



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

**ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ Δ. ΠΕΠΠΑ

Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2008



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

ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ Δ. ΠΕΠΠΑ

Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την2008.

.....
Α. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Παπαθανασίου
Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Νοέμβριος 2008

.....
ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ Δ. ΠΕΠΠΑ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ Δ. ΠΕΠΠΑ 2008

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Στα πλαίσια αυτά, δημιουργήθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο στην προγραμματιστική γλώσσα του περιβάλλοντος της MATLAB, το οποίο δέχεται ως εισόδους μετεωρολογικά δεδομένα (ωριαίες τιμές) και χαρακτηριστικά του υπό εξέταση φωτοβολταϊκού πλαισίου, και προσδιορίζει την ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή. Αρχικά, γίνεται η εκτίμηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια αυθαίρετου προσανατολισμού από δεδομένα ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια. Στη συνέχεια, προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά σημεία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου για τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας. Τέλος, ολοκληρώνονται οι προκύπτουσες τιμές της ισχύος σε ετήσια βάση και εφαρμόζονται κάποιοι συντελεστές απωλειών για τον τελικό υπολογισμό της ηλεκτρικής ενέργειας που διατίθεται από το πλαίσιο.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για τον προσδιορισμό της παραγωγής φωτοβολταϊκών συστοιχιών ή μεγάλων φωτοβολταϊκών σταθμών.

Πραγματοποιήθηκε, τέλος, εφαρμογή του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης σε ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σταθμό με τη χρήση καταγεγραμμένων χρονοσειρών και εξήχθη μια σειρά αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων που συνοψίζουν τις δυνατότητες του μοντέλου.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Φωτοβολταϊκό στοιχείο, Ηλιακή Ακτινοβολία, Υπολογιστικό Μοντέλο, Συντελεστής Απωλειών, Ετήσια Ενεργειακή Απόδοση

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the development of a suitable model to estimate the performance of photovoltaic arrays.

Concerning this thesis, a programming model has been created using the language of technical computing MATLAB. With the use of meteorological data (hourly values) and characteristics of the photovoltaic module under investigation as inputs, this model predicts the annual energy production. Firstly, the radiation on an arbitrary surface is determined from known values of radiation on the horizontal plane. Afterwards, the characteristic points of the module's I-V curve are estimated for the actual operating conditions. Finally, the resulted hourly power values are integrated over one year period and with the use of derating factors the final energy yield is calculated.

The model can be used also to estimate the production of photovoltaic arrays and large photovoltaic systems.

The case study was applied on a typical photovoltaic station using given data series and the respective results summarize the model's potentials.

KEY WORDS

Photovoltaic cell, Solar Radiation, Programming Model, Derating Factor, Annual Energy Yield

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Παπαθανασίου Σταύρο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το αντικείμενο των φωτοβολταϊκών, αλλά κυρίως για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην υποψήφια διδάκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Παρασκευαδάκη Εύα για την αμέριστη συμπαράσταση και τη συνεχή καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας που πραγματοποίησα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στο συνάδελφο Ρουτσολιά Ιάσωνα, με τον οποίο εργαστήκαμε παράλληλα στα πλαίσια των διπλωματικών μας εργασιών, το αντικείμενο των οποίων συνδέεται άμεσα, και με την πολύτιμη βοήθεια και στήριξη του οποίου κατάφερα να περατώσω την παρούσα διπλωματική.

Δεν πρέπει να ξεχάσω τις συναδέλφους μα κυρίως φίλες Βασιλική και Μαριάντζελα των οποίων η βοήθεια υπήρξε καθοριστική, όπως επίσης και όλους εκείνους που έμμεσα ή άμεσα μου συμπαραστάθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου. Σε αυτήν οφείλεται ότι έχω μέχρι σήμερα επιτύχει.

Αλεξάνδρα Δ. Πέππα

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	v
Abstract	vii
Ευχαριστίες	ix
Πίνακας περιεχομένων	xi
Κεφάλαιο 1	
Εισαγωγή	
1.1 Γενικά	2
1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας	2
Κεφάλαιο 2	
Φωτοβολταϊκά Συστήματα	
2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία	6
2.1.1 Ημιαγώγιμα στοιχεία	6
2.1.2 Πρόσμιξη ημιαγώγιμων στοιχείων	7
2.1.3 Η ένωση p-n	9
2.1.4 Ορθή και ανάστροφη πόλωση της διόδου	11
2.1.5 Το ανάστροφο ρεύμα κόρου	12
2.1.6 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	13
2.1.7 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων	14
2.1.8 Συντελεστής Πλήρωσης	16
2.2 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πλαισίων	18
2.2.1 Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο	18
2.2.2 Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	18
2.2.3 Πλαίσια άμορφου πυριτίου ή thin film	19
2.2.4 Πλαίσια τεχνολογίας III-IV ομάδας	20

Κεφάλαιο 3

Ηλιακή Ακτινοβολία

3.1	Ο Ήλιος	22
3.2	Ηλιακή Σταθερά	24
3.3	Φασματική Κατανομή της Ακτινοβολίας εκτός Γήινης Ατμόσφαιρας	25
3.4	Μεταβολές Ακτινοβολίας εκτός Ατμόσφαιρας	26
3.5	Ορισμοί	27
3.6	Κατεύθυνση Ακτινικής Συνιστώσας Ακτινοβολίας	30
3.7	Λόγος Ακτινικής Συνιστώσας σε Κεκλιμένη Επιφάνεια προς Ακτινική Συνιστώσα σε Οριζόντια	35
3.8	Ακτινοβολία εκτός Ατμόσφαιρας σε Οριζόντιο Επίπεδο	37
3.9	Δεδομένα Ηλιακής Ακτινοβολίας	38
3.10	Επίδραση Ατμόσφαιρας στην Ηλιακή Ακτινοβολία	39
3.11	Δείκτης Καθαρότητας Ατμόσφαιρας	41
3.12	Ακτινική και Διάχυτη Συνιστώσα Ωριαίας Ακτινοβολίας	41
3.13	Ακτινοβολία σε Κεκλιμένες Επιφάνειες	42
3.14	Μοντέλο Ανισοτροπικού Ουρανού	43

Κεφάλαιο 4

Μοντέλο ενεργειακής απόδοσης

4.1	Εισαγωγή	48
4.2	Εξισώσεις Απόδοσης Φωτοβολταϊκών Πλαισίων	49
4.3	Παράμετροι Εξαρτώμενοι από την Ακτινοβολία	52
4.4	Φασματικές και Οπτικές Παράμετροι	55
4.5	Παράμετροι στις Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς	59
4.6	Παράμετροι Εξαρτώμενοι από τη Θερμοκρασία	60
4.7	Θερμοκρασία Λειτουργίας Πλαισίου (Θερμοκρασιακό Μοντέλο)	61
4.8	Εξισώσεις Απόδοσης Συστοιχιών	64
4.9	Προσδιορισμός της Ενεργού Ακτινοβολίας (E_e)	65
4.10	Βάση Δεδομένων ΦΒ Πλαισίων	67

Κεφάλαιο 5

Παράγοντες Επίδρασης Στην Απόδοση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

5.1	Εισαγωγή	72
5.2	Ενέργεια διαθέσιμη από φωτοβολταϊκά πλαίσια	72
5.2.1	Επίδραση Ηλιακής Ακτινοβολίας	74
5.2.2	Τάση μέγιστης ισχύος (V_{mp}) συναρτήσει της ακτινοβολίας	75
5.2.3	Θερμοκρασία Λειτουργίας και Θερμοκρασιακοί Συντελεστές	76
5.2.4	Μεταβολές στο Ηλιακό Φάσμα	77
5.2.5	Επίδραση Γωνίας Πρόσπτωσης Ηλιακής Ακτινοβολίας	80
5.3	ac Ενέργεια Διαθέσιμη από Φωτοβολταϊκά Συστήματα	81

Κεφάλαιο 6

Εφαρμογή

6.1	Ηλιακή Ακτινοβολία	88
6.2	Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά	89
6.3	Κλίση και Προσανατολισμός	92
6.4	Χαρακτηριστικά Μετατροπέα	96
6.5	Ρύπανση Φωτοβολταϊκών Πλαισίων	99
6.6	Θερμοκρασία	100
6.7	Συντελεστής Απωλειών	102
6.8	Συντελεστής Απόδοσης (Performance Ratio)	104

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

7.1	Γενικά	110
7.2	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	111

Βιβλιογραφία	113
---------------------	-----

Παράρτημα	115
------------------	-----

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και πιο επιτακτική η ανάγκη αξιοποίησης εναλλακτικών – ανανεώσιμων – μορφών ενέργειας. Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση, σε συνδυασμό με τη μείωση των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων, και οι δυσμενείς επιπτώσεις από την εκτεταμένη χρήση τους – επιπτώσεις που γίνονται ολοένα και πιο εμφανείς τα τελευταία χρόνια – έχουν στρέψει το ενδιαφέρον στην εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών. Μία από αυτές τις πηγές είναι και η ηλιακή ενέργεια η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) στοιχείων.

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών είναι μια νέα σχετικά τεχνολογία που εμφανίστηκε στη δεκαετία του 1960, κυρίως ως τμήμα διαστημικών εφαρμογών, και η οποία έκτοτε εξελίσσεται συνεχώς. Στις μέρες μας, πραγματοποιείται σημαντική έρευνα στον τομέα αυτό με στόχο κυρίως την καλύτερη αξιοποίηση της παρεχόμενης από τον ήλιο ενέργειας και κατά τη συνέπεια την αύξηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Η χώρα μας, πρέπει να σημειωθεί εδώ, διαθέτει τα χαρακτηριστικά εκείνα που ευνοούν την αξιοποίηση της τεχνολογίας αυτής με κυριότερο το σημαντικό ηλιακό δυναμικό που παρουσιάζει.

1.2 Σκοπός διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου εκτίμησης της ενεργειακής απόδοσης ΦΒ συστημάτων. Η ετήσια ενεργειακή παραγωγή είναι ένας από τους πλέον καθιερωμένους δείκτες που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των ΦΒ συστημάτων και κατά συνέπεια είναι απαραίτητος ο όσο το δυνατόν ακριβέστερος προσδιορισμός του. Με στόχο λοιπόν την εκτίμηση της παραγόμενης από ένα ΦΒ σύστημα ενέργειας πραγματοποιήθηκε η εργασία αυτή, η διάρθρωση της οποίας στα κεφάλαια που ακολουθούν περιγράφεται παρακάτω.

- Στο 2^ο Κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των ΦΒ στοιχείων και στη συνέχεια αναφέρονται ενδεικτικά οι διαθέσιμες τεχνολογίες ΦΒ πλαισίων που συναντώνται στις μέρες μας.

- Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας και αναλύεται ο τρόπος προσδιορισμού της ακτινοβολίας που δέχεται ένα πλαίσιο αυθαίρετης κλίσης και προσανατολισμού όταν είναι γνωστή η τιμή της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο.
- Στο 4^ο Κεφάλαιο αναλύεται το μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ισχύος που παράγει ένα ΦΒ πλαίσιο ή συστοιχία υπό συνθήκες που διαφέρουν από τις πρότυπες, και η ολοκλήρωση της οποίας, στη διάρκεια ενός έτους, οδηγεί στην εκτίμηση της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής.
- Στο 5^ο Κεφάλαιο αναλύονται οι παράγοντες που επιδρούν στην απόδοση ενός ΦΒ συστήματος και οι οποίοι σε πολλές περιπτώσεις συντελούν σε σημαντική μείωση της ενέργειας που διατίθεται τελικά στο δίκτυο.
- Στο 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου που αναπτύχθηκε για ένα συγκεκριμένο ΦΒ σταθμό και τέλος
- Στο 7^ο Κεφάλαιο συνοψίζονται κάποια βασικά συμπεράσματα σε συνδυασμό με κάποιες προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη της παρούσας εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων [2], [9] και γίνεται μια αναφορά στις υπάρχουσες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πλαισίων [12].

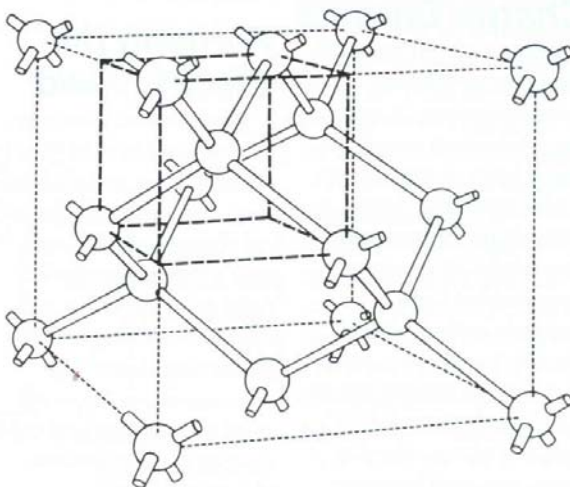
2.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το κύριο συστατικό κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τα φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία (ή φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες). Τα στοιχεία αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου που καθώς δέχονται στην επιφάνειά τους την ηλιακή ακτινοβολία εκδηλώνουν μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής του και την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται, ένα ηλιακό στοιχείο μπορεί να δώσει τάση 0,5-1,0 V και πυκνότητα ρεύματος 20-40 mA ανά cm^2 της επιφανείας του.

2.1.1 Ημιαγώγιμα Στοιχεία

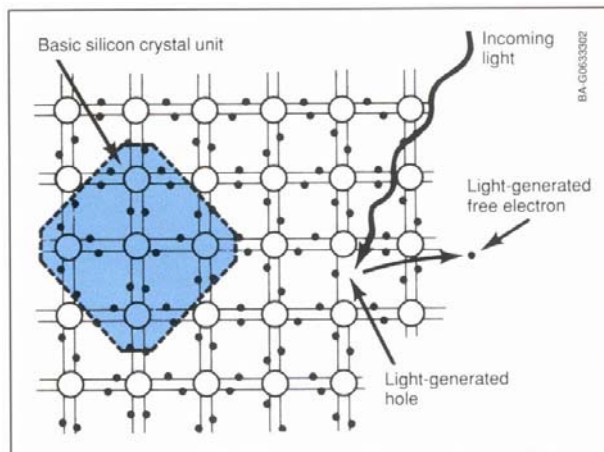
Βασικό ημιαγώγιμο υλικό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι το πυρίτιο, το οποίο είναι το στοιχείο με την μεγαλύτερη χρήση όχι μόνο για τα ηλιακά στοιχεία αλλά και για τις άλλες ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Το πυρίτιο είναι τετρασθενές στοιχείο. Σε ένα κρύσταλλο πυριτίου, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.1, κάθε άτομο είναι ενωμένο με τέσσερα γειτονικά άτομα που συγκρατούνται με το κεντρικό άτομο με τέσσερα ζεύγη ηλεκτρονίων (χημικούς δεσμούς). Έτσι το κεντρικό άτομο έχει στην εξωτερική του στοιβάδα οκτώ ηλεκτρόνια και σταθερή δομή.



Σχ. 2.1 Απεικόνιση του πλέγματος του πυριτίου

Όταν ο κρύσταλλος του πυριτίου απορροφήσει φωτόνια κατάλληλης ενέργειας ελευθερώνονται ηλεκτρόνια σθένους από κάποιους από τους δεσμούς. Τα ηλεκτρόνια αυτά αποτελούν φορείς ηλεκτρισμού και συνεισφέρουν στη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος Σχ. 2.2. Οι κενές ηλεκτρονικές θέσεις που δημιουργούνται στους χημικούς δεσμούς ονομάζονται οπές.



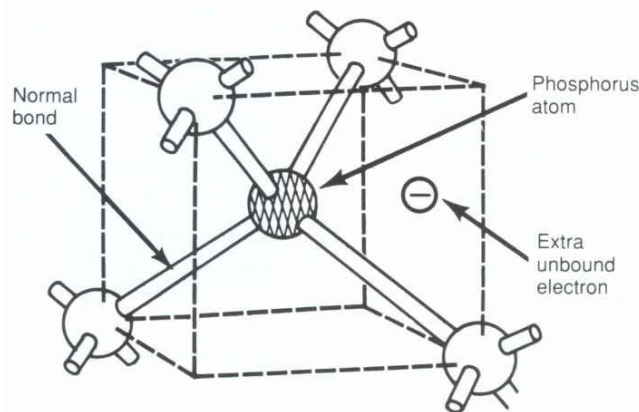
Σχ. 2.2 Επίδραση της ακτινοβολίας στο πυρίτιο

Σε συνθήκες σταθερής ενεργειακής κατάστασης το πλήθος των ηλεκτρονίων που ελευθερώνονται ισούται με το πλήθος των ηλεκτρονίων που παγιδεύονται στις οπές κι έτσι παρατηρείται ισορροπία φορέων. Εάν στα άκρα του ημιαγωγού εφαρμοστεί τάση, τότε δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο υπό την επίδραση του οποίου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές κινούνται σε αντίθετη κατεύθυνση. Η ημιαγωγιμότητα των υλικών αυτών οφείλεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια όσο και στις θετικές οπές.

