάσπασης είναι 0.5v και 12-50 v αντίστοιχα (

καθώς εξαρτάται από την ποιότητα του υλικού κατασκευής της κυψέλης). Αν ξεπερασθεί η τιμή της τάσης διάσπασης, τότε η δίοδος γίνεται αγώγιμη και μπορεί επίσης να καταστραφεί. Η καμπύλη ρεύματος τάσης που ισχύει για την κλασική δίοδο, ισχύει και για την φωτοβολταϊκή κυψέλη.

Όταν η κυψέλη δεν φωτίζεται, το ισοδύναμο κύκλωμα αποτελείται μόνο από μία δίοδο. Η τάση στα άκρα της κυψέλης ισούται με την τάση στα άκρα της διόδου και το ρεύμα εξόδου είναι το ίδιο με αυτό που διαρρέει την δίοδο αλλά με αντίθετη φορά. Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα(Εικόνα 19)

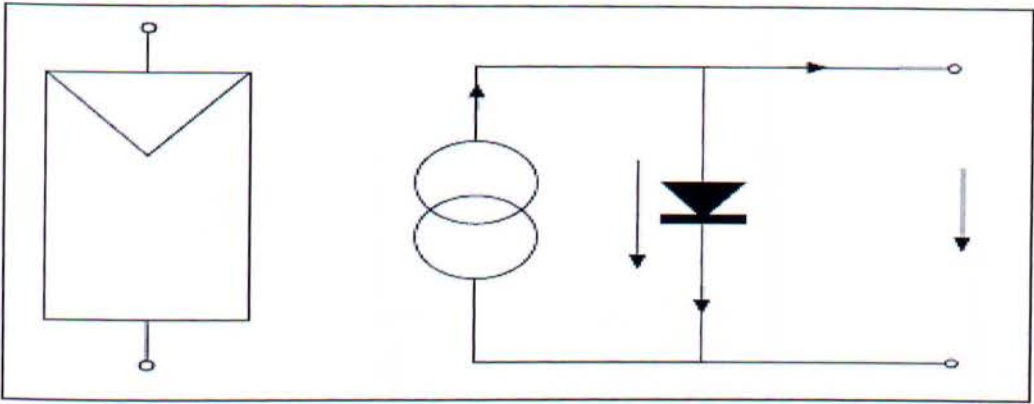


Εικόνα 19: Ισοδύναμο κύκλωμα όταν η κυψέλη δεν απορροφά φως

$$V=V_D$$

$$I=-I_D$$

Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στην κυψέλη, τότε όπως έχει αναφερθεί, η ενέργεια των φωτονίων δημιουργεί φορτισμένους φορείς. Μία κυψέλη η οποία δέχεται ηλιακή ακτινοβολία έχει σαν ισοδύναμο κύκλωμα μία δίοδο παράλληλα τοποθετημένη σε μία πηγή ρεύματος. Αυτή η πηγή ρεύματος παράγει το φωτοηλεκτρικό ρεύμα ή αλλιώς φως – ρεύμα I_{ph} . Το ρεύμα εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας. Τώρα η χαρακτηριστική καμπύλη της διόδου μετατοπίζεται προς τα κάτω ανάλογα με το μέγεθος του φωτο - ρεύματος. Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα(Εικόνα 20).



Εικόνα 20: Ισοδύναμο κύκλωμα όταν η κυψέλη απορροφά φως

$$V = V_D$$

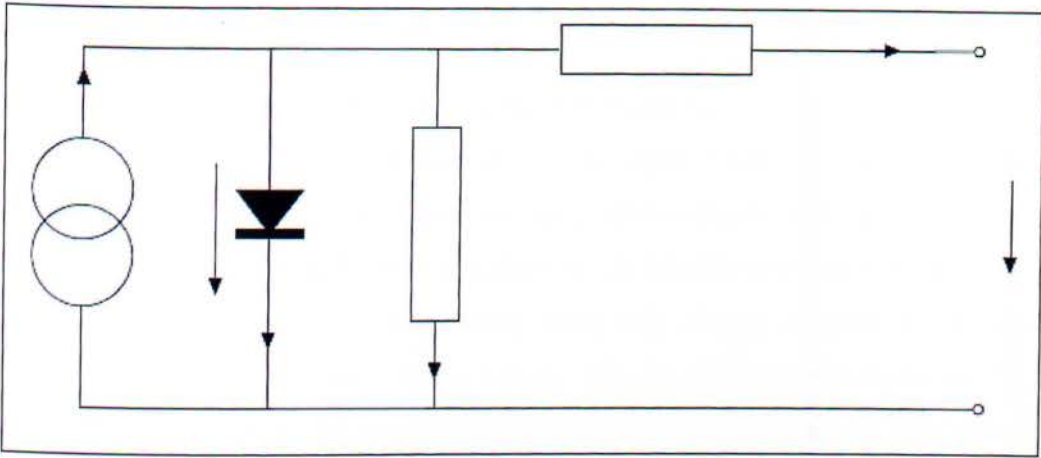
$$I_{Ph} = C_o * G$$

$$I = I_{Ph} - I_D$$

Όπου,

- c_o : Συντελεστής φωτο-ρεύματος σε m^2/V
- G : Ηλιακή ακτινοβολία της κυψέλης σε W/m^2

Το ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο που θεωρείται ως το τυποποιημένο μοντέλο των φωτοβολταϊκών (standard model) ονομάζεται μοντέλο μίας διόδου (single-diode model) και έχει κάποιες προσθήκες σε σχέση με το μοντέλο που εξετάσθηκε προηγούμενα. Έτσι, επειδή στις φωτοβολταϊκές κυψέλες παρατηρείται μία πτώση τάσης καθώς οι φορτισμένοι φορείς μετακινούνται από το υλικό του ημιαγωγού στις ηλεκτρικές επαφές, προστίθεται εν σειρά στο μοντέλο μία ωμική αντίσταση R_s της τάξης μερικών $m\Omega$. Επίσης εμφανίζονται τα λεγόμενα ρεύματα διαρροής τα οποία συμβολίζονται με την παράλληλη αντίσταση R_p με την R_p να είναι μεγαλύτερη των 10Ω . Η ακρίβεια του μοντέλου αυτού είναι καλύτερη από αυτήν του ιδανικού μοντέλου που εξετάσθηκε προηγούμενα. Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα(Εικόνα 21)



Εικόνα 21: Ισοδύναμο κύκλωμα τυποποιημένου μοντέλου

$$I = I_{ph} - I_D - I_p$$

$$I_p = V_D / R_p = (V + I * R_s) / (R_p)$$

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα ισοδύναμα κυκλωματικά μοντέλα για τα φωτοβολταϊκά και όλα έχουν σκοπό να προσεγγίσουν την φυσική τους λειτουργία με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Μία τέτοια καλή προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερες μετρήσεις καθώς και σε καλύτερο έλεγχο των φωτοβολταϊκών. Έτσι μπορεί να γίνει προσδιορισμός του σημείου μέγιστης ισχύος MPP (maximum power point) κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας και τελικά να προσδιορισθεί το σημείο στο οποίο ολόκληρη η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση λειτουργεί με την μέγιστη απόδοση. Σημαντικό μέρος σε αυτήν την αναζήτηση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας πάνω στην καμπύλη ρεύματος – τάσης του φωτοβολταϊκού, είναι ο υπολογισμός την κλίσης M :

$$M = dV/dI = \tan\phi \approx \Delta V / \Delta I$$

Το σημείο μέγιστης ισχύος MPP εντοπίζεται επάνω στην καμπύλη ρεύματος – τάσης, εκεί όπου το M ισούται με την μονάδα και επομένως η γωνία ϕ είναι 45° . Επειδή το τυποποιημένο ισοδύναμο μοντέλο είναι ανεπαρκές σε αρκετά πεδία εφαρμογών, όπου και απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια, χρησιμοποιούνται μοντέλα όπως το μοντέλο δύο διόδων (two diode model) και το λειτουργικό μοντέλο (effective solar cell model).

1.9 Το λειτουργικό μοντέλο (effective solar cell model).

Για την λύση των εξισώσεων τάσης και ρεύματος αυτού του μοντέλου, είναι απαραίτητες μόνο τέσσερις παράμετροι της φωτοβολταϊκής κυψέλης. Αυτό μειώνει την προσπάθεια που καταβάλλεται για τους υπολογισμούς και για την απόκτηση πληροφοριών σχετικά με άλλες παραμέτρους. Το χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί αυτό το μοντέλο από το τυποποιημένο είναι πως εδώ οι αντιστάσεις R_s και R_p συνδυάζονται ώστε τελικά να προκύψει μια φωτοβολταϊκή αντίσταση R_{pv} . Η αντίσταση αυτή μπορεί να πάρει θετικές και αρνητικές τιμές και για τον λόγο αυτό δεν αποτελεί μία ωμική αντίσταση.

Οι τέσσερις παράμετροι που απαιτούνται είναι οι R_{pv} , V_T , I_0 και I_{ph} μπορούν να υπολογισθούν από την παράμετρο M καθώς επίσης και από την τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}), το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}), την τάση (V_{MPP}) και το ρεύμα (I_{MPP}) του βέλτιστου σημείου λειτουργίας της κυψέλης. Έτσι προκύπτουν:

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

$$V_T = -(M + R_{pv}) I_{sc}$$

$$I_0 = I_{sc} e^{-(V_{oc}/V_T)}$$

$$I_{ph} = I_{sc}$$

Για τους παραπάνω υπολογισμούς είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της παραμέτρου M , η οποία είναι συνάρτηση των V_{oc} , I_{sc} , V_{MPP} και I_{MPP} .

$$M = f(V_{oc}, I_{sc}, V_{MPP}, I_{MPP}) \quad M = f(V_{oc}, I_{sc}, V_{MPP}, I_{MPP})$$

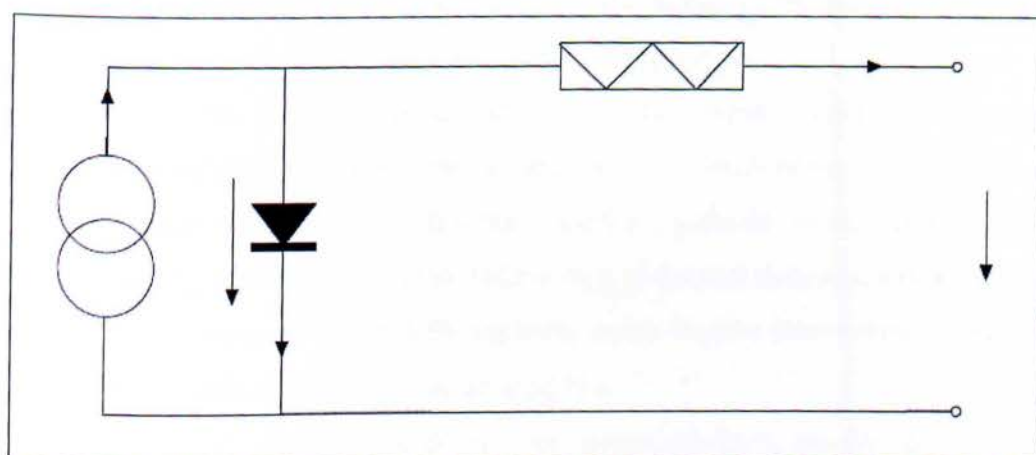
Ο επόμενος τύπος υπολογίζει την παράμετρο M με πολύ καλή προσέγγιση

$$M = \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \left(k_1 \frac{I_{MPP} V_{MPP}}{I_{SC} V_{OC}} + k_2 \frac{V_{MPP}}{V_{OC}} + k_3 \frac{I_{MPP}}{I_{SC}} + k_4 \right)$$

με

$$k_1 = -5.411 \quad k_2 = 6.450 \quad k_3 = 3.417 \quad k_4 = -4.422$$

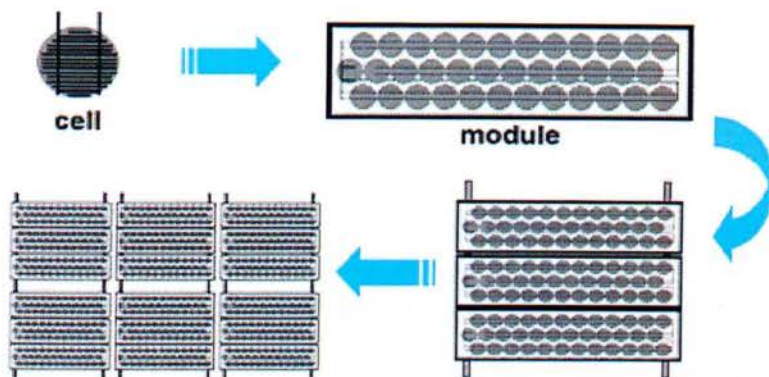
Οι παραπάνω τιμές των συντελεστών έχουν υπολογισθεί με την χρήση μίας αριθμητικής μεθόδου (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων). Πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά της κυψέλης και του πλαισίου που απαιτούνται στους υπολογισμούς (V_{OC} , I_{SC} , V_{MPP} και I_{MPP}) μπορούν να συλλεχθούν από τα τεχνικά χαρακτηριστικά που παρέχουν οι κατασκευαστικές. Αφού είναι γνωστές οι παραπάνω παράμετροι, πλέον μπορούν να λυθούν οι εξισώσεις τάσης και ρεύματος του λειτουργικού μοντέλου.



Εικόνα 22: Λειτουργικό μοντέλο

1.10 Διατάξεις φωτοβολταϊκών πλαισίων

Μία φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι μία πλήρης μονάδα ισχύος, που αποτελείται από οποιοδήποτε αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων. Μία μορφή της φωτοβολταϊκής συστοιχίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα(Εικόνα 23)



Εικόνα 23: Φωτοβολταϊκό στοιχείο, μονάδα, πλαίσιο και διάταξη

Ανάλογα με τον βαθμό πολυπλοκότητας στην κατασκευή και τη λειτουργία μπορούμε να κατατάξουμε τις φωτοβολταϊκές διατάξεις σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. Τις απλές διατάξεις, όπου τα ηλιακά κύτταρα είναι τοποθετημένα σε σταθερά επίπεδα πλαίσια και δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία με την φυσική πυκνότητα και διακύμανση στη διάρκεια της ημέρας.

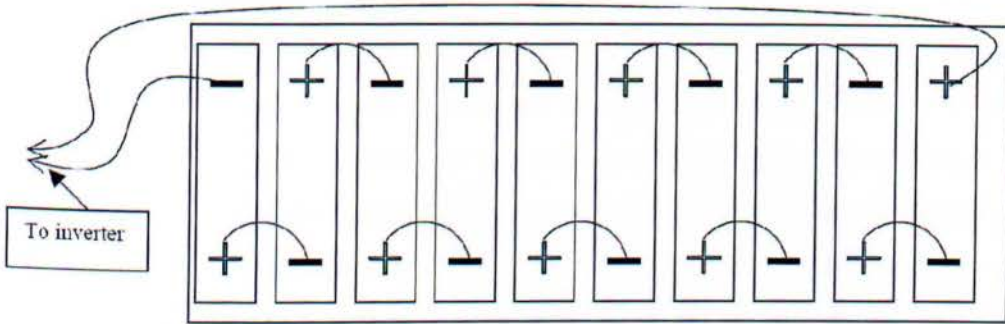
2. Τις διατάξεις με κινητά πλαίσια που περιστρέφονται αυτόματα και παρακολουθούν συνεχώς την πορεία του ήλιου στον ουρανό, ώστε τα ηλιακά κύτταρα να δέχονται κάθετα την ηλιακή ακτινοβολία σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ηλεκτρική ενέργεια που παράγει ένα ηλιακό κύτταρο μέχρι 50% περίπου, αφού δέχεται πυκνότερη ακτινοβολία, ανά μονάδα εμβαδού της επιφάνειάς του.

3. Τις διατάξεις που με την χρησιμοποίηση φακών ή κατόπτρων συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία και την στέλνουν πολύ συμπυκνωμένη πάνω στα ηλιακά κύτταρα. Για την αποφυγή θέρμανσης, στις συγκεντρωτικές διατάξεις απαιτείται συνήθως η τεχνητή ψύξη των ηλιακών κυττάρων με κυκλοφορία ψυχρού αέρα ή ψυκτικών.

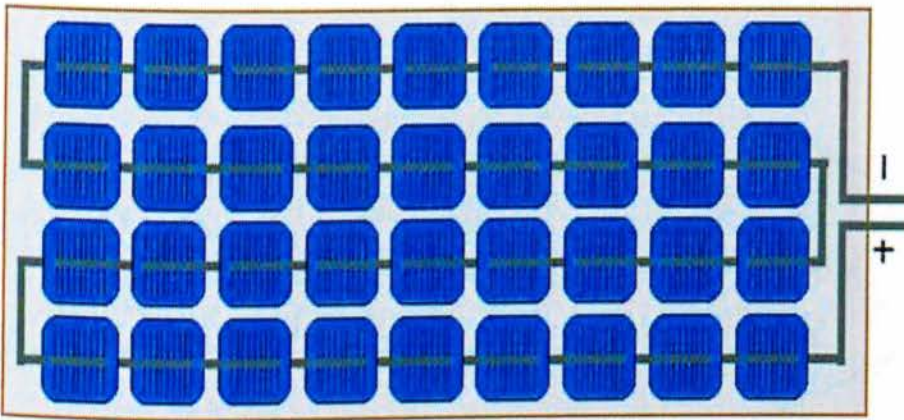
Οι αλληλοσυνδέσεις των ηλιακών κυττάρων, επάνω στα πλαίσια έχουν τρεις διατάξεις και είναι οι εξής:

1. Σε απλές παράλληλες σειρές (series – parallel, SP).
2. 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.

3. Σε διάταξη γεφυρωτής διασύνδεσης (bridge – linked) στην οποία όλα τα κύτταρα αλληλοσυνδέονται με γεφυρωτή διαμόρφωση ανορθωτή (ρεύματος).



Εικόνα 24: Παράλληλη σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων

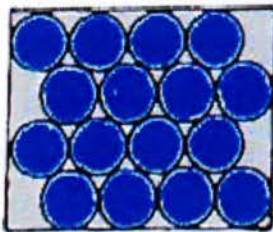


Εικόνα 25: Σύνδεση στοιχείων σε σειρά σε ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο

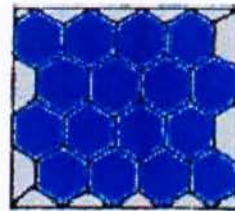
Επιπλέον ρόλο παίζει και η παράθεση των στοιχείων επάνω στην φωτοβολταϊκή μονάδα. Οι αντίστοιχοι συντελεστές κάλυψης είναι 0.78 , 0.88 , 0.98 ανά περίπτωση με την σειρά που εμφανίζονται στις εικόνες(Εικόνα 26).



(α)



(β)

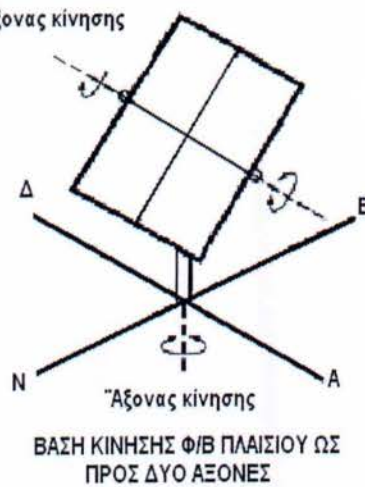
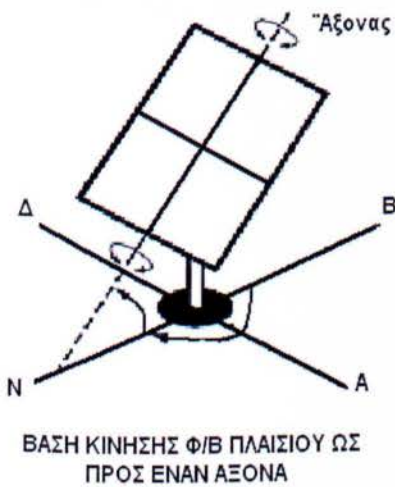


(γ)

Εικόνα 26: Σχηματική παράθεση στοιχείων

1.11 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Για ένα παρατηρητή στη γη ο ήλιος εκτελεί δύο κινήσεις, την ημερήσια, από την ανατολή προς τη δύση και την εποχιακή, κατά την οποία μεταβάλλει καθημερινά το μεσημβρινό του ύψος. Ο συλλέκτης για να έχει όλη τη μέρα τη μέγιστη απόδοση, θα πρέπει να προσπίπτουν πάντα κάθετα στην επιφάνειά του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ηλιακές ακτίνες τότε έχουν την μεγαλύτερη πυκνότητα στην μονάδα επιφάνειας και δεν ανακλώνται στην γυάλινη επικάλυψη του συλλέκτη. Για να επιτευχθεί όμως αυτό στην πράξη θα πρέπει ο συλλέκτης να παρακολουθεί συνεχώς την κίνηση του ηλίου και επομένως να στρέφεται σε δύο άξονες αφενός για να παρακολουθεί την ημερήσια τροχιά του ήλιου από την ανατολή προς τη δύση και αφετέρου να μεταβάλλει την γωνία του ως προς το οριζόντιο επίπεδο για να παρακολουθεί την μεταβολή του ύψους του ήλιου προς τον ορίζοντα.



Αυτό όμως για πρακτικούς λόγους δεν είναι εύκολο. Μπορούμε όμως να δώσουμε στον συλλέκτη σταθερό προσανατολισμό, φροντίζοντας να είναι προσφορότερος. Έτσι λοιπόν για το βόρειο ημισφαίριο τοποθετείται ο συλλέκτης με την επιφάνεια του στραμμένη ακριβώς προς τον Νότο, δηλαδή με αξιμούθια γωνία στις 180° και αντίστοιχα 0° για το Νότιο ημισφαίριο, οπότε την μεσημβρία θα δέχεται κάθετα τις ηλιακές ακτίνες, εφόσον και η κλίση του προς το οριζόντιο επίπεδο είναι κατάλληλη για το εποχιακό ύψος του ήλιου, δηλαδή $90^\circ - h$.

Προσανατολισμός	Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο		
	0 °	30 °	90 °
Ανατολικός - Δυτικός	90	85	50
Νοτιοανατολικός- Νοτιοδυτικός	90	95	60
Νότιος	90	100	60
Βορειοανατολικός- Βορειοδυτικός	90	67	30
Βόρειος	90	60	20

Εικόνα 27: Βέλτιστες γωνίες σταθερού προσανατολισμού

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

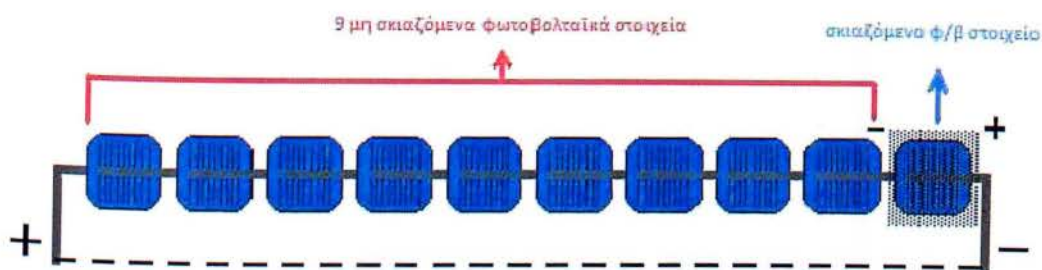
2.1 Εισαγωγή - ΣΚΙΑΣΗ

Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει τη μελέτη του φαινομένου της σκίασης και του φαινομένου των μαύρων κηλίδων. Αρχικά παρατίθεται μια γεωμετρική ανάλυση της σκίασης και στη συνέχεια εξηγείται σε θεωρητικό επίπεδο η επίδρασή της στη λειτουργία των φβ πλαισίων. Τέλος, μελετάται η ηλεκτρική απόκριση των φβ συστοιχιών υπό συνθήκες μερικής σκίασης μέσω κατάλληλων προσομοιώσεων με το λογισμικό PSpice.

Φαινόμενο μαύρων κηλίδων (hot – spot Effect)

Το φαινόμενο των μαύρων κηλίδων διαπιστώθηκε από τις πρώτες κιόλας ημέρες που ο άνθρωπος ταξίδεψε στο διάστημα. Η πρώτη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων έγινε σε τέτοια διαστημικά ταξίδια για να πετυχαίνουν ανεξάντλητη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι λοιπόν τεκμηριωμένα εξακριβώθηκε σχεδόν άμεσα πως το φαινόμενο των μαύρων κηλίδων μπορεί να εμφανιστεί από αστοχία υλικού ενός από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που απαρτίζουν μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια, από λανθασμένη σύνδεση της πολικότητας των στοιχείων από μερική σκίαση. Πάντως και στις τρεις περιπτώσεις τα αποτελέσματα είναι ακριβώς τα ίδια, δηλαδή οδηγούμαστε στην υπερθέρμανση των “κακών” φωτοβολταϊκών στοιχείων και τελικά στην ολική τους καταστροφή.