2.1.2 Πρόσμιξη ημιαγώγιμων στοιχείων

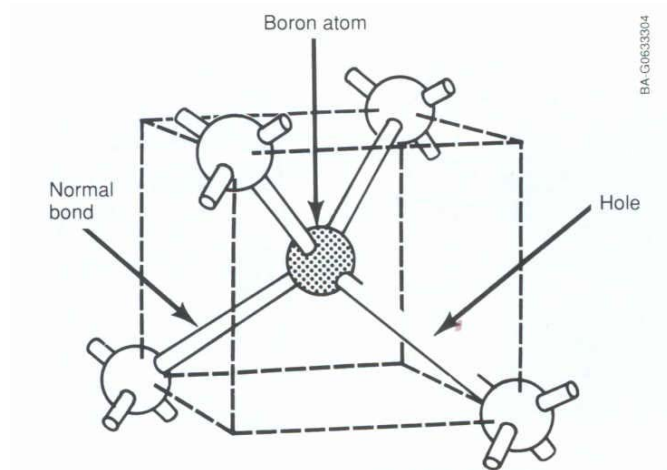
Με την πρόσμιξη μικρής ποσότητας πεντασθενούς στοιχείου, πχ. As, σε τήγμα πυριτίου, Si, ενσωματώνονται στην κρυσταλλική δομή του πυριτίου άτομα As σε θέσεις που αλλιώς θα κατείχαν μόνο άτομα Si. Τέσσερα από τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους κάθε ατόμου As σχηματίζουν δεσμούς σθένους με γειτονικά άτομα Si. Το πέμπτο ηλεκτρόνιο συγκρατείται πολύ «χαλαρά» από το θετικό πυρηνικό φορτίο του

As με αποτέλεσμα με πολύ μικρή ποσότητα ενέργειας να μπορεί να αποσπασθεί και να συμπεριφερθεί σαν ελεύθερο ηλεκτρόνιο, όμοιο με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που προέρχονται από τη διέγερση των ηλεκτρονίων σθένους των κανονικών δεσμών πυριτίου. Το πεντασθενές άτομο As που βρίσκεται σε περιβάλλον με τετρασθενή άτομα συμπεριφέρεται σαν δότης ηλεκτρονίων και συγχρόνως μετατρέπεται σε θετικό ιόν.



Σχ. 2.3 Σχηματισμός πυριτίου τύπου N με προσμίξεις από άτομα-δότες ηλεκτρονίων

Αντίστοιχα, με την πρόσμιξη τρισθενών ατόμων, πχ B, σε πλεγματικές θέσεις του πυριτίου δημιουργούνται κενές θέσεις ηλεκτρονίων στους δεσμούς, αφού τα τρία ηλεκτρόνια σθένους κάθε ατόμου B επαρκούν για τους δεσμούς με τρία μόνο από τα τέσσερα άτομα Si που το περιβάλλουν. Με την απορρόφηση λίγης ενέργειας, ένα ηλεκτρόνιο από γειτονικό πλήρη δεσμό μπορεί να μετακινηθεί προς την κενή θέση, αφήνοντας στην προηγούμενη θέση του μια οπή. Το τρισθενές άτομο B που βρίσκεται σε περιβάλλον με τετρασθενή άτομα συμπεριφέρεται σαν αποδέκτης ηλεκτρονίων και συγχρόνως μετατρέπεται σε αρνητικό ιόν.

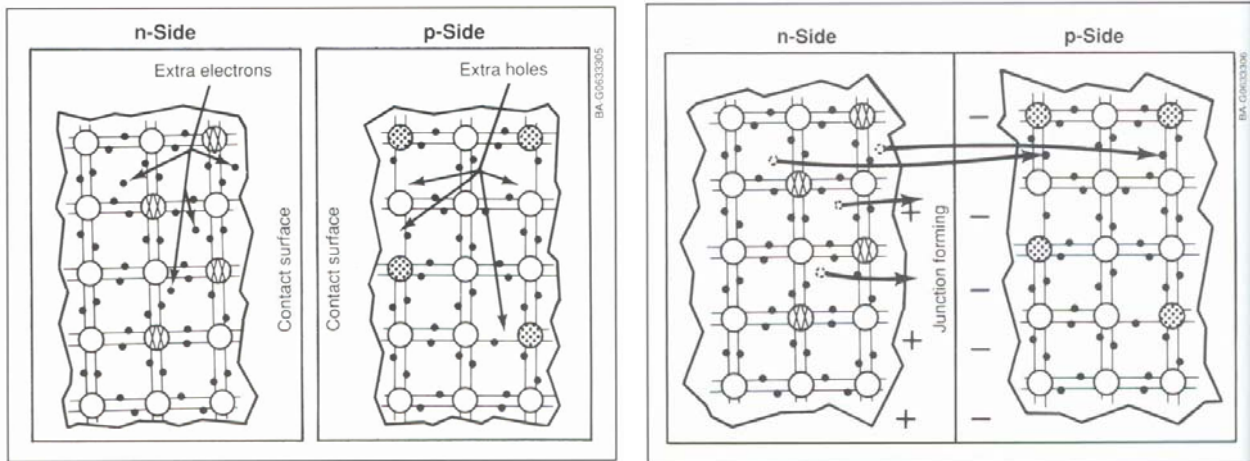


Σχ. 2.4 Σχηματισμός πυριτίου τύπου P με προσμίξεις από άτομα-αποδέκτες ηλεκτρονίων

Οι ημιαγωγοί προσμίξεων στους οποίους επικρατούν δότες και επομένως οι κύριοι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι τα αρνητικά φορτισμένα ελεύθερα ηλεκτρόνια ονομάζονται τύπου n, ενώ αντίστοιχα όταν επικρατούν αποδέκτες οι ημιαγωγοί προσμίξεων ονομάζονται τύπου p.

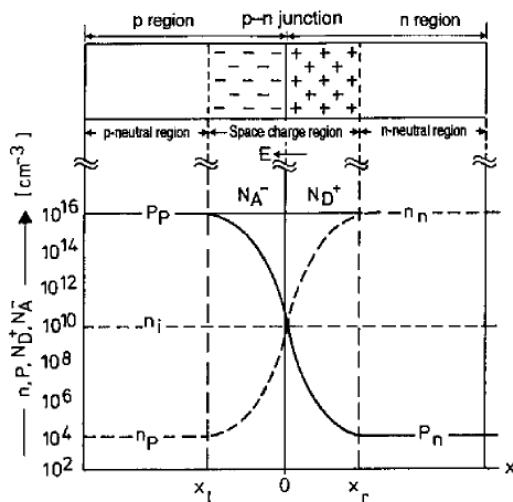
2.1.3 Η ένωση P-N

Οι σημαντικότερες ιδιότητες και εφαρμογές των διατάξεων ημιαγωγών δεν προέρχονται κυρίως από τη δημιουργία φορέων, αλλά οφείλονται περισσότερο στη διάχυση των φορέων τους. Βασική διάταξη για την εκδήλωση των ιδιοτήτων αυτών είναι η ένωση p-n (ονομάζεται επίσης σύνδεση, επαφή ή μετάβαση p-n) που μπορούμε να θεωρήσουμε ότι σχηματίζεται όταν έλθουν σε στενή επαφή ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου p με ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου n. Αμέσως τότε, ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n, όπου οι οπές είναι λιγότερες, και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου τύπου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p, όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι επίσης πολύ λιγότερα.



Σχ. 2.5 Ένωση p-n

Η ανάμιξη αυτή των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια των τεμαχίων τύπου p και n, ανατρέπουν την κατάσταση ισορροπίας που υπήρχε πριν. Η αποκατάσταση των συνθηκών ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις των φορέων, μέχρι οι συγκεντρώσεις τους να πάρουν τιμές που να ικανοποιούν το νόμο δράσης των μαζών Σχ. 2.6.



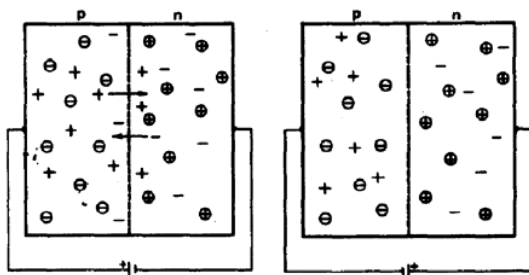
Σχ. 2.6 Μεταβολή της συγκέντρωσης των οπών και των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε μια ένωση P-N

Για αυτό η περιοχή γύρω από μια ένωση p-n ονομάζεται ζώνη εξάντλησης των φορέων (ή περιοχή αραιώσης). Η διάταξη ημιαγωγών που αποτελείται από μία ένωση p-n και από μία ηλεκτρική σύνδεση στο κάθε τμήμα της ονομάζεται δίοδος ημιαγωγού ή απλά δίοδος.

Σε αντίθεση με τους ευκίνητους φορείς των ημιαγωγών (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) που τείνουν να διαχέονται προς τις περιοχές με τη μικρότερη συγκέντρωσή τους, η συγκέντρωση των αρνητικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες στο τμήμα τύπου p, και η συγκέντρωση των θετικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι δότες στο τμήμα τύπου n, παραμένουν αμετάβλητες, αφού τα ιόντα, όπως συνήθως όλα τα άτομα στα στερεά, μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική ουδετερότητα και οι δύο πλευρές της ένωσης p-n φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Δημιουργείται λοιπόν μία διαφορά δυναμικού, που η τιμή της είναι σχετικά μικρή (συνήθως περίπου 0.3 μέχρι 0.5V, ανάλογα με τις συγκεντρώσεις των προσμίξεων) αλλά το ενσωματωμένο αυτό ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων πλειονότητας προς το απέναντι τμήμα της ένωσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι η διάοδος που περιέχει την ένωση p-n παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάλογα με τη φορά του.

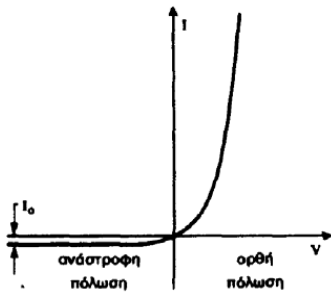
2.1.4 Ορθή και αναστροφή πόλωση της διάοδος

Η μία περίπτωση είναι να επιβληθεί στη διάοδο p-n ορθή πόλωση, δηλαδή ο αρνητικός πόλος της πηγής να συνδεθεί με το τμήμα τύπου n της διάοδος, και ο θετικός πόλος με το τμήμα τύπου p. Τότε, τα ηλεκτρόνια ρέουν ανεμπόδιστα από την πηγή, διαμέσου του τμήματος τύπου n, προς την περιοχή της ένωσης όπου επανασυνδέονται με τις οπές που σχηματίζονται με την απομάκρυνση ηλεκτρονίων προς το θετικό πόλο της πηγής, διαμέσου του τμήματος τύπου p (Σχ. 2.7).



Σχ. 2.7 Συνδεσμολογία ορθής και αναστροφής πόλωσης

Αντίθετα, στην ανάστροφη πόλωση, δηλαδή αν ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδεθεί με το τμήμα τύπου p και ο θετικός με το τμήμα τύπου n, γίνεται επανασύνδεση των οπών του τμήματος τύπου p με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την πηγή, και, από την άλλη μεριά, απομάκρυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων του τμήματος τύπου n, προς το θετικό πόλο της πηγής. Έτσι, οι συγκεντρώσεις των φορέων μειώνονται πάρα πολύ, το πάχος της ζώνης εξάντλησης αυξάνει, και τα φορτισμένα άτομα των προσμίξεων δημιουργούν ένα ισχυρό εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο που είναι αντίθετο προς το πεδίο που επιβάλλει η πηγή. Το αποτέλεσμα είναι ότι τώρα η δίοδος προβάλλει μεγάλη αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα. Δηλαδή μπορεί μια δίοδος που έχει σε ορθή πόλωση αντίσταση μόλις 10 Ω, να την αυξάνει στην αντίστροφη πόλωση σε 100 ΜΩ, δηλαδή να γίνεται δέκα εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη. Το παρακάτω διάγραμμα (Σχ. 2.8) δείχνει ακριβώς την ιδιόμορφη μεταβολή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει μια δίοδο ένωσης p-n, σε συνάρτηση με την τιμή της τάσης και το είδος της πόλωσης που εφαρμόζεται.



Σχ. 2.8 Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης (I)-τάσης (V) μίας διόδου P-N

2.1.5 Το ανάστροφο ρεύμα κόρου

Για αρνητικές τιμές της επιβαλλόμενης τάσης (ανάστροφη πόλωση), η ένταση του ρεύματος τείνει και σταθεροποιείται σε μία τιμή I_0 που ονομάζεται ανάστροφο ρεύμα κόρου, ενώ για θετικές τιμές της τάσης (ορθή πόλωση) η ένταση του ρεύματος που διαρρέει μία δίοδο p-n αυξάνει ταχύτατα, και η μη γραμμική εξάρτησή της από την τιμή της επιβαλλόμενης τάσης V δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

όπου e : το στοιχειώδες ηλεκτρονικό φορτίο,

k : η σταθερά Boltzman,

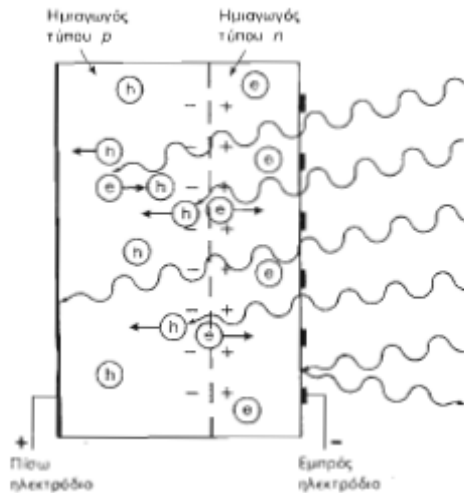
T : η απόλυτη θερμοκρασία, και

γ : ένας συντελεστής που ανάλογα με την κατασκευή και την ποιότητα της διόδου παίρνει συνήθως τιμές μεταξύ 1 και 2.

Στις συνηθισμένες διόδους πυριτίου, το I_0 είναι συνήθως μικρότερο από 1 μA , ενώ το ρεύμα της ορθής πόλωσης είναι πολλές χιλιάδες φορές μεγαλύτερο και φτάνει σε δεκάδες ή εκατοντάδες mA.

2.1.6 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα ηλιακά στοιχεία είναι διόδοι ημιαγωγού με τη μορφή δίσκου, (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ηλιακής ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντιθέτου προσήμου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχτούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού της πεδίου Σχ. 2.9.



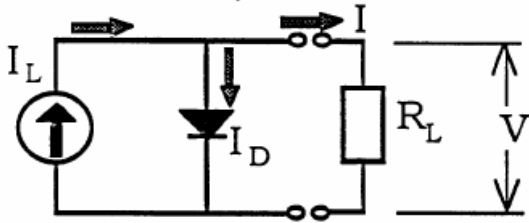
Σχ. 2.9 Μηχανισμός εκδήλωσης φωτοβολταϊκού φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο

Έτσι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

2.1.7 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Με στόχο την εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μια δίοδο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω απλοποιημένο διάγραμμα Σχ. 2.10.



Σχ. 2.10 Απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί μια ισορροπία όταν η τάση, που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα. Σε αυτήν την περίπτωση θα ισχύει η σχέση

$$I_{\phi} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{\gamma kT}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

από την οποία προκύπτει η τιμή της τάσης ανοικτοκύκλωσης V_{oc} του στοιχείου

$$V_{oc} = \frac{\gamma kT}{e} \ln\left(\frac{I_{\phi}}{I_0} - 1\right) \quad (2.3)$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η τιμή του I_{ϕ} είναι πολύ μεγαλύτερη από του I_0 κι επομένως η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί στην

$$V_{oc} = \frac{\gamma kT}{e} \ln \frac{I_{\phi}}{I_0} \quad (2.4)$$

που δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της τάσης ανοικτού κυκλώματος σε συνάρτηση με το φωτόρευμα, δηλαδή με την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Στην άλλη ακραία περίπτωση, δηλαδή σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα I_{sc} θα ισούται με το παραγόμενο φωτόρευμα:

$$I_{sc}=I_{\phi}$$

Όταν όμως το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου κλείσει διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης R_L , το ρεύμα θα πάρει μια μικρότερη τιμή I_L που προκύπτει από τη λύση της εξίσωσης

$$I_L = I_{\phi} - I_0 \left[\exp\left(\frac{eI_L R_L}{\gamma k T}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

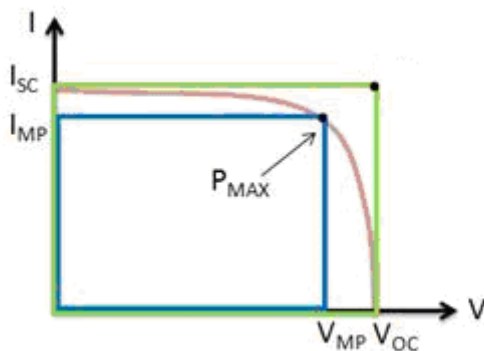
Για κάποια τιμή της αντίστασης η ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο γίνεται μέγιστη. Στις συνθήκες αυτές, αντιστοιχεί μια βέλτιστη τάση V_m , που προκύπτει από τη λύση της εξίσωσης

$$\frac{I_{\phi}}{I_0} + 1 = \left(1 + \frac{eV_m}{\gamma k T} \right) \exp\left(\frac{eV_m}{\gamma k T}\right) \quad (2.6)$$

2.1.8 Συντελεστής Πλήρωσης

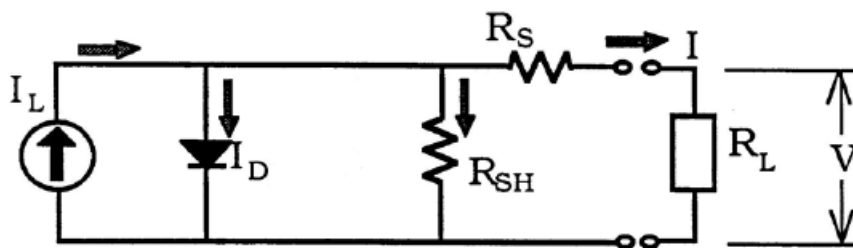
Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος $P_m = I_m \cdot V_m$ προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης επί την ανοικτοκυκλωμένη τάση, $I_{sc} \cdot V_{oc}$, ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF (*fill factor*).