Το φαινόμενο λοιπόν των μαύρων κηλίδων συμβαίνει όταν υπάρχει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο που δίνει χαμηλό ρεύμα σε σχέση με τα υπόλοιπα που όλα όμως είναι ενωμένα σε μία σειρά. Δηλαδή στην παρακάτω εικόνα εάν οι ακροδέκτες στο τέλος και στην αρχή της σειράς ενωθούν, τότε η ισχύ που παράγουν τα μη σκιαζόμενα στοιχεία σπαταλιέται διά μέσου του σκιαζόμενου φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Εικόνα 28: Διάταξη φ/β στοιχείων σε σειρά με ένα σκιαζόμενο

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

Το καταστροφικό αυτό φαινόμενο είναι ικανό να αποφευχθεί με την χρήση μίας παρακαμπτήριας διόδου. Μια δίοδος συνδέεται παράλληλα με μία σειρά φωτοβολταϊκών στοιχείων την οποία θέλουμε να προστατέψουμε αλλά με αντίθετη πόλωση. Κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας κάθε στοιχείο είναι ορθά πολωμένο και η δίοδος που είναι ανάστροφα απλά αποτελεί ένα κομμάτι ανοιχτού ουσιαστικά κυκλώματος με αποτέλεσμα να μην επιλέγει το δρόμο αυτό, το ρεύμα

Όταν ένα στοιχείο πολωθεί ανάστροφα και εμφανισθεί μία διαφορά του ρεύματος βραχυκυκλώσεως μεταξύ των φωτοβολταϊκών στοιχείων της σειράς, τότε η δίοδος άγει και προστατεύει το προβληματικό στοιχείο.

Πρακτικά θα έπρεπε να είχαμε μία δίοδο για κάθε στοιχείο που αυτό φυσικά είναι ανέφικτο λόγω του υψηλού κόστους για αυτό και χρησιμοποιείται μία δίοδος κατά μήκος μίας ομάδας στοιχείων. Ο μέγιστος αριθμός φωτοβολταϊκών στοιχείων που μπορεί να καλύπτει μία δίοδος είναι περίπου 15 (στοιχεία/ δίοδος) για φωτοβολταϊκά πλαίσια πυριτίου.

2.2 ΣΚΙΑΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΔΙΑΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΣΕ ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ

Σε μεγάλης κλίμακας φβ συστήματα όπως και σε άλλες περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης, οι διατεταγμένοι σε σειρές φβ συλλέκτες είναι πιθανό να υπόκεινται σε σκιάσεις από γειτονικές τους σειρές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η συγκεκριμένη κατάσταση δημιουργεί την ανάγκη για μια βέλτιστη λύση στο ζήτημα της διάταξης των συλλεκτών σε μια δοσμένη έκταση, λαμβάνοντας υπόψη κυρίως ότι το ποσοστό της σκίασης εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σειρών. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται αρχικά η γεωμετρική ανάλυση της σκίασης που προκαλείται από κατακόρυφους και κεκλιμένους στύλους και κατ' επέκταση συλλέκτες και κατόπιν διερευνούνται οι μεταβολές της σκίασης στην επιφάνεια ενός φβ συλλέκτη με στόχο την αποτίμηση της παραγόμενης από τα πλαίσια ηλεκτρικής ενέργειας.

2.2.1 Γεωμετρία Σκίασης

Ο ρυθμός σχεδίασης μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι διαρκώς αυξανόμενος και η σκίαση των συστοιχιών από παρακείμενές τους μπορεί να είναι αναπόφευκτη σε τέτοιου είδους συστήματα. Το ζήτημα της περιορισμένης έκτασης για την εγκατάσταση φβ συστοιχιών γίνεται έντονο, σε περιπτώσεις όπως για παράδειγμα στις στέγες των κτιρίων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, όπου η μεγιστοποίηση ή ένα συγκεκριμένο ποσό λαμβανόμενης ενέργειας είναι επιθυμητό, οι συλλέκτες που διατάσσονται σε σειρές σκιάζονται κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η απλοϊκή λύση ενός μόνο συλλέκτη κεκλιμένου υπό βέλτιστη κλίση δεν είναι πάντα εφαρμόσιμη εξαιτίας αρκετών τεχνικών ή πρακτικών λόγων, είτε άλλοτε, υφίσταται περιορισμός στο μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος του συλλέκτη. Κατά συνέπεια, οι συλλέκτες διατάσσονται σε σειρές με κάποια απόσταση μεταξύ τους, κυρίως για λόγους συντήρησης. Με αυτή τη διάταξη, οι συλλέκτες της μίας σειράς είναι δυνατόν να προκαλέσουν σκίαση σε αυτούς της επόμενης, κατά τη διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα τη μείωση της ηλιακής ενέργειας που λαμβάνεται (ενεργειακής ή ηλιακής απολαβής). Η εκδήλωση του φαινομένου της σκίασης εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σειρών συλλεκτών, το ύψος τους, το μήκος της σειράς, τη γωνία κλίσης και το γεωγραφικό πλάτος. Η ύπαρξη πολλών σειρών,

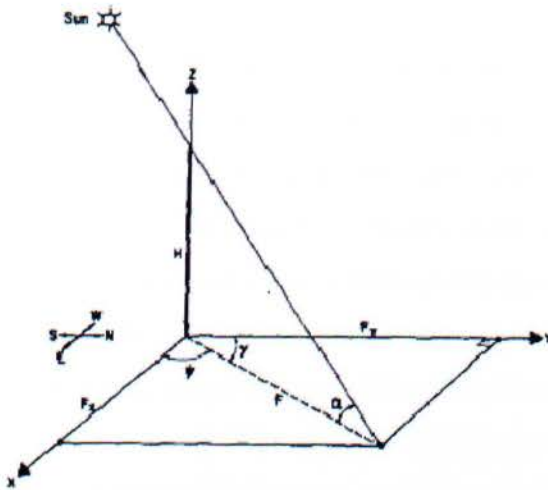
από τη μία, αυξάνει τη συνολική επιφάνεια των συλλεκτών (μικρή απόσταση μεταξύ των σειρών), από την άλλη όμως, εντείνει το φαινόμενο της σκίασης. Υπάρχει, επομένως, μια βέλτιστη λύση στη διάρθρωση των συλλεκτών σε μια δοσμένη έκταση, από τη σκοπιά της ηλιακής απολαβής καθώς και του οικονομικού ζητήματος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά ο υπολογισμός της γεωμετρίας σκιάς που προκαλούν κατακόρυφοι και επικλινείς στύλοι, και κατ' επέκταση συλλέκτες. Συγκεκριμένα, δίνονται οι αναλυτικές εκφράσεις των συνιστωσών της σκιάς (για συλλέκτη προσανατολισμένο στο νότο), του ύψους της και του εμβαδού της. Τα σχήματα που παρατίθενται, απεικονίζουν το φαινόμενο της σκίασης για διαφορετικούς μήνες του έτους.

2.2.2. Σκίαση από Κατακόρυφο Στύλο

Η παρακάτω εικόνα (Εικόνα 29) απεικονίζει τις συνιστώσες της σκιάς που προκαλεί ένας στύλος, ύψους H , τοποθετημένος στην αρχή των αξόνων. Ο ήλιος βρίσκεται σε γωνία ανύψωσης α (την ωριαία ηλιακή γωνία ω) με αζιμούθια γωνία γ . Οι εξισώσεις υπολογισμού των συνιστωσών αυτών συναρτήσει του χρόνου (ωριαία γωνία ω που σχετίζεται με την ώρα στη διάρκεια της ημέρας και ηλιακή απόκλιση δ με την ημέρα του έτους) και της τοποθεσίας (γεωγραφικό πλάτος ϕ) προκύπτουν έπειτα από κάποιους χειρισμούς

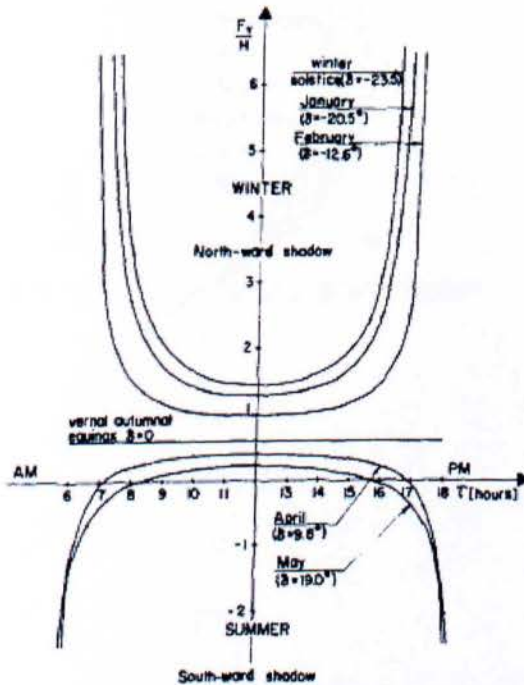
$$F_x = H \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega}$$

$$F_y = H \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega}$$



Εικόνα 29: Συνιστώσες σκιάς κατακόρυφου στύλου

Τα παρακάτω σχήματα απεικονίζουν τις συνιστώσες της σκιάς F_y/H και F_x/H , αντίστοιχα για την περίπτωση ενός στύλου τοποθετημένου στην αρχή των αξόνων, O , και για ορισμένους τυπικούς μήνες. Ειδικότερα, οι συνιστώσες της σκιάς έχουν υπολογιστεί για τις μέσες ημέρες των χειμερινών μηνών Ιανουάριο ($\delta = -20,5^\circ$), Φεβρουάριο ($\delta = -12,6^\circ$) και για το χειμερινό ηλιοστάσιο, καθώς και για τις μέσες ημέρες των θερινών μηνών Απρίλιο ($\delta = +9,8^\circ$), Μάιο ($\delta = +19,0^\circ$) και για την εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία ($\delta = 0^\circ$).

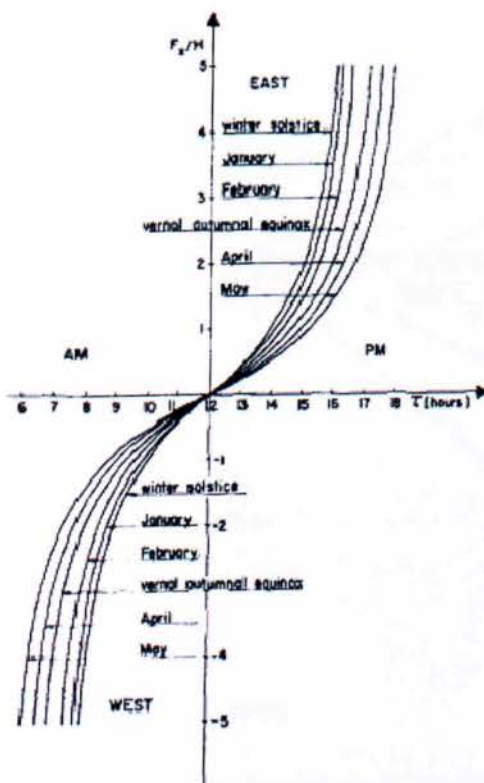


Εικόνα 30: Συνιστώσες σκιάς κατακόρυφου στύλου κατά τον άξονα Βορρά-Νότου συναρτήσει της ώρας

Όπως φαίνεται από το σχήμα (Εικόνα 30), κατά τη διάρκεια του χειμώνα οι συνιστώσες B-N της σκιάς έχουν μεγάλο μήκος και κείνται στη βόρεια κατεύθυνση. Το μεσημέρι, η συνιστώσα έχει μικρό μήκος, το οποίο αυξάνει και τείνει στο άπειρο τις ώρες ανατολής και δύσης του ηλίου. Το μεγαλύτερο μήκος σκιάς συναντάται στο χειμερινό ηλιοστάσιο και η ελάχιστη τιμή του, το μεσημέρι, είναι $F_y/H = 1.45$.

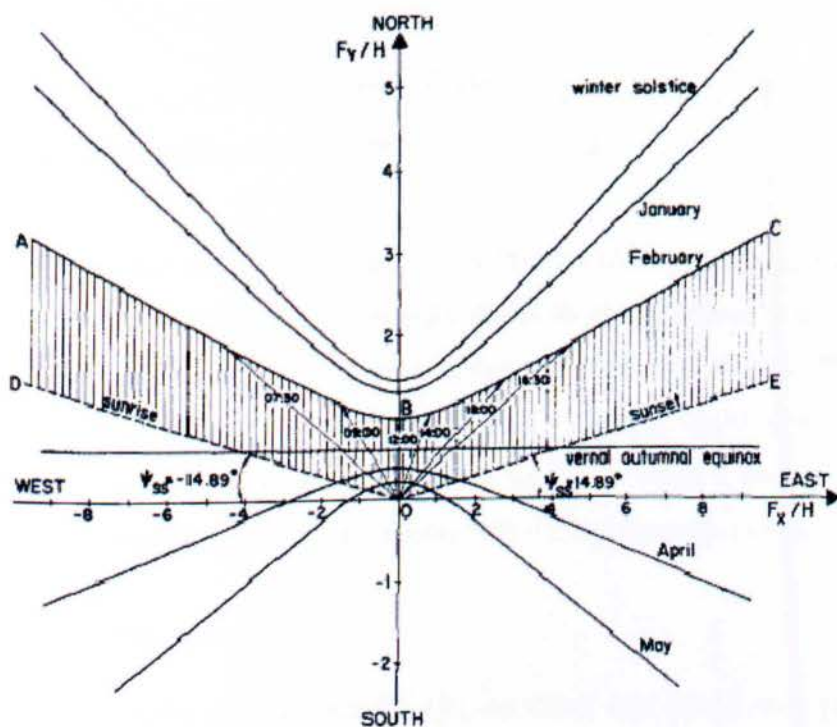
Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ($\delta > 0^\circ$), οι συνιστώσες έχουν μικρό μήκος και τις περισσότερες ώρες της ημέρας βρίσκονται στη βόρεια κατεύθυνση. Τα χρονικά διαστήματα πλησίον της ανατολής και δύσης του ηλίου, στα οποία $90^\circ < \gamma < -90^\circ$ ή $|\gamma| > 90^\circ$, οι σκιές κείνται στη νότια κατεύθυνση. Τον Απρίλιο, για $\tau = 07:06$ και $\tau = 16:54$, όπου $|\gamma| = 90^\circ$, οι συνιστώσες βρίσκονται ακριβώς στη δύση και ανατολή, αντίστοιχα.

Μια ιδιαίτερη περίπτωση παρατηρείται στην εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία ($\delta = 0^\circ$). Η συνιστώσα B-N της σκιάς παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και ίση με $F_y/H = 0.62$. Το καλοκαίρι, οι συνιστώσες της σκιάς προς νότο, είναι μικρής σημασίας καθώς η ηλιακή ακτινοβολία στα αντίστοιχα διαστήματα είναι χαμηλή και οι συλλέκτες είναι στραμμένοι προς το νότο. Η (Εικόνα 31) παρουσιάζει τις συνιστώσες A-Δ της σκιάς για τους ίδιους, με την (Εικόνα 30).



Εικόνα 31: Συνιστώσες σκιάς κατακόρυφου στύλου κατά τον άξονα Ανατολής-Δύσης συναρτήσει της ώρας

Η (Εικόνα 32) περιγράφει τη σχέση μεταξύ των συνιστωσών της σκιάς $F_y = f(F_x)$ για τους ίδιους μήνες που εξετάστηκαν και παραπάνω, για ένα στύλο τοποθετημένο στην αρχή των αξόνων. Το σχήμα αυτό περιλαμβάνει το μήκος της σκιάς και την κατεύθυνση της, μεγέθη που αναπαριστώνται από τις ακτίνες (με κέντρο την αρχή των αξόνων O), για διαφορετικές χρονικές στιγμές στη διάρκεια της ημέρας, π.χ. 7:30 κλπ, για το μήνα Φεβρουάριο. Το επίπεδο $F_y - F_x$ διαιρείται σε δύο περιοχές, τη γραμμοσκιασμένη $ABCDOE$ και το υπόλοιπο επίπεδο. Παρόμοιες περιοχές παρατηρούνται για όλους τους άλλους μήνες. *Οποιοσδήποτε άλλος στύλος βρεθεί στην περιοχή $ABCDOE$ θα σκιαστεί μία φορά στη διάρκεια της ημέρας.* Τις ημέρες της εαρινής και φθινοπωρινής ισημερίας, ο ήλιος ανατέλλει ακριβώς στην ανατολή ($\gamma = -90^\circ$). Το χειμώνα ($\delta < 0^\circ$), ο ήλιος ανατέλλει νοτιοανατολικά, όπου $|\gamma| < 90^\circ$, και επομένως η σκιά έχει κατεύθυνση βορειοδυτική. Το καλοκαίρι ($\delta > 0^\circ$), ο ήλιος ανατέλλει βορειοανατολικά, όπου $|\gamma| > 90^\circ$, και η σκιά έχει κατεύθυνση νοτιοδυτική.

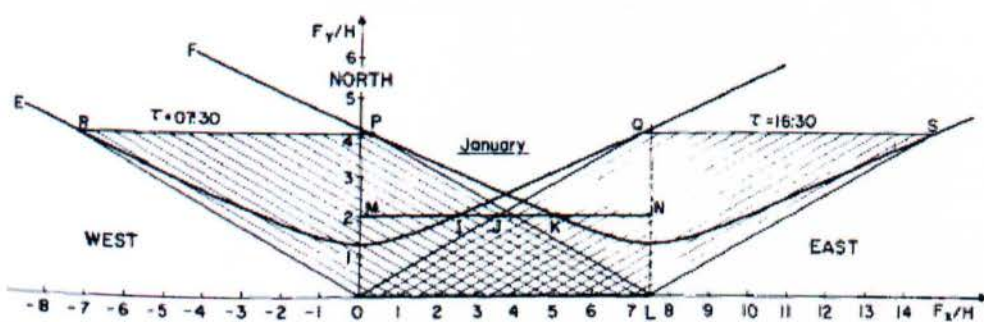


Εικόνα 32

2.2.3. Σκίαση από Κατακόρυφο Συλλέκτη

Ένα επίπεδο (επιφάνεια συλλέκτη) μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από τη σύνθεση άπειρου αριθμού στύλων. Ένας συλλέκτης μήκους $OL = L/H = 7.5$ και η

σκίαση που προκαλεί φαίνονται στην (Εικόνα 33). Οι δύο καμπύλες E και F (έντονες γραμμές) αντιστοιχούν στις σκιάσεις που προκαλούν τα άκρα του συλλέκτη, O και L αντίστοιχα, για το μήνα Ιανουάριο. Οι επιμέρους σκιές του συλλέκτη τις χρονικές στιγμές $\tau = 07:30$ (αριστερά) και $\tau = 16:30$ (δεξιά) δίνονται από τις αντίστοιχες γραμμοσκιασμένες περιοχές. Στις 7:30, το άκρο O προκαλεί τη σκιά OR, και το άκρο L την LP. Συνεπώς, ολόκληρος ο συλλέκτης μήκους OL προκαλεί τη σκιά εμβαδού ORPL. Παρομοίως, στις 16:30, ο συλλέκτης προκαλεί τη σκιά εμβαδού OQSL, προς την ανατολική πλευρά.



Εικόνα 33: Σκίαση κατακόρυφου συλλέκτη κατά το μήνα Ιανουάριο

Με την τοποθέτηση ενός δεύτερου συλλέκτη MN του ίδιου μήκους και ύψους με τον OL, σε απόσταση $D/H = 2.0$, το τμήμα JN αυτού θα είναι σκιασμένο στις 16:30. Το μεγαλύτερο σκιασμένο τμήμα που παρατηρείται το απόγευμα είναι το $IN = 5.0$ στις 15:30, και συμμετρικά, πριν το μεσημέρι το $MK = 5.0$ στις 08:30. Ο συλλέκτης MN είναι ασκίαστος το χρονικό διάστημα 08:30 με 15:30, αφού η συνιστώσα της σκιάς F_y/H είναι μικρότερη από την απόσταση $D/H = 2$ στο διάστημα αυτό.

2.2.4 Σκίαση από Κεκλιμένο Στύλο

Ένας στύλος μήκους A, στο επίπεδο ZY, με κλίση στο βορρά υπό γωνία β , αναπαριστάται στην (Εικόνα 34). Το μήκος της σκιάς που προκαλεί ισούται με $P = OC$ και οι επιμέρους συνιστώσες είναι

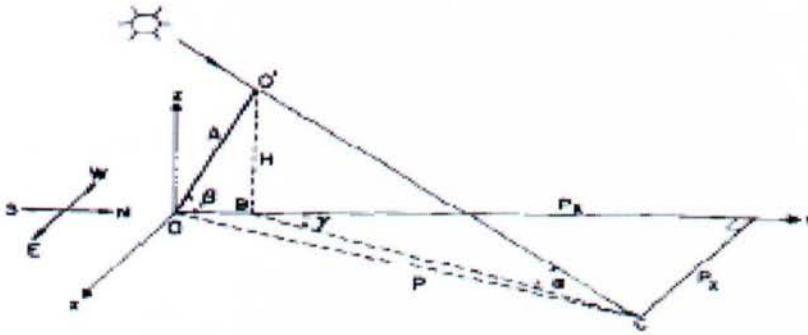
$$P_x = A \sin \beta \frac{\sin \gamma}{\tan a} = F_x$$

2.1

$$P_y = A \left(\cos \beta + \frac{\cos \gamma}{\tan \alpha} \sin \beta \right) = A \cos \beta + F_y$$

2.2

όπου F_x και F_y δίνονται από τις εξισώσεις (2.1) και (2.2) αντίστοιχα, και $H = A \sin \beta$. Το άκρο C της σκιάς, που προκαλείται από τον επικλινή στύλο OO' στην αρχή των αξόνων, είναι ίδιο ακριβώς με το άκρο της σκιάς ενός κατακόρυφου στύλου $O'B$, ύψους $H = A \sin \beta$, μετατοπισμένου κατά $A \cos \beta$. Κατά συνέπεια, οι εικόνες (Εικόνα 32) (Εικόνα 31) και (Εικόνα 30) εφαρμόζονται εξίσου κατάλληλα στην περίπτωση κεκλιμένου στύλου με πραγματικό ύψος, $A \sin \beta$, ενώ η αρχή των αξόνων είναι μετατοπισμένη προς την κατεύθυνση $-y$ κατά $A \cos \beta$.



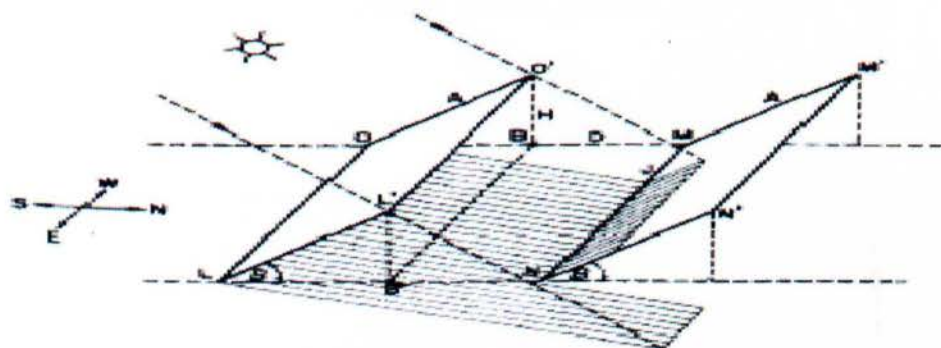
Εικόνα 34: Συνιστώσες σκιάς κεκλιμένου στύλου

2.2.5 Σκίαση από Κεκλιμένο Συλλέκτη

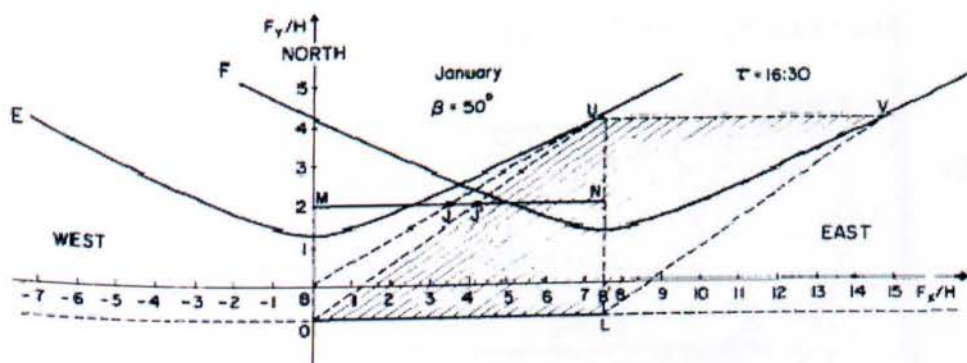
Η (Εικόνα 35) περιγράφει τη θέση δύο κεκλιμένων συλλεκτών ($OLO'L'$ και $MNM'N'$) και το σχήμα της σκιάς που προκαλεί ο πρώτος στο δεύτερο. Η (Εικόνα 38) παρουσιάζει τη σκίαση (γραμμοσκιασμένη περιοχή) που προκαλείται από τον κεκλιμένο συλλέκτη του προηγούμενου σχήματος, κλίσης $\beta = 50^\circ$ για το μήνα Ιανουάριο τη χρονική στιγμή $\tau = 16:30$.