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.7)$$



Σχ. 2.11 Συντελεστής Πλήρωσης

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι το απλοποιημένο ηλεκτρικό ισοδύναμο που περιγράφηκε προηγουμένως δεν καλύπτει την πραγματική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Μια σωστότερη προσέγγιση αποτελεί το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.12 καθώς περιέχει τις αναπόφευκτες αντιστάσεις R_s που παρεμβάλλονται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια. Επιπλέον, επειδή η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν έχει άπειρη τιμή, αφού λόγω αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων γίνονται διαρροές ρεύματος, το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει και την παράλληλη αντίσταση R_{sh} .



Σχ. 2.12 Πλήρες ηλεκτρικό ισοδύναμο φβ στοιχείου

Στην περίπτωση αυτή η σχέση μεταξύ ρεύματος-τάσης δίνεται από τη σχέση

$$I_L \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = I_\phi - I_0 \left[\exp \left(\frac{e(V_L - I_L R_s)}{\gamma K T} \right) - 1 \right] - \frac{V_L}{R_{sh}} \quad (2.8)$$

2.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Οι τεχνολογίες των φβ που συναντώνται σήμερα ποικίλουν ως προς το βασικό υλικό κατασκευής, την ικανότητα μετατροπής και το κόστος. Μια συνοπτική αναφορά των κυριότερων χαρακτηριστικών τους ακολουθεί στη συνέχεια.

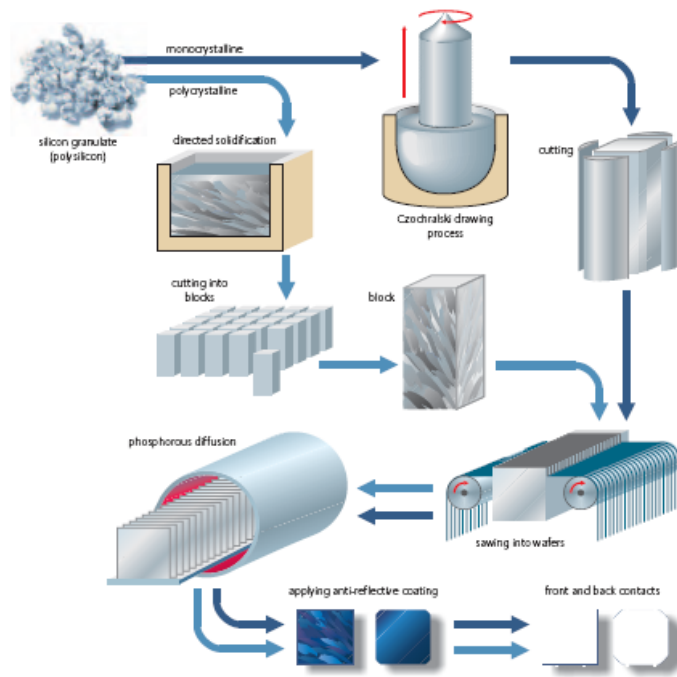
2.2.1 Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο

Τα πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από κρυσταλλικό πυρίτιο- βασικό ημιαγώγιμο υλικό. Το κρυσταλλικό πυρίτιο μορφοποιείται σε μεγάλα φύλλα, τα οποία μπορούν να καταμηθούν σε συγκεκριμένο μέγεθος και να χρησιμοποιηθούν σε ένα πλαίσιο. Τα πλαίσια αυτού του είδους είναι πιο ακριβά από τα πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου καθώς προέρχονται από πυρίτιο καλύτερης ποιότητας-καθαρότητας, ωστόσο χαρακτηρίζονται από υψηλότερη ικανότητα μετατροπής και συχνά σε βάθος χρόνου παρουσιάζουν καλύτερη σχέση κόστους-απόδοσης. Η ικανότητα μετατροπής τους είναι της τάξης του 15-18%, κάτι που σημαίνει ότι από την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνειά τους, το παραπάνω ποσοστό μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

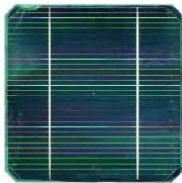
2.2.2 Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

Τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια πυριτίου έχουν ένα μέτριο κόστος σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες που είναι διαθέσιμες στις μέρες μας, και σίγουρα χαμηλότερο από τα αντίστοιχα μονοκρυσταλλικά εξαιτίας της χαμηλότερης ποιότητας πυριτίου που χρησιμοποιούν, παρόλο που το κόστος παραγωγής των μεμονωμένων ηλιακών στοιχείων που τα αποτελούν παραμένει υψηλό. Το μειονέκτημα σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά πλαίσια είναι η σχετικά μειωμένη ικανότητα μετατροπής που κυμαίνεται σε 12-14%.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται συνοπτικά οι διαφορές στον τρόπο κατασκευής των μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών πλαισίων.



Σχ. 2.13 Κατασκευή ΦΒ στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου

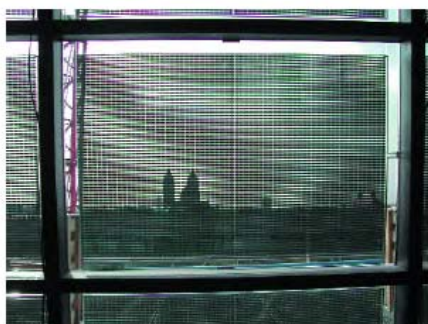


Σχ. 2.14 Τυπικό ΦΒ κρυσταλλικό στοιχείο

2.2.3 Πλαίσια άμορφου πυριτίου ή πλαίσια thin film

Τα thin-film πλαίσια διαφέρουν σημαντικά από τα κρυσταλλικά, από την αρχική φάση κατασκευής τους. Αντί το πυρίτιο να χυτευθεί και στη συνέχεια να καταταμηθεί σε στοιχεία, το άμορφο πυρίτιο δεν παρουσιάζει κρυσταλλική δομή και μπορεί να εφαρμοστεί σαν μια λεπτή ημιαγώγιμη μεμβράνη πάνω σε διαφορετικά υλικά. Εκτός από το άμορφο πυρίτιο, με τον ίδιο τρόπο μπορούν χρησιμοποιηθούν το σύμπλοκο δισεληνιούχου χαλκού με ίνδιο (copper indium diselenide, CIS) και το τελουριούχο κάδμιο (CdTe). Το βασικό πλεονέκτημα των thin-film πλαισίων έγκειται στο χαμηλό κόστος κατασκευής και η πολλαπλή χρησιμότητα τους. Επειδή για την κατασκευή τους απαιτείται λιγότερος χρόνος και κόστος, μπορούν να παραχθούν πιο αποδοτικά. Από την άλλη πλευρά, επειδή οι μεμβράνες αυτές εφαρμόζονται σε λεπτές

επιστρώσεις σε διάφορα υλικά, είναι δυνατή η κατασκευή εύκαμπτων, σταθερής μορφής, ή ασυνήθιστου μεγέθους πλαίσίων. Ωστόσο, τα πλαίσια thin-film παρουσιάζουν κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Παρόλο που υπερέχουν σε κόστος κατασκευής και “ευλυγισία”, υστερούν πολύ σε ικανότητα μετατροπής με συνέπεια να παρουσιάζουν τη χαμηλότερη ανάμεσα σε όλες τις υπάρχουσες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών (4-5%). Τα συγκεκριμένα πλαίσια χρησιμοποιούν πυρίτιο με χαμηλά επίπεδα καθαρότητας γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε επιπρόσθετες απώλειες μετατροπής όταν τα πλαίσια αυτά αρχίσουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.



Σχ. 2.15 Παράδειγμα εφαρμογής ημιδιάφανου thin-film πλαισίου

2.2.4 Πλαίσια τεχνολογίας III-IV ομάδας

Το όνομα των τεχνολογιών αυτών έχει προκύψει από το βασικό υλικό κατασκευής τους, το οποίο κατατάσσεται στην τρίτη ή τέταρτη ομάδα του περιοδικού πίνακα. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν μεν υψηλή ικανότητα μετατροπής αλλά συγχρόνως παρουσιάζουν και υψηλό κόστος. Τα υλικά που χρησιμοποιούν έχουν ικανότητα μετατροπής γύρω στο 25%, όπως το αρσενιούχο γάλιο, το οποίο συνδυάζεται με άλλα υλικά για τη δημιουργία ημιαγωγών που αποκρίνονται σε διαφορετικούς τύπους ηλιακής ενέργειας. Ωστόσο, η χρήση τους περιορίζεται μόνο σε αεροδιαστημικές εφαρμογές εξαιτίας του υψηλού κόστους τους όπως προαναφέρθηκε.

Κεφάλαιο 3

Ηλιακή Ακτινοβολία

Το εν λόγω κεφάλαιο αναφέρεται στη φύση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον ήλιο και που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνονται γεωμετρικές αναλύσεις, όπως η κατεύθυνση λήψης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και η γωνία πρόσπτωσης της σε διαφορετικές επιφάνειες. Στη συνέχεια καλύπτονται τα θέματα της επίδρασης της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία, των δεδομένων ακτινοβολίας που είναι διαθέσιμα καθώς και ο τρόπος με τον οποίο είναι δυνατό να επεξεργαστούν τα συγκεκριμένα δεδομένα ώστε να λάβουμε την απαραίτητη τελικά πληροφορία – την ακτινοβολία σε επιφάνειες διαφόρων κλίσεων και προσανατολισμών [1], [3], [10].

3 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η δομή και τα χαρακτηριστικά του ήλιου καθορίζουν τη φύση της ενέργειας που εκπέμπεται στο διάστημα. Το πρώτο κύριο θέμα σε αυτό το κεφάλαιο αφορά τα χαρακτηριστικά αυτής της ενέργειας εκτός της γήινης ατμόσφαιρας, την έντασή της και τη φασματική της κατανομή. Το ενδιαφέρον εστιάζεται πρωτίστως στην ακτινοβολία που περιλαμβάνει μήκη κύματος από 0,25 έως 3,0 μm , το τμήμα εκείνο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που περιλαμβάνει την περισσότερη ενέργεια που εκλύεται από τον ήλιο.

Το δεύτερο θέμα σε αυτό το κεφάλαιο είναι η ηλιακή γεωμετρία, δηλαδή η θέση του ήλιου στον ουρανό και η κατεύθυνση υπό την οποία η ακτινική συνιστώσα της ακτινοβολίας προσπίπτει στις επιφάνειες διάφορων προσανατολισμών. Το τρίτο θέμα είναι η ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας σε μια οριζόντια επιφάνεια και η οποία αντιστοιχεί στο θεωρητικό άνω όριο της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι διαθέσιμη στην επιφάνεια της γης.

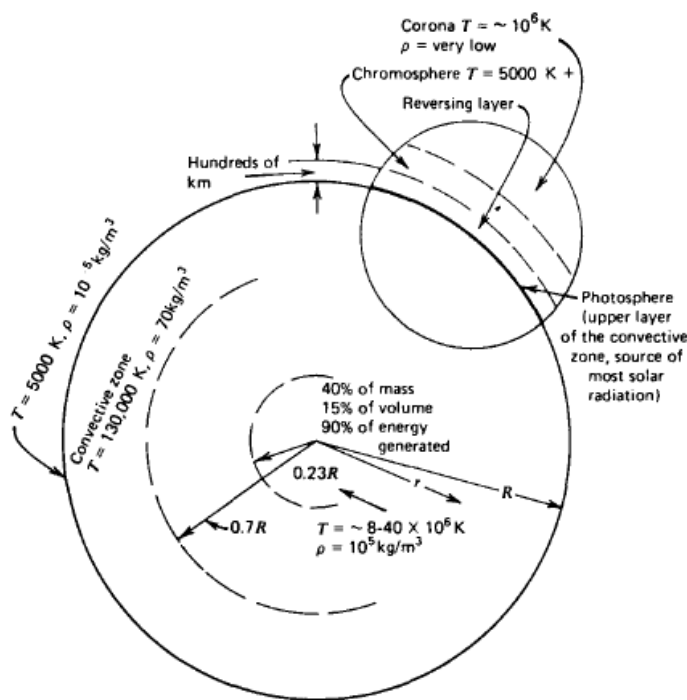
Η κατανόηση της φύσης της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας, των επιδράσεων που έχει ο προσανατολισμός μιας επιφάνειας λήψης και η θεωρητικά μέγιστη ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης είναι σημαντική για την κατανόηση και τη χρήση των δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας.

3.1 Ο ήλιος

Ο ήλιος είναι μια σφαίρα έντονα θερμής αέριας ύλης με διάμετρο 1.39×10^9 m και απέχει, κατά μέσο όρο, $1,5 \times 10^{11}$ m από τη γη. Όπως φαίνεται από τη γη, ο ήλιος περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του μία φορά κάθε τέσσερις βδομάδες. Ωστόσο, εξαιτίας της μη ομοιόμορφης πυκνότητάς του, δεν περιστρέφεται σαν συμπαγές σώμα: η διάρκεια περιστροφής του ισημερινού είναι 27 ημέρες και των πολικών περιοχών 30 ημέρες. Ο ήλιος μπορεί να θεωρηθεί ένας συνεχής αντιδραστήρας σύντηξης του οποίου τα τοιχώματα αποτελούνται από θερμά αέρια που συγκρατούνται από βαρυτικές δυνάμεις. Η θερμοκρασία στον πυρήνα του ήλιου εκτιμάται από 8×10^6 έως 40×10^6 K και η πυκνότητά του 80 με 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή του νερού. Η ενέργεια που παράγεται στο εσωτερικό της ηλιακής σφαίρας σε θερμοκρασίες εκατομμυρίων βαθμών Κελσίου μεταφέρεται στην επιφάνεια και

έπειτα ακτινοβολείται στο διάστημα. Ξεκινώντας ως ακτίνες X και γ στον πυρήνα, ακτινοβολούσες και μεταφορικές διαδικασίες μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε μεγαλύτερα μήκη κύματος στην επιφάνεια μέσω εκπομπής απορρόφησης και επανακτινοβολίας.

Ένα σχηματικό διάγραμμα της δομής του ήλιου φαίνεται στο σχήμα 3.1. Εκτιμάται ότι το 90% της ενέργειας παράγεται στην περιοχή από 0 έως 0,23R (όπου R είναι η ακτίνα του ήλιου) η οποία περιλαμβάνει το 40% της μάζας του ήλιου. Σε απόσταση 0,7R από το κέντρο, η θερμοκρασία πέφτει στους 130000 K περίπου και η πυκνότητα στα 70kg/m^3 : στην περιοχή αυτή οι μεταφορικές διαδικασίες αρχίζουν να γίνονται σημαντικές και η ζώνη από 0,7R έως 1,0R είναι γνωστή ως μεταφορική. Κατά μήκος αυτής της ζώνης η θερμοκρασία πέφτει περίπου στους 5000 K και η πυκνότητα στα 10^{-5} kg/m^3 . Η ανώτερη επιφάνεια της μεταφορικής ζώνης, η φωτόσφαιρα, αποτελεί την πηγή ολόκληρης σχεδόν της ηλιακής ακτινοβολίας. Πάνω από τη φωτόσφαιρα υπάρχει η επιφάνεια αναστροφής, ακολουθούμενη από τη χρωμόσφαιρα σε ύψος 10000 km και τέλος το ηλιακό στέμμα, μια περιοχή πολύ χαμηλής πυκνότητας και πολύ υψηλής (10^6 K) θερμοκρασίας.

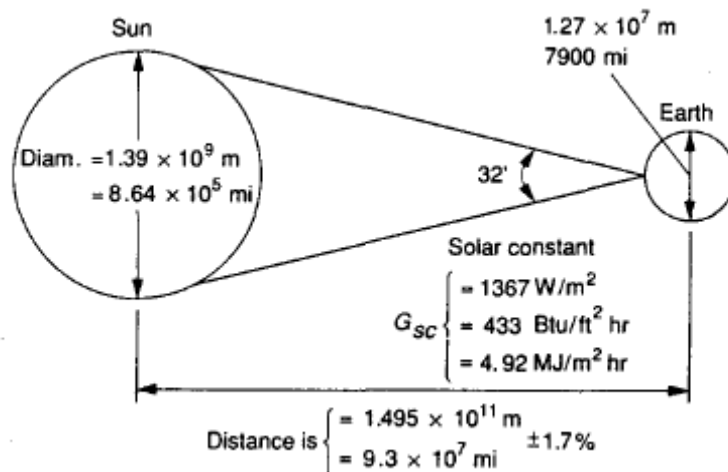


Σχ. 3.1 Δομή του ήλιου

Αυτή η απλοποιημένη εικόνα για τον ήλιο, η φυσική του δομή, η θερμοκρασία και η πυκνότητά του βοηθούν στην κατανόηση ότι ο ήλιος στην πραγματικότητα δεν συμπεριφέρεται σαν μέλαν σώμα σταθερής θερμοκρασίας. Η εκπεμπόμενη ηλιακή ακτινοβολία είναι η σύνθεση διαφορετικών στρωμάτων που εκπέμπουν και απορροφούν ακτινοβολία σε διάφορα μήκη κύματος. Η ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας και η φασματική της κατανομή έχουν πλέον μετρηθεί με διάφορες μεθόδους σε αρκετά πειράματα: τα αποτελέσματα διατυπώνονται στις επόμενες δύο ενότητες.