Οι δύο καμπύλες E και F αντιστοιχούν στις σκιάσεις που προκαλούν τα άκρα του συλλέκτη, OO' και LL' αντίστοιχα, στη διάρκεια της ημέρας. Οι καμπύλες αυτές είναι πανομοιότυπες με αυτές από την (Εικόνα 33) για έναν κατακόρυφο συλλέκτη $B'BO'L'$ (σχήμα 2.7), ύψους $O'B = H$ και βάσης BB' . Καθώς η βάση του κεκλιμένου συλλέκτη είναι OL και απέχει απόσταση $A \cos \beta$ από τη βάση BB' του κατακόρυφου, η σκιά που προκαλεί το άκρο OO' του συλλέκτη δίνεται από την OU και όχι από την BU που αντιστοιχεί σε κατακόρυφο συλλέκτη στη θέση B. Η απόσταση OB ισούται

με $\cos\beta = 0.84$. Τοποθετώντας το συλλέκτη $MNM'N'$ σε απόσταση $BM/H = D/H = 2.0$, η σκιά σε αυτόν δίνεται από το ευθύγραμμο τμήμα NJ' το οποίο είναι μικρότερο από το NJ που θα προκαλούσε ένας κατακόρυφος συλλέκτης του ίδιου ύψους ($NJ' < NJ$). Συμπερασματικά, ένας κεκλιμένος συλλέκτης προκαλεί λιγότερη σκίαση σε σχέση με έναν κατακόρυφο με αντίστοιχο ύψος. Τέλος, είναι προφανές, ότι μέρος των σκιάσεων κείται κάτωθεν του συλλέκτη.



Εικόνα 35: Σχετική θέση δύο κεκλιμένων συλλεκτηών



Εικόνα 36: Σκίαση κεκλιμένου συλλεκτη

2.2.6. Ύψος και Εμβαδό Σκίασης

Ο υπολογισμός των σχετικών μεγεθών της σκίασης που προκαλείται από έναν κεκλιμένο συλλέκτη σε κάποιον άλλο γειτονικά παρακείμενο δίνεται συνοπτικά ακολούθως.

Το σχετικό ύψος σκιάς (σε μονάδες ύψους του συλλέκτη, A) στην κατεύθυνση MM' (Εικόνα 35), ως συνάρτηση του χρόνου ισούται με:

$$h_z = \frac{H_z}{A}$$

(σε μονάδες ύψους του συλλέκτη, A) στην κατεύθυνση MM' (Εικόνα 35), ως συνάρτηση του χρόνου ισούται με:

$$h_z = 1 - \frac{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta}{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta} \times (d \sin \beta + \cos \beta) \quad (2.3.1)$$

ενώ συναρτήσει των γωνιών α και γ του ηλίου:

$$h_z = 1 - \frac{d \sin \beta + \cos \beta}{\cos \beta + \left[\frac{\sin \beta \cos \gamma}{\tan \alpha} \right]} \quad (2.3.2)$$

με $a \geq 0$, $\gamma \leq 90^\circ$ ενώ και στις δύο περιπτώσεις ισχύει $0 \leq h_s \leq 1$

Το σχετικό μήκος σκιάς

$l_s = \frac{L_s}{L}$ (σε μονάδες μήκους του συλλέκτη, L) δίνεται από τη σχέση:

$$l_s = 1 - \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta} \times \left(\frac{d \sin \beta + \cos \beta}{l} \right) \quad (2.4.1)$$

ή ισοδύναμα, συναρτήσει των γωνιών α και γ,

$$l_s = \frac{L_s}{L} = 1 - \frac{d \sin \beta + \cos \beta}{\lambda} \times \frac{|\sin \gamma|}{\cos \beta \tan a + \sin \beta \cos \gamma} \quad (2.4.2)$$

με $a \geq 0$, $\gamma \leq 90^\circ$ ενώ και στις δύο περιπτώσεις ισχύει $0 \leq l_s \leq 1$

Τα σχετικά (κανονικοποιημένα) μεγέθη της απόστασης d και του μήκους σειράς l ορίζονται ως εξής:

$$d = \frac{D}{H}, \quad l = \frac{L}{H}$$

Τέλος, το σχετικό εμβαδό, ξ, της σκιασμένης επιφάνειας ισούται με το γινόμενο του σχετικού ύψους με του σχετικού μήκους της σκιάς.

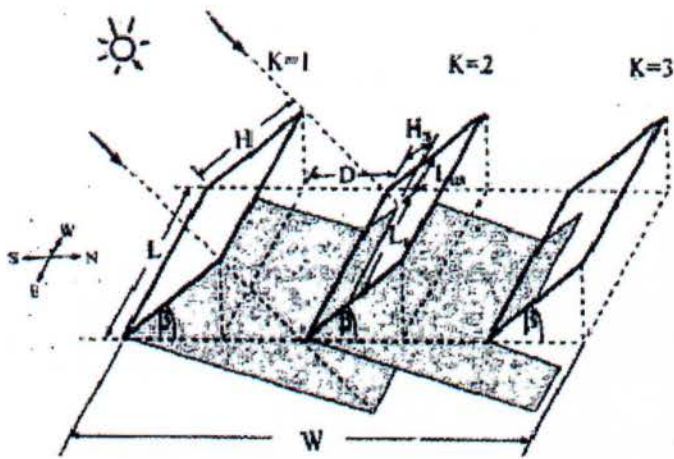
2.3 Μεταβολές Σκίασης στην Επιφάνεια φβ Συλλεκτών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σταθερά τοποθετημένοι συλλέκτες διατεταγμένοι σε σειρές μιας φβ εγκατάστασης είναι πιθανό να υπόκεινται σε σκιάσεις από γειτονικές τους σειρές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το ποσοστό της σκίασης εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σειρών και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο βέλτιστο σχεδιασμό του φβ συστήματος. Οι μεταβολές της σκίασης στην επιφάνεια ενός φβ συλλέκτη διερευνώνται με στόχο την αποτίμηση της παραγόμενης από τα πλαίσια ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάλυση που ακολουθεί παρέχει πληροφορίες για την κατάλληλη διάταξη και διασύνδεση των φβ πλαισίων προς σχηματισμό της φβ συστοιχίας.

Παρουσίαση του προβλήματος

Στην (Εικόνα 37) φαίνεται ένα σύνολο φβ συλλεκτών, προσανατολισμένων στο νότο ($\gamma=0^\circ$), σε οριζόντιο επίπεδο και δεδομένου μήκους L (που ισούται επίσης με το μήκος του κάθε συλλέκτη). Η απόσταση μεταξύ των συλλεκτών είναι D , το ύψος είναι H και η γωνία κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο είναι β . Το ποσό της σκίασης εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σειρών των συλλεκτών. Το Israeli Institute of Standards (SII) συνιστά η τοποθέτηση των φβ συλλεκτών που έχουν γωνία κλίσης μεταξύ $31^\circ < \beta < 50^\circ$ να γίνεται σε απόσταση ίση με $D = 1.35H \sin \beta$ μεταξύ των σειρών, όπου H το ύψος του συλλέκτη (Εικόνα 37). Η πρόταση αυτή προκύπτει από την απαίτηση για περιορισμό της σκίασης που προκαλείται από τη μία σειρά συλλεκτών στην επόμενη. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει περιορισμός χώρου ή κάποιος άλλος λόγος, η απόσταση μεταξύ των σειρών μπορεί να είναι μεγάλη.

Ωστόσο, όταν η διαθέσιμη έκταση είναι περιορισμένη ή συντρέχουν οικονομικοί λόγοι, οι συστοιχίες διατάσσονται με μικρότερη απόσταση μεταξύ τους, η οποία καθορίζεται από τις εκάστοτε απαιτήσεις.



Εικόνα 37: Σκίαση από παρακείμενους συλλέκτες

2.4 Σκιασμένη Επιφάνεια ΦΒ Συλλέκτη

Στην παράγραφο αυτή μελετάται η σκιασμένη επιφάνεια ενός φβ συλλέκτη. Ο συγκεκριμένος συλλέκτης αποτελείται από φβ πλαίσια διατεταγμένα σε σειρές, με αριθμό πλαισίων ίσο με $m = L/L_m$ ανά σειρά, και αριθμό σειρών $n = H/H_m$, όπου L_m και H_m είναι το μήκος και ύψος των πλαισίων αντίστοιχα. Εξετάζεται η διαβάθμιση της σκίασης στα διάφορα πλαίσια για την 21η Δεκεμβρίου. Ένα πλαίσιο μπορεί να σκιάζεται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, για ένα τμήμα της ημέρας ή καθόλου. Το πλαίσιο έχει μήκος $L_m = 1\text{m}$ και πλάτος $W_m = 0.4\text{m}$ και ο αριθμός των πλαισίων στη συστοιχία είναι 50. Δύο διαφορετικές διαμορφώσεις εφαρμόζονται: (α) Οριζόντια διαμόρφωση, σε 5 σειρές των 10 πλαισίων η κάθε μία. (β) Κατακόρυφη διαμόρφωση, σε 2 σειρές των 25 πλαισίων η κάθε μία. Το μήκος και το ύψος της συστοιχίας είναι $L = 10\text{m}$ και $H = 2\text{m}$, αντίστοιχα, και για τις δύο διαμορφώσεις. Τα σκιασμένα πλαίσια φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 1), όπως υπολογίζεται για τη μικρότερης διάρκειας ημέρα, 21 Δεκεμβρίου, σε γεωγραφικό μήκος 32°N από την ανατολή του ήλιου στις 07:03 έως το μεσημέρι (συμμετρικά για το απόγευμα, από το μεσημέρι μέχρι τις 16:57), για κλίση $\beta = 32^\circ$ και απόσταση μεταξύ των σειρών $D = 0.8\text{m}$. Τα πλαίσια που σκιάζονται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας σημειώνονται με βαθύ γκρι, αυτά που σκιάζονται μέρος της ημέρας με ανοιχτό γκρι και αυτά που δεν σκιάζονται καθόλου με λευκό. Ένα πλαίσιο χαρακτηρίζεται "σκιασμένο" ακόμα και όταν η σκιά καλύπτει μικρό μόνο μέρος του. Η ισχύς εξόδου του συγκεκριμένου πλαισίου θεωρείται μηδενική για όσο χρονικό διάστημα παρατηρείται σκιά στην επιφάνειά του.

Πρόκειται φυσικά για την ακραία περίπτωση, καθώς κάποιο ποσό ισχύος είναι δυνατόν να παράγεται από το πλαίσιο όταν σκιάζεται μερικώς.

Πίνακας 1: Σκίαση πλαισίων κατά τη διάρκεια της 21ης Δεκεμβρίου

Πίνακας 2: Ποσοστά του χρόνου κατά τη διάρκεια της 21ης Δεκεμβρίου στα όποια το πλαίσιο ήταν εντελώς ασκίαστο

94	94	94	94	94	94	98	100	100	100
86	86	86	86	86	86	90	97	100	100
69	69	69	69	69	69	73	80	93	100
0	0	0	0	0	0	4	11	24	50
0	0	0	0	0	0	4	11	24	50

100	100	100	100	100	100	81	83	85	88	92	97	100	100	100	100
79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79
0	0	0	0	0	0	2	4	6	9	13	18	24	32	43	58
0	0	0	0	0	0	2	4	6	9	13	18	24	32	43	58

Πίνακας 3: Άμεση προσπίπτουσα σε ένα πλαίσιο ακτινοβολία σε kWh κατά την 21^η Δεκεμβρίου

1.1162	1.1162	1.1162	1.1162	1.1162	1.1162	1.1179	1.1190	1.1190	1.1190
1.0986	1.0986	1.0986	1.0986	1.0986	1.0986	1.1004	1.1091	1.1190	1.1190
1.0187	1.0187	1.0187	1.0187	1.0187	1.0187	1.0205	1.0293	1.0777	1.1190
0	0	0	0	0	0	0.0018	0.0106	0.0590	0.3099
0	0	0	0	0	0	0.0018	0.0106	0.0590	0.3099

1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0733	1.0743	1.0753	1.0770	1.0895	1.1072	1.1190	1.1190	1.1190	1.1190
1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725
0	0	0	0	0	0	0.0008	0.0018	0.0028	0.0045	0.0170	0.0348	0.0590	0.1099	0.2254	0.4303
0	0	0	0	0	0	0.0008	0.0018	0.0028	0.0045	0.0170	0.0348	0.0590	0.1099	0.2254	0.4303

Ο (Πίνακας 4) συνοψίζει τα αποτελέσματα του (Πίνακας 1) συγκρίνοντας τις δύο διαμορφώσεις των πλαισίων στη συστοιχία, οριζόντια και κατακόρυφη, και δίνει τον αριθμό και το ποσοστό των πλαισίων που υπόκεινται σε σκίαση καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, τμήμα της ή καθόλου.

Πίνακας 4: Σύγκριση πλαισίων που υπόκεινται σε σκίαση για τις δύο διαμορφώσεις

Διαμόρφωση	Πλαίσια ασκίαστα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας		Πλαίσια σκιασμένα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας		Πλαίσια σκιασμένα τμήμα της ημέρας	
	Αριθμός	%	Αριθμός	%	Αριθμός	%
A	6	12	12	24	32	64
B	5	10	14	28	31	62

Το συμπέρασμα σχετικά με το ποια διαμόρφωση οδηγεί σε υψηλότερη παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από την εσωτερική διασύνδεση των μεμονωμένων ηλιακών στοιχείων του πλαισίου. Εντούτοις, τα διαφορετικά αποτελέσματα που παρατηρούνται στον πίνακα, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο λόγος του μήκους προς το ύψος του πλαισίου είναι δυνατόν να επηρεάζει την παραγόμενη ενέργεια. Το ποσοστό του χρόνου στη διάρκεια της ημέρας κατά το οποίο ένα πλαίσιο είναι εντελώς ασκίαστο έχει σημασία στον υπολογισμό της ενεργειακής παραγωγής. Κάτι τέτοιο απεικονίζεται στον (Πίνακας 2) και για τις δύο διαμορφώσεις, λαμβάνοντας υπόψη μόνο την ακτινική συνιστώσα της ακτινοβολίας.

Αξίζει να σημειωθεί τέλος ότι όλα τα πλαίσια λαμβάνουν διάχυτη ακτινοβολία. Με παρατήρηση του (Πίνακας 2), μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η μία διαμόρφωση (A) οδηγεί σε υψηλότερη παραγωγή από την άλλη (B), ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, η παραγόμενη από το πλαίσιο ενέργεια εξαρτάται και από τη διασύνδεση των στοιχείων στο πλαίσιο, όπως αναφέρθηκε ήδη. Με βάση την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των πλαισίων είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η κατάλληλη διασύνδεση μεταξύ τους για το σχηματισμό της συστοιχίας. Πλαίσια που λαμβάνουν παρόμοια επίπεδα προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε αντίστοιχα χρονικά διαστήματα, είναι και υποψήφια για σύνδεση σε σειρά. Η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, σε kWh, που προσπίπτει στην επιφάνεια των πλαισίων φαίνεται στον (Πίνακας 3).

2.5 Συμπεράσματα και Περαιτέρω Έρευνα

Η σκίαση των συλλεκτών θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό μεγάλης κλίμακας φβ συστημάτων, σε ορισμένες δε περιπτώσεις αρκετά σοβαρά. Το κόστος της έκτασης της θέσης εγκατάστασης, η ύπαρξη περιορισμένων διαθέσιμων εκτάσεων ή η επιθυμία για ένα συγκεκριμένο σχεδιασμό τόσο από τη σκοπιά του οικονομικού όσο και του ενεργειακού ζητήματος, μπορεί κάποιες φορές να οδηγήσουν σε μια λύση όπου η σκίαση είναι αναπόφευκτη. Με την αύξηση του αριθμού των σειρών των συλλεκτών σε μια δοσμένη έκταση (ή ισοδύναμα, τη μείωση της απόστασης μεταξύ

των συλλεκτών), η συνολική επιφάνεια τους αυξάνεται. Κάτι τέτοιο, όμως, θα είχε σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη σκίαση. Συνεπώς υπάρχει μια βέλτιστη λύση στην περίπτωση που η μεγιστοποίηση ή ένα συγκεκριμένο ποσό λαμβανόμενης ενέργειας είναι επιθυμητό.

Εφόσον ο βέλτιστος σχεδιασμός του συστήματος περιλαμβάνει το κόστος αυτού, η μέγιστη λαμβανόμενη ενέργεια αποτελεί μόνο το ένα μέρος στην εξεύρεση μιας βέλτιστης λύσης. Το άλλο μέρος περιγράφεται από τη μέση μέγιστη λαμβανόμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας του συλλέκτη. Η συνολική λοιπόν βέλτιστη λύση προκύπτει από τη σύνθεση – συμβιβασμό μεταξύ – των δύο αυτών μεγεθών. Το πρώτο σκέλος, δηλαδή η μέγιστη ενέργεια αποκλειστικά, θα είχε σαν αποτέλεσμα ένα μεγάλο αριθμό σειρών με ιδιαίτερα έντονο το φαινόμενο της σκίασης. Το δεύτερο σκέλος από την άλλη, υποδηλώνει απουσία του φαινομένου της σκίασης. Κατά συνέπεια, ο βέλτιστος αριθμός των σειρών από συλλέκτες σε ένα σύστημα καθορίζεται από το σημείο εκείνο, πέρα από το οποίο η αύξηση της ενεργειακής απολαβής με παράλληλη αύξηση του αριθμού των σειρών είναι μικρή.

Οι παράμετροι σχεδίασης του συστήματος περιλαμβάνουν: δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, θέση εγκατάστασης (γεωγραφικό πλάτος), ύψος συλλέκτη H , γωνία κλίσης β , ελάχιστη απόσταση ανάμεσα στους συλλέκτες D_{min} , διαστάσεις διαθέσιμης έκτασης και απόσταση συλλέκτη από το έδαφος. Καθεμία παράμετρος συνεισφέρει με διαφορετικό τρόπο στη βέλτιστη λύση (για παράδειγμα η απόσταση d επηρεάζει σημαντικά τη λύση, εν αντιθέσει με το μήκος σειράς l που έχει μικρή μόνο επίδραση). Πρέπει να σημειωθεί βέβαια ότι εκτός από τις παραμέτρους αυτές, ο εκάστοτε σχεδιασμός καθορίζεται σημαντικά από τις συγκεκριμένες σε κάθε περίπτωση απαιτήσεις.

Η μεταβολή της σκίασης κατά τη διάρκεια της ημέρας στην επιφάνεια ενός φβ συλλέκτη, σκίαση που προκαλείται όπως έχει επισημανθεί και προηγουμένως από τη μια σειρά συλλεκτών στην επόμενη, δίνει στο σχεδιαστή του συστήματος πληροφορίες για τον επιθυμητό τρόπο διασύνδεσης των πλαισίων προς σχηματισμό της φβ συστοιχίας. Στην ενότητα αυτή παρατίθεται αρχικά μια ανάλυση της γεωμετρίας της σκίασης (συνιστώσες σκιάς, ύψος και εμβαδό) και η επίδρασή της στο σχεδιασμό μεγάλων φβ συστημάτων. Στη συνέχεια, εξετάζονται τα φβ πλαίσια που υπόκεινται σε σκίαση και υπολογίζεται η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε καθένα από αυτά. Η πληροφορία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του τρόπου διασύνδεσης των πλαισίων της συστοιχίας. Σημειώνεται, τέλος, ότι παρά την ανάλυση που προηγήθηκε, μια συνολικά βέλτιστη λύση στο σχεδιασμό ενός φβ συστήματος δεν αναλύθηκε πλήρως στην παρούσα ενότητα.

2.6 Επίδραση σκίασης στην ηλεκτρική απόκριση φωτοβολταϊκών στοιχείων

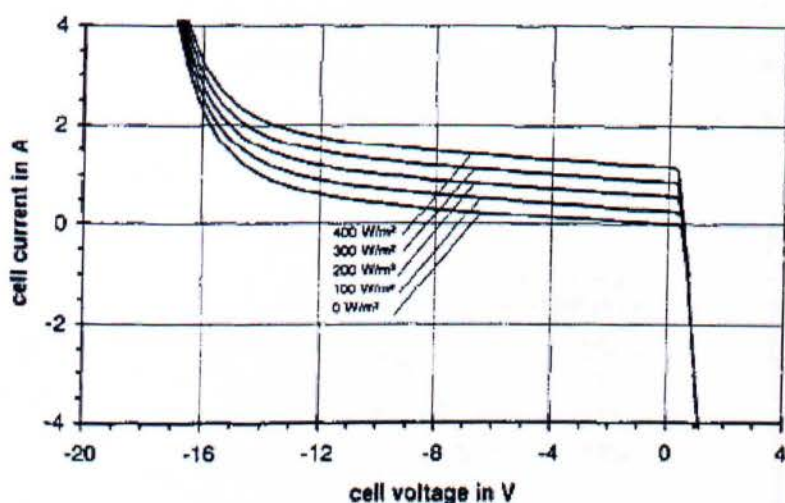
Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, ένα φβ πλαίσιο αποτελείται από 36 ηλιακά στοιχεία που συνδέονται σε σειρά και περισσότερα τέτοια πλαίσια συνθέτουν μια συστοιχία, συνδεδεμένα είτε σε σειρά είτε παράλληλα, για την ανάπτυξη κατάλληλης τάσης ή/και ρεύματος. Η ισχύς εξόδου μιας φβ συστοιχίας περιορίζεται σημαντικά όταν οι χαρακτηριστικές I-V των ηλιακών στοιχείων δεν είναι πανομοιότυπες εξαιτίας ρύπανσης, ανομοιόμορφης ακτινοβολίας, διακυμάνσεων στη θερμοκρασία, σκίασης κλπ.

Το φαινόμενο της μερικής σκίασης έχει γίνει αντικείμενο εκτενούς μελέτης τα τελευταία χρόνια. Μια τέτοια προσπάθεια ανάλυσης – επεξήγησης του φαινομένου αυτού ακολουθεί στη συνέχεια.

2.6.1 Ηλεκτρική Απόκριση υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης

Όταν ένα τμήμα ενός φβ πλαισίου σκιάζεται, τα στοιχεία που υφίστανται σκίαση δεν είναι ικανά να παράγουν το ίδιο ρεύμα με εκείνα που δέχονται ομοιόμορφη ακτινοβολία. Από τη στιγμή όμως που όλα τα στοιχεία ενός πλαισίου είναι

συνδεδεμένα εν σειρά, ίδια ποσότητα ρεύματος διαρρέει το σύνολο των στοιχείων. Τα ασκίαστα στοιχεία “αναγκάζουν” τα σκιασμένα να παράγουν μεγαλύτερο ρεύμα από αυτό που αντιστοιχεί στην ακτινοβολία τους. Ο μόνος τρόπος με τον οποίο τα σκιασμένα στοιχεία μπορούν να λειτουργήσουν σε ρεύμα μεγαλύτερο από το ρεύμα βραχυκύκλωσής τους είναι στην περιοχή των αρνητικών τάσεων, όπως προκύπτει από την ολική χαρακτηριστική ρεύματος τάσης που φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 38: Ολική χαρακτηριστική ρεύματος τάσης

Το εν λόγω γεγονός προκαλεί μια απώλεια τάσης στο σύστημα. Τα σκιασμένα στοιχεία απορροφούν ισχύ και αρχίζουν να λειτουργούν ως φορτία. Με άλλα λόγια, τα σκιασμένα στοιχεία δαπανούν ισχύ υπό μορφή θερμότητας προκαλώντας έτσι τα λεγόμενα *hot spots*. Για την πρόληψη της εκδήλωσης του φαινομένου αυτού, γίνεται χρήση παρακαμπτηρίων διόδων (*bypass diodes*).

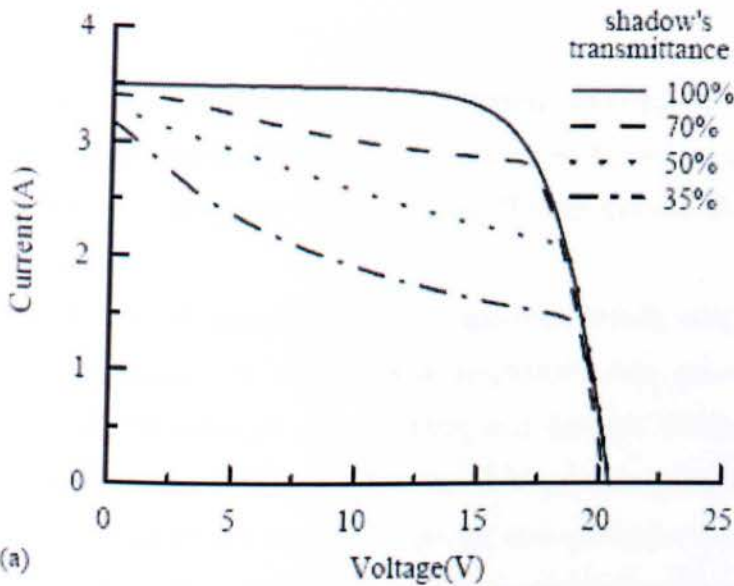
Όταν ένα φβ στοιχείο σκιάζεται, η αντίστοιχη bypass διάδος πολώνεται ορθά και όλο το πλεονάζον ρεύμα σε σχέση με το ρεύμα βραχυκύκλωσης του σκιασμένου στοιχείου διοχετεύεται διαμέσου της διόδου. Έτσι, η bypass διάδος μειώνει δραματικά το μέγεθος της θέρμανσης που προκαλείται τοπικά στη σκιασμένη περιοχή.