3.2 Ηλιακή Σταθερά

Η εικόνα 3.2 δείχνει σχηματικά τη γεωμετρία ήλιου-γης. Η απόσταση μεταξύ ήλιου και γης μεταβάλλεται κατά 1,7% και επίσης ο ήλιος υποτείνεται σε γωνία 32° στη μέση απόσταση ήλιου-γης, που είναι της τάξεως των $1,495 \cdot 10^{11}$ m (μία αστρονομική μονάδα). Η ακτινοβολία που εκλύεται από τον ήλιο και η χωρική του σχέση με τη γη έχουν σαν αποτέλεσμα μια σχεδόν σταθερή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα της γης. Η ηλιακή σταθερά, G_{sc} , είναι η ενέργεια του ήλιου ανά μονάδα χρόνου που λαμβάνεται από μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας στη μέση απόσταση ήλιου-γης έξω από την ατμόσφαιρα.

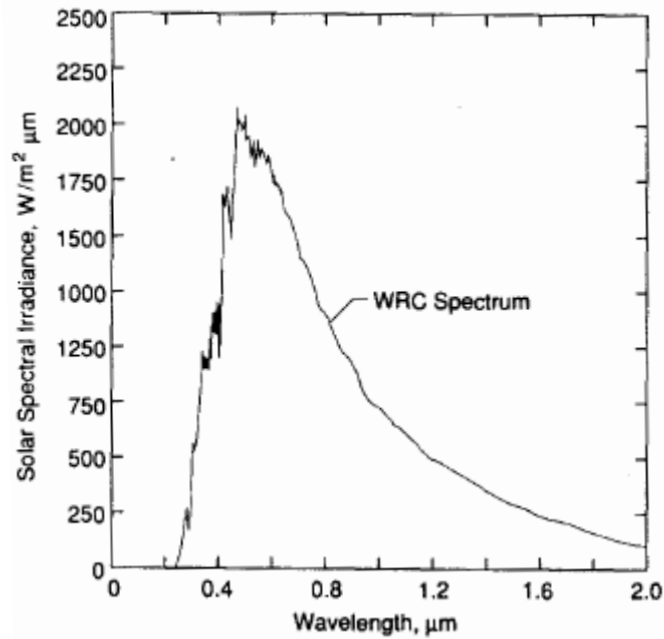


Σχ. 3.2 Γεωμετρική σχέση Ηλιου-Γης

Το Παγκόσμιο Κέντρο Ακτινοβολίας (World Radiation Center-WRC) έχει υιοθετήσει την τιμή 1367 W/m^2 με αβεβαιότητα της τάξης του 1%. Αυτή η τιμή για την ηλιακή σταθερά G_{sc} χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία.

3.3 Φασματική Κατανομή της Ακτινοβολίας εκτός Γήινης Ατμόσφαιρας

Επιπλέον της ολικής ακτινοβολίας στο ηλιακό φάσμα εκτός ατμόσφαιρας (η ηλιακή σταθερά) είναι χρήσιμη και η γνώση της φασματικής κατανομής αυτής της ακτινοβολίας, δηλαδή της ακτινοβολίας που θα λαμβανόταν απουσία της ατμόσφαιρας. Μια πρότυπη καμπύλη φασματικής κατανομής έχει συνταχθεί από μετρήσεις σε μεγάλο υψόμετρο και στο διάστημα. Η πρότυπη καμπύλη του WRC φαίνεται στην εικόνα 3.3.



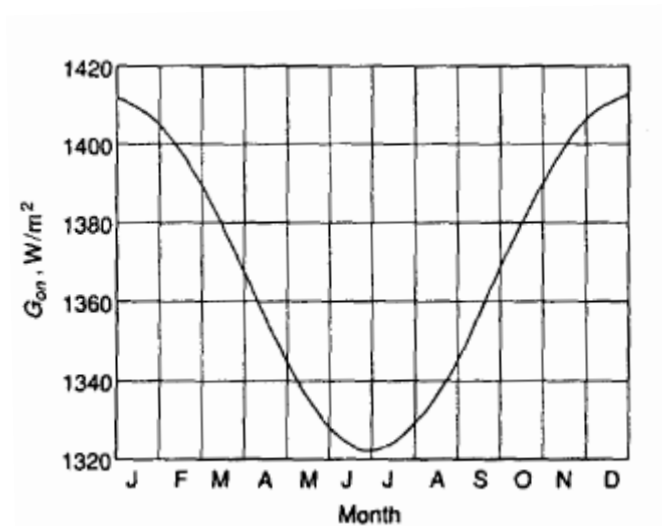
Σχ. 3.3 Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας

3.4 Μεταβολές Ακτινοβολίας εκτός Ατμόσφαιρας

Το επίπεδο της ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας είναι σχεδόν σταθερό κατά τη διάρκεια του έτους. Μια μικρή απόκλιση οφείλεται σε αβεβαιότητες και μεταβολές της εκπεμπόμενης από τον ήλιο ακτινοβολίας ωστόσο στις περισσότερες τεχνολογικές εφαρμογές η ενέργεια που εκπέμπεται από τον ήλιο μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Παρόλα αυτά, λόγω της μεταβολής στην απόσταση που χωρίζει τον ήλιο από τη γη παρατηρούνται αποκλίσεις στην ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας εύρους $\pm 3\%$. Η εποχιακή απόκλιση υποδηλώνεται από τη σχέση

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (3.1)$$

όπου G_{on} η ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας μετρημένη σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ήλιου την n-οστή ημέρα του έτους, και όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχ. 3.4 Μεταβολές της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια του έτους

3.5 Ορισμοί

Οι παρακάτω ορισμοί είναι χρήσιμοι καθώς αναφέρονται σε μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Αέριος Μάζα (Air Mass) AM. Ο λόγος της ατμοσφαιρικής μάζας που διαπερνά η ακτινική συνιστώσα της ακτινοβολίας προς τη μάζα που θα διαπερνούσε αν ο ήλιος βρισκόταν στο ζενίθ (στην κατακόρυφο). Συνεπώς AM=1 στο επίπεδο της θάλασσας όταν ο ήλιος είναι στο ζενίθ και AM=2 για ζενιθιακή γωνία $\theta_z = 60^\circ$. Για ζενιθιακές γωνίες από 0° έως 70° στο επίπεδο της θάλασσας μια καλή προσέγγιση δίνεται από τον τύπο

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \tag{3.2.α}$$

Για μεγαλύτερες γωνίες πρέπει να ληφθεί υπόψη η καμπυλότητα της γης που γίνεται σημαντική. Πιο συγκεκριμένα η αέριος μάζα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη γωνία ζενίθ του ηλίου θ_z και την ακόλουθη εξίσωση

$$AM = \left[\cos \theta_z + 0.5057 \cdot (96.080 - \theta_z)^{-1.634} \right]^{-1} \tag{3.2.β}$$

Τελικά η απόλυτη αέρια μάζα υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την τιμή της αερίου μάζας με το πηλίκο της ατμοσφαιρικής πίεσης στο σημείο εξέτασης προς την ατμοσφαιρική πίεση στο επίπεδο της θάλασσας

$$AM_{\alpha} = AM \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (3.2.\gamma)$$

Ακτινική ή άμεση Ακτινοβολία (Beam Radiation). Η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον ήλιο χωρίς να έχει υποστεί διάχυση από την ατμόσφαιρα. (Η ακτινική συνιστώσα αναφέρεται συχνά και ως άμεση συνιστώσα)

Διάχυτη Ακτινοβολία (Diffuse Radiation). Η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον ήλιο αφού η κατεύθυνσή της έχει αλλάξει από τη διάχυση στην ατμόσφαιρα.

Ολική Ηλιακή Ακτινοβολία (Total Solar Radiation). Το άθροισμα ακτινικής και διάχυτης ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια. (Οι πιο συνηθισμένες μετρήσεις ακτινοβολίας αναφέρονται σε ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο).

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

Ακτινοβολία ή Ηλιακή Έκθεση (Irradiation or Radiant Exposure), J/m^2 . Η προσπίπτουσα ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας που προκύπτει από την ολοκλήρωση της έντασης ακτινοβολίας σε καθορισμένο χρονικό διάστημα, συνήθως μιας ώρας ή μέρας. Το σύμβολο I χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ακτινοβολίας σε διάστημα μιας ώρας.

Οι δείκτες των G και I έχουν ως εξής: το a αναφέρεται στην ακτινοβολία εκτός της γήινης ατμόσφαιρα, το b και το d στην ακτινική και τη διάχυτη ακτινοβολία αντίστοιχα, και το T και το n αναφέρονται στην ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

και σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης αντίστοιχα. Αν δε δηλώνεται T ή n τότε η ακτινοβολία αναφέρεται στο οριζόντιο επίπεδο.

Ηλιακός Χρόνος (Solar Time). Ο χρόνος βασισμένος στη φαινόμενη κίνηση του ήλιου στον ουρανό με το ηλιακό μεσημέρι να είναι η χρονική στιγμή που ο ήλιος περνά από το μεσημβρινό του παρατηρητή.

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

$$t_s = t_c + \frac{L_{loc}}{15} - T_c + E \quad (3.3)$$

όπου: t_s , ο ηλιακός χρόνος (σε ώρες)

t_c , ο τοπικός χρόνος (σε ώρες, από 1 έως 24)

L_{loc} , το γεωγραφικό μήκος της θέσης του παρατηρητή (σε μοίρες)

T_c , η τοπική ωρολογιακή ζώνη ανατολικά του GMT

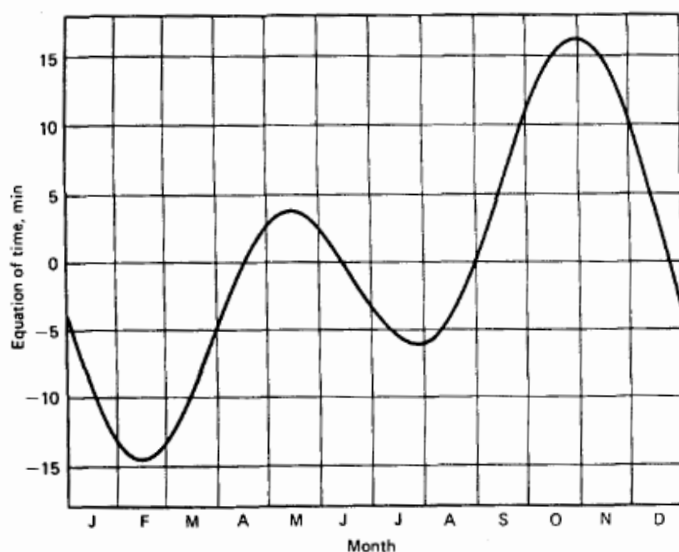
(σε ώρες, για την Ελλάδα +2 ώρες)

E , μία εξίσωση χρόνου (σε ώρες)

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad (3.4.a)$$

$$\text{όπου } B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (3.4.b)$$

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



Σχ. 3.5 Η εξίσωση του E κατά τη διάρκεια του έτους

3.6 Κατεύθυνση Ακτινικής Συνιστώσας Ακτινοβολίας

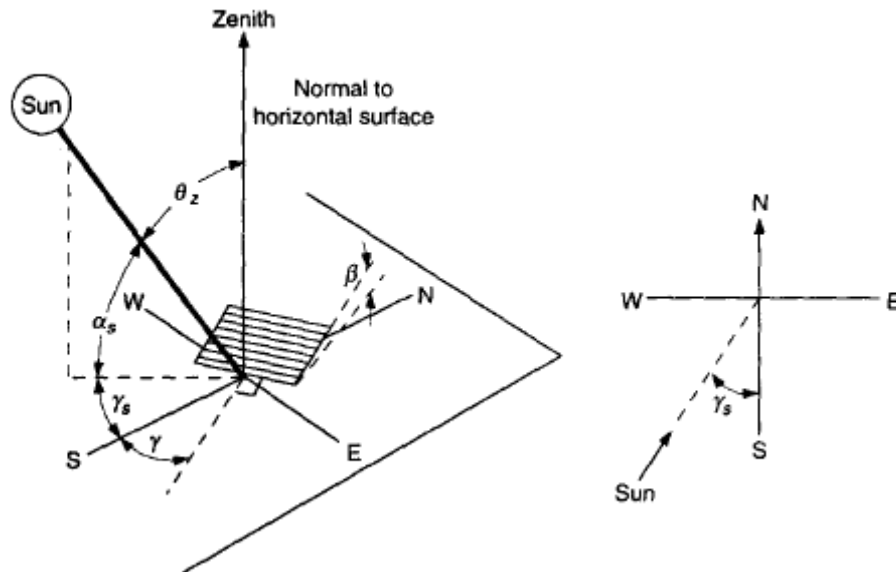
Οι γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ ενός επιπέδου αυθαίρετου προσανατολισμού ως προς τη γη οποιαδήποτε χρονική στιγμή (ανεξαρτήτως αν το επίπεδο είναι σταθερό ή κινείται σε σχέση με τη γη) και της προσπίπτουσας άμεσης ακτινοβολίας, που ισοδυναμεί με τη θέση του ήλιου σχετικά με τη θέση του επιπέδου, μπορούν να περιγραφούν με τη βοήθεια αρκετών γωνιών. Μερικές από τις γωνίες αυτές φαίνονται στην εικόνα 3.6 και ορίζονται ως εξής:

- φ **γεωγραφικό πλάτος**, η γωνιακή θέση της τοποθεσίας βόρεια ή νότια από τον ισημερινό, θετικό στο βόρειο ημισφαίριο και αρνητικό στο νότιο ($-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$)
- δ **ηλιακή απόκλιση**, η γωνιακή θέση του ήλιου το ηλιακό μεσημέρι (δηλ. όταν ο ήλιος είναι στον τοπικό μεσημβρινό) σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού, θετική στο βόρειο ημισφαίριο και αρνητική στο νότιο ($-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$)
- β **κλίση**, η γωνία μεταξύ του επιπέδου της υπό εξέταση επιφάνειας και του ορίζοντα, $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ ($\beta > 90^\circ$ σημαίνει ότι το επίπεδο της επιφάνειας είναι στραμμένο προς τα κάτω)

- γ **αζιμούθια γωνία επιφάνειας**, η γωνιακή απόκλιση της προβολής της καθέτου της επιφάνειας στο οριζόντιο επίπεδο από τον τοπικό μεσημβρινό, με μηδενική τιμή στο νότο, αρνητικές τιμές στην ανατολή και θετικές στη δύση ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$)
- ω **ωριαία γωνία**, η γωνιακή απόκλιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά από τον τοπικό μεσημβρινό που οφείλεται στην περιστροφή της γης γύρω από τον άξονα της κατά 15° την ώρα, πρώι αρνητική, απόγευμα θετική. Υπολογίζεται από τη σχέση $\omega = (t_s - 12)15$
- θ **γωνία πρόσπτωσης**, η γωνία μεταξύ της ακτινικής συνιστώσας της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια και της καθέτου στην επιφάνεια αυτή.

Επίσης ορίζονται συμπληρωματικές γωνίες που περιγράφουν τη θέση του ήλιου στον ουρανό:

- θ_z **ζενιθιακή γωνία**, η γωνία μεταξύ της κατακορύφου και της ευθείας με τον ήλιο, ή η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια
- α_s **γωνία ανύψωσης ήλιου**, η γωνία μεταξύ του ορίζοντα και της ευθείας με τον ήλιο, συμπληρωματική της ζενιθιακής γωνίας.
- γ_s **αζιμούθια γωνία ήλιου**, η γωνιακή απόκλιση από το νότο της προβολής της ακτινικής συνιστώσας στο οριζόντιο επίπεδο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.6. Αποκλίσεις ανατολικά του νότου είναι αρνητικές και δυτικά του νότου θετικές.



Σχ. 3.6 Γωνίες προσδιορισμού θέσης επιπέδου και ήλιου

Η ηλιακή απόκλιση δ μπορεί να βρεθεί από την εξίσωση του Cooper (1969):

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (3.5)$$

Σημειώνεται ότι η ηλιακή απόκλιση είναι συνεχής συνάρτηση του χρόνου, ωστόσο κατά τη διάρκεια ενός 24-ώρου μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και λαμβάνεται ίση με την τιμή που έχει κατά το μεσημέρι. Ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής της επιτυγχάνεται στις ισημερίες, οπότε είναι ίσος με $0,5^\circ/\mu\epsilon\rho\alpha$ περίπου. Για τις περισσότερες τεχνολογικές εφαρμογές, η θεώρηση ενός ακεραίου n για την περιγραφή της ημέρας του έτους καταλήγει σε ικανοποιητικό υπολογισμό της απόκλισης.