Από την άλλη μεριά, η bypass διάδος διατηρεί την τάση της ομάδας των σκιασμένων στοιχείων στην οποία συνδέεται σε περίπου $-0,6V$, περιορίζοντας με τον τρόπο αυτό τη μείωση της ισχύος εξόδου της συστοιχίας. Εκτός από τη μείωση της ισχύος, τα σκιασμένα στοιχεία αλλάζουν σημαντικά τη συνολική I-V καμπύλη του φβ πλαισίου εξαιτίας των bypass διόδων. Για το λόγο αυτό, είναι δυνατόν να σχηματιστούν αρκετά τοπικά σημεία μέγιστης ισχύος (MPP) στην καμπύλη P-V ενός

φβ πλαισίου ή μιας συστοιχίας. Το φαινόμενο αυτό δημιουργεί αρκετά προβλήματα στον έλεγχο της ανίχνευσης σημείων μέγιστης ισχύος (MPP tracking control) του συστήματος.

2.7 Λειτουργία χωρίς δίοδο bypass

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η συμπεριφορά – καμπύλη I-V – ενός φ/β πλαισίου χωρίς τη χρήση bypass διόδων σε σχέση με δύο παραμέτρους: το επίπεδο της ακτινοβολίας που δέχονται τα σκιασμένα στοιχεία ενός πλαισίου και τον αριθμό των σκιασμένων στοιχείων

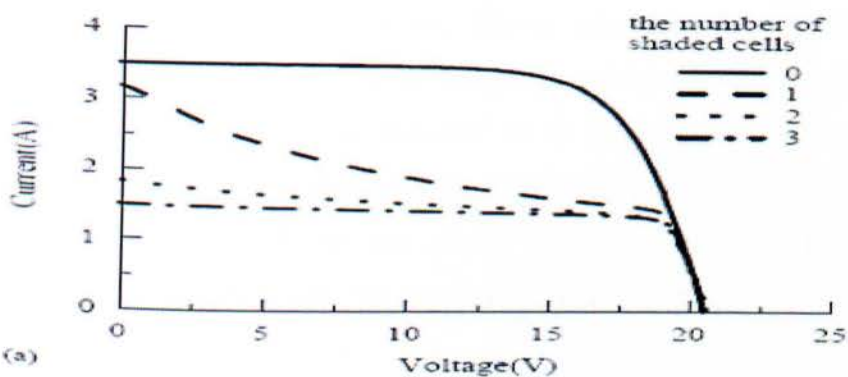


Εικόνα 39: I-V χαρακτηριστική για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας

Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζει την I-V χαρακτηριστική για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας των σκιασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, μόνο το ένα στοιχείο του πλαισίου καλύπτεται από σκιά θεωρώντας διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας (κάθε πλαίσιο αποτελείται από 36 φβ στοιχεία). Σε αυτή την περίπτωση, τα ρεύματα βραχυκύκλωσης είναι σχεδόν ίδια παρόλο που το επίπεδο ακτινοβολίας είναι διαφορετικό. Ωστόσο, σε χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας, το ρεύμα μειώνεται ταχύτατα με αύξηση της τάσης. Από την άλλη μεριά, η τάση ανοικτοκύκλωσης είναι ίδια.

Στην (Εικόνα 40) φαίνονται οι μεταβολές της I-V χαρακτηριστικής σαν συνάρτηση του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων (το επίπεδο της ακτινοβολίας

λαμβάνεται σταθερό και ίσο με 35%). Καθώς ο αριθμός των σκιασμένων στοιχείων αυξάνεται, το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται αισθητά. Η τάση ανοικτοκύκλωσης ωστόσο παραμένει σχεδόν ίδια.



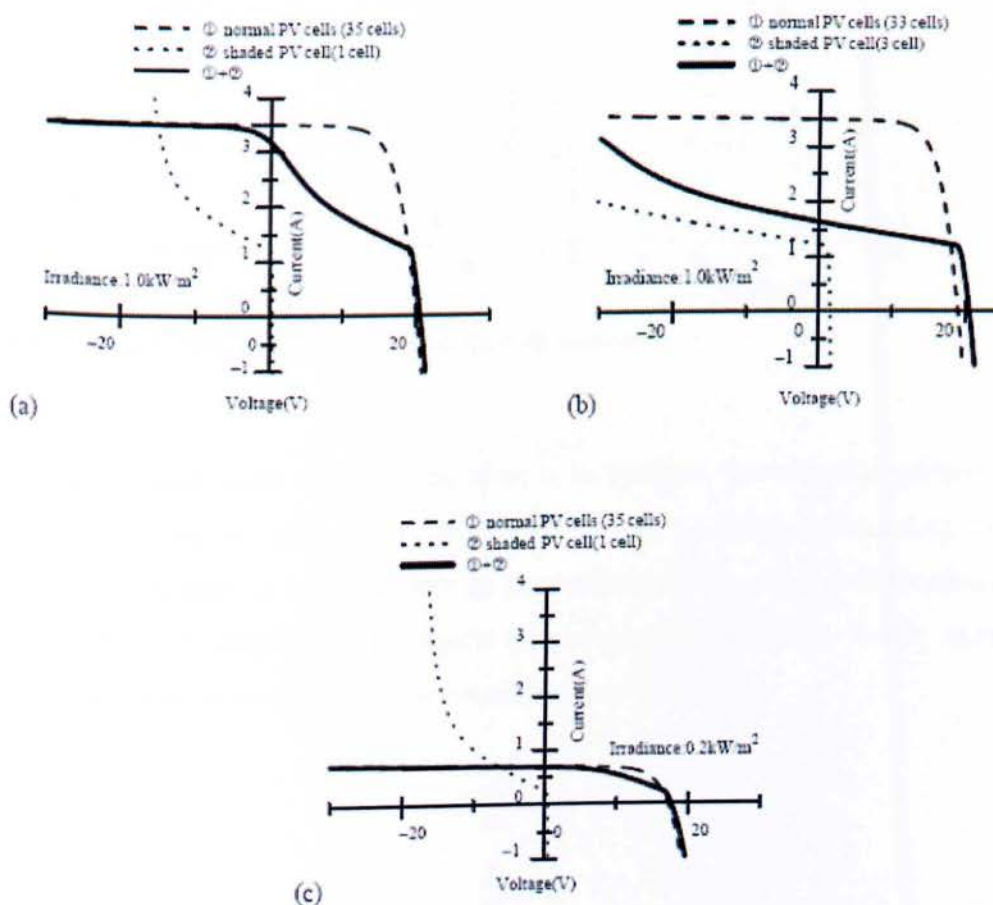
Εικόνα 40: I-V χαρακτηριστική για διαφορετικό αριθμό σκιασμένων στοιχείων

Όπως είναι φανερό από τις παραπάνω εικόνες, οι I-V χαρακτηριστικές μεταβάλλονται σημαντικά από τις συνθήκες ακτινοβολίας, τη σκίαση και τον αριθμό των σκιασμένων στοιχείων σε ένα πλαίσιο. Η αιτία των μεταβολών αυτών μελετάται στη συνέχεια.

Η (Εικόνα 41α) απεικονίζει τις I-V χαρακτηριστικές ενός φβ πλαισίου με ένα σκιασμένο στοιχείο. Για την I-V χαρακτηριστική ενός σκιασμένου στοιχείου, το ρεύμα αυξάνεται απότομα με την τάση στο δεύτερο τεταρτημόριο εξαιτίας του φαινομένου της χιονοστιβάδας. Για την I-V χαρακτηριστική των υπολοίπων 35 στοιχείων η αύξηση του ρεύματος εξαιτίας του φαινομένου της χιονοστιβάδας δεν εμφανίζεται στο σχήμα καθώς η αύξηση αυτή συντελείται σε πολύ αρνητικές τάσεις. Η I-V χαρακτηριστική ενός πλαισίου με ένα σκιασμένο στοιχείο αποτελεί την σύνθεση των δύο προηγούμενων χαρακτηριστικών. Έχει αποδειχθεί ότι η μείωση του ρεύματος στην περιοχή κοντά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης όπως φαίνεται στην (Εικόνα 39) προκύπτει από την επίδραση του φαινομένου της χιονοστιβάδας (τάσης κατάρρευσης) του σκιασμένου στοιχείου. Η (Εικόνα 41β) απεικονίζει τις I-V χαρακτηριστικές ενός φβ πλαισίου με τρία σκιασμένα στοιχεία. Καθώς ο αριθμός των σκιασμένων στοιχείων αυξάνεται, η τάση κατάρρευσης των σκιασμένων στοιχείων μετατοπίζεται προς τα αριστερά και η μείωση του ρεύματος κοντά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης όπως δείχνει η (Εικόνα 41β) μετατοπίζεται σε υψηλές αρνητικές τιμές τάσης. Έτσι, η I-V χαρακτηριστική ενός φβ πλαισίου με τρία σκιασμένα

στοιχεία, η οποία εμφανίζεται στο πρώτο τεταρτημόριο, αλλάζει σημαντικά σε σύγκριση με την(Εικόνα 41α).

Η I-V χαρακτηριστική ενός πλαισίου με ένα σκιασμένο στοιχείο και για χαμηλότερο επίπεδο ακτινοβολίας, δίνεται στην (Εικόνα 41γ). Καθώς το επίπεδο ακτινοβολίας μειώνεται, τόσο το ρεύμα βραχυκύκλωσης των ασκίαστων στοιχείων όσο και του σκιασμένου μειώνονται. Τα εν λόγω ρεύματα βραχυκύκλωσης έχουν αμελητέα διαφορά, σε σύγκριση με τις εικόνες (α) και (β). Ως εκ τούτου, η I-V χαρακτηριστική συντίθεται από μικρές μεταβολές του ρεύματος: η επίδραση της μείωσης του ρεύματος από την τάση κατάρρευσης είναι μικρή.



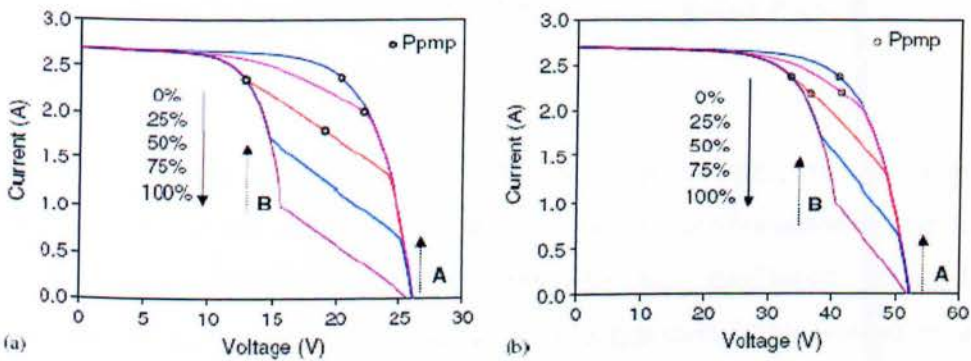
Εικόνα 41: I-V χαρακτηριστικές ασκίαστων και σκιασμένων στοιχείων συνδεδεμένων εν σειρά:

- (α) 1 σκιασμένο στοιχείο (1000 W/m^2)
- (β) 3 σκιασμένα στοιχεία (1000 W/m^2)
- (γ) 1 σκιασμένο στοιχείο (200 W/m^2)

2.8 Επίδραση διόδου bypass

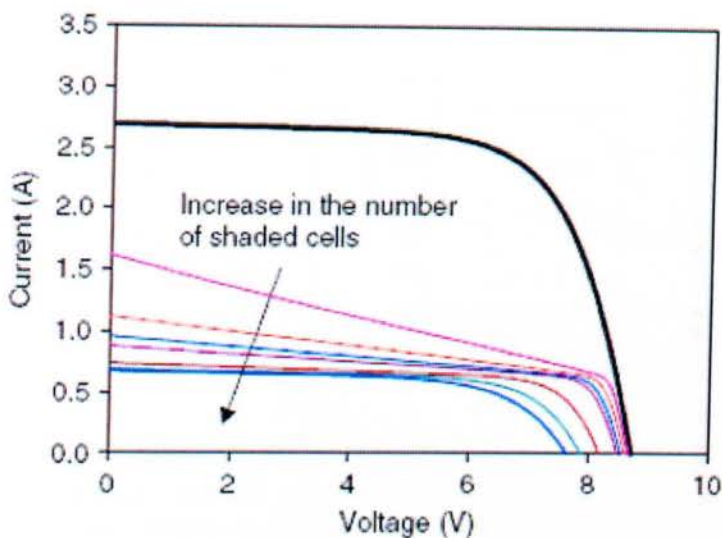
Στη συνέχεια μελετώνται οι αντίστοιχες με τις προαναφερθείσες επιδράσεις στην περίπτωση *ύπαρξης* bypass διόδου. Θεωρείται μια ακολουθία 18 σειριακά συνδεδεμένων στοιχείων, με την υπόθεση ότι ένα από τα στοιχεία σκιάζεται σε ποσοστό 25%, 50%, 75% ή 100%.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην (Εικόνα 42)(α, β). Η μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης του σκιασμένου στοιχείου είναι φανερή στο σημείο που οι επιδράσεις σκίασης αρχίζουν να ενεργούν (σημείο A) και στο σημείο στο οποίο ενεργοποιείται η bypass διάδος (σημείο B).



Εικόνα 42: Σκίαση ενός στοιχείου με διαφορετικά ποσοστά

Ένα άλλο επακόλουθο της σκίασης είναι η μετατόπιση του σημείου μέγιστης ισχύος σε τάσεις χαμηλότερες από τις αναμενόμενες για τις εκάστοτε διατάξεις. Το φαινόμενο αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη σε περιπτώσεις συστημάτων συνδεδεμένων σε μετατροπείς που ανιχνεύουν το σημείο μέγιστης ισχύος (MPPT), καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε κακή λειτουργία και αύξηση των απωλειών.

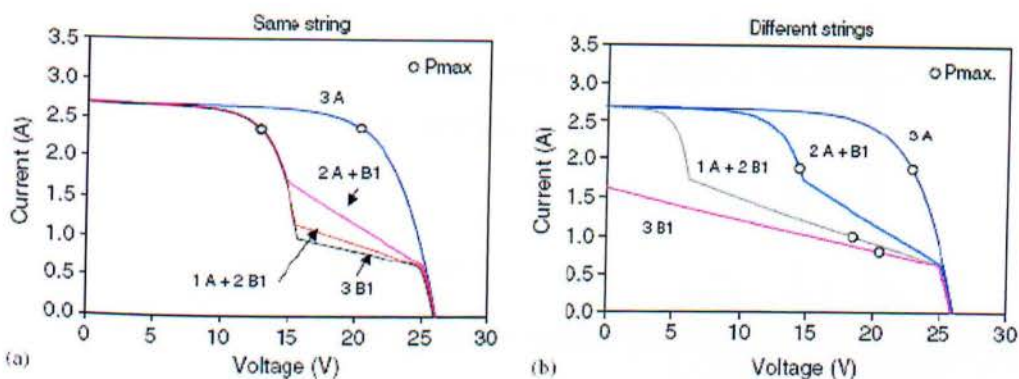


Εικόνα 43: Επίδραση της αύξησης του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε μια ακολουθία 18 στοιχείων

Η (Εικόνα 43) παρουσιάζει την επίδραση της αύξησης του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε μια ακολουθία 18 σειριακά συνδεδεμένων στοιχείων. Η επίδραση αυτή απεικονίζεται στην περίπτωση που συνδέονται περισσότερες ακολουθίες, όπως εκτιμάται στο σχήμα 2.19. Το σχήμα αυτό δείχνει ένα σύστημα που αποτελείται από τρεις ακολουθίες των 18 στοιχείων, σε κάθε μια από τις οποίες δύο ή τρία στοιχεία από κάθε ακολουθία σκιάζονται κατά 75%.

Η παραμόρφωση της I-V χαρακτηριστικής αυξάνεται με τον αριθμό των σκιασμένων στοιχείων, κάτι που οφείλεται στη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης της ακολουθίας, όταν ο αριθμός των σκιασμένων στοιχείων αυξάνεται.

Στην περίπτωση ενός συστήματος που λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, η αύξηση του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε μια ακολουθία δεν έχει καμιά επίδραση, όπως φαίνεται και στην (Εικόνα 44), όπου το σημείο μέγιστης ισχύος είναι το ίδιο και για τις τρεις χαρακτηριστικές.



Εικόνα 44: Επίδραση της αύξησης του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε ένα σύστημα με 3 ακολουθίες των 18 στοιχείων (α) σκιασμένα στοιχεία στην ίδια ακολουθία (β) σκιασμένα στοιχεία σε διαφορετικές ακολουθίες

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι εντελώς διαφορετικά όταν τα στοιχεία που σκιάζονται ανήκουν σε διαφορετικές ακολουθίες, καθώς σε αυτή την περίπτωση η αύξηση του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων προκαλεί μια σημαντική μείωση στο MPP. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα (β), όπου η μείωση της ισχύος είναι της τάξης του 61% για την περίπτωση στην οποία ίδια επίπεδα σκίασης εμφανίζονται σε όλες τις ακολουθίες της συστοιχίας. Μια τέτοια η περίπτωση θα πρέπει να αποφεύγεται, καθώς προκαλεί σημαντική μείωση στην παραγόμενη ισχύ.

2.9 Μελέτη σκίασης με χρήση του λογισμικού PSPICE

Στην παρούσα ενότητα γίνεται μια προσπάθεια κατανόησης της λειτουργίας των φβ συστημάτων, υπό συνθήκες μερικής σκίασης, με εφαρμογή των ανάλογων μοντέλων στο λογισμικό PSpice. Το PSpice είναι το πιο διαδεδομένο υπολογιστικό εργαλείο για την προσομοίωση τόσο αναλογικών όσο και διακριτών κυκλωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα ισοδύναμα φωτοβολταϊκά μοντέλα, τόσο σε επίπεδο στοιχείου όσο και σε επίπεδο πλαισίου, που χρησιμοποιήθηκαν για τις απαραίτητες προσομοιώσεις με το PSpice. Δίνονται οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός φβ στοιχείου με βάση τις οποίες προκύπτουν οι $I(V)$ χαρακτηριστικές κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Αρχικά παρουσιάζεται το βασικό μοντέλο ενός φβ στοιχείου, το οποίο στη συνέχεια επεκτείνεται για να συμπεριλάβει κάποιες πρόσθετες απώλειες.

Κατόπιν, γίνεται αναγωγή σε επίπεδο πλαισίου, με τις αντίστοιχες εξισώσεις και, τέλος, προτείνεται ένα βελτιωμένο μοντέλο για εφαρμογή σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας (ακτινοβολία, θερμοκρασία).

2.9.1 Ιδανικό Ισοδύναμο Κύκλωμα

Η τιμή του ρεύματος που παράγεται από ένα φβ στοιχείο δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

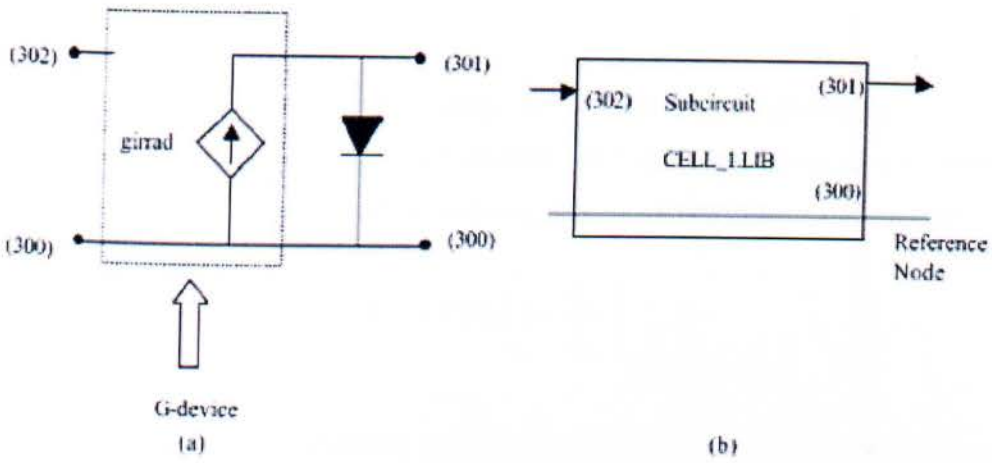
Όπως είναι γνωστό, τόσο το ρεύμα βραχυκύκλωσης όσο και το ανάστροφο ρεύμα κόρου μεταβάλλονται ανάλογα με την επιφάνεια του φβ στοιχείου, γεγονός σημαντικό καθώς διευκολύνεται η κλιμάκωση των φβ συστημάτων ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Το μοντέλο αυτό, αν και το απλούστερο, είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές και μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε κώδικα του PSpice με τη χρήση μιας πηγής ρεύματος τιμής ίσης με I_{sc} και μιας διόδου.

2.9.2 Μοντέλο PSpice Ιδανικού φβ Στοιχείου

Ένας βολικός τρόπος για το χειρισμό των κυκλωμάτων σε PSpice είναι ο καθορισμός υποκυκλωμάτων (subcircuits) στα κύρια κυκλώματα. Κάτι τέτοιο ισχύει και στην περίπτωση των φβ στοιχείων όπου η δημιουργία υποκυκλώματος εξυπηρετεί τη διαδικασία της σύνδεσης δύο ή περισσότερων στοιχείων σε σειρά ή παράλληλα. Το διάγραμμα του μοντέλου ενός ιδανικού φβ στοιχείου, που χρησιμοποιείται, δίνεται στην (Εικόνα 45), το οποίο αποτελεί ουσιαστικά υλοποίηση της εξίσωσης (2.8).

Η βασική ιδέα στην παρούσα ανάλυση είναι ότι τα φβ στοιχεία δέχονται μια συγκεκριμένη ακτινοβολία και το ρεύμα βραχυκύκλωσης που παράγουν είναι ανάλογο προς αυτήν. Για την εφαρμογή αυτού στο PSpice, η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ανατίθεται σε μια πηγή ρεύματος εξαρτώμενη από τάση (g-device), όπως φαίνεται και στην (Εικόνα 45α).



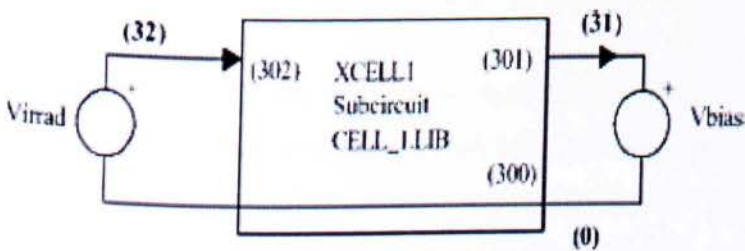
Εικόνα 45: Αναπαράσταση υποκυκλώματος φβ στοιχείου και αντίστοιχο μπλοκ διάγραμμα

Η τιμή της πηγής ρεύματος, με ονομασία "girrad", δίνεται από τη σχέση:

$$girrad = \frac{J_{sc} \cdot A}{1000} G \quad (2.6)$$

όπου G η ακτινοβολία σε W/m^2 . Η εξίσωση υποθέτει ότι η τιμή του J_{sc} δίνεται σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς ($AM = 1.5$, $1000W/m^2$, $T_{cell} = 25^\circ C$), που είναι και οι συνθήκες στις οποίες διεξάγονται συνήθως οι πειραματικές μετρήσεις. Οι τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης προκύπτουν από τα φύλλα προδιαγραφών (datasheets) που παρέχουν οι κατασκευαστές. Η εξίσωση υπολογίζει την τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης για κάθε επίπεδο ακτινοβολίας G , με δεδομένη την ισχύ της αναλογικής σχέσης μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών. Το μπλοκ διάγραμμα του υποκυκλώματος δίνεται στην (Εικόνα 45) στο οποίο φαίνεται ένας κόμβος αναφοράς (300), ένας κόμβος εισόδου (302) για την είσοδο μιας τάσης αριθμητικά ίσης με την τιμή της ακτινοβολίας και ένας κόμβος εξόδου (301) για τη σύνδεση του στοιχείου στο κύκλωμα.

Το φβ στοιχείο συνδέεται σε ένα κύκλωμα μέτρησης για την εξαγωγή της $I(V)$ χαρακτηριστικής, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 46)



Εικόνα 46: Κύκλωμα μέτρησης I-V χαρακτηριστικής φβ στοιχείου

• Τάση ανοικτοκύκλωσης

Εκτός από το ρεύμα βραχυκύκλωσης, ένα δεύτερο χαρακτηριστικό σημείο της καμπύλης $I(V)$ ενός φβ στοιχείου αποτελεί το σημείο τομής της με τον άξονα των τάσεων, ή αλλιώς η τάση ανοικτοκύκλωσης, V_{oc} , η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$V_{oc} = V_T \ln \left(1 + \frac{I_{sc}}{I_0} \right) \quad (2.7)$$

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται ότι η τάση ανοικτοκύκλωσης εξαρτάται λογαριθμικά από το λόγο I_{sc}/I_0 . Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι υπό σταθερή θερμοκρασία, η τιμή της V_{oc} μεταβάλλεται λογαριθμικά με το ρεύμα I_{sc} , το οποίο με τη σειρά του μεταβάλλεται ανάλογα με την ακτινοβολία, κάτι που συνεπάγεται λογαριθμική εξάρτηση μεταξύ τάσεως ανοικτοκύκλωσης και ακτινοβολίας. Τα παραπάνω οδηγούν στο σημαντικό συμπέρασμα ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης επηρεάζεται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από την ακτινοβολία σε σχέση με την τάση ανοικτοκύκλωσης. Η τάση αυτή επιπλέον είναι ανεξάρτητη της επιφάνειας του κελιού, γεγονός σημαντικό καθώς ανεξαρτήτως μεγέθους επιφάνειας, η εν λόγω τάση παραμένει πάντα ίδια κάτω από ίδιες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

• Σημείο Μέγιστης Ισχύος

Η ισχύς εξόδου ενός φβ στοιχείου ισούται με το γινόμενο του ρεύματος που διανέμεται στο φορτίο επί την τάση στα άκρα του στοιχείου. Θετικό πρόσημο υποδηλώνει παραγωγή ισχύος από το στοιχείο – διανομή στο φορτίο, ενώ αρνητικό κατανάλωση ισχύος από το στοιχείο. Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω σύμβαση πρόσημου, η ισχύς σε κάθε σημείο της χαρακτηριστικής δίνεται από τη σχέση:

$$P = V \times I = V \left[I_L - I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \right]$$

Προφανώς, η τιμή της ισχύος στο σημείο βραχυκύκλωσης είναι μηδενική, αφού η τάση στο σημείο αυτό ισούται με μηδέν, όπως και στο σημείο ανοικτοκύκλωσης όπου το ρεύμα ισούται με μηδέν. Η ισχύς που παράγεται από το φβ στοιχείο είναι θετική στο διάστημα μεταξύ των δύο αυτών σημείων. Επίσης, υπάρχει ένα σημείο εντός αυτού του διαστήματος στο οποίο η ισχύς μεγιστοποιείται, το επονομαζόμενο σημείο μέγιστης ισχύος (maximum power point, MPP), με συντεταγμένες $V=V_m$ και $I=I_m$.