Υπάρχει ένα σύνολο χρήσιμων σχέσεων μεταξύ των παραπάνω γωνιών. Οι εξισώσεις που συνδέουν τη γωνία πρόσπτωσης θ της ακτινικής συνιστώσας της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια, με τις άλλες γωνίες είναι:

$$\begin{aligned}
 \cos \theta &= \sin \delta \sin \phi \cos \beta \\
 &- \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\
 &+ \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\
 &+ \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\
 &+ \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\text{και } \cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \tag{3.7}$$

Σε αρκετές περιπτώσεις που συναντώνται συχνά στην πράξη η παραπάνω εξίσωση δύναται να απλοποιηθεί:

- Για κεκλιμένες επιφάνειες στραμμένες προς το νότο ή το βορρά, οπότε η αζιμούθια γωνία τους γ είναι 0° ή 180° (μια πολύ κοινή περίπτωση για σταθερούς επίπεδους συλλέκτες), ο τελευταίος όρος μηδενίζεται.
- Για κάθετες επιφάνειες, $\beta=90^\circ$ και η εξίσωση γίνεται:

$$\cos \theta = -\sin \delta \cos \phi \cos \gamma + \cos \delta \sin \phi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \tag{3.7.α}$$

- Για οριζόντιες επιφάνειες, η γωνία πρόσπτωσης συμπίπτει με τη ζενιθιακή γωνία του ήλιου, θ_z . Η τιμή της κυμαίνεται από 0° έως 90° όταν ο ήλιος βρίσκεται πάνω από τον ορίζοντα. Σε αυτήν την περίπτωση, $\beta=0^\circ$, και η εξίσωση γίνεται

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \tag{3.7.β}$$

Η αζιμούθια γωνία του ήλιου γ_s μπορεί να λάβει τιμές στο διάστημα από -180° μέχρι 180° . Για βόρεια ή νότια γεωγραφικά πλάτη μεταξύ $-23,45^\circ$ έως $66,45^\circ$, η γ_s θα βρίσκεται μεταξύ 90° και -90° για ημέρες με λιγότερες από 12 ώρες ηλιοφάνεια (το χρονικό διάστημα από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου). Για ημέρες με περισσότερες από 12 ώρες ηλιοφάνειας, η γ_s θα είναι μεγαλύτερη από 90° ή μικρότερη από -90° νωρίς και αργά την ημέρα, οπότε ο ήλιος βρίσκεται βόρεια της Α-

Δ γραμμής στο βόρειο ημισφαίριο ή νότια της Α-Δ γραμμής στο νότιο ημισφαίριο. Υπολογίζεται λοιπόν από την εξής σχέση

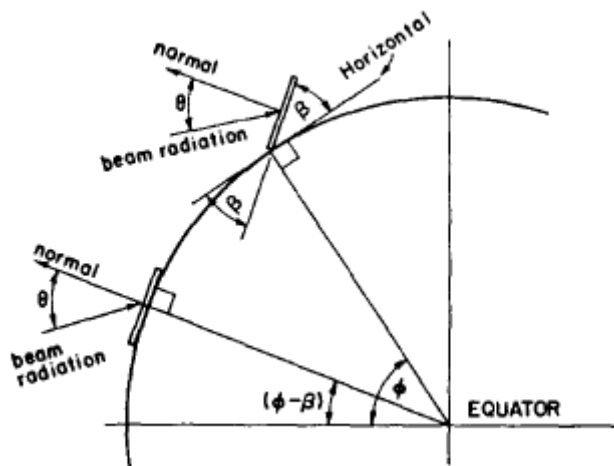
$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \alpha_s \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha_s \cos \phi} \quad (3.8)$$

Χρήσιμες εξισώσεις για τη γωνία πρόσπτωσης κεκλιμένων επιφανειών, στραμμένων προς το νότο ή το βορρά, προκύπτουν από το γεγονός ότι επιφάνειες με κλίση β προς νότο ή βορρά έχουν ακριβώς την ίδια γεωμετρική σχέση με την ακτινική συνιστώσα όπως μια οριζόντια επιφάνεια σε ένα νοητό γεωγραφικό πλάτος $(\phi - \beta)$. Η εν λόγω σχέση φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, για το βόρειο ημισφαίριο. Μετατρέποντας την εξίσωση 3.7.β προκύπτει

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta \quad (3.9.a)$$

Για το νότιο ημισφαίριο αρκεί να αντικατασταθεί ο όρος $(\phi - \beta)$ με $(\phi + \beta)$, ακολουθώντας τη σύμβαση προσήμου για τα ϕ και δ .

$$\cos \theta = \cos(\phi + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi + \beta) \sin \delta \quad (3.9.b)$$



Σχ. 3.7 Ισοδύναμες γωνίες κεκλιμένων επιφανειών

Τέλος, η ωριαία γωνία δύσης του ήλιου ω_s προκύπτει από την 3.7.β, θέτοντας $\theta_z = 90^\circ$:

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta \quad (3.10)$$

Συνεπώς ο ήλιος ανατέλλει σε γωνία $-\omega_s$ και δύει σε $+\omega_s$.

Ο αριθμός των ωρών που διαρκεί η κάθε ημέρα, δηλαδή ο χρόνος από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, θα είναι:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3.11)$$

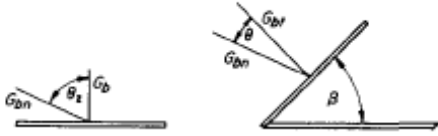
3.7 Λόγος Ακτινικής Συνιστώσας σε Κεκλιμένη Επιφάνεια προς Ακτινική Συνιστώσα σε Οριζόντια

Για τους σκοπούς των διαδικασιών σχεδίασης και υπολογισμών απόδοσης, καθίσταται συχνά αναγκαίος ο υπολογισμός της ωριαίας ακτινοβολίας σε ένα κεκλιμένο επίπεδο συλλέκτη από μετρήσεις ή εκτιμήσεις ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα οριζόντιο επίπεδο. Τα πιο συνηθισμένα διαθέσιμα δεδομένα αφορούν την ολική ακτινοβολία σε ώρες ή ημέρες στο οριζόντιο επίπεδο, ενώ στην ουσία αυτά που χρειάζονται είναι η ακτινική και η διάχυτη συνιστώσα στο επίπεδο ενός συλλέκτη τυχαίας κλίσης.

Ο γεωμετρικός παράγοντας R_b , ο λόγος της ακτινικής συνιστώσας σε κεκλιμένη επιφάνεια προς την ακτινική συνιστώσα σε οριζόντια επιφάνεια οποιαδήποτε χρονική στιγμή, προκύπτει με τη βοήθεια της σχέσης 3.6. Το παρακάτω σχήμα εξηγεί παραστατικά τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινικής συνιστώσας σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο. Ο λόγος G_{bT}/G_b δίνεται από την:

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n} \cos \theta}{G_{b,n} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3.12)$$

όπου οι σχέσεις των $\cos\theta$ και $\cos\theta_z$ έχουν ήδη παρατεθεί.



Σχ. 3.8 Ακτινική συνιστώσα σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο

Η βέλτιστη γωνία αζιμούθιου για επίπεδους συλλέκτες είναι συνήθως 0° στο βόρειο ημισφαίριο (ή 180° στο νότιο ημισφαίριο). Είναι λοιπόν σύνηθες να ισχύει $\gamma=0^\circ$ (ή $\gamma=180^\circ$). Σε αυτήν την περίπτωση, οι εξισώσεις 3.7.β και 3.9 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των $\cos\theta_z$ και $\cos\theta$ αντίστοιχα, καταλήγοντας για το βόρειο ημισφαίριο, για $\gamma=0^\circ$, στην

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (3.13)$$

Στο νότιο ημισφαίριο, $\gamma=180$, και η αντίστοιχη εξίσωση είναι:

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (3.14)$$

Σημειώνεται εδώ ότι η παραπάνω διαδικασία υπολογισμού είναι ικανοποιητική για τις περισσότερες ώρες της ημέρας, ωστόσο στις ώρες κοντά στην ανατολή και τη δύση του ηλίου μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες τιμές για το R_b . Η ηλιακή απολαβή τις ώρες αυτές είναι σχεδόν πάντα μηδενική ή αμελητέα ποσότητα σε σύγκριση με τη συνολική ημερήσια απόδοση του συλλέκτη. Ως εκ τούτου, μη ρεαλιστικές τιμές για το R_b και κατά συνέπεια για το I_b δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

3.8 Ακτινοβολία εκτός Ατμόσφαιρας σε Οριζόντιο Επίπεδο

Σε αρκετές περιπτώσεις υπολογισμών ακτινοβολίας είναι πιο βολικό να χρησιμοποιούνται κανονικοποιημένα μεγέθη ακτινοβολίας, δηλαδή ο λόγος της ακτινοβολίας προς τη θεωρητικά μέγιστη, που θα ήταν διαθέσιμη εάν δεν υπήρχε καθόλου ατμόσφαιρα. Για αυτούς τους υπολογισμούς, που αναλύονται στη συνέχεια του κεφαλαίου, είναι αναγκαία μια μέθοδος προσδιορισμού της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας.

Σε κάθε χρονική στιγμή, η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα ισούται με την ακτινοβολία G_{on} (σχέση 3.1) διαιρούμενη με το λόγο R_b :

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \cos \theta_z \quad (3.15)$$

όπου G_{sc} η ηλιακή σταθερά και n η ημέρα του έτους. Συνδυάζοντας τώρα την εξίσωση 3.7.β που δίνει το $\cos \theta_z$ με την παραπάνω εξίσωση, προκύπτει η G_o για οριζόντιο επίπεδο οποιαδήποτε χρονική στιγμή μεταξύ ανατολής και δύσης του ηλίου.

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (3.16)$$

Συχνά είναι απαραίτητο να υπολογίζεται η ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας για χρονική περίοδο μιας ώρας. Ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση στο πεδίο του χρόνου, για περίοδο ανάμεσα στις ωριαίες γωνίες ω_1 και ω_2 που καθορίζουν μία ώρα (όπου ω_2 είναι η μεγαλύτερη),

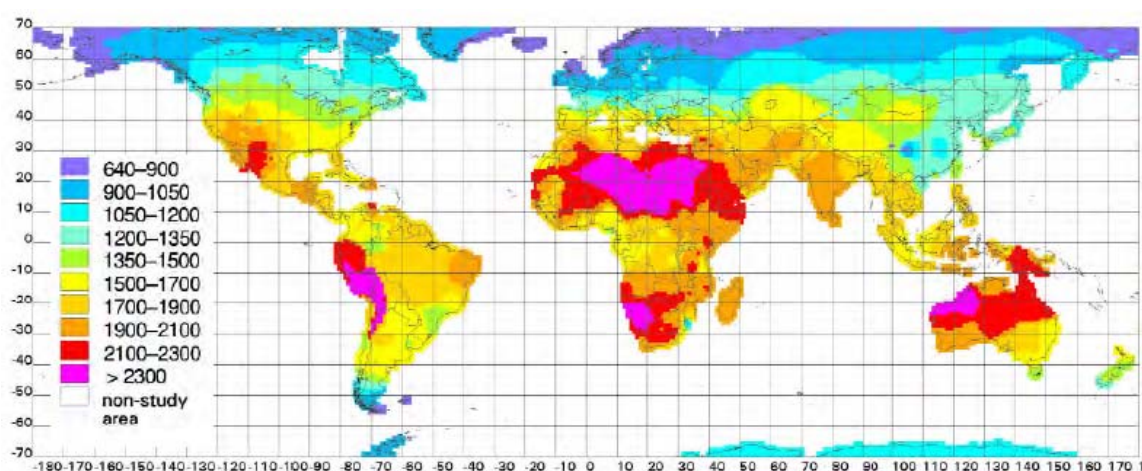
$$I_o = \frac{12 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \times \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (3.17)$$

3.9 Δεδομένα Ηλιακής Ακτινοβολίας

Δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία είναι διαθέσιμα σε διάφορες μορφές. Για τη σωστή κατανόηση και χρήση τους όμως είναι απαραίτητες οι παρακάτω πληροφορίες: εάν πρόκειται για στιγμιαίες μετρήσεις (ένταση ακτινοβολίας) ή μετρήσεις ολοκληρωμένες σε καθορισμένο χρονικό διάστημα –συνήθως ωριαίες ή ημερήσιες- (ακτινοβολία), ο χρόνος ή η χρονική διάρκεια των μετρήσεων, εάν οι μετρήσεις αναφέρονται στην άμεση, τη διάχυτη ή την ολική ακτινοβολία, τα όργανα μέτρησης, τον προσανατολισμό της επιφάνειας, και εάν πρόκειται για μέσες τιμές την περίοδο στην οποία αναφέρονται.

Τα περισσότερα δεδομένα ακτινοβολίας που είναι διαθέσιμα αναφέρονται σε οριζόντιο επίπεδο, περιλαμβάνουν τόσο την άμεση όσο και τη διάχυτη συνιστώσα της ακτινοβολίας. Ο τύπος μετρήσεων που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι οι ωριαίες τιμές ολικής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, I , για την περίοδο ενός έτους. Η μονάδα μέτρησής τους είναι MJ/m^2 .

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένας παγκόσμιος χάρτης της προσπίπτουσας στη γη ηλιακής ακτινοβολίας [13]. Ενάντια στις προβλέψεις η μέση ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη κοντά στους τροπικούς παρά στον ισημερινό εξαιτίας των νεφώσεων που σκεπάζουν αυτές τις περιοχές. Στα υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη η ηλιακή ακτινοβολία είναι μικρότερη εξαιτίας του υψηλότερου ύψους στο οποίο βρίσκεται ο ήλιος.



Σχ. 3.9 Παγκόσμιος Χάρτης Ακτινοβολίας (ετήσιες τιμές σε kWh/m^2)

3.10 Επίδραση Ατμόσφαιρας στην Ηλιακή Ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης υπόκειται σε μεταβολές τόσο λόγω των αλλαγών στην ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, όσο και σε δύο επιπρόσθετα και σημαντικά φαινόμενα. Πρώτον, η σκέδαση στην ατμόσφαιρα από μόρια αέρα, νερού και σκόνης και δεύτερον η ατμοσφαιρική απορρόφηση από O_3 , H_2O , CO_2 .

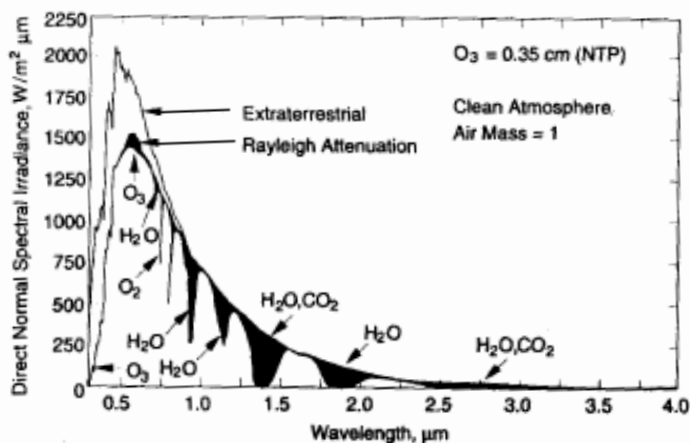
Η σκέδαση της ακτινοβολίας κατά το πέρασμά της από την ατμόσφαιρα προκαλείται από την αλληλεπίδραση της με τα μόρια του αέρα, του νερού (υδρατμοί και σταγονίδια) και της σκόνης. Ο βαθμός στον οποίον παρατηρείται σκέδαση είναι συνάρτηση του αριθμού των σωματιδίων τα οποία πρέπει να διαπεράσει η ακτινοβολία και του μεγέθους τους σε σχέση με το μήκος κύματος της, λ . Το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας μέσα από τα μόρια του αέρα περιγράφεται από τον όρο *αέριο μάζα*. Τα μόρια του νερού και της σκόνης που αλληλεπιδρούν με την ακτινοβολία εξαρτώνται τόσο από την αέριο μάζα όσο και από παράγοντες που σχετίζονται με την τοποθεσία και το χρόνο (σκόνη και υγρασία που παρατηρείται στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της ημέρας και ανάλογα με την τοποθεσία).

Τα μόρια του αέρα είναι πολύ μικρά σε σχέση με το μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας και η σκέδαση ακολουθεί το νόμο του Rayleigh (ο συντελεστής σκέδασης είναι ανάλογος του λ^{-4}). Η σκέδαση σύμφωνα με τον Rayleigh είναι σημαντική μόνο σε μικρά μήκη κύματος ενώ σε μεγαλύτερα μήκη, μεγαλύτερα του $\lambda=0,6\mu\text{m}$, έχει μικρή επίδραση στην ατμοσφαιρική διαπερατότητα. Η σκόνη και το νερό στην ατμόσφαιρα τείνουν να εμφανίζονται σε σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους. Η επίδρασή τους συνεπώς είναι πιο δύσκολο να υπολογισθεί σε σύγκριση με την επίδραση των μορίων του αέρα, καθώς η φύση και η έκταση των μορίων της σκόνης και της υγρασίας στην ατμόσφαιρα ποικίλουν πολύ σε σχέση με την τοποθεσία και το χρόνο.

Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα οφείλεται κυρίως στην απορρόφηση από το όζον στην περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας και από τους υδρατμούς νερού και το διοξείδιο του άνθρακα στην περιοχή της υπέρυθρης. Το μεγαλύτερο μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας απορροφάται από το όζον, με σχεδόν απόλυτη απορρόφηση για μήκη κύματος που βρίσκονται κάτω από τα $0,29\mu\text{m}$. Η

απορρόφηση από το όζον μειώνεται καθώς το μήκος κύματος λ αυξάνεται πάνω από τα 0.29 μm μέχρι τα 0.35 μm όπου δεν παρατηρείται καθόλου απορρόφηση. Οι υδρατμοί νερού απορροφούν σημαντικά σε διαστήματα της υπέρυθρης περιοχής του ηλιακού φάσματος με κεντρικές τιμές 1.0, 1.4 και 1.8 μm . Σε μήκη κύματος μεγαλύτερα των 2.5 μm παρατηρείται υψηλή απορρόφηση από το CO₂ και το H₂O κι έτσι η μετάδοση βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Παρ' όλα αυτά, το περιεχόμενο της ακτινοβολίας σε αυτήν την περιοχή είναι μικρότερο του 5% κι έτσι δεν προκαλούνται σημαντικές αλλαγές. Επιπλέον, η περιοχή αυτή δεν αφορά τις φωτοβολταϊκές εφαρμογές.

Οι επιδράσεις της σκέδασης από τα μόρια του αέρα και της απορρόφησης από O₃, CO₂ και H₂O στη φασματική κατανομή της ακτινικής συνιστώσας φαίνονται στο παρακάτω σχήμα για καθαρή ατμόσφαιρα.



Σχ. 3.10 Επίδραση της ατμόσφαιρας (σκέδαση και απορρόφηση) στην ηλιακή ακτινοβολία

Η φασματική κατανομή της ολικής ακτινοβολίας εξαρτάται επίσης από την κατανομή της διάχυτης συνιστώσας. Ωστόσο για τις περισσότερες τεχνολογικές εφαρμογές η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να θεωρηθεί περίπου ίδια τόσο για την ακτινική όσο και για τη διάχυτη συνιστώσα.

Εν κατακλείδι, η ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη γήινη ατμόσφαιρα έχει φασματική κατανομή όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Οι ακτίνες-X και άλλες ακτινοβολίες μικρού μήκους κύματος απορροφώνται έντονα στην ιονόσφαιρα από το άζωτο, το οξυγόνο και άλλα ατμοσφαιρικά στοιχεία. Από τη

σκοπιά των γήινων εφαρμογών αρκεί να ληφθεί υπόψη το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας ανάμεσα στα 0.29 και 2.5 μm .

3.11 Δείκτης Καθαρότητας Ατμόσφαιρας

Η συχνότητα με την οποία εμφανίζονται περίοδοι με διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας, για παράδειγμα αίθριες και συννεφιασμένες μέρες, αποτυπώνεται με το δείκτη καθαρότητας k_T . Ο δείκτης αυτός είναι ο λόγος της ωριαίας ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο προς την ωριαία ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας.

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (3.18)$$

Τα δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία I προέρχονται από μετρήσεις ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και δίνονται σε πίνακες, ενώ η τιμή για την I_0 μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά από την εξίσωση 3.17. Οι τιμές τους αναφέρονται συνήθως σε ημερήσιες μέσες τιμές, που προκύπτουν από μετρήσεις διάρκειας ενός μηνός. Ο δείκτης k_T αποτελεί χαρακτηριστικό του τόπου εγκατάστασης, και συχνά δίδεται σε πίνακες ως μέση μηνιαία τιμή. Έχει αποδειχθεί στατιστικά ότι ανεξάρτητα από το γεωγραφικό πλάτος, το ποσοστό του χρόνου κατά τον οποίο η συνολική ημερήσια ακτινοβολία είναι μικρότερη ή ίση από ορισμένη τιμή εξαρτάται άμεσα από την τιμή του k_T . Είναι επίσης διαπιστωμένο ότι όσο περισσότερο αίθρια είναι η ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της ακτινοβολίας και μικρότερο το ποσοστό της διάχυτης επί της ολικής.

3.12 Ακτινική και Διάχυτη Συνιστώσα Ωριαίας Ακτινοβολίας

Ο διαχωρισμός της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο στις συνιστώσες της, διάχυτη και ακτινική, είναι απαραίτητος καθώς οι υπολογισμοί της ακτινοβολίας σε επίπεδο αυθαίρετης κλίσης και προσανατολισμού από δεδομένα στο οριζόντιο επίπεδο απαιτούν διαφορετική αντιμετώπιση των δύο συνιστωσών.

Η συνήθης προσέγγιση είναι η συσχέτιση του κλάσματος της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, I_d/I , με τον ωριαίο δείκτη καθαρότητας, k_T . Από τις πολλές σχέσεις συσχέτισης διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας που έχουν διατυπωθεί, αυτή που χρησιμοποιείται είναι των Erbs et al:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T & , k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 & , 0.22 < k_T \leq 0.80 \\ 0.165 & , k_T > 0.80 \end{cases} \quad (3.19)$$

Με τη βοήθεια της παραπάνω εξίσωσης προκύπτει η άμεση ακτινοβολία I_b που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο αφαιρώντας από την ολική τη διάχυτη, δηλαδή

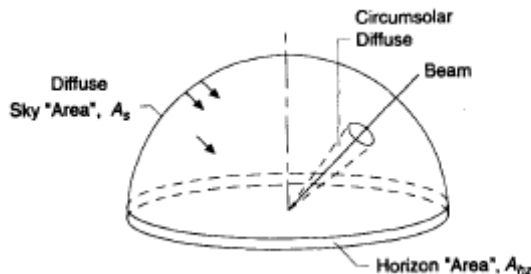
$$I_b = I - I_d \quad (3.20)$$

3.13 Ακτινοβολία σε Κεκλιμένες Επιφάνειες

Για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο όταν είναι γνωστή μόνο η ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο απαιτείται η γνώση της κατεύθυνσης με την οποία προσπίπτουν στην επιφάνεια η ακτινική και η διάχυτη συνιστώσα. Η γεωμετρική ανάλυση της κατεύθυνσης της ακτινικής συνιστώσας έχει προηγηθεί. Η κατεύθυνση με την οποία λαμβάνεται η διάχυτη ακτινοβολία, δηλαδή η κατανομή της στον ουράνιο θόλο, είναι συνάρτηση των συνθηκών συννεφιάς και ατμοσφαιρικής καθαρότητας, οι οποίες ποικίλουν σημαντικά.

Δεδομένα από συνθήκες αίθριου καιρού έχουν οδηγήσει στην περιγραφή της διάχυτης ακτινοβολίας ως σύνθεσης τριών συνιστωσών. Η πρώτη είναι η ισοτροπική συνιστώσα, που λαμβάνεται ομοιόμορφα από όλο τον ουράνιο θόλο. Η δεύτερη, περιγραμματική, λαμβάνεται από το περίγραμμα του ήλιου, προέρχεται από την ευθεία σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας και είναι συγκεντρωμένη στο τμήμα του ουρανού κοντά στον ήλιο. Η τρίτη, γνωστή ως φωτεινότητα ορίζοντα, συγκεντρώνεται κοντά στον ορίζοντα και είναι περισσότερο εμφανής σε συνθήκες

καθαρού ουρανού. Το σχήμα 3.11 δείχνει σχηματικά τις τρεις αυτές συνιστώσες της διάχυτης ακτινοβολίας.



Σχ. 3.11 Σχηματική αναπαράσταση των τριών συνιστωσών της διάχυτης ακτινοβολίας

Τα μοντέλα περιγραφής του ουράνιου θόλου που χρησιμοποιούνται εν γένει αποτελούν μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν τη διάχυτη ακτινοβολία. Προσθέτοντας την άμεση και την ανακλώμενη ακτινοβολία καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο από μετρήσεις στο οριζόντιο. Οι διαφορές ανάμεσα στα υπάρχοντα μοντέλα συνίστανται στον τρόπο με τον οποίο χειρίζονται τις τρεις συνιστώσες της διάχυτης ακτινοβολίας.

Η προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια τυχαίας κλίσης είναι το άθροισμα της άμεσης ακτινοβολίας, των τριών συνιστωσών της διάχυτης και της ανακλώμενης σε παρακείμενα αντικείμενα ή στο έδαφος (*albedo*). Δίνεται από τη σχέση

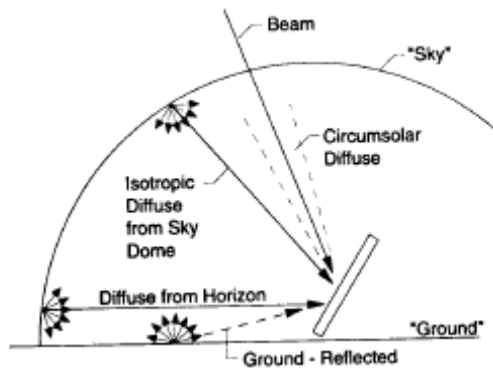
$$I_T = I_{T,b} + I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} + I_{T,d,hz} + I_{T,refl} \tag{3.21}$$

όπου οι δείκτες *iso*, *cs*, *hz* και *refl* αναφέρονται στην ισοτροπική, περιγραμματική, οριζόντια και ανακλώμενη ακτινοβολία.

3.14 Μοντέλο Ανισοτροπικού Ουρανού

Από τα διάφορα διαθέσιμα μοντέλα ουράνιου θόλου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του ανισοτροπικού ουρανού, το οποίο λαμβάνει υπόψη -σε αντίθεση με τα

άλλα μοντέλα- και τις τρεις συνιστώσες της διάχυτης ακτινοβολίας, όπως φαίνονται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 3.12 Άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία που προσπίπτει σε κεκλιμένη επιφάνεια

Οι Hay και Davies θεωρούν ότι η περιγραμματική συνιστώσα της διάχυτης ακτινοβολίας έχει την ίδια κατεύθυνση με την ακτινική· δε λαμβάνουν υπόψη τη φωτεινότητα ορίζοντα. Οι Reindl et al. προσθέτουν έναν όρο φωτεινότητας ορίζοντα στο μοντέλο των προηγούμενων, ο οποίος προτάθηκε από τον Klucher.

Το μοντέλο των Hay και Davies βασίζεται στην υπόθεση ότι το σύνολο της διάχυτης ακτινοβολίας απεικονίζεται από δύο μόνο μέρη, το ισοτροπικό και το περιγραμματικό. Έτσι, η διάχυτη ακτινοβολία σε έναν κεκλιμένο συλλέκτη γράφεται ως εξής

$$I_{d,T} = I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} \quad (3.22)$$

και

$$I_{d,T} = I_d \left[(1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + A_i R_b \right] \quad (3.23)$$

όπου A_i ένας ανισοτροπικός δείκτης και είναι συνάρτηση της ατμοσφαιρικής διαπερατότητας στην ακτινική ακτινοβολία. Υπό αίθριες συνθήκες παίρνει υψηλές τιμές, ενώ σε συνθήκες συννεφιάς, όπου απουσιάζει η ακτινική συνιστώσα, το A_i είναι μηδέν.

$$A_i = \frac{I_{bn}}{I_{on}} = \frac{I_b}{I_o} \quad (3.24)$$

Οι Reindl et al. υποστηρίζουν ότι το παραπάνω μοντέλο παρά τα ικανοποιητικά αποτελέσματα δεν λογαριάζει τη φωτεινότητα του ορίζοντα. Το τροποποιούν με την προσθήκη ενός όρου παρεμφερούς με του Klucher. Τελικά, η διάχυτη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο δίνεται από τη σχέση

$$I_{d,T} = I_d \left[(1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + A_i R_b \right] \quad (3.25)$$

όπου

$$f = \sqrt{I_b/I} \quad (3.26)$$

Όταν η ακτινική και η ανακλώμενη συνιστώσα προστεθούν, προκύπτει το HDKR μοντέλο (Hay, Davies, Klucher, Reindl μοντέλο).

Η ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια δίνεται επομένως από τη σχέση

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.27)$$

Κεφάλαιο 4

Μοντέλο Ενεργειακής Απόδοσης

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται οι εξισώσεις και οι εφαρμογές που σχετίζονται με το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκής συστοιχίας βασισμένες σε αυτό που αναπτύχθηκε στα Sandia National Laboratories. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει ηλεκτρικά, θερμικά και οπτικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων και είναι σχεδιασμένο να χρησιμοποιεί ωριαίες χρονοσειρές ηλιακής ακτινοβολίας και μετεωρολογικών δεδομένων. Η καθολικότητα και η ακρίβειά του έχουν εξακριβωθεί τόσο για επίπεδα πλαίσια (flat-plate) όλων των τεχνολογιών όσο και για συγκεντρωτικά (concentrator), όπως επίσης και για μεγάλες συστοιχίες (arrays). Οι εφαρμογές του μοντέλου αφορούν τη σχεδίαση φωτοβολταϊκών συστημάτων, βελτιστοποίηση της απόδοσης και σύγκριση των μετρούμενων τιμών με τις αναμενόμενες [6].

4.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο παρέχει μια λεπτομερή περιγραφή του μοντέλου απόδοσης φωτοβολταϊκών πλαισίων και συστοιχιών βασισμένο σε αυτό που αναπτύχθηκε στα Sandia National Laboratories. Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αρκετούς διαφορετικούς τρόπους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας για μια συγκεκριμένη εφαρμογή βασισμένη στην αναμενόμενη ισχύ ή/και ενέργεια σε ωριαία, μηνιαία ή ετήσια βάση. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρατήρηση της πραγματικής ως προς την αναμενόμενη απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος και με τον τρόπο αυτό να συμβάλλει στη διάγνωση προβλημάτων.

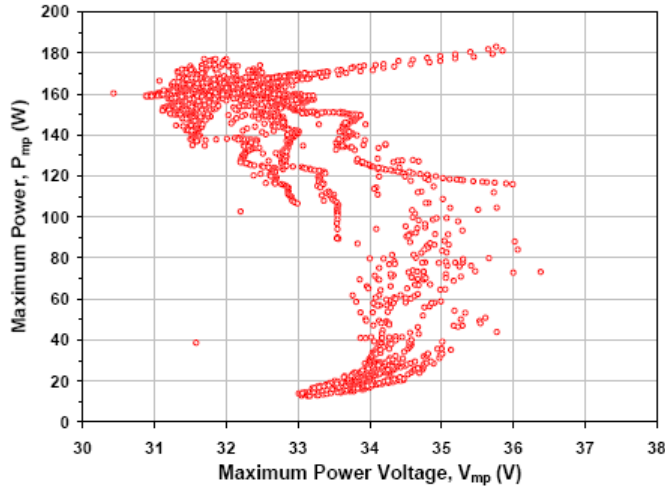
Το μοντέλο απόδοσης που περιγράφεται είναι εμπειρικό, ωστόσο επιτυγχάνει καθολικότητα και ακρίβεια από το γεγονός ότι οι ξεχωριστές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται σ' αυτό προκύπτουν από τα μεμονωμένα χαρακτηριστικά των ηλιακών στοιχείων (solar cells). Η καθολικότητα και η ακρίβεια του μοντέλου των Sandia έχουν αποδειχθεί τόσο για επίπεδα πλαίσια (όλων των τεχνολογιών) όσο και για συγκεντρωτικά, καθώς επίσης και για μεγάλες συστοιχίες πλαισίων. Στην παραγωγή φωτοβολταϊκών πλαισίων λαμβάνονται υπόψη ηλεκτρικές, θερμικές, φασματικές και οπτικές επιδράσεις. Η μοντελοποίηση της απόδοσης έχει αξιολογηθεί επιτυχώς κατά τη διάρκεια εκτεταμένων πειραμάτων και συγκριτικών μελετών με άλλα εργαστήρια και οργανισμούς ελέγχου, τόσο για διασυνδεδεμένα όσο και για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Από την προαναφερθείσα πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε σε πληθώρα πλαισίων του εμπορίου προέκυψε μια βάση δεδομένων η οποία διατηρείται στον ιστοχώρο των Sandia και περιέχει όλες τις σχετικές παραμέτρους απόδοσης. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας στο μοντέλο απόδοσης που περιγράφεται στο εν λόγω κεφάλαιο. Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη από κατασκευαστές και σχεδιαστές φωτοβολταϊκών συστημάτων.

4.2 Εξισώσεις Απόδοσης Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Ο αντικειμενικός σκοπός οποιασδήποτε δοκιμής και προσπάθειας μοντελοποίησης είναι να ποσοτικοποιήσει και να αντιγράψει πιστά το υπό εξέταση φαινόμενο. Ο έλεγχος και η μοντελοποίηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε εξωτερικό περιβάλλον αποτελούν μια περίπλοκη διαδικασία εξαιτίας των επιδράσεων από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με το περιβάλλον και τη φυσική των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό, εφαρμογή και παρατήρηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ένα μοντέλο απόδοσης πρέπει να είναι σε θέση να διαχωρίζει και να ποσοτικοποιεί την επίδραση όλων των σημαντικών παραγόντων.

Η παρακάτω γραφική παράσταση απεικονίζει την πολυπλοκότητα της προαναφερθείσας διαδικασίας χρησιμοποιώντας δεδομένα που καταγράφηκαν για ένα πολυκρυσταλλικό (mc-Si) φωτοβολταϊκό πλαίσιο πυριτίου 165-Wp (ισχύος αιχμής) για μια περίοδο πέντε ημερών τον Ιανουάριο. Η κατακόρυφη διασπορά στις τιμές της μέγιστης ισχύος P_{mp} οφείλεται πρωταρχικά σε διακυμάνσεις του επιπέδου ηλιακής ακτινοβολίας και δευτερευόντως σε επιδράσεις από το ηλιακό φάσμα, τη θερμοκρασία πλαισίου και τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στοιχείων. Η οριζόντια διασπορά στις αντίστοιχες τιμές τάσεως V_{mp} οφείλεται κατά κύριο λόγο στη θερμοκρασία πλαισίου με μικρότερη επίδραση από την ηλιακή ακτινοβολία και τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στοιχείων. Το μοντέλο απόδοσης που περιγράφεται εδώ διαχωρίζει τις επιδράσεις αυτές έτσι ώστε η χαοτική συμπεριφορά του σχήματος 4.1 να μπορεί να μοντελοποιηθεί με κατάλληλες εξισώσεις, όπως καταδεικνύεται ακολούθως.