Η σχέση μεταξύ των V_m και I_m προκύπτει από το γεγονός ότι η παράγωγος της ισχύος στο σημείο αυτό είναι μηδενική:

$$\frac{dP}{dV} = 0 = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V_m}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_m}{V_T} I_0 e^{\frac{V_m}{V_T}} \quad (2.8)$$

στο MPP, από όπου

$$I_m = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V_m}{V_T}} - 1 \right) \quad (2.9)$$

και

$$V_m = V_{oc} - V_T \ln \left(1 + \frac{V_m}{V_T} \right) \quad (2.10)$$

Με τη χρήση του PSpice οι συντεταγμένες του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) προσδιορίζονται εύκολα από τη γραφική παράσταση $I(V)$ που προκύπτει.

2.9.3 Γενικευμένο Μοντέλο φβ Στοιχείου

Το ισοδύναμο κύκλωμα του φβ στοιχείου μέχρι στιγμής, και η αντίστοιχη υλοποίηση του στο PSpice, λαμβάνει υπόψη μια ιδανική συμπεριφορά του κελιού βασισμένη σε μια ιδανική δίοδο και μια ιδανική πηγή ρεύματος. Το μοντέλο όμως αυτό, εξαιτίας των απλοποιήσεων που περιλαμβάνει, δεν είναι ικανό να επεξηγήσει ή να μοντελοποιήσει επαρκώς τη συμπεριφορά των φβ στοιχείων και, ως εκ τούτου, κρίνεται ανεπαρκές στον προσδιορισμό της μέγιστης παραγόμενης ισχύος. Ένα πιο πλήρες μοντέλο, που περιλαμβάνει σε πρώτη φάση ωμικές αντιστάσεις, είναι απαραίτητο για την ορθότερη προσομοίωση της λειτουργίας των φβ συστημάτων. Η ανάγκη για χρήση ωμικών αντιστάσεων πηγάζει από τα εξής δύο φαινόμενα.

2.9.3.1. Αντίσταση σειράς

Ένας από τους κυριότερους περιορισμούς του ιδανικού μοντέλου προέρχεται από τις ωμικές απώλειες σειράς, οι οποίες εμφανίζονται στα πραγματικά φβ στοιχεία. Στην πράξη, το ρεύμα που παράγεται στο εσωτερικό του στοιχείου φτάνει στους ακροδέκτες αφού διαπεράσει το πάχος του ημιαγωγίμου υλικού, το οποίο παρουσιάζει κάποια ειδική αντίσταση. Επιπλέον, η αντίσταση των αγωγών και των ηλεκτροδίων που περιέχονται στη συσκευασία του φβ στοιχείου συμβάλλουν στις ολικές απώλειες σειράς. Συνήθως, οι αναπόφευκτες αυτές σειριακές απώλειες μπορούν να ενσωματωθούν σε μια μόνο αντίσταση, R_s , που ονομάζεται αντίσταση σειράς του φβ στοιχείου.

2.9.3.2. Αντίσταση εκτροπής

Στη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών η μαζική παραγωγή έχει ως αποτέλεσμα αναπόφευκτα κατασκευαστικά ελαττώματα, μεταξύ των οποίων τοπικές βραχυκυκλώσεις και διαρροές ρεύματος είναι από τα πλέον συνηθισμένα. Οι συγκεκριμένες απώλειες, που σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αρκετά υψηλές ώστε να μην αγνοηθούν, εκφράζονται γενικά μέσω μιας αντίστασης, R_{sh} , παράλληλης προς τη δίοδο.

Ωστόσο, μερικές φορές η απλή θεώρηση των παραπάνω αντιστάσεων ως τα μοναδικά επιπλέον συστατικά του ισοδύναμου κυκλώματος δεν είναι και πάλι επαρκής για την ακριβή μοντελοποίηση των $I(V)$ χαρακτηριστικών ενός φβ στοιχείου. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στα ακόλουθα φαινόμενα.

2.9.3.3. Επανασύνδεση

Η επανασύνδεση των φορέων στην περιοχή αραίωσης της ένωσης p-n των φβ στοιχείων εξηγεί τις μη ωμικές διαδρομές ρεύματος στο εσωτερικό του στοιχείου. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε χαμηλές τάσεις πόλωσης και μπορεί να ποσοτικοποιηθεί από μια δεύτερη δίοδο με ανάστροφο ρεύμα κόρου J_{02} και με συντελεστή ποιότητας δίοδου συνήθως ίσο με 2, παράμετροι διαφορετικές από αυτές της ιδανικής δίοδου. Η δίοδος αυτή προστίθεται στο υποκύκλωμα του στοιχείου, παράλληλα στην αρχική – ιδανική.

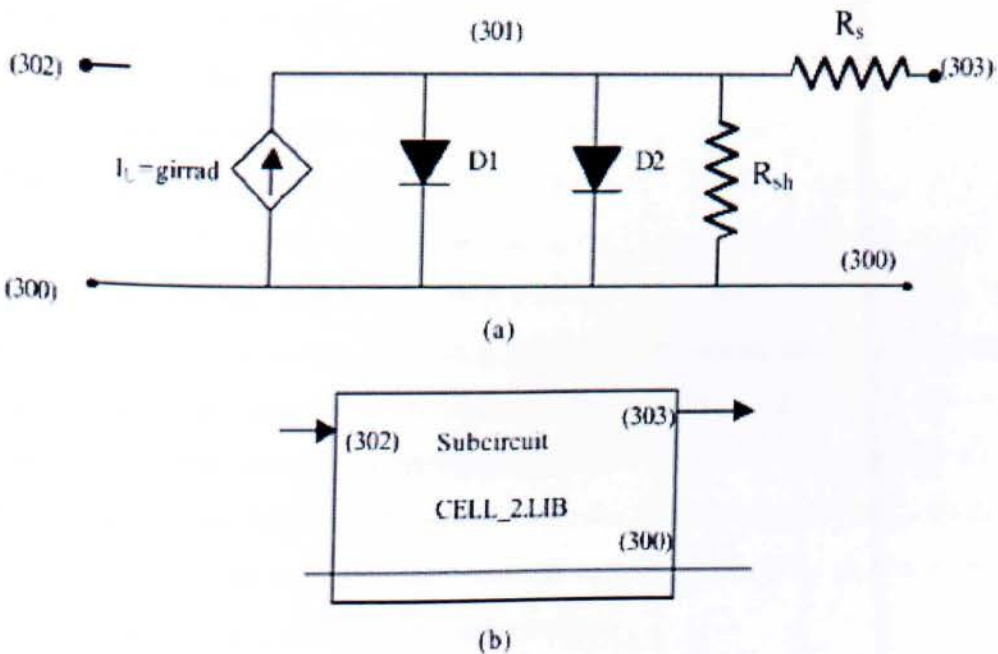
2.9.3.4. Μη ιδανικότητα διόδου

Στην πράξη πολύ λίγα στοιχεία εκδηλώνουν μια εντελώς ιδανική συμπεριφορά και έχουν συντελεστή ποιότητας διόδου ίσο με τη μονάδα. Για το λόγο αυτό αποτελεί κοινή πρακτική η πρόσθεση ενός παράγοντα “*n*”, ο οποίος ενσωματώνει αυτές τις μη ιδανικότητες. Το αρχικό μοντέλο συνεπώς τροποποιείται για να συμπεριλάβει αυτή την επίδραση.

Συνοψίζοντας, μπορεί να γραφεί μια νέα σχέση μεταξύ ρεύματος – τάσης που λαμβάνει υπόψη τις προαναφερθείσες επιδράσεις:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_s}{2V_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.11)$$

Το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα δίνεται στην (Εικόνα 47), όπου η διάδος D1 αντιστοιχεί στον πρώτο εκθετικό όρο, ενώ η D2 στο δεύτερο.



Εικόνα 47: Υποκύκλωμα δύο διόδων και αντιστάσεων εν σειρά και παράλληλης

2.10 Μοντέλο PSpice φβ Πλαισίου

Μεμονωμένα ηλιακά στοιχεία διαθέτουν περιορισμένη ικανότητα παραγωγής ισχύος σε υψηλά επίπεδα τάσης καθώς η τάση ανοικτοκύκλωσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι ανεξάρτητη της επιφάνειας των φβ στοιχείων και περιορίζεται από τις ιδιότητες των ημιαγωγών. Στις περισσότερες φβ εφαρμογές, απαιτούνται επίπεδα τάσης μεγαλύτερα από μερικές δεκάδες Volt, ενώ ακόμα και για τυπικές

ηλεκτρονικές εφαρμογές ένα ελάχιστο όριο ενός Volt περίπου συνηθίζεται στην πράξη. Για το λόγο αυτό είναι υποχρεωτική η εν σειρά σύνδεση των φβ στοιχείων προκειμένου να αυξηθεί η παραγόμενη τάση.

Οι φωτοβολταϊκές εφαρμογές ποικίλουν από μερικά Watt μέχρι αρκετά MW στις φβ εγκαταστάσεις. Κατά συνέπεια, δεν απαιτείται μόνο αύξηση της τάσης αλλά και του ρεύματος, καθώς η μέγιστη επιφάνεια των φβ στοιχείων περιορίζεται λόγω κατασκευαστικών παραγόντων. Κάτι τέτοιο, σημαίνει ότι η παράλληλη σύνδεση φβ στοιχείων και πλαισίων είναι η πλέον συνήθης προσέγγιση προς αύξηση του ρεύματος εξόδου μιας δεδομένης φβ εγκατάστασης.

Ισοδύναμο Κύκλωμα φβ Πλαισίου

Η χαρακτηριστική $I(V)$ ενός φβ πλαισίου προκύπτει από τη σύνθεση των $I(V)$ χαρακτηριστικών των μεμονωμένων στοιχείων που συνδυάζονται για τη δημιουργία ενός πλαισίου. Με τη χρήση του PSpice δεν είναι δύσκολη η επέκταση μιας απλής σύνδεσης στοιχείων προς σχηματισμό ενός ισοδύναμου μοντέλου πλαισίου.

Υπάρχουν ωστόσο δύο κύριοι λόγοι για τους οποίους είναι προτιμότερη μια πιο συμπαγής διατύπωση ενός μοντέλου για φβ πλαίσια. Πρώτον, καθώς ο αριθμός των συνδεδεμένων στοιχείων εντός του πλαισίου αυξάνεται, το ίδιο συμβαίνει και με τον αριθμό των κόμβων που απαιτούνται στο κύκλωμα (και ισοδύναμα στο κώδικα (PSpice), γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα άσκοπη πολυπλοκότητα και δυσκολία στο χειρισμό. Δεύτερον, εφόσον είναι γνωστοί οι γενικοί κανόνες αναγωγής που διέπουν τη σχέση μεταξύ των ηλεκτρικών μεγεθών (ρεύματος και τάσης) στοιχείων και πλαισίου, είναι απλή και βολική η ανάπτυξη ενός πιο συμπαγούς μοντέλου για ένα φβ πλαίσιο και κατ' επέκταση μια φβ εγκατάσταση. Στην εξίσωση της $I(V)$ χαρακτηριστικής ενός μεμονωμένου φβ στοιχείου

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_s}{2V_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.12)$$

γίνονται ορισμένες απλοποιημένες παραδοχές. Πιο συγκεκριμένα η αντίσταση εκτροπής ενός φβ στοιχείου είναι συνήθως πολύ μεγάλη (ιδανικά άπειρη) και οι

επιδράσεις της μπορούν να αγνοηθούν, όπως και αυτές της δεύτερης διόδου (D2). Έτσι, θεωρώντας $I_{O2}=0$ και $R_{sh}=\infty$, η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) \quad (2.13)$$

όπου έχει υποθεθεί επίσης ότι $I_{sc}=IL$.

Οι κανόνες των τάσεων, ρευμάτων και αντιστάσεων στην περίπτωση ενός πίνακα (που αντιστοιχεί σε ένα φβ πλαίσιο) διαστάσεων $N_s \times N_p$ στοιχείων έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} I_M &= N_p I \\ I_{scM} &= N_p I_{sc} \\ V_M &= N_s V \\ V_{ocM} &= N_s V_{oc} \\ R_{sM} &= \frac{N_s}{N_p} R_s \end{aligned} \quad (2.14)$$

όπου ο δείκτης M αναφέρεται σε πλαίσιο ενώ η απουσία του αναφέρεται σε μεμονωμένο στοιχείο.

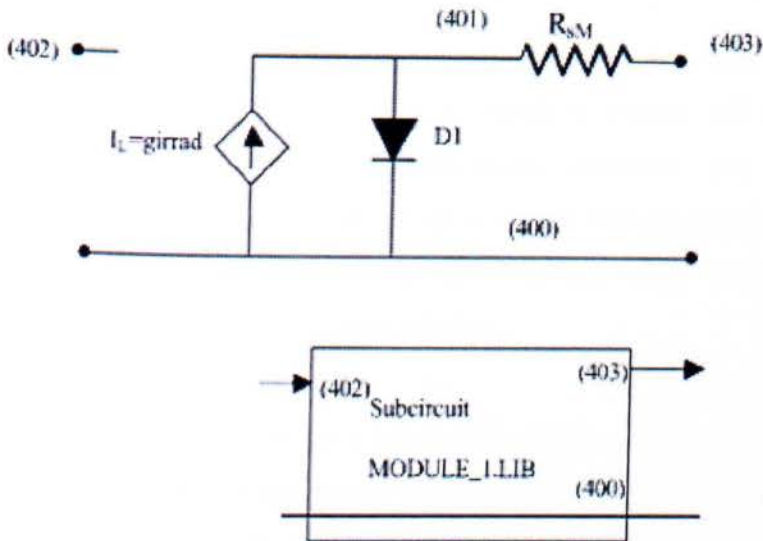
Έπειτα από κάποιους υπολογισμούς προκύπτει ότι

$$R_{sM} = \frac{V_{ocM}}{I_{scM}} - \frac{P_{\max M}}{FF_{0M} I_{scM}^2}$$

Όπου

$$FF_{0M} = \frac{J_{mM} V_{mM}}{J_{scM} V_{ocM}} = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{oc}} = FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{1 + v_{oc}} \quad (2.15)$$

Το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα του φβ πλαισίου δίνεται στην παρακάτω εικόνα. (Εικόνα 48).



Εικόνα 48: Μοντέλο PSpice για το κύκλωμα φβ πλαισίου

Το μοντέλο που περιγράφηκε σε αυτή την παράγραφο, είναι ικανό να αποδώσει τις $I(V)$ χαρακτηριστικές των φβ πλαισίων σε πρότυπες συνθήκες, χρησιμοποιώντας τιμές των κύριων ηλεκτρικών μεγεθών ενός πλαισίου του εμπορίου: ρεύμα βραχυκύκλωσης, τάση ανοιχτο-κύκλωσης, ισχύς αιχμής και αριθμός των συνδεδεμένων στοιχείων. Το πρόβλημα που ανακύπτει ωστόσο αφορά την αναγωγή της συμπεριφοράς των πλαισίων σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας (ακτινοβολία, θερμοκρασία). Η παράγραφος που ακολουθεί αφιερώνεται στο ζήτημα αυτό.

2.11 Μετάβαση σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φβ πλαισίων προσδιορίζονται από τους κατασκευαστές για πρότυπες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Οι πρότυπες συνθήκες καθορίζονται ως $AM=1.5$, 1000 W/m^2 σε θερμοκρασία κελιού 25°C , ενώ $AM0$ (1353 W/m^2) στους 25°C είναι οι αντίστοιχες πρότυπες συνθήκες εκτός ατμόσφαιρας. Ως εκ τούτου, τα μόνα γνωστά δεδομένα για ένα φβ πλαίσιο είναι οι ονομαστικές τιμές των ηλεκτρικών του παραμέτρων, οι οποίες διαφέρουν από τις τιμές των ίδιων αυτών παραμέτρων όταν οι συνθήκες λειτουργίας μεταβάλλονται. Η μετατροπή των χαρακτηριστικών από ένα σύνολο συνθηκών σε ένα άλλο αποτελεί κύριο ζήτημα, καθώς απαιτείται ο προσδιορισμός της παραγόμενης ενέργειας μιας φβ εγκατάστασης σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, και όχι σε πρότυπες ή σε συνθήκες που επιτυγχάνονται σε εξειδικευμένα εργαστήρια.

Οι περισσότερες μέθοδοι μετατροπής σε αυθαίρετες συνθήκες βασίζονται στους ακόλουθους γενικούς κανόνες:

- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ανάλογο της ηλιακής ακτινοβολίας και έχει μικρή εξάρτηση από τη θερμοκρασία (χαμηλός θερμοκρασιακός συντελεστής).

- Η τάση ανοικτοκύκλωσης έχει αρνητική εξάρτηση από τη θερμοκρασία και εξαρτάται λογαριθμικά από την ακτινοβολία. Επιπλέον, μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη θερμοκρασία λειτουργίας ενός φβ στοιχείου, υφίσταται εξαιτίας της συσκευασίας στην οποία περιέχονται, της μεταγωγής θερμότητας και της ακτινοβολίας.

Το μοντέλο PSpice που χρησιμοποιείται για τις απαραίτητες προσομοιώσεις είναι βασισμένο στη μέθοδο μετατροπής του προτάθηκε από τον G. Blaesser, ύστερα από μακρά παρακολούθηση της συμπεριφοράς φβ συστημάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος μετασχηματίζει κάθε ζεύγος συντεταγμένων (I,V) σε ένα άλλο (I_r, V_r) σε πρότυπες συνθήκες και αντίστροφα, σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$I_r = I \frac{G}{G_r} \quad (2.16)$$

Και

$$V_r = V + DV \quad (2.17)$$

Ο θερμοκρασιακός συντελεστής του ρεύματος αγνοείται και οι επιδράσεις της θερμοκρασίας ενσωματώνονται σε μια παράμετρο DV, που ορίζεται ως εξής:

$$DV = V_{ocr} + V_{oc} \quad (2.18)$$

Οι τιμές των ρευμάτων και των τάσεων κανονικοποιούνται με βάση τις

$$i_r = \frac{I_r}{I_{scr}} \quad i = \frac{I}{I_{sc}} \quad (2.19)$$

Και

$$v_r = \frac{V_r}{V_{ocr}} \quad v = \frac{V}{V_{oc}} \quad (2.20)$$

Οι σχέσεις μεταξύ των κανονικοποιημένων αυτών τιμών είναι

$$i_r = i \quad (2.21)$$

και

$$v = \frac{v_r - Dv}{1 - Dv} \quad (2.22)$$

όπου,

$$Dv = \frac{DV}{V_{ocr}} \quad (2.23)$$

Οι εξισώσεις (2.21) και (2.22) αποτελούν τις εξισώσεις μετατροπής του ρεύματος και της τάσης αντίστοιχα. Επίσης, είναι απαραίτητη η μετατροπή του συντελεστή πλήρωσης, ο οποίος με βάση τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ως

$$FF = FF_r \frac{v_{mr} - Dv}{v_{mr}(1 - Dv)} \quad (2.24)$$

Η παράμετρος Dv έχει προκύψει από πληθώρα πειραματικών μετρήσεων για φβ πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου και προσεγγίζεται από την ακόλουθη σχέση:

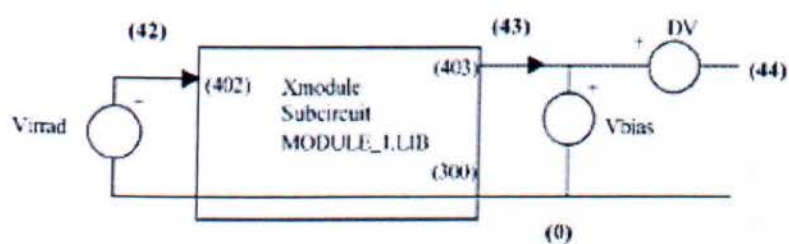
$$D_v = 0.06 \ln \frac{G_r}{G} + 0.004(T_\alpha - T_r) + 0.12 \times 10^{-3} G \quad (2.25)$$

Όπου:

- Τα η θερμοκρασία περιβάλλοντος και
- Τr η θερμοκρασία λειτουργίας των φβ στοιχείων υπό πρότυπες συνθήκες (25°C).

Το κυκλωματικό διάγραμμα που προκύπτει για τη μετατροπή σε αυθαίρετες συνθήκες όπως και το κύκλωμα μέτρησης δίνονται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 49). Στο σχήμα αυτό μια πηγή τάσης εξαρτώμενη από τάση συμπεριλαμβάνεται στο υπάρχον κύκλωμα υπολογισμού σε πρότυπες συνθήκες, προκειμένου να επιτευχθεί η

μετατόπιση της τάσης που υπαγορεύεται από την εξίσωση , και η οποία απαιτείται για την επιδιωκόμενη μετάβαση σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας.



Εικόνα 49: Κύκλωμα μετατροπής σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

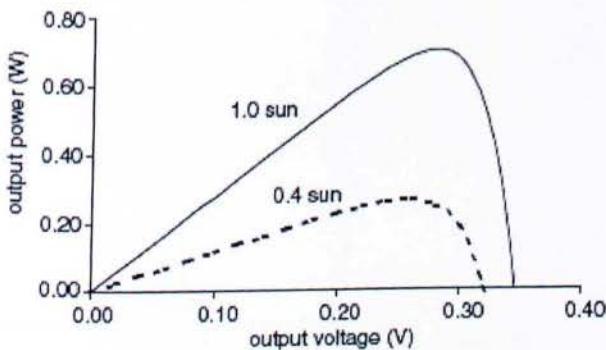
3.1 Ερευνητικά αποτελέσματα

Μελέτες στο παρελθόν από διάφορους ερευνητές έχουν αποδείξει ότι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η ηλιακή ακτινοβολία είναι από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν άλλοτε με θετικό και άλλοτε με αρνητικό τρόπο την λειτουργία του φ/β πλαισίου. Συγκεκριμένα οι φ/β κυψέλες λείτουν πιο αποδοτικά σε χαμηλές θερμοκρασίες (ψυχρές, φωτεινές και ηλιόλουστες μέρες).

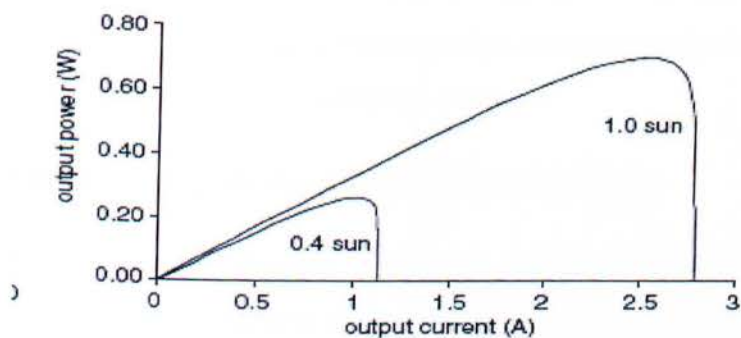
Συγκεκριμένα με την αύξηση της θερμοκρασίας:

- Η τάση της κυψέλης και η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} μειώνονται
- Το ανάστροφο ρεύμα της διόδου I_s και το ρεύμα βραχυκυκλώματος I_{sc} αυξάνονται, αν και ο βασικός παράγοντας που μεταβάλλει το ρεύμα είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2)
- Η ισχύς εξόδου P_0 μειώνεται

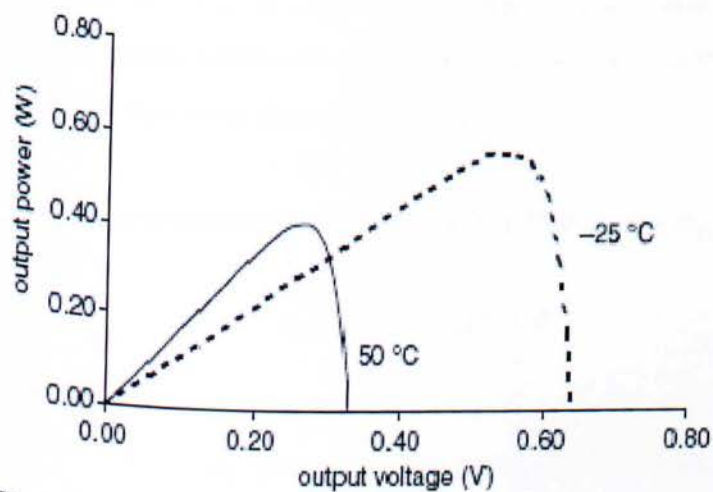
Τα παραπάνω φαίνονται και στις χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης (P-V), ισχύος-ρεύματος (P-I) και ρεύματος-τάσης (I-V) που ακολουθούν:



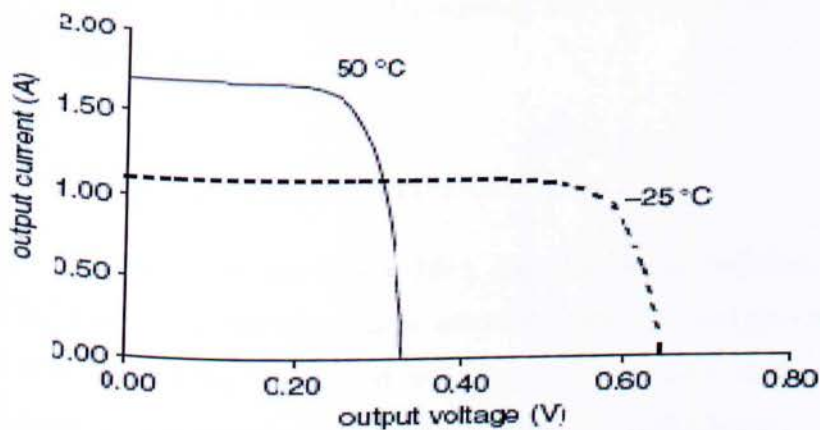
Εικόνα 50: Επιδρασεις του επιπέδου της ηλιακής ακτινοβολιας στη χαρακτηριστικη ισχυος -τασης



Εικόνα 51: Επιδράσεις του επιπέδου της ηλιακής ακτινοβολίας στη χαρακτηριστική ισχύος-ρεύματος



Εικόνα 52: Επιδράσεις της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική ισχύος-τάσης



Εικόνα 53: Επίδραση της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος.

Από τις χαρακτηριστικές αυτές προκύπτει και το συμπέρασμα ότι με την αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνεται η ισχύς εξόδου P_0 , το ρεύμα εξόδου I_0 , ενώ η τάση εξόδου δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα.

3.2 Υπολογισμός απόδοσης ηλιακής κυψέλης

Όλες οι ηλιακές κυψέλες έχουν ένα βαθμό απόδοσης ο οποίος ονομάζεται ονομαστικός και αναφέρεται στην απόδοση της κυψέλης κάτω από μια ορισμένη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία αναφοράς. Σχεδόν ποτέ όμως μια κυψέλη δεν λειτουργεί στην θερμοκρασία αναφοράς και ποτέ δε λειτουργεί σε σταθερή θερμοκρασία. Άλλη είναι η θερμοκρασία το καλοκαίρι και άλλη το χειμώνα. Ακόμα και την ίδια ημέρα άλλη θερμοκρασία έχουμε αν συννεφιάσει και άλλη αν έχει ηλιοφάνεια. Για το λόγο αυτό πρέπει να υπολογίσουμε την απόδοση της κυψέλης στην θερμοκρασία που έχουμε κάθε φορά. Οι σχέσεις που ακολουθούνται για τον υπολογισμό αυτό είναι οι ακόλουθες.

Η μέση απόδοση μιας ϕ/β κυψέλης δίνεται από τη σχέση :

$$\eta_p = \eta_r * [1 - \beta_p (T_c - T_r)]$$

όπου

- β_p είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας για την απόδοση της ϕ/β κυψέλης και δίνεται από τον κατασκευαστή
- η_r είναι ο βαθμός απόδοσης της ϕ/β κυψέλης στη θερμοκρασία αναφοράς T_r (25°C)
- T_c είναι η θερμοκρασία που συνδέεται με την μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος.

3.3 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Έχει μετρηθεί ότι κυρίως λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας την οποία δέχονται, αλλά και λόγω των ηλεκτρικών απωλειών οι οποίες πραγματοποιούνται πάνω τους, στις αντιστάσεις σειράς, τα ϕ/β στοιχεία αποκτούν κατά την λειτουργία τους θερμοκρασία αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος.

Αν T_c είναι η θερμοκρασία του στοιχείου μπορούμε να θεωρήσουμε ότι εξαρτάται αυτή γραμμικά από την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a και την ηλιακή ακτινοβολία G , ως εξής:

$$T_c = T_a + \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) * G$$

όπου:

- T_c είναι η θερμοκρασία των πλαισίων
- T_a είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος
- NOCT είναι η τυπική θερμοκρασία λειτουργίας του πλαισίου και δίνεται από την κατασκευάστρια εταιρεία
- G είναι η ηλιακή ακτινοβολία σε W/m^2

Αν η κλίση των κυβελών είναι διαφορετική από τη βέλτιστη ($\beta = |\varphi - \delta|$) τότε γίνεται χρήση της σχέσης :

$$T_c = T_a + C_f * \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) * G$$

όπου:

C_f είναι διορθωτικός συντελεστής που είναι ίσος με :

$$C_f = 1 - 1,17 * 10^{-4} (\beta_m - \beta)^2$$

όπου: β_m είναι η βέλτιστη κλίση συλλέκτη ($\beta_m = |\varphi - \delta|$), και είναι ίση με

- $\beta = \varphi + 15^\circ$, μεγαλύτερη παραγωγή κατά τους χειμερινούς μήνες
- $\beta = \varphi - 15^\circ$, μεγαλύτερη παραγωγή κατά τους θερινούς μήνες
- φ είναι το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας,

- δ είναι η ηλιακή απόκλιση και είναι ίση με:

$$\delta = 23.45 * \sin\left(\frac{360 * (284 + n)}{365}\right)$$

- β είναι η τρέχουσα κλίση του συλλεκτή

και

- n είναι ο αύξοντας αριθμός των ημερών του χρόνου

Ο παραπάνω τύπος μπορεί να γραφτεί και

$$T_c = T_a + C_f \cdot h_w \cdot G$$

όπου h_w : χαρακτηριστικός συντελεστής των φ/β πλαισίων, με τιμή συνήθως:

$$h_w = 0,03 \text{ m}^2 \text{ C}^\circ / \text{W}$$

Από την τελευταία σχέση προκύπτει ότι ένα φ/β πλαίσιο το οποίο δέχεται ηλιακή ακτινοβολία 1 kW/m^2 , θα έχει θερμοκρασία κατά $30 \text{ }^\circ\text{C}$ μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία επίσης επηρεάζεται από την ταχύτητα του ανέμου και συντελείτε καλύτερη απαγωγή θερμότητας όσο η ταχύτητα αυξάνεται.

Απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου

Ως απόδοση ενός φ/β στοιχείου η_c , ορίζεται το πηλίκο της μέγιστης ισχύος (P_{\max}), που αποδίδει, προς το γινόμενο της προσπίπτουσας έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της επιφάνειας S_c του φ/β στοιχείου:

$$\eta_c = \frac{P_{\max}}{G \cdot S_c} = \frac{I_{\max} \cdot V_{\max}}{G \cdot S_c}$$

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος (P_{\max}) προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης (I_{sc}) και της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης (V_{oc}) ενός φ/β στοιχείου, ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF (fill factor):

$$FF = \frac{I_{\max} \cdot V_{\max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

Επομένως η απόδοση του φ/β στοιχείου μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\eta_c = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{G \cdot S_c}$$

Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φ/β πλαισίου, ορίζεται με παρόμοιο τρόπο με αυτόν του φ/β στοιχείου. Εκφράζει τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φ/β πλαίσιο, προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια. Επειδή όμως η επιφάνεια ενός φ/β πλαισίου δεν είναι καλυμμένη εξ'ολοκλήρου από φ/β στοιχεία η απόδοση διαφέρει από την απόδοση των στοιχείων που αποτελείται. Ορίζεται ο **συντελεστής κάλυψης** ενός φ/β πλαισίου ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της

επιφάνειας του ημιαγωγού όπου γίνεται η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, προς τη συνολική επιφάνεια του φ/β πλαισίου. Στις παρακάτω σχέσεις οι δείκτες που χρησιμοποιούνται παραπέμπουν στο αν το μέγεθος αφορά το πλαίσιο (m→module) ή το στοιχείο (c→cell).

Ο συντελεστής απόδοσης ενός πλαισίου δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_m = \frac{P_{\max}}{G \cdot S_m} = \frac{I_{\max} \cdot V_{\max}}{G \cdot S_m}$$

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στην λειτουργία των φ/β. Στα πλαίσια αυτά, χρησιμοποιήσαμε μετρήσεις που έχουν γίνει σε εγκατεστημένο φ/β σύστημα στην πόλη SALEM, της πολιτείας του OREGON, από το ομόνυμο πανεπιστήμιο. Οι μετρήσεις που επιλέχθηκαν είναι διάρκειας ενός έτους (2009).

Στους παρακάτω πίνακες βλέπουμε ενδεικτικά κάποιες μετρήσεις από τον μήνα Ιανουάριο.

Microsoft Excel - X10000004.xls [Read-Only]								
RADIANCE 45°(W/m2)								
C1	A	B	C	D	E	F	G	H
	DAY	TIME(mi)	RADIANCE 45°(W/m ²)	ENV. TEMP(co)	PV TEMP(c°)	P(W)		
384	2	1000	566	7,4	18,5	554		
385	2	1005	539	7	18,5	530		
386	2	1010	584	6,4	18,1	577		
387	2	1015	614	6,2	18,5	607		
388	2	1020	631	6,4	19,1	639		
389	2	1025	679	7,1	20,5	716		
390	2	1030	663	8	22,2	695		
391	2	1035	698	8,3	22,9	730		
392	2	1040	664	7,9	23,2	696		
393	2	1045	714	8,2	23,4	751		
394	2	1050	729	8	23,7	765		
395	2	1055	751	8,1	24,6	787		
396	2	1100	770	8,1	24,5	808		
397	2	1105	655	7,6	22,9	690		
398	2	1110	748	8	24,1	789		
399	2	1115	785	8,4	25,6	822		
400	2	1120	812	8,8	27	844		
401	2	1125	825	8,6	27,7	842		
402	2	1130	851	8,4	27,9	812		
403	2	1135	937	8,9	28,3	883		
404	2	1140	1022	9,1	30,2	956		
405	2	1145	911	8,8	30,2	864		
406	2	1150	262	8,5	23,2	264		
407	2	1155	150	7,5	16	144		
408	2	1200	115	7,5	12,7	103		
672	3	1000	95	3,2	6,2	82		
673	3	1005	124	3,1	5,6	118		
674	3	1010	164	3,3	6,2	165		
675	3	1015	306	3,5	7,7	315		
676	3	1020	224	3,6	8,6	229		
677	3	1025	174	3,5	7,6	178		
678	3	1030	204	3,6	7,9	214		
679	3	1035	217	3,7	8,4	229		
680	3	1040	470	4	10,2	515		
681	3	1045	370	4,3	13,1	400		
682	3	1050	254	4,1	11,5	270		
683	3	1055	187	4,1	10,3	194		
684	3	1100	195	4	9,3	206		
685	3	1105	282	4	9	309		
686	3	1110	230	4,1	9,3	246		
687	3	1115	203	4	8,6	216		
688	3	1120	203	4,1	8,7	217		
689	3	1125	221	4,1	8,6	239		

Στην πρώτη στήλη έχουμε τις μέρες κατά αύξοντα αριθμό και στην δεύτερη έχουμε τα λεπτά της ώρας στα οποία λαμβάνουμε τις μετρήσεις.

Στην συνέχεια έχουμε την ακτινοβολία που δέχεται το φ/β μας σε κλίση 45° , την θερμοκρασία που επικρατεί στο περιβάλλον, την θερμοκρασία λειτουργίας του φ/β και τέλος την πραγματική ισχύ

ΤΡΟΠΟΣ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Όλες οι μετρήσεις του έτους καταχωρήθηκαν σε ένα αρχείο του microsoft excel 2003 και φιλτραρίστηκαν με σκοπό να διαγραφούν τιμές από λάθος μετρήσεις των οργάνων. Για αυτό τον λόγο δεν έχουν ληφθεί υπ'όψη τιμές της ακτινοβολίας πάνω από 1000 w/m^2 , όπως επίσης και αρνητικές τιμές της πραγματικής ισχύος.

	A	B	C				
1	DAY	TIME(min)	RADIANCE 45°(W/m ²)				
2	1	5					
3	1	10					
4	1	15					
5	1	20					
6	1	25					
7	1	30					
8	1	35					
9	1	40					
10	1	45					
11	1	50					
12	1	55	0	5,9	5,5	-4	
13	1	100	0	5,9	5,6	-4	
14	1	105	0	5,9	5,6	-4	
15	1	110	0	5,9	5,6	-4	
16	1	115	0	6	5,7	-4	
17	1	120	0	6	5,6	-4	
18	1	125	0	6	5,6	-4	
19	1	130	0	6	5,6	-4	
20	1	135	0	6	5,6	-4	
21	1	140	0	6,1	5,6	-4	
22	1	145	0	6	5,6	-4	
23	1	150	0	6,1	5,7	-4	
24	1	155	0	6,1	5,7	-4	
25	1	200	0	6,1	5,7	-4	
26	1	205	0	6	5,7	-4	
27	1	210	0	6	5,7	-4	
28	1	215	0	6	5,6	-4	
29	1	220	0	6	5,7	-4	

DAY	TIME(min)	RADIANCE 45°(W/m²)	ENV. TEMP(°C)	PV TEMP(°C)	P(W)
165	1	1340	36	11,1	11,2
168	1	1355	32	11,2	11,3
174	1	1425	30	11,2	11,2
177	1	1440	26	11,2	11,3
391	2	830	30	4	2,1
394	2	845	84	4,5	4,3
395	2	850	63	4,7	4,8
396	2	855	46	4,7	4,6
398	2	905	54	4,6	4,6
399	2	910	55	4,5	4,5
401	2	920	372	5,5	9,7
402	2	925	406	5,8	11,6
403	2	930	435	6,1	13
404	2	935	428	6,4	14,3
405	2	940	400	6,3	13,9
406	2	945	497	6,4	15,4
407	2	950	523	6,7	16,7
408	2	955	551	6,9	17,8
409	2	1000	566	7,4	18,5
410	2	1005	539	7	18,5
411	2	1010	584	6,4	18,1
412	2	1015	614	6,2	18,5
413	2	1020	631	6,4	19,1
414	2	1025	679	7,1	20,5
415	2	1030	663	8	22,2
416	2	1035	698	8,3	22,9
417	2	1040	664	7,9	23,2
418	2	1045	714	8,2	23,4
419	2	1050	729	8	23,7
420	2	1055	751	8,1	24,6

Στον πρώτο πίνακα βλέπουμε την διαδικασία που ακολουθήσαμε για να γίνει το φιλτράρισμα των τιμών που χρειαζόμαστε και στον δεύτερο πίνακα βλέπουμε το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας.

Σε πρώτη φάση χωρίσαμε τις τιμές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος σε ομάδες ανα 5° C (από 0-44° C) όπως φαίνεται παρακάτω

DAY	TIME(min)	RADIANCE 45°(W/m²)	ENV. TEMP(°C)	PV TEMP(°C)	P(W)
289	2	205	0	3,7	2,8
290	2	210	0	3,6	3,4
291	2	215	0	3,5	3,6
292	2	220	0	3,4	3,5
293	2	225	0	3,3	3,5
294	2	230	0	3,3	3,5
295	2	235	0	3,3	3,4
296	2	240	0	3,3	3,4
297	2	245	0	3,4	3,5
298	2	250	0	3,5	3,5
299	2	255	0	3,6	3,6
300	2	300	0	3,7	3,7
301	2	305	0	3,7	3,7
302	2	310	0	3,8	3,8
303	2	315	0	3,8	3,8
304	2	320	0	3,9	3,8
305	2	325	0	3,9	3,8

Στη συνέχεια χωρίσαμε τις τιμές της ακτινοβολίας σε ομάδες των 50 W/m² (από 0-1000 W/m²) για κάθε ομάδα θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.

DAY	TIME(min)	RADIANCE 45°(W/m ²)	ENV,TEMP(°C)	PV TEMP(°C)	P(W)
289	2	205	0	3,7	2,8
290	2	210	0	3,6	3,4
291	2	215	0	3,5	3,6
292	2	220	0	3,4	3,5
293	2	225	0	3,3	3,5
294	2	230	0	3,3	3,5
295	2	235	0	3,3	3,4
296	2	240	0	3,3	3,4
297	2	245	0	3,4	3,5
298	2	250	0	3,5	3,5
299	2	255	0	3,6	3,6
300	2	300	0	3,7	3,7
301	2	305	0	3,7	3,7
302	2	310	0	3,8	3,8
303	2	315	0	3,8	3,8
304	2	320	0	3,9	3,8
305	2	325	0	3,9	3,8

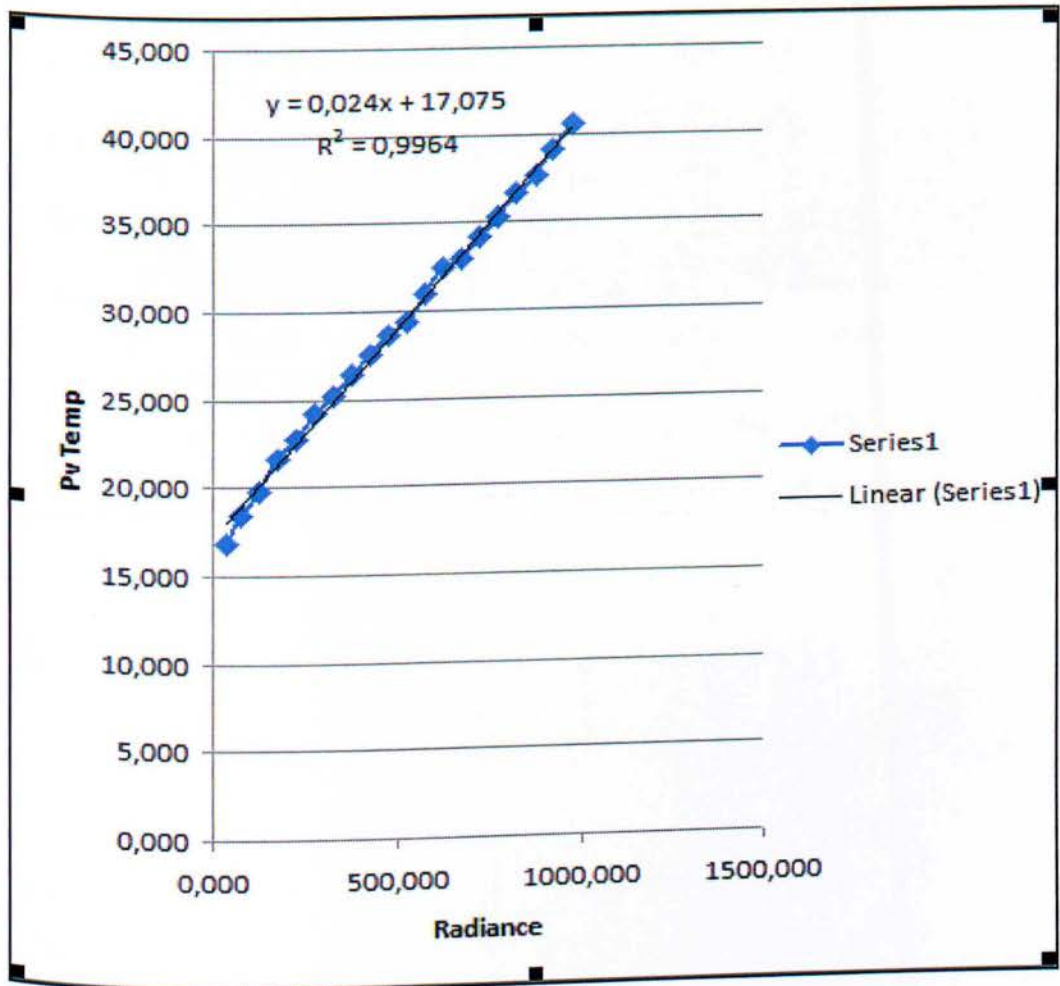
Έτσι καταφέραμε να υπολογίσουμε τον μέσο όρο αυτών των τιμών για όλες τις ομάδες θερμοκρασιών

	RADIANCE 45°(W/m ²)	ENV,TEMP(°C)	PV TEMP(°C)	P(W)
0-49	37,339	2,100	2,627	7,242
50-99	74,138	2,323	4,105	53,721
100-149	121,903	2,512	5,798	114,257
150-199	170,544	2,582	6,862	167,714
200-249	222,479	2,903	7,463	217,042
250-299	272,786	2,971	8,836	266,167
300-349	325,000	3,033	9,878	309,583
350-399	374,926	2,678	9,667	311,481
400-449	425,458	2,517	11,213	383,167
450-499	472,917	2,500	11,558	416,583
500-549	521,636	2,527	12,182	447,636
550-599	570,857	2,436	14,186	524,929
600-649	622,25	2,775	17,35	617,75
650-699	672,667	2,967	20,300	660,000
750-799	779	3,45	25,1	813
850-899	851	3,2	19,2	754
Μέσος όρος 0-1000	407,181	2,717	11,645	379,017

Όπως παρατηρούμε στον παραπάνω πίνακα η θερμοκρασία λειτουργίας του φ/β είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος όπως επίσης και ότι όσο μεγαλώνει η ακτινοβολία που δέχεται το φ/β τόσο μεγαλύτερη πραγματική ισχύ

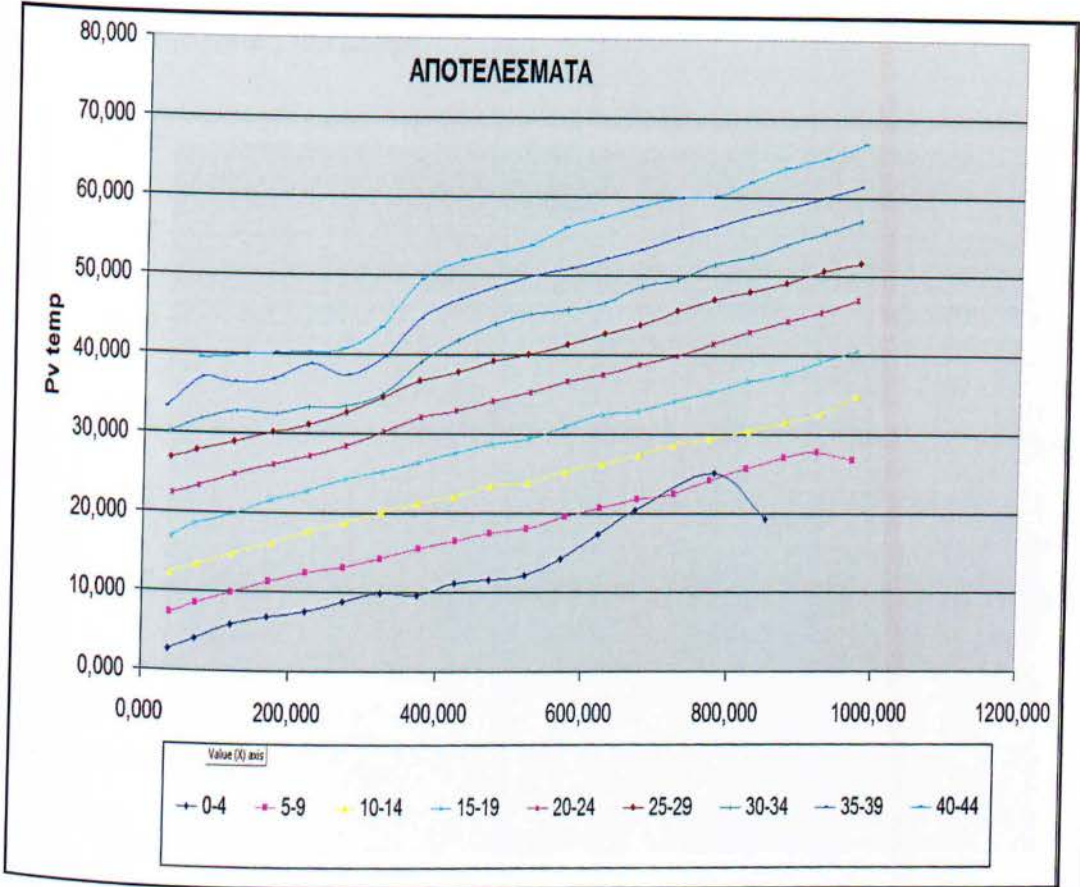
έχουμε, κάτι το οποίο είναι φυσιολογικό, σύμφωνα με την θεωρία που αναπτύξαμε παραπάνω.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τον τρόπο με τον οποίο επιδρά η ακτινοβολία στην θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος για την συγκεκριμένη γραφική παράσταση είναι κυμαίνεται από 15-19° C.