Σχ. 4.1 Διάγραμμα μετρούμενων τιμών P_{mp} και V_{mp} πολυκρυσταλλικού πλαισίου

Οι παρακάτω εξισώσεις προσδιορίζουν το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την ανάλυση και μοντελοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των ΦΒ πλαισίων. Οι εξισώσεις περιγράφουν την ηλεκτρική συμπεριφορά μεμονωμένων ΦΒ πλαισίων και μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα για οποιοδήποτε συνδυασμό πλαισίων - συνδεδεμένων σε σειρά ή παράλληλα- μιας συστοιχίας. Οι ίδιες εξισώσεις εφαρμόζονται εξίσου καλά για μεμονωμένα στοιχεία, πλαίσια, συστοιχίες τόσο επίπεδων όσο και συγκεντρωτικών πλαισίων.

Οι εξισώσεις (4.1) έως (4.10) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αναμενόμενης ισχύος και ενέργειας που παράγεται από ένα πλαίσιο θεωρώντας ότι προκαθορισμένοι συντελεστές απόδοσης πλαισίων καθώς και δεδομένα ακτινοβολίας είναι διαθέσιμα. Τα απαραίτητα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και μετεωρολογικά δεδομένα λαμβάνονται από υπάρχουσες χρονοσειρές ή από απευθείας μετρήσεις. Τα τρία χαρακτηριστικά σημεία της καμπύλης I-V ενός πλαισίου, ρεύμα βραχυκύκλωσης, τάση ανοικτοκύκλωσης και σημείο μέγιστης ισχύος δίνονται από τις πρώτες τέσσερις εξισώσεις. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα τρία αυτά σημεία σε συνδυασμό με δύο πρόσθετα που καθορίζουν καλύτερα τη μορφή της καμπύλης.

$$I_{sc} = I_{sco} \cdot f_1(AM_a) \cdot \left\{ \left(E_b \cdot f_2(AOI) + f_d E_{diff} \right) / E_o \right\} \cdot \left\{ 1 + a_{I_{sc}} \cdot (T_c - T_o) \right\} \quad (4.1)$$

$$I_{mp} = I_{mpo} \cdot \left\{ C_0 \cdot E_e + C_1 \cdot E_e^2 \right\} \cdot \left\{ 1 + a_{I_{mp}} \cdot (T_c - T_o) \right\} \quad (4.2)$$

$$V_{oc} = V_{oco} + N_s \cdot \delta(T_c) \cdot \ln(E_e) + \beta_{V_{oc}}(E_e) \cdot (T_c - T_o) \quad (4.3)$$

$$V_{mp} = V_{mpo} + C_2 \cdot N_s \cdot \delta(T_c) \cdot \ln(E_e) + C_3 \cdot N_s \cdot \{\delta(T_c) \cdot \ln(E_e)\}^2 + \beta_{V_{mp}}(E_e) \cdot (T_c - T_o) \quad (4.4)$$

$$P_{mp} = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad (4.5)$$

$$FF = P_{mp} / (I_{sc} \cdot V_{oc}) \quad (4.6)$$

όπου

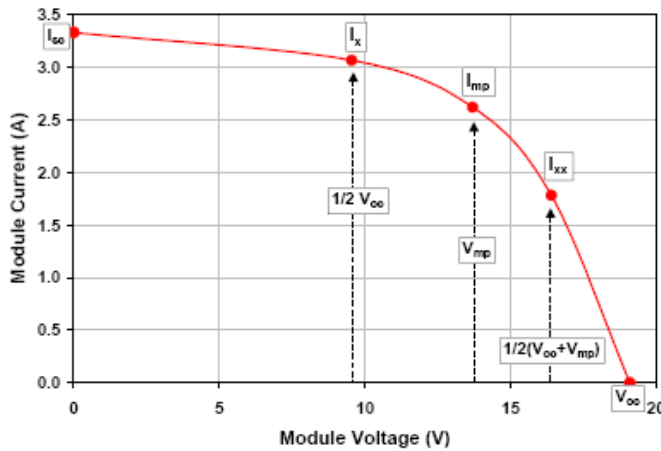
$$E_e = I_{sc} / [I_{sco} \cdot \{1 + a_{I_{sc}} \cdot (T_c - T_o)\}] \quad (4.7)$$

$$\delta(T_c) = n \cdot k \cdot (T_c + 273.15) / q \quad (4.8)$$

$$I_x = I_{xo} \cdot \{C_4 \cdot E_e + C_5 \cdot E_e^2\} \cdot \{1 + a_{I_{sc}} \cdot (T_c - T_o)\} \quad (4.9)$$

$$I_{xx} = I_{xxo} \cdot \{C_6 \cdot E_e + C_7 \cdot E_e^2\} \cdot \{1 + a_{I_{mp}} \cdot (T_c - T_o)\} \quad (4.10)$$

Τα δύο πρόσθετα σημεία της καμπύλης I-V προσδιορίζονται από τις εξισώσεις (9) και (10). Το τέταρτο σημείο (I_x) υπολογίζεται για τάση ίση με το μισό της τάσης ανοικτοκύκλωσης (V_{oc}), και το πέμπτο (I_{xx}) για τάση ίση με το ημίαθροισμα της τάσης ανοικτοκύκλωσης και της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος (V_{mp}). Τα πέντε σημεία που ορίζονται από το μοντέλο απόδοσης προσδιορίζουν τη βασική μορφή της καμπύλης I-V και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μιας καλής προσέγγισης ολόκληρης της καμπύλης I-V σε περιπτώσεις που η τάση λειτουργίας που απαιτείται είναι διαφορετική από τη βέλτιστη (V_{mp}).



Σχ. 4.2 Απεικόνιση της I-V καμπύλης με επισήμανση των σημείων που υπολογίζει το μοντέλο

Ακολούθως εξετάζονται όλες οι παράμετροι και οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω εξισώσεις και οι οποίες προσδιορίζουν το μοντέλο απόδοσης. Δίνονται οι ορισμοί των παραμέτρων που σχετίζονται με τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, την εξάρτηση από την ακτινοβολία, τις φασματικές και οπτικές επιδράσεις, τις πρότυπες συνθήκες αναφοράς, τη θερμοκρασιακή εξάρτηση και τη θερμοκρασία λειτουργίας πλαισίου.

Βασικοί Ορισμοί Παραμέτρων Πλαισίου

I_{sc}	= Ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)
I_{mp}	= Ρεύμα σημείου μέγιστης ισχύος (A)
I_x	= Ρεύμα σε τάση $V=0.5V_{oc}$ (A)
I_{xx}	= Ρεύμα σε τάση $V=0.5(V_{oc}+V_{mp})$ (A)
V_{oc}	= Τάση ανοικτοκύκλωσης (V)
V_{mp}	= Τάση σημείου μέγιστης ισχύος (V)
P_{mp}	= Μέγιστη ισχύς (W)
FF	= Συντελεστής Πλήρωσης (αδιάστατο)
N_s	= Αριθμός φβ στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά σε μια ακολουθία
N_p	= Αριθμός ακολουθιών συνδεδεμένων παράλληλα σε ένα πλαίσιο
k	= Σταθερά του Boltzmann
q	= Στοιχειώδες φορτίο
T_c	= Θερμοκρασία στοιχείων στο εσωτερικό του πλαισίου
T_o	= Θερμοκρασία αναφοράς (τυπικά 25°C)
E_o	= Ακτινοβολία αναφοράς (τυπικά 1000W/m ²)
$\delta(T_c)$	= “θερμική τάση” ανά στοιχείο σε θερμοκρασία T_c .

4.3 Παράμετροι Εξαρτώμενοι από την Ακτινοβολία

Οι παρακάτω παράμετροι απόδοσης πλαισίου συσχετίζουν την τάση και το ρεύμα του πλαισίου και κατά συνέπεια τη μορφή της καμπύλης I-V, με το επίπεδο ακτινοβολίας.

Η εικόνα 4.3 παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο οι μετρηθείσες τιμές V_{oc} και V_{mp} του πλαισίου μεταβάλλονται σε συνάρτηση με την ενεργό ακτινοβολία. Σε αυτό το παράδειγμα οι τιμές που παρουσιάστηκαν στην εικόνα 1 μεταφράζονται αρχικά σε κοινή θερμοκρασία (50°C) προκειμένου να εξαλειφθεί η θερμοκρασιακή εξάρτηση. Έπειτα, οι συντελεστές ($n, C2, C3$) προσδιορίζονται με τη βοήθεια πολυωνυμικής προσέγγισης εφαρμοσμένης στις εξισώσεις (4.3) και (4.4) και χρησιμοποιούνται κατόπιν στο μοντέλο απόδοσης για τον υπολογισμό της τάσης συναρτήσει της ακτινοβολίας σε διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας. Η εγκυρότητα αυτής της προσέγγισης έχει επιβεβαιωθεί από το γεγονός ότι πλήθος πειραματικών σημείων, που έχουν απεικονιστεί προηγουμένως, καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια αίθριων και συννεφιασμένων καιρικών συνθηκών πέντε ημερών με επίπεδο ακτινοβολίας από 80 έως 1200 W/m^2 και θερμοκρασίας πλαισίου από 6 έως 45°C .

Η εικόνα 4.4 παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο οι μετρηθείσες τιμές ρεύματος πλαισίου ($I_{sc}, I_{mp}, I_x, I_{xx}$) μεταβάλλονται σε συνάρτηση με την ενεργό ακτινοβολία. Ομοίως με την ανάλυση που προηγήθηκε για την τάση, οι τιμές που μετρήθηκαν μεταφράστηκαν σε κοινή θερμοκρασία ώστε να εξαλειφθεί η θερμοκρασιακή εξάρτηση. Οι συντελεστές ($C0, C1, C4, C5, C6, C7$) που σχετίζονται με τα I_{mp}, I_x και I_{xx} προσδιορίστηκαν στη συνέχεια με τη βοήθεια πολυωνυμικής προσέγγισης εφαρμοσμένης στις εξισώσεις (4.2), (4.9) και (4.10). Η γραφική παράσταση του I_{sc} ως προς την ενεργό ακτινοβολία είναι πάντα γραμμική. Οι σχέσεις για τις τρεις άλλες τιμές του ρεύματος δύναται να είναι μη γραμμικές (παραβολικές) προκειμένου να προσεγγίζουν καλύτερα τη μορφή της πραγματικής καμπύλης I-V σε ένα ευρύ φάσμα ακτινοβολίας. Το μοντέλο, επίσης, εκμεταλλεύεται το γεγονός μιας “γνωστής” κατάστασης, ότι δηλαδή στο επίπεδο της μηδενικής ακτινοβολίας τα ρεύματα είναι μηδενικά, με αποτέλεσμα να έχει ισχύ ακόμα και σε επίπεδα χαμηλής ακτινοβολίας. Οι ορισμοί των προαναφερθέντων συντελεστών είναι οι ακόλουθοι:

$E_e = H$ «ενεργός» ηλιακή ακτινοβολία όπως ορίζεται από την εξίσωση (4.7). Η μεταβλητή αυτή περιγράφει το κλάσμα της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου και στο οποίο ουσιαστικά τα ΦΒ στοιχεία αποκρίνονται. Οι τιμές που λαμβάνει υπολογίζονται με βάση τα δεδομένα της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο όπως δίνονται από υπάρχουσες χρονοσειρές.

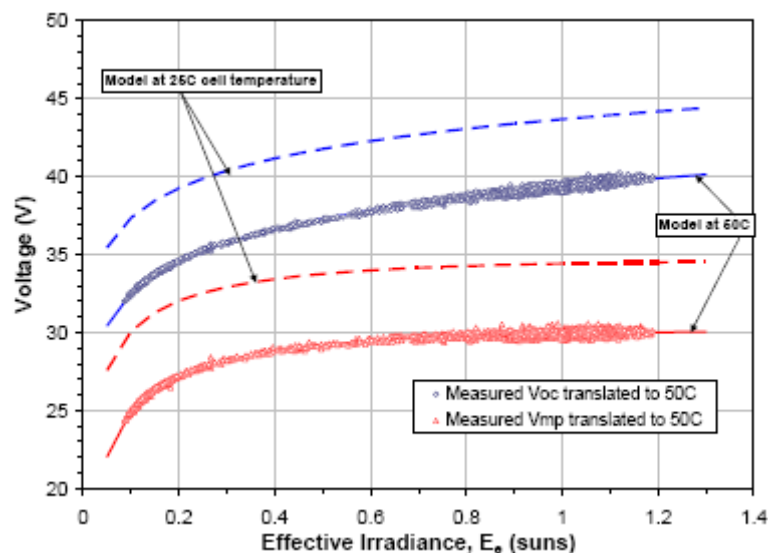
$C0, C1 =$ Εμπειρικά προσδιορισμένοι συντελεστές που συσχετίζουν το ρεύμα I_{mp} με την ενεργό ακτινοβολία, E_e . $C0+C1=1$ (αδιάστατοι)

$C2, C3$ = Εμπειρικά προσδιορισμένοι συντελεστές που συσχετίζουν την τάση V_{mp} με την ενεργό ακτινοβολία. (Ο $C2$ είναι αδιάστατος και ο $C3$ έχει μονάδες $1/V$)

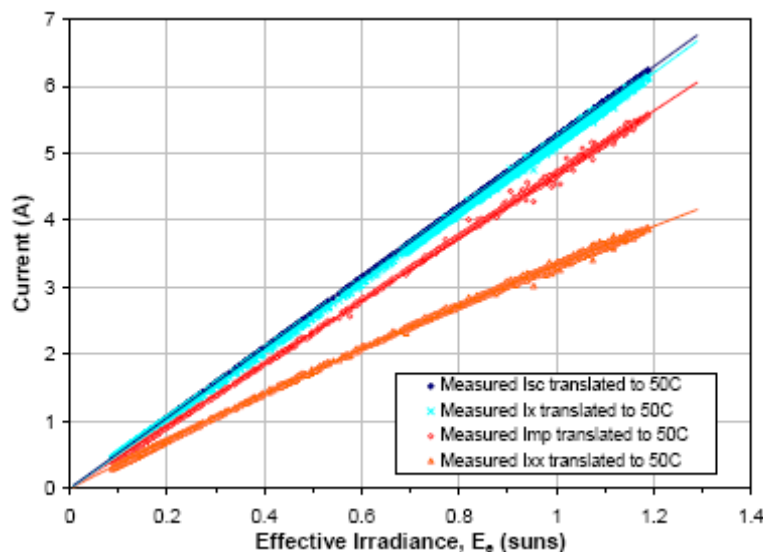
$C4, C5$ = Εμπειρικά προσδιορισμένοι συντελεστές που συσχετίζουν το ρεύμα (I_x) με την ενεργό ακτινοβολία, E_e . $C4+C5=1$ (αδιάστατοι)

$C6, C7$ = Εμπειρικά προσδιορισμένοι συντελεστές που συσχετίζουν το ρεύμα (I_{xx}) με την ενεργό ακτινοβολία, E_e . $C6+C7=1$ (αδιάστατοι)

n = Εμπειρικά προσδιορισμένος «συντελεστής ποιότητας δίοδου» που σχετίζεται με τα μεμονωμένα ΦΒ στοιχεία ενός πλαισίου, με τυπική τιμή κοντά στη μονάδα (αδιάστατος). Προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας μετρηθείσες τιμές της V_{oc} μεταφρασμένες σε κοινή θερμοκρασία και σχεδιασμένες συναρτήσεις του φυσικού λογαρίθμου της ενεργού ακτινοβολίας. Η σχέση αυτή είναι τυπικά γραμμική σε ένα ευρύ φάσμα ακτινοβολίας (~0,1 έως 1,4 ήλιο).



Σχ. 4.3 Μεταβολή τάσεων συναρτήσει της ενεργού ακτινοβολίας



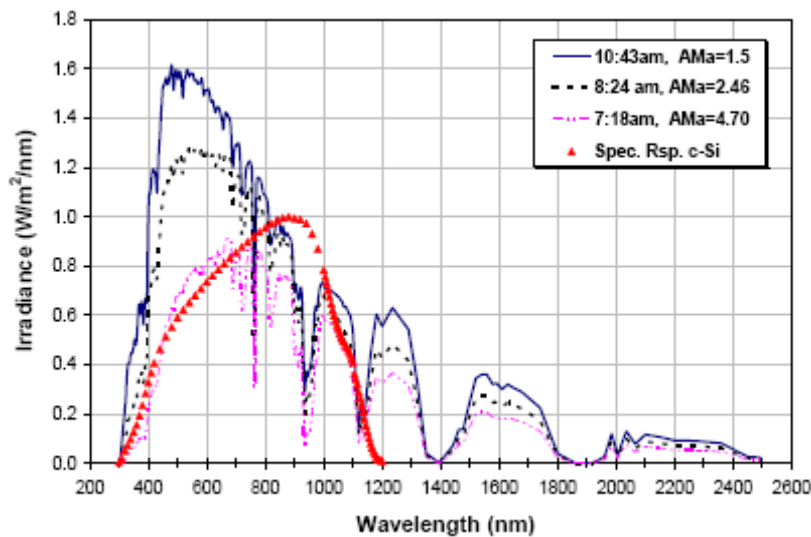
Σχ. 4.4 Μεταβολή ρευμάτων συναρτήσει της ενεργού ακτινοβολίας

4.4 Φασματικές και Οπτικές Παράμετροι

Για το σχεδιασμό συστημάτων οι απαιτούμενες από το μοντέλο απόδοσης μεταβλητές ακτινοβολίας λαμβάνονται από βάσεις δεδομένων ή από μετεωρολογικά μοντέλα που δίνουν εκτιμήσεις μέσω ωριαίων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας και καιρικών συνθηκών. Τα δεδομένα αυτά επεξεργάζονται με διάφορες μεθόδους προκειμένου να υπολογιστεί η αναμενόμενη ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια φωτοβολταϊκού πλαισίου, αυθαίρετου προσανατολισμού, όπως καθορίζεται από το σχεδιασμό του συστήματος και την εφαρμογή. Από την άλλη, σε πειραματικές δοκιμές η ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του πλαισίου προκύπτει συνήθως από μετρήσεις και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται απευθείας στο μοντέλο απόδοσης.