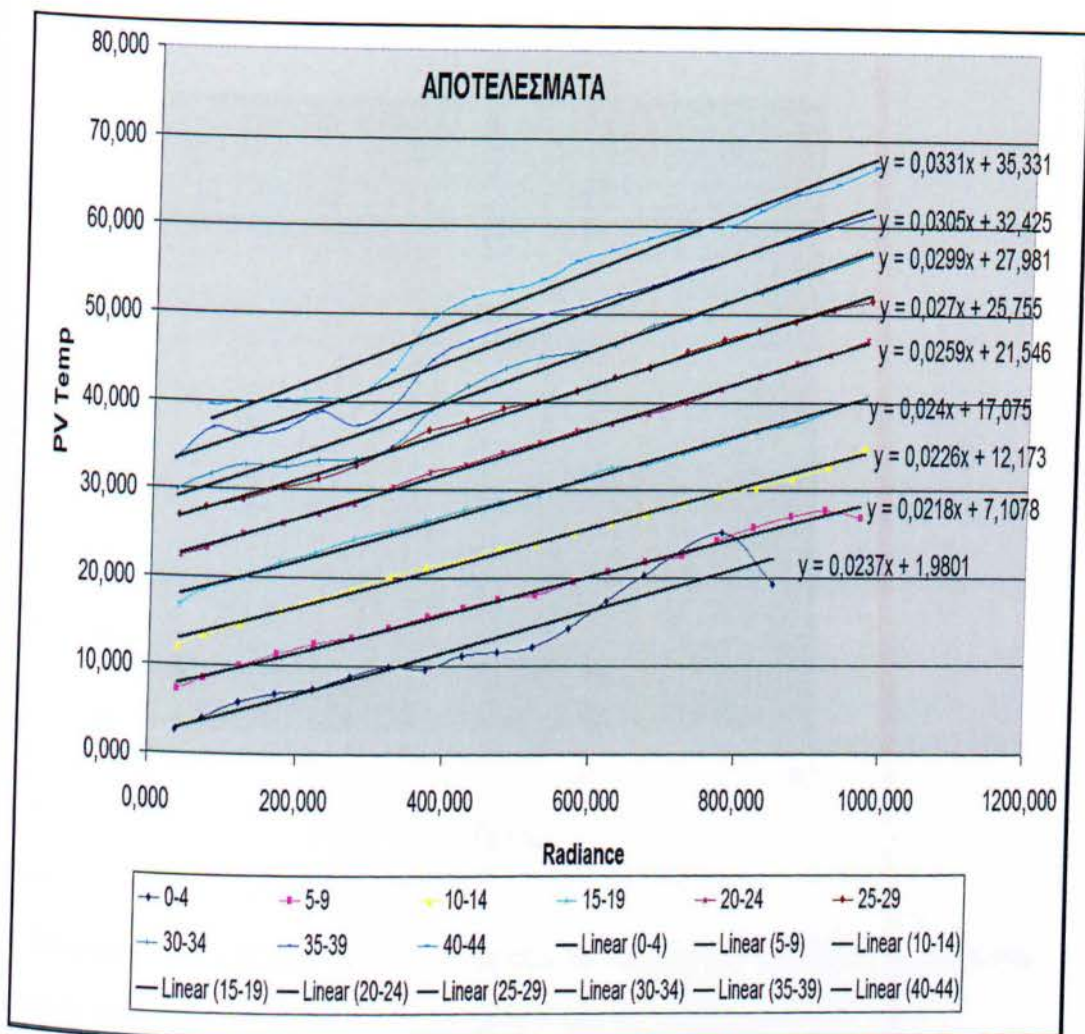


Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια γραμμική άύξηση η οποία εκφράζεται από την σχέση $y = 0,024x + 17,075$.

Αυτή η διαδικασία έχει επαναληφθεί για όλες τις ομάδες θερμοκρασιών του περιβάλλοντος και το αποτέλεσμα της φαίνεται στο παρακάτω συγκεντρωτικό διάγραμμα.

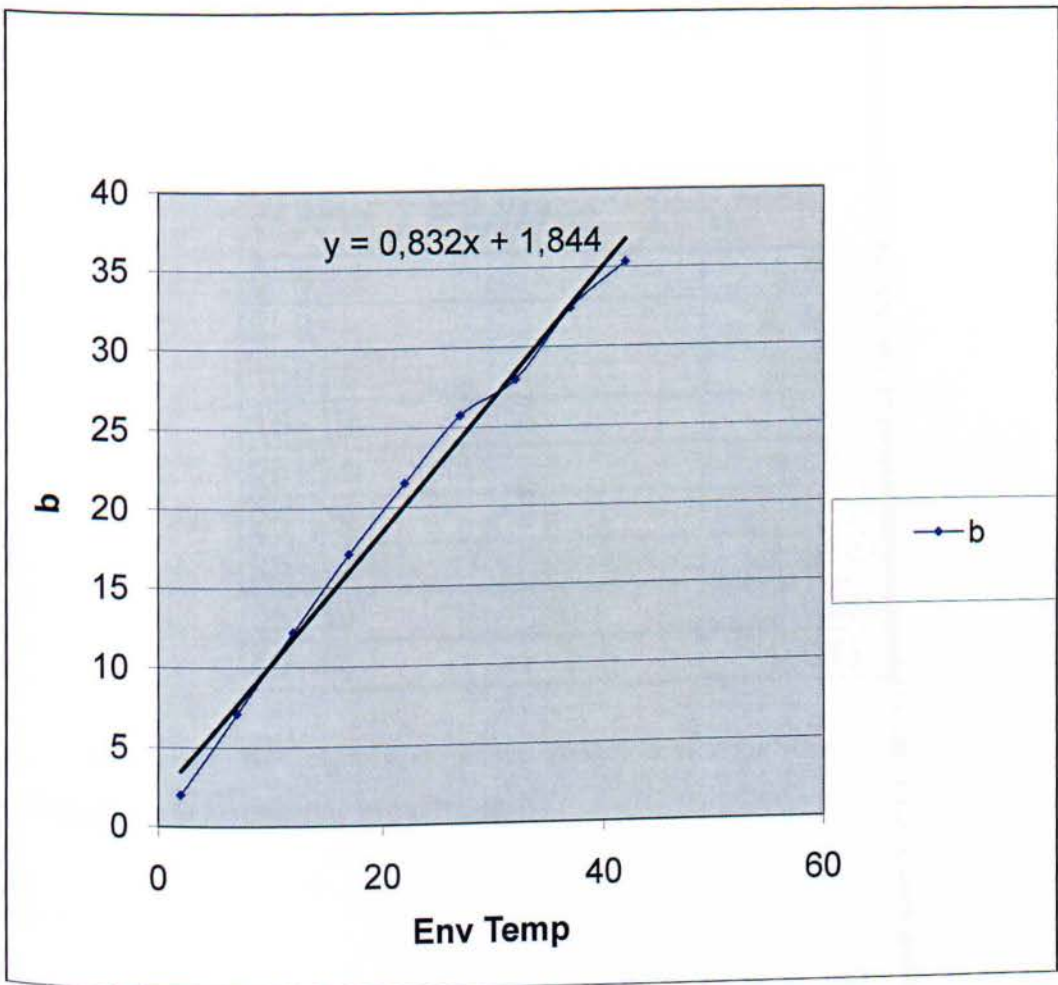


Και την τελική του μορφή



Όπως είναι γνωστό για την εξίσωση ευθείας $y = ax + b$ η ποσότητα a είναι η κλίση της ευθείας (ή συντελεστής διεύθυνσης) και b είναι το σημείο στο οποίο τέμνει η ευθεία τον άξονα y .

Στην συνέχεια πήραμε όλα τα σημεία στα οποία τέμνεται ο άξονας y από την παραπάνω γραφική παράσταση (b) και μαζί με τις μέσες τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος προσπαθήσαμε να δημιουργήσουμε μεταξύ τους μία σχέση τοποθετώντας τα σε μία κοινή γραφική παράσταση. Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω.



Η σχέση $y = 0,8322x + 1,8449$ εκφράζει το καινούργιο σημείο b λαμβάνοντας υπ' όψη σαν παράγοντα και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει μια καινούργια σχέση η οποία συνδέει την θερμοκρασία λειτουργίας του ϕ/β με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος η οποία είναι

$$T_c = a * G + (0,8322 * T_a) + 1,8449$$

Όπου:

- T_c η θερμοκρασία λειτουργίας του ϕ/β
- G η ακτινοβολία
- T_a η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

Και για τις εκάστοτε θερμοκρασίες του περιβάλλοντος το α αλλάζει σύμφωνα με τα παρακάτω:

ENV, TEMP(c^o)	α
0~4	0,0237
5~9	0,0218
10~14	0,0226
15~19	0,024
20~24	0,0259
25~29	0,027
30~34	0,0299
35~39	0,0305
40~44	0,0331

Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε ανά πάσα στιγμή την θερμοκρασία λειτουργίας του φ/β μας.

4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων, λαμβάνοντας υπ' όψη τον γενικό τύπο $T_c = T_a + C_f * \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) * G$ που αναφέρθηκε προηγουμένως και τον τύπο που αναπτύχθηκε μέσω της πειραματικής διαδικασίας.

Τα αποτελέσματα μας είναι τα εξής:

ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΟΛΟ ΤΟ ΠΛΑΤΟΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ				
PV TEMP(c°)	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ 1	ΠΟΣΟΣΤΟ ΛΑΘΟΥΣ 1 (%)	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ 2	ΠΟΣΟΣΤΟ ΛΑΘΟΥΣ 2 (%)
11,645	14,688	20,718	13,756	15,347
17,134	20,801	17,627	17,893	4,241
23,462	26,654	11,976	23,093	-1,596
29,049	31,681	8,308	27,977	-3,833
34,528	36,572	5,588	32,997	-4,639
39,251	41,558	5,551	37,697	-4,124
42,961	46,480	7,570	43,247	0,662
47,668	51,147	6,802	47,425	-0,513
52,678	57,203	7,911	53,976	2,405

Όπου:

- Θεωρητικό 1, Ποσοστό λάθους 1 αντιστοιχούν στον γενικό τύπο

$$T_c = T_a + C_f * \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) * G$$

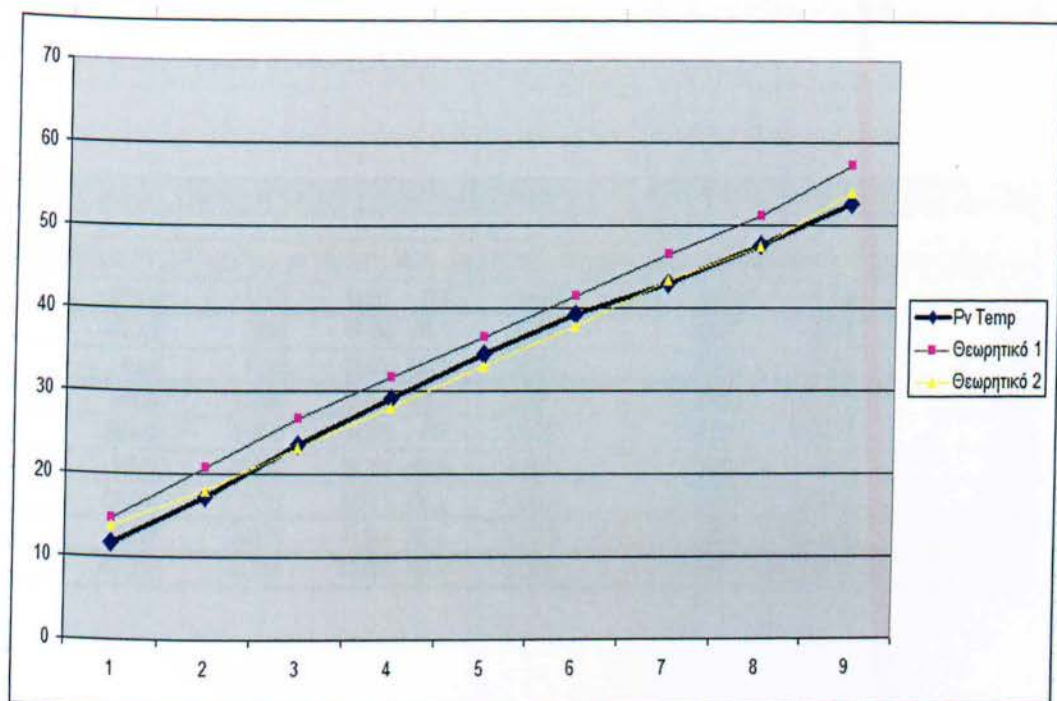
Και

- Θεωρητικό 2, Ποσοστό λάθους 2 αντιστοιχούν στον τύπο

$$T_c = a * G + (0,8322 * T_a) + 1,8449 \text{ που αναπτύχθηκε κατά την πειραματική διαδικασία.}$$

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρούμε ότι τα ποσοστά λάθους με βάση τον τύπο (2) είναι πολύ μικρότερα σε σχέση με αυτά που προκύπτουν μέσω του τύπου (1). Άρα επιτευχθήκε μια καλύτερη προσέγγιση στις πραγματικές μετρήσεις που έχουμε και αυτό φαίνεται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις



Βλέπουμε ότι σε όλο το πλάτος των θερμοκρασιών η γραφική “Θεωρητικό 2” προσεγγίζει με καλύτερα αποτελέσματα την γραφική με τις πραγματικές θερμοκρασίες. Επίσης για μεγαλύτερες θερμοκρασίες παρατηρούμε ότι οι 2 αυτές γραφικές σχεδόν συμπίπτουν το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για το συγκεκριμένο φ/β σύστημα η σχέση που προέκυψε μας δίνει σαφώς καλύτερα αποτελέσματα από την σχέση που αναφέρθηκε στο θεωρητικό μέρος.

Επίσης μπορούμε να δούμε ότι για σχεδόν σταθερή ακτινοβολία αυτό που επηρεάζει περισσότερο την θερμοκρασία λειτουργίας του φ/β είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και μέσω του αλγόριθμου που αναπτύξαμε συμπεραίνουμε ότι αυτός λειτουργεί πιο προσεγγιστικά για μεγαλύτερες θερμοκρασίες.

Τέλος,όπως παρατηρούμε η μέση τιμή της πραγματικής ισχύος παίρνει μεγαλύτερες τιμές για μικρότερες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι για θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 5~9 ° C η ισχύς παίρνει την μέγιστη τιμή της και αυτή η τιμή συνεχίζει να είναι μεγάλη και για θερμοκρασία από 10~14 ° C,ενώ για θερμοκρασία που προσεγγίζει το 0 βλέπουμε την ελάχιστη μέση τιμή της ισχύος. Αυτό ισχύει και για τις πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Βέβαια στην πρώτη περίπτωση έχουμε και πολύ μικρή τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ενώ στην δεύτερη περίπτωση παρόλο που η μέση τιμή της ακτινοβολίας παραμένει σχεδόν ίδια η θερμοκρασία λειτουργίας είναι πολύ μεγάλη (>40 ° C) και αυτό οδηγεί στην σταδιακή μείωση της μέσης τιμής της ισχύος, κάτι το οποίο είναι απολύτως σύμφωνο με όλο το θεωρητικό μέρος που αναπτύχτηκε.

ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΟΛΟ ΤΟ ΠΛΑΤΟΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ							
RADIANCE 45°(W/m ²)	ENV,TEMP(co)	PV TEMP(c°)	P(W)	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ 1	ΠΟΣΟΣΤΟ ΛΑΘΟΥΣ 1 (%)	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ 2	ΠΟΣΟΣΤΟ ΛΑΘΟΥΣ 2 (%)
407,181	2,717	11,645	379	14,688	20,718	13,756	15,347
473,353	6,884	17,134	485,7	20,801	17,627	17,893	4,241
499,8	11,96	23,462	483,6	26,654	11,976	23,093	-1,596
499,83	16,986	29,049	457,8	31,681	8,308	27,977	-3,833
500,466	21,858	34,528	413	36,572	5,588	32,997	-4,639
500,23	26,851	39,251	404,8	41,558	5,551	37,697	-4,124
501,008	31,75	42,961	395,3	46,480	7,570	43,247	0,662
499,797	36,453	47,668	389,2	51,147	6,802	47,425	-0,513
524,332	41,788	52,678	392,5	57,203	7,911	53,976	2,405

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η διαδικασία που αναπτύχθηκε παραπάνω ισχύει για συγκεκριμένη φ/β εγκατάσταση (φ/β πάρκο Salem, USA). Στο μέλλον θα μπορούσε να γίνει μία περαιτέρω έρευνα πάνω και σε άλλες φ/β εγκαταστάσεις για να μπορέσουμε να βγάλουμε πιο σαφή συμπεράσματα για τον παραπάνω αλγόριθμο και για την λειτουργία του σε άλλες φ/β εγκαταστάσεις οι οποίες παρουσιάζουν διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά.

Επίσης, έρευνα θα μπορούσε να διεξαχθεί και σε φ/β τα οποία είναι εγκατεστημένα σε διαφορετικό τόπο, με διαφορετικά γεωγραφικά χαρακτηριστικά(γεωγραφικό πλάτος) και διαφορετικούς εξωτερικούς παράγοντες να τα επηρεάζουν.

Τέλος παράγοντες όπως η ρύπανση, η σκίαση, η υγρασία, οι οποίοι δεν δίνονταν στις μετρήσεις αυτής της έρευνας, θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν σε μελλοντική έρευνα για την εξαγωγή πιο χρήσιμων συμπερασμάτων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Clean energy project analysis(photovoltaic chapter),Minister of natural resources, Canada 2001-2004
- Ahmed A. El Tayyan, PV system behavior based on datasheet ,Physics Department, Al Azhar University, Gaza , Palestine
- S. Kurtz, D. Miller, M. Kempe, and N. Bosco,Evaluation of High-Temperature Exposure of Photovoltaic Modules, presented at the 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference Philadelphia, Pennsylvania June 7–12, 2009
- Tomasz Kozak,Witold Maranda, Andrzej Napieralski, Influence of Ambient Temperature on the Amount of Electric Energy Produced by Solar Modules, 16th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems", June 25-27, 2009
- C. González-Morán, Member, IEEE, P. Arboleya, Member, D. Reigosa, Member, IEEE, G. Díaz, Member, IEEE, J. Gómez-Aleixandre Member, IEEE, Improved model of photovoltaic sourcesconsidering ambient temperature and solar irradiation
- Jurij Kurnik, MarkoJankovec, KristijanBrecl, MarkoTopic, Outdoor testing of PV module temperature and performance under different mounting and operational conditions
- Y. Sukamongkol a, S. Chungpaibulpatana a,*, W. Ongsakul b, A simulation model for predicting the performance of a solar photovoltaic system with alternating current loads, Received 1 August 2001, accepted 17 December 2001
- Arvind Tiwari *, M.S. Sodha, Performance evaluation of solar PV/T system: An experimental validation, Received 2 September 2004; received in revised form 30 May 2005; accepted 6 July 2005

- Αρκούδης Γεώργιος, Τεχνικοοικονομική αξιολόγηση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα, Αθήνα 2007
- Προδρομίδης Γεώργιος, Απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων και φωτοβολταϊκών συστημάτων υπό συνθήκες σκίασης και χαμηλής έντασης ακτινοβολίας, Πάτρα 2009
- Γκατζής Αθανάσιος, Κατριάδης Ιωάννης, Μέτρηση βαθμού απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων και μελέτη της εξάρτησής του από τη θερμοκρασία, Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 08
- Γεώργιος Κτενίδης, Μελέτη Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας των 100kW, Αθήνα, Μάρτιος 08
- Μαρία Χριστοδούλου Έκτορα, Επίδραση εξωτερικών παραμέτρων στις χαρακτηριστικές ιδιότητες ηλιακών πλαισίων τύπου CIS, Πάτρα 2009

Επίσης για την έρευνά μας χρησιμοποιήθηκαν διάφορες ιστοσελίδες εκ των οποίων οι κυριότερες ήταν:

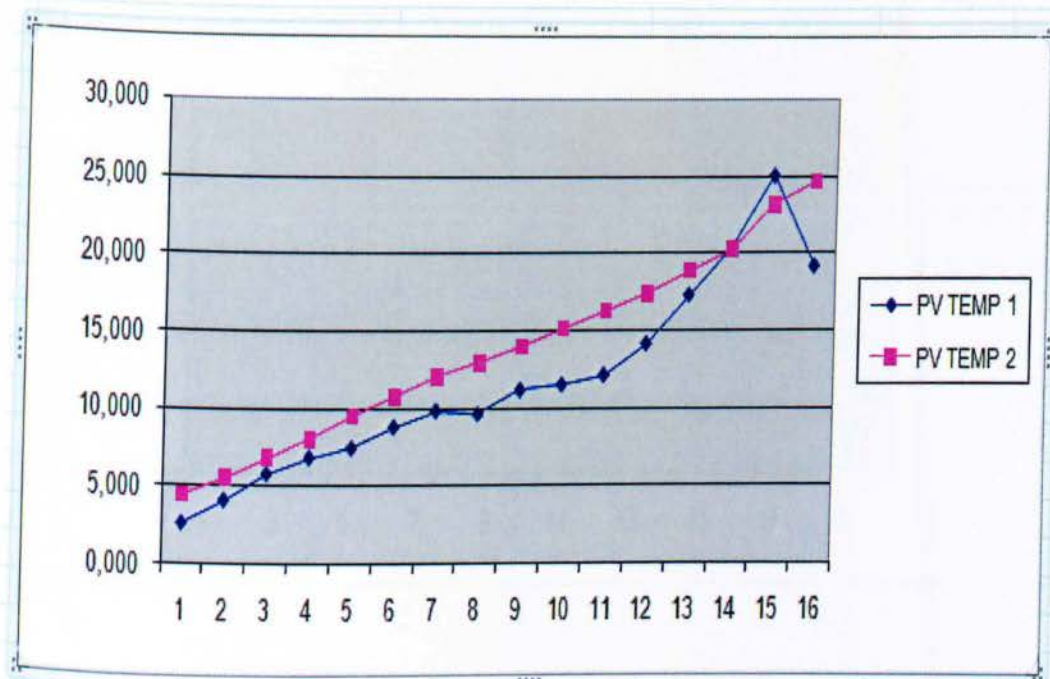
- www.solardat.uoregon.edu
- www.solarone.de
- www.solarbuzz.com

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 0-4

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ 0-1000

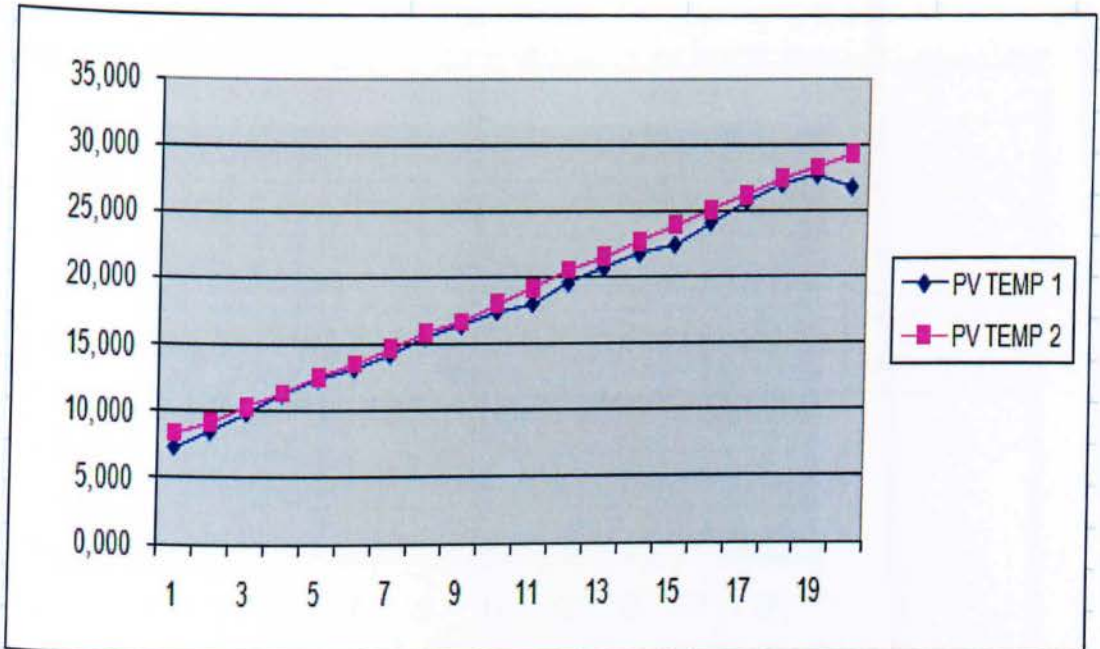
	RADIANCE 45°(W/m ²)	ENV,TEMP(c°)	PV TEMP(c°)	P(W)	PV TEMP (c°)(alg)	%
0-49	37,339	2,100	2,627	7,242	4,477	41,319
50-99	74,138	2,323	4,105	53,721	5,535	25,846
100-149	121,903	2,512	5,798	114,257	6,824	15,040
150-199	170,544	2,582	6,862	167,714	8,036	14,608
200-249	222,479	2,903	7,463	217,042	9,533	21,713
250-299	272,786	2,971	8,836	266,167	10,783	18,057
300-349	325,000	3,033	9,878	309,583	12,072	18,174
350-399	374,926	2,678	9,667	311,481	12,959	25,406
400-449	425,458	2,517	11,213	383,167	14,023	20,040
450-499	472,917	2,500	11,558	416,583	15,134	23,624
500-549	521,636	2,527	12,182	447,636	16,311	25,315
550-599	570,857	2,436	14,186	524,929	17,401	18,479
600-649	622,25	2,775	17,35	617,75	18,902	8,209
650-699	672,667	2,967	20,300	660,000	20,256	-0,217
750-799	779	3,45	25,1	813	23,178	-8,291
850-899	851	3,2	19,2	754	24,677	22,194
Μέσος όρος 0-1000	407,181	2,717	11,645	379,017		



ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 5-9

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ 0-1000

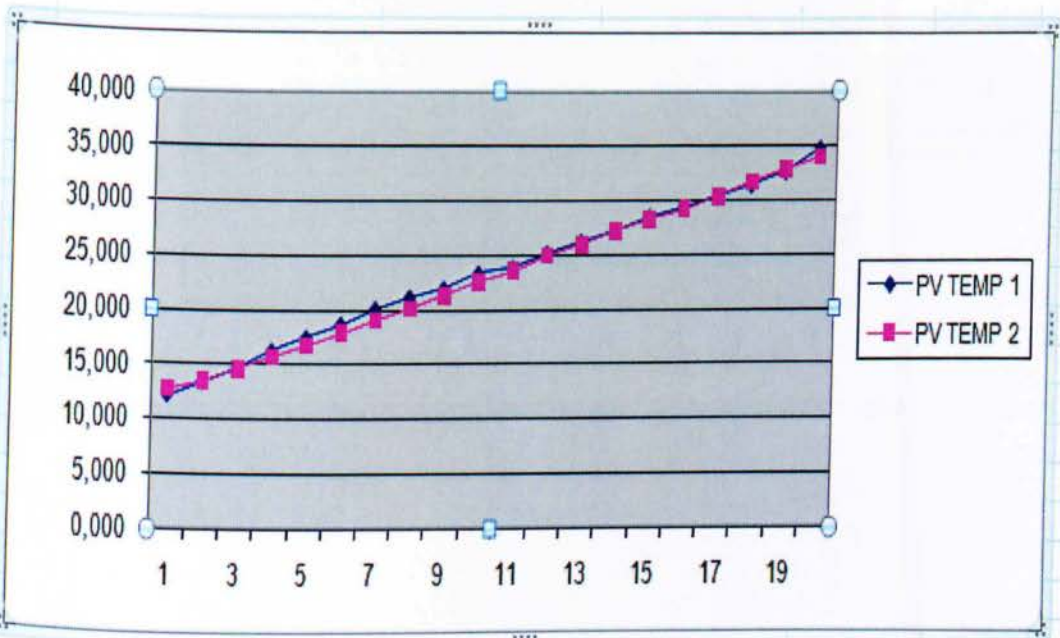
	RADIANCE 45°(W/m ²)	ENV,TEMP(c°)	PV TEMP(c°)	P(W)	PV TEMP (c°)(alg)	%
0-49	38,532	6,863	7,314	7,848	8,396	12,892
50-99	74,138	6,905	8,482	51,781	9,208	7,876
100-149	121,946	6,998	9,870	113,250	10,327	4,423
150-199	172,408	6,907	11,253	173,645	11,351	0,870
200-249	222,282	7,025	12,378	223,488	12,537	1,265
250-299	273,526	6,917	13,165	270,803	13,564	2,940
300-349	323,376	6,991	14,225	310,198	14,712	3,315
350-399	375,958	6,979	15,527	352,735	15,849	2,029
400-449	425,613	6,688	16,407	405,255	16,689	1,690
450-499	472,635	7,093	17,423	438,810	18,051	3,479
500-549	523,520	7,162	18,041	490,089	19,218	6,121
550-599	575,475	7,400	19,565	559,081	20,549	4,788
600-649	623,155	7,336	20,683	606,806	21,535	3,957
650-699	674,415	7,363	21,762	675,646	22,675	4,025
700-749	724,500	7,514	22,413	732,141	23,892	6,193
750-799	772,969	7,698	24,100	774,203	25,102	3,993
800-849	822,745	7,704	25,696	826,039	26,192	1,893
850-899	874,278	7,804	27,013	860,370	27,398	1,407
900-949	920,762	7,676	27,705	889,452	28,306	2,123
950-999	970,189	7,532	26,786	953,162	29,264	8,465
Μέσος όρος 0-1000	475,353	6,884	17,134	485,740		



ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 10-14

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ 0-1000

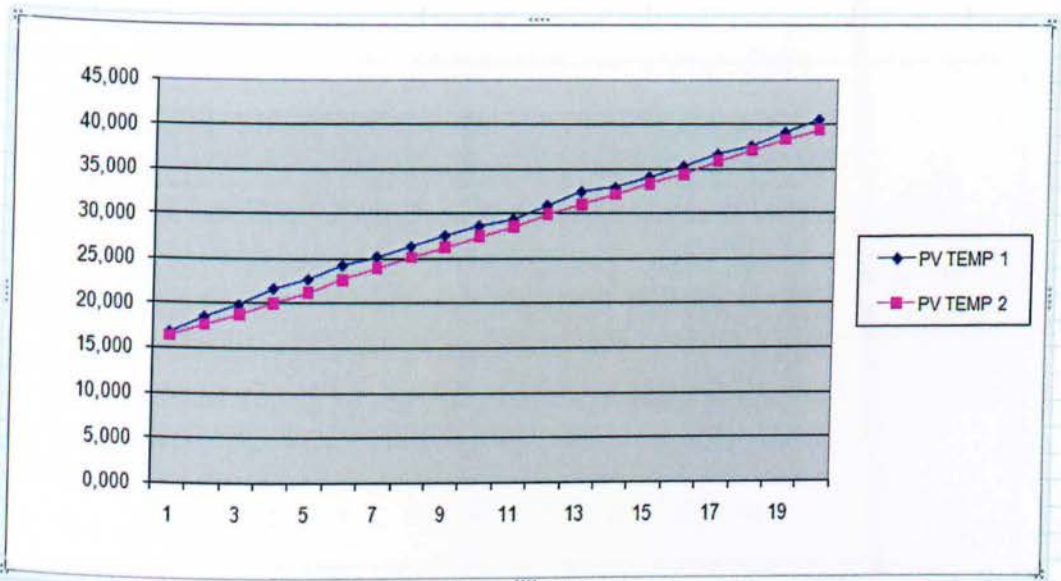
	RADIANCE 45°(W/m ²)	ENV,TEMP(c°)	PV TEMP(c°)	P(W)	PV TEMP (c°)(a1g)	%
0-49	38,304	12,076	12,210	7,883	12,760	4,312
50-99	74,488	11,944	13,402	53,884	13,468	0,491
100-149	122,679	11,969	14,718	113,060	14,578	-0,961
150-199	174,928	11,841	16,235	170,806	15,653	-3,719
200-249	224,062	11,809	17,498	223,659	16,737	-4,547
250-299	274,052	11,805	18,680	273,797	17,862	-4,577
300-349	324,582	11,868	20,138	321,142	19,057	-5,669
350-399	373,064	11,812	21,191	370,118	20,106	-5,394
400-449	422,749	11,899	21,963	412,178	21,301	4,312
450-499	473,444	12,038	23,376	468,185	22,562	-3,604
500-549	523,092	11,900	23,857	506,445	23,570	-1,216
550-599	574,756	12,130	25,188	550,428	24,929	-1,040
600-649	625,969	11,967	26,261	603,037	25,950	-1,197
650-699	675,114	12,102	27,266	658,304	27,174	-0,340
700-749	724,066	12,022	28,516	704,627	28,213	-1,072
750-799	772,324	11,940	29,409	754,324	29,236	-0,595
800-849	824,798	11,827	30,329	807,787	30,328	-0,003
850-899	874,639	12,104	31,467	846,000	31,685	0,687
900-949	924,670	12,138	32,678	889,411	32,844	0,504
950-999	974,396	12,174	34,851	937,651	33,997	-2,512
Μέσος όρος 0-1000	499,800	11,960	23,462	483,630		



ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 15-19

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ 0-1000

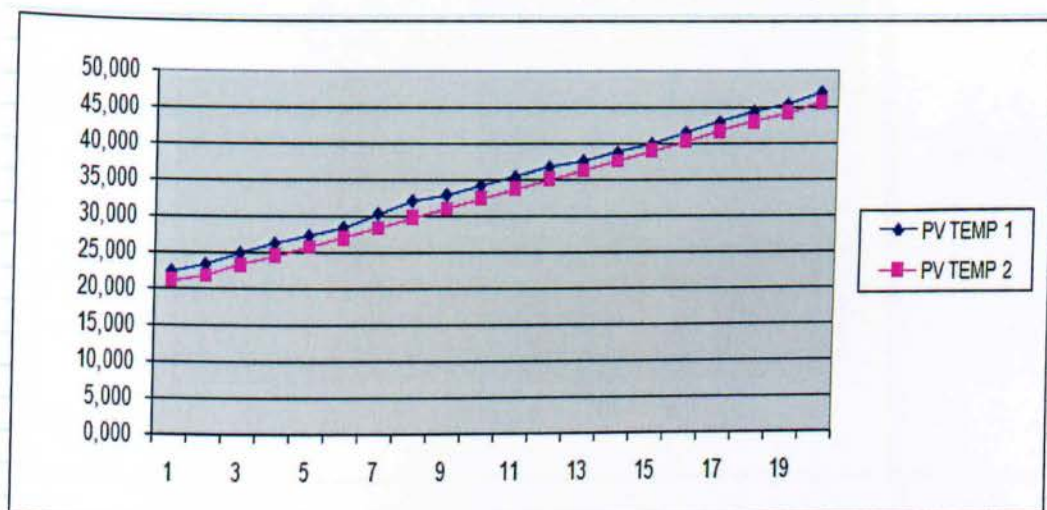
	RADIANCE 45°(W/m ²)	ENV,TEMP(c°)	PV TEMP(c°)	P(W)	PV TEMP (c°)(aig)	%
0-49	39,441	16,364	16,811	7,346	16,409	-2,447
50-99	72,287	16,898	18,500	48,328	17,643	-4,859
100-149	124,920	16,665	19,824	108,769	18,712	-5,946
150-199	174,442	16,822	21,647	164,399	20,031	-8,068
200-249	222,481	16,837	22,702	212,453	21,196	-7,103
250-299	273,935	17,104	24,268	263,726	22,654	-7,128
300-349	324,775	17,213	25,237	313,842	23,964	-5,311
350-399	372,557	17,239	26,378	346,845	25,132	-4,957
400-449	423,938	17,145	27,598	371,629	26,288	-4,985
50-499	473,787	17,144	28,678	415,029	27,483	-4,348
500-549	525,447	16,951	29,429	456,118	28,562	-3,037
550-599	574,601	17,156	30,956	481,540	29,913	-3,489
600-649	625,145	17,097	32,481	528,950	31,077	-4,519
650-699	674,082	17,002	32,959	611,918	32,172	-2,446
700-749	723,722	16,973	34,159	670,462	33,339	-2,459
750-799	772,979	16,764	35,325	726,293	34,347	-2,847
800-849	823,833	17,170	36,685	775,030	35,906	-2,170
850-899	876,200	17,054	37,625	822,980	37,066	-1,507
900-949	923,347	17,139	39,155	888,116	38,268	-2,319
950-999	974,721	16,983	40,565	941,896	39,372	-3,031
Μέσος όρος 0-1000	499,832	16,986	29,049	457,783		



ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 20-24

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ 0-1000

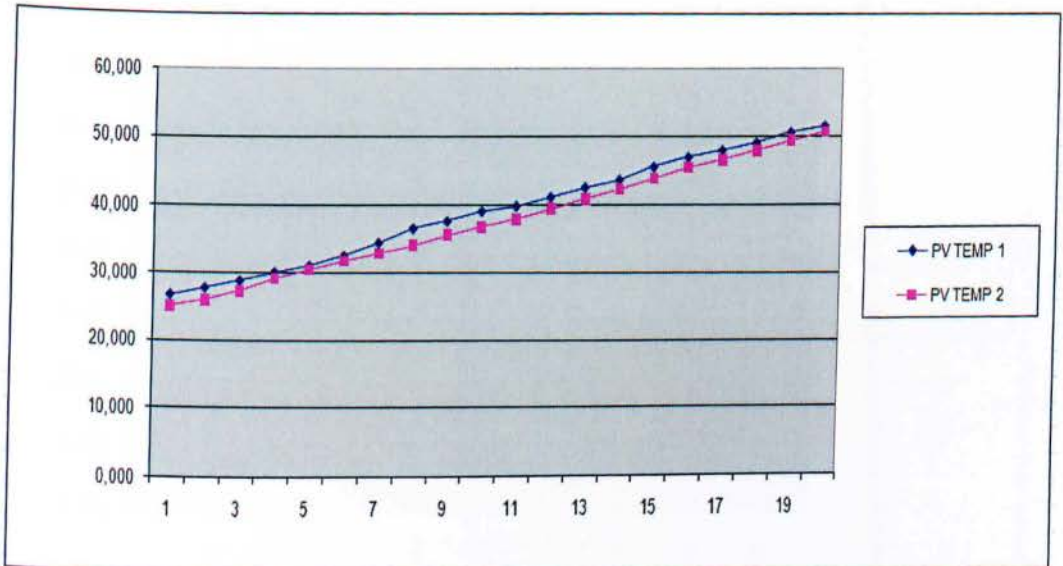
	RADIANCE 45°(W/m ²)	ENV,TEMP(c°)	PV TEMP(c°)	P(W)	PV TEMP (c°)(alg)	%
0-49	39,414	21,833	22,297	6	21,035	-6,000
50-99	75,301	21,534	23,220	43,169	21,716	-6,928
100-149	123,392	21,775	24,801	86,177	23,162	-7,078
150-199	176,293	21,686	26,131	137,687	24,458	-6,842
200-249	224,972	21,664	27,183	189,303	25,700	-5,770
250-299	274,024	21,586	28,387	238,848	26,906	-5,506
300-349	325,093	21,710	30,262	286,700	28,332	-6,813
350-399	375,467	21,754	32,026	329,520	29,673	-7,929
400-449	423,879	21,762	32,865	367,619	30,934	-6,243
450-499	474,327	21,865	34,147	378,095	32,326	-5,634
500-549	524,990	21,892	35,320	396,867	33,661	-4,930
550-599	575,036	21,849	36,661	431,542	34,921	-4,983
600-649	624,430	21,812	37,527	475,731	36,170	-3,752
650-699	674,224	21,894	38,722	527,718	37,527	-3,185
700-749	725,962	21,920	39,902	574,016	38,889	-2,603
750-799	774,016	21,977	41,453	611,554	40,181	-3,166
800-849	824,441	22,168	42,921	679,725	41,646	-3,060
850-899	876,086	22,165	44,376	730,173	42,982	-3,243
900-949	923,681	22,088	45,370	847,169	44,150	-2,764
950-999	974,297	22,227	46,984	921,415	45,577	-3,087
Μέσος όρος 0-1000	500,466	21,858	34,528	412,951		



ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 25-29

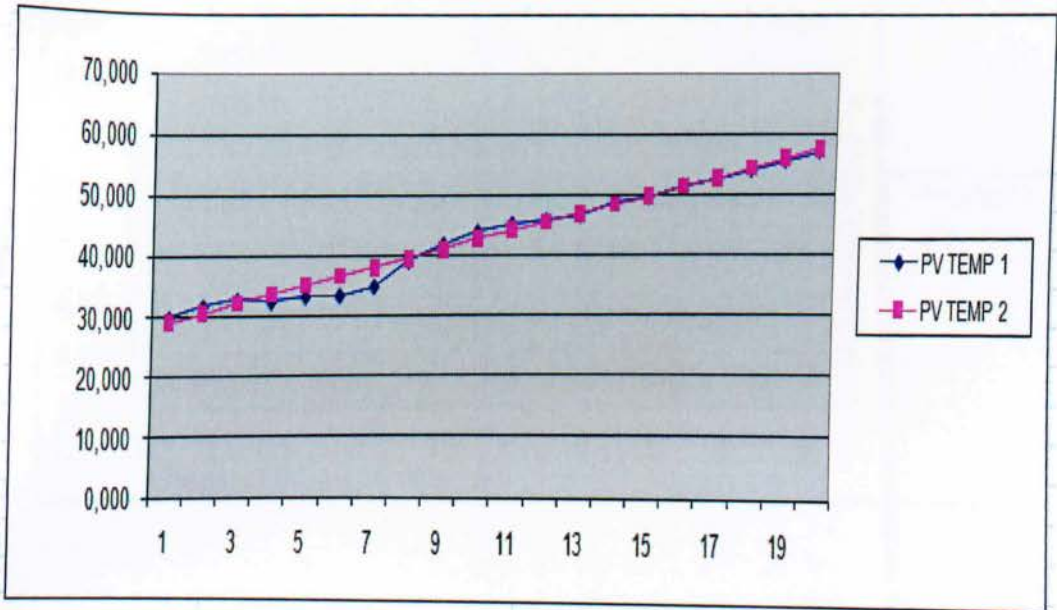
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ 0-1000

	RADIANCE 45°(W/m ²)	ENV,TEMP(c°)	PV TEMP(c°)	P(W)	PV TEMP (c°)(alg)	%
0-49	37,423	26,665	26,758	4,885	25,046	-6,833
50-99	72,972	26,584	27,755	34,569	25,939	-7,002
100-149	122,446	26,562	28,813	60,054	27,256	-5,713
150-199	174,842	27,129	30,134	88,987	29,142	-3,404
200-249	223,469	27,138	31,105	143,086	30,463	-2,107
250-299	274,604	27,106	32,622	194,910	31,817	-2,529
300-349	323,163	26,851	34,578	252,313	32,916	-5,048
350-399	373,456	26,701	36,724	287,772	34,149	-7,541
400-449	425,804	26,898	37,789	307,130	35,726	-5,775
450-499	473,980	26,704	39,225	360,670	36,865	-6,400
500-549	521,643	26,579	39,937	405,557	38,048	-4,962
550-599	575,190	26,556	41,249	444,230	39,475	-4,494
600-649	626,489	26,650	42,678	526,145	40,939	-4,249
650-699	674,307	26,799	43,772	571,147	42,354	-3,349
700-749	726,032	27,002	45,618	602,835	43,919	-3,870
750-799	775,524	27,274	47,001	609,497	45,482	-3,342
800-849	823,902	26,949	47,982	669,333	46,518	-3,147
850-899	874,206	26,961	49,103	763,947	47,886	-2,542
900-949	926,805	27,015	50,608	848,489	49,351	-2,548
950-999	978,347	26,903	51,560	921,206	50,649	-1,800
Μέσος όρος 0-1000	500,230	26,851	39,251	404,838		



AKTINOΒΟΛΙΑ 0-1000

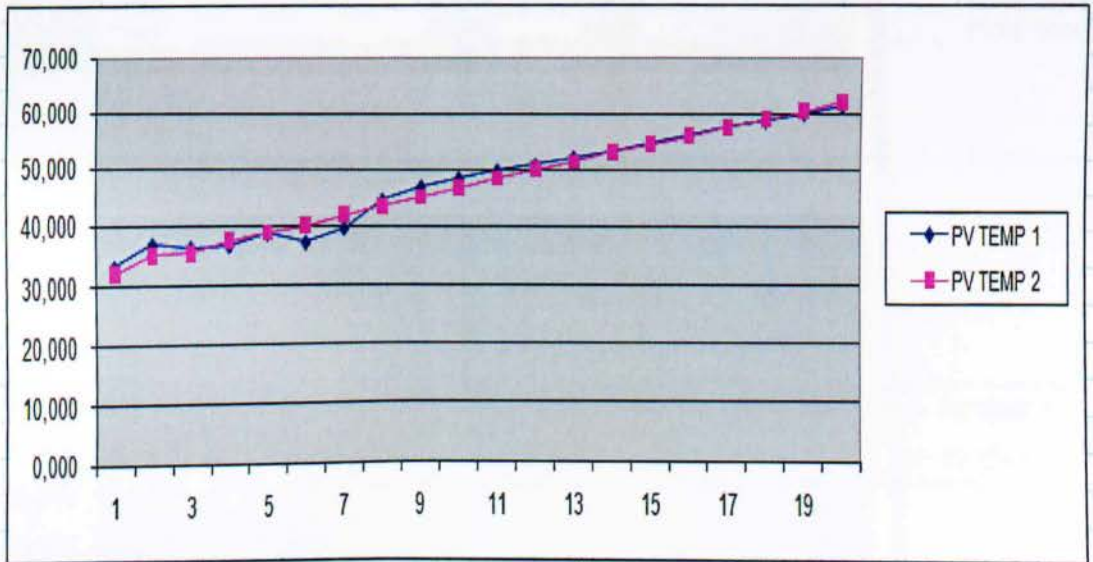
	RADIANCE 45°(W/m ²)	ENV,TEMP(c°)	PV TEMP(c°)	P(W)	PV TEMP (c°)(alg)	%
0-49	33,500	31,525	29,938	2,000	29,082	-2,943
50-99	78,6	31,568	31,756	17,28	30,466	-4,234
100-149	124,531	32,028	32,813	37,031	32,222	-1,832
150-199	179,500	31,882	32,507	59,795	33,744	3,666
200-249	223,283	32,107	33,326	104,457	35,240	5,431
250-299	273,806	31,992	33,453	140,056	36,655	8,736
300-349	323,750	31,800	34,936	161,083	37,989	8,036
350-399	375,053	31,732	39,068	203,895	39,466	1,007
400-449	424,78	31,696	41,78	239,44	40,923	-2,094
450-499	476,132	32,034	43,843	302,434	42,740	-2,582
500-549	524,349	31,960	45,122	379,746	44,120	-2,271
550-599	575,234	31,763	45,705	475,422	45,477	-0,500
600-649	625,121	31,562	46,532	550,288	46,802	0,577
650-699	677,203	31,674	48,683	618,116	48,452	-0,475
700-749	725,386	31,486	49,487	678,700	49,736	0,501
750-799	775,615	31,668	51,382	715,269	51,390	0,015
800-849	826,371	31,394	52,446	727,454	52,679	0,442
850-899	873,627	31,640	53,949	756,331	54,297	0,641
900-949	927,439	31,675	55,489	842,931	55,935	0,798
950-999	976,883	31,820	57,004	893,605	57,535	0,923
Μέσος όρος 0-1000	501,008	31,750	42,981	395,267		



ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 35-39

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ 0-1000

	RADIANCE 45°(W/m ²)	ENV,TEMP(c°)	PV TEMP(c°)	P(W)	PV TEMP (c°)(alg)	%
0-49	29,000	35,100	33,200	1,000	31,940	-3,946
50-100	78,000	37,100	36,900	4,000	35,099	-5,133
100-149	121,400	35,980	36,320	40,000	35,490	-2,338
150-199	172,875	36,494	36,725	55,000	37,488	2,034
200-249	224,643	36,307	38,757	109,571	38,911	0,396
250-299	274,706	35,912	37,282	136,941	40,109	7,048
300-349	325,667	36,189	39,744	164,667	41,894	5,131
350-399	374,189	36,392	44,622	205,108	43,543	-2,477
400-449	425,811	36,481	46,978	240,135	45,192	-3,954
450-499	473,537	36,505	48,444	294,951	46,667	-3,807
500-549	524,043	36,811	49,861	367,652	48,462	-2,886
550-599	577,453	36,713	50,843	470,226	50,010	-1,667
600-649	626,776	36,576	52,163	549,102	51,400	-1,486
650-699	674,000	36,845	53,241	610,563	53,065	-0,332
700-749	723,313	36,723	54,752	639,766	54,467	-0,522
750-799	772,507	36,706	56,036	690,597	55,953	-0,148
800-849	823,951	36,749	57,507	729,610	57,558	0,088
850-899	873,047	36,584	58,681	774,306	58,918	0,401
900-949	925,488	36,372	59,972	835,000	60,341	0,612
950-999	975,525	36,531	61,333	866,475	62,000	1,075
Μέσος όρος 0-1000	499,797	36,453	47,668	389,233		



ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 40-44

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ 0-1000

	RADIANCE 45°(W/m ²)	ENV,TEMP(c°)	PV TEMP(c°)	P(W)	PV TEMP (c°)(alg)	%
50-99	76,000	40,800	39,500	3,000	38,314	-3,095
100-149	120,000	41,600	39,750	15,500	40,436	1,698
150-199	178,333	41,833	40,133	42,667	42,561	5,705
200-249	223,333	41,367	40,333	96,333	43,663	7,625
250-299	270,600	40,760	40,640	123,600	44,722	9,128
300-349	320,167	41,900	43,500	153,000	47,312	8,056
350-399	374,667	41,617	49,417	185,667	48,880	-1,098
400-449	430,000	41,740	51,880	219,200	50,814	-2,098
450-499	478,200	41,580	52,820	266,000	52,276	-1,040
500-549	524,600	42,200	53,860	366,000	54,328	0,861
550-599	571,667	43,017	56,033	453,667	56,566	0,941
600-649	619,333	42,767	57,267	532,333	57,935	1,154
650-699	670,333	42,667	58,667	599,000	59,540	1,467
700-749	723,500	42,550	59,750	645,250	61,203	2,374
750-799	777,250	41,400	60,075	697,250	62,025	3,144
800-849	822,857	41,400	61,857	730,143	63,535	2,640
850-899	871,889	41,422	63,678	736,111	65,176	2,299
900-949	928,111	41,483	64,900	772,500	67,088	3,261
950-999	981,467	41,873	66,823	819,850	69,178	3,404
Μέσος όρος 0-1000	524,332	41,788	52,678	392,477		