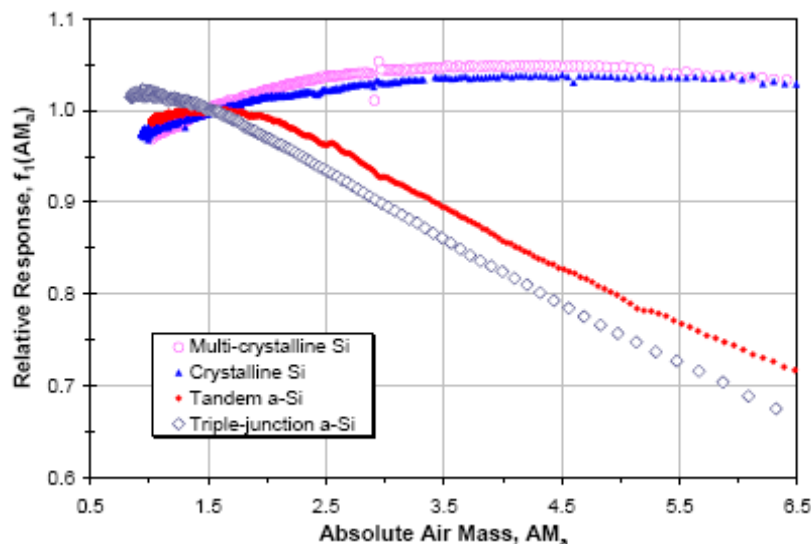
Οι εμπειρικές συναρτήσεις $f1(AMa)$ και $f2(AOI)$ ποσοτικοποιούν την επίδραση των διακυμάνσεων στο ηλιακό φάσμα και των οπτικών απωλειών που οφείλονται στη γωνία πρόσπτωσης στο ρεύμα βραχυκύκλωσης του πλαισίου. Αυτές οι συναρτήσεις προσδιορίζονται από πειραματικούς ελέγχους που διεξάγονται σε πραγματικές συνθήκες. Ο σκοπός των δύο αυτών συναρτήσεων είναι η εκτίμηση των συστηματικών επιδράσεων που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια κυρίως αίθριων συνθηκών οπότε συλλέγεται και η πλειονότητα της ηλιακής ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, η εικόνα 5 απεικονίζει πώς η κατανομή του ηλιακού φάσματος

μεταβάλλεται καθώς η ημέρα προχωράει από το πρωί στο μεσημέρι, έχοντας ως αποτέλεσμα μια συστηματική επίδραση στο κανονικοποιημένο ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός τυπικού στοιχείου Si. Για κρυσταλλικά πλαίσια πυριτίου, το κανονικοποιημένο ρεύμα I_{sc} είναι σχετικά αυξημένο σε υψηλές αέριες μάζες (AM) από ότι είναι το ηλιακό μεσημέρι.



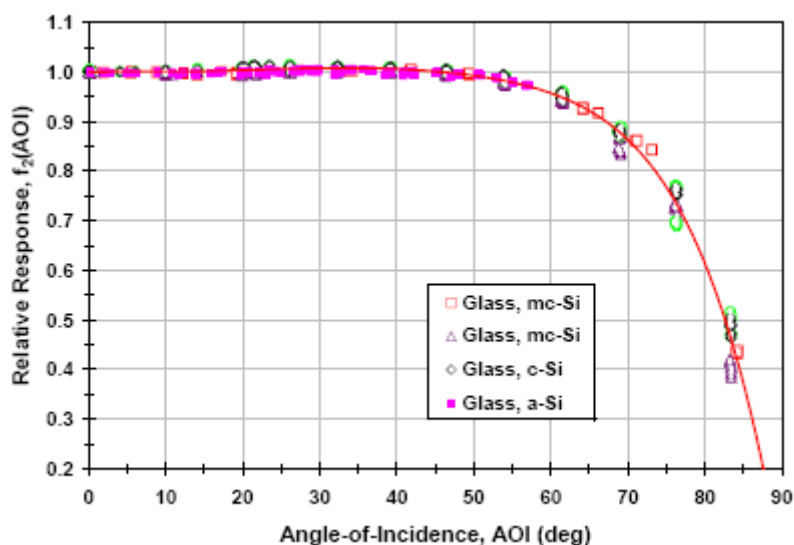
Σχ. 4.5 Μεταβολές ηλιακού φάσματος για διαφορετικές τιμές αέριας μάζας.

Οι επιδράσεις από παροδικά σύννεφα, καπνό, σκόνη και άλλα μετεωρολογικά φαινόμενα λογίζονται στην πράξη τυχαίες και ότι κατά μέσο όρο σταθμίζονται σε εβδομαδιαία, μηνιαία ή ετήσια βάση. Για πλαίσια του ίδιου κατασκευαστή, οι δύο παραπάνω συναρτήσεις μπορούν να θεωρηθούν καθολικές, εφόσον ο τύπος των στοιχείων και το υλικό της υπερκείμενης επιφάνειας του πλαισίου (πχ γυαλί) είναι τα ίδια. Οι εικόνες 4.6 και 4.7 παρουσιάζουν τυπικά παραδείγματα των δύο εμπειρικά προσδιορισμένων συναρτήσεων.



Σχ. 4.6 Μεταβολή της f_1 συναρτήσεως της αέριας μάζας

Στην εικόνα 4.6 παρατηρείται ότι η επίδραση από το μεταβαλλόμενο ηλιακό φάσμα είναι σχετικά μικρή για τιμές αέριας μάζας μεταξύ 1 και 2. Στα πλαίσια της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής, αξίζει να σημειωθεί ότι πάνω από το 90% της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός έτους βρίσκεται σε τιμές αέριας μάζας μικρότερες από 3. Συνεπώς, η φασματική επίδραση για τιμές αέριας μάζας μεγαλύτερες από 3 είναι βασικά ακαδημαϊκού ενδιαφέροντος. Όπως σημειώνεται στη βιβλιογραφία, η επίδραση των μεταβολών του ηλιακού φάσματος στην ετήσια ενεργειακή παραγωγή είναι αρκετά μικρή, κάτω από 3%.



Σχ. 4.7 Μεταβολή της f_2 συναρτήσεως της γωνίας πρόσπτωσης

Η εικόνα 4.7 δείχνει ότι η επίδραση των οπτικών απωλειών (απώλειες ανάκλασης) για επίπεδα πλαίσια είναι τυπικά αμελητέα μέχρις ότου η γωνία πρόσπτωσης να ξεπεράσει τις 55°. Οι απώλειες αυτές προστίθενται στην “κλασική” απώλεια συνημιτόνου που οφείλεται στο γεγονός ότι η επιφάνεια του πλαισίου δεν είναι εν γένει κάθετη στη διεύθυνση των ακτίνων του ήλιου. Η αθροιστική επίδραση (απώλεια) στη διάρκεια ενός έτους πρέπει να ληφθεί υπόψη ανάλογα με το σχεδιασμό του συστήματος και τον προσανατολισμό του πλαισίου. Για πλαίσια που “ιχνηλατούν” τον ήλιο δεν παρουσιάζεται οπτική απώλεια. Στην περίπτωση κατακόρυφων πλαισίων, τοποθετημένων στην νότια όψη κτιρίου, οι ετήσιες ενεργειακές απώλειες λόγω ανάκλασης είναι περίπου 5%. Οι ορισμοί των σχετικών παραμέτρων είναι οι ακόλουθοι:

E_b = Ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου, (W/m^2)

E_{diff} = Διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου, (W/m^2)

f_d = Κλάσμα της διάχυτης ακτινοβολίας που λαμβάνεται από το πλαίσιο, τυπικά ίσο με τη μονάδα για επίπεδα πλαίσια

E_e = Ενεργός ηλιακή ακτινοβολία στην οποία τα ΦΒ στοιχεία αποκρίνονται, (αδιάστατο ή “ήλιοι”)

E_o = Ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς, τυπικά $1000W/m^2$

AM_a = Απόλυτη αέρια μάζα, (αδιάστατη). Η τιμή της υπολογίζεται από τη γωνία ανύψωσης του ήλιου και το υψόμετρο της τοποθεσίας, και παρέχει μια σχετική μέτρηση για το μήκος της διαδρομής που ακολουθεί ο ήλιος μέσα από την ατμόσφαιρα. $AM_a = 1$ στο επίπεδο της θάλασσας όταν ο ήλιος είναι ακριβώς πάνω από το σημείο εξέτασης.

AOI = Γωνία πρόσπτωσης του ήλιου, (μοίρες). AOI είναι η γωνία μεταξύ της καθέτου στην επιφάνεια του πλαισίου και της ακτινικής συνιστώσας του ήλιου.

T_c = Θερμοκρασία των στοιχείων στο εσωτερικό του πλαισίου, ($^{\circ}C$). Προσδιορίζεται από μετρήσεις θερμοκρασίας στην πίσω όψη του πλαισίου, ή από θερμοκρασιακό μοντέλο χρησιμοποιώντας δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και μετεωρολογικά δεδομένα.

$f1(AMa)$ = Εμπειρικά προσδιορισμένη πολυώνυμική συνάρτηση που σχετίζει την επίδραση του ηλιακού φάσματος στο ρεύμα I_{sc} με τη μεταβολή της αέριας μάζας κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπου:

$$f1(AMa) = a0 + a1 \cdot AMa + a2 \cdot (AMa)^2 + a3 \cdot (AMa)^3 + a4 \cdot (AMa)^4$$

$f2(AOI)$ = Εμπειρικά προσδιορισμένη πολυωνυμική συνάρτηση που σχετίζει την επίδραση των οπτικών απωλειών στο ρεύμα I_{sc} με τη γωνία πρόσπτωσης (AOI), όπου:

$$f1(AOI) = b0 + b1 \cdot AOI + b2 \cdot (AOI)^2 + b3 \cdot (AOI)^3 + b4 \cdot (AOI)^4 + b5 \cdot (AOI)^5$$

4.5 Παράμετροι στις Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς (Standard Reporting (Reference) Conditions, SRC)

Οι πρότυπες συνθήκες αναφοράς χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία φωτοβολταϊκών για την αξιολόγηση ή προδιαγραφή της απόδοσης ενός πλαισίου. Η αξιολόγηση αυτή προβλέπεται σε μια και μοναδική πρότυπη κατάσταση λειτουργίας. Οι σχετικές παράμετροι απόδοσης είναι είτε προδιαγραφές του κατασκευαστή είτε αποτελέσματα δοκιμών που πραγματοποιούνται σε κατάλληλα εργαστήρια. Η ακρίβεια αυτών των προδιαγραφών απόδοσης είναι κρίσιμη για το σχεδιασμό των φωτοβολταϊκών συστοιχιών ή συστημάτων, καθώς παρέχουν το σημείο αναφοράς από το οποίο προκύπτει η απόδοση σε όλες τις άλλες συνθήκες. Η συνέπεια ενός σφάλματος 10% στις προδιαγραφές του πλαισίου θα έχει ως αποτέλεσμα 10% επίδραση στην ετήσια ενεργειακή παραγωγή του ΦΒ συστήματος. Οι σχεδιαστές συστημάτων και οι κατασκευαστές των πλαισίων θα πρέπει να καταβάλλουν κάθε δυνατή προσπάθεια για να εγγυώνται την ακρίβεια των προδιαγραφών. Οι παράμετροι απόδοσης και οι συνθήκες που σχετίζονται με τις πρότυπες συνθήκες αναφοράς ορίζονται ως εξής:

$$T_o = \text{Θερμοκρασία αναφοράς στοιχείου, } 25^{\circ}\text{C}$$

$$E_o = \text{Ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς, } 1000\text{W/m}^2$$

$$I_{sco} = I_{sc} (E = E_o \text{ W/m}^2, AM_a = 1.5, T_c = T_o, AOI = 0^{\circ}) \text{ (A)}$$

$$I_{mpo} = I_{mp} (E_e = 1, T_c = T_o) \text{ (A)}$$

$$V_{oco} = V_{oc} (E_e = 1, T_c = T_o) \text{ (V)}$$

$$V_{mpo} = V_{mp} (E_e = 1, T_c = T_o) \text{ (V)}$$

$$I_{xo} = I_x (E_e = 1, T_c = T_o) \text{ (A)}$$

$$I_{xxo} = I_{xx} (E_e = 1, T_c = T_o) \text{ (A)}$$

4.6 Παράμετροι Εξαρτώμενοι από τη Θερμοκρασία

Η χρήση τεσσάρων ξεχωριστών θερμοκρασιακών συντελεστών είναι σημαντική προκειμένου το μοντέλο απόδοσης να εφαρμόζεται εξίσου καλά σε όλες τις τεχνολογίες φωτοβολταϊκών, σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Κάποιες υπάρχουσες προτυποποιημένες διαδικασίες εσφαλμένα θεωρούν ότι ο θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση V_{oc} μπορεί να εφαρμοστεί και για την V_{mp} , όπως επίσης ότι ο θερμοκρασιακός συντελεστής για το ρεύμα I_{sc} μπορεί να εφαρμοστεί και για το I_{mp} . Εάν δεν είναι διαθέσιμοι από τον κατασκευαστή του πλαισίου, οι απαιτούμενες παράμετροι δίνονται από τη βάση δεδομένων των Sandia είτε μπορούν να μετρηθούν κατά τη διάρκεια δοκιμών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, το μοντέλο απόδοσης επιτρέπει οι θερμοκρασιακοί συντελεστές για την τάση (V_{oc} και V_{mp}) να μεταβάλλονται με την ηλιακή ακτινοβολία, εάν είναι απαραίτητο, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση συγκεντρωτικών πλαισίων. Ωστόσο για μη συγκεντρωτικά επίπεδα πλαίσια σταθερές τιμές για τους συντελεστές της τάσης είναι γενικά επαρκείς.

Οι ορισμοί των παραμέτρων δίνονται στη συνέχεια, και όταν χρησιμοποιούνται στο εν λόγω μοντέλο απόδοσης, οι μονάδες μέτρησης των θερμοκρασιακών συντελεστών πρέπει να είναι αυτές που ορίζονται παρακάτω, ώστε να υπάρχει συμφωνία με τις εξισώσεις.

αI_{sc} = Κανονικοποιημένος θερμοκρασιακός συντελεστής για το ρεύμα I_{sc} , ($1/^\circ\text{C}$). Η παράμετρος αυτή “κανονικοποιείται” διαιρώντας τη θερμοκρασιακή εξάρτηση ($\text{A}/^\circ\text{C}$) που μετράται για ένα συγκεκριμένο πρότυπο ηλιακό φάσμα και επίπεδο ακτινοβολίας με το ρεύμα βραχυκύκλωσης του πλαισίου στις πρότυπες συνθήκες αναφοράς, I_{sc0} . Με τη χρήση της συγκεκριμένης μονάδας μέτρησης ($1/^\circ\text{C}$) η ίδια τιμή του συντελεστή μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για ανεξάρτητα πλαίσια όσο και για παράλληλες σειρές πλαισίων.

αI_{mp} = Κανονικοποιημένος θερμοκρασιακός συντελεστής για το ρεύμα I_{mp} , ($1/^\circ\text{C}$). Κανονικοποιημένος με τον ίδιο τρόπο όπως το αI_{sc} .

$\beta V_{oc}(E_e) = \beta V_{oco} + m\beta V_{oc} \cdot (1 - E_e)$, ($\text{V}/^\circ\text{C}$). Θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση ανοικτοκύκλωσης του πλαισίου ως συνάρτηση της ενεργού ακτινοβολίας, E_e . Συνήθως, η εξάρτηση από την ακτινοβολία αμελείται και το βV_{oc} θεωρείται ότι έχει σταθερή τιμή.

βV_{oco} = Θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση V_{oc} του πλαισίου σε επίπεδο ακτινοβολίας $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, ($\text{V}/^\circ\text{C}$).

$m\beta V_{oc}$ = Συντελεστής που περιγράφει την εξάρτηση του θερμοκρασιακού συντελεστή για την τάση V_{oc} από την ακτινοβολία, συνήθως θεωρείται μηδενικός, ($\text{V}/^\circ\text{C}$).

$\beta V_{mp}(E_e) = \beta V_{mpo} + m\beta V_{mp} \cdot (1 - E_e)$, ($\text{V}/^\circ\text{C}$). Θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση στο σημείο μέγιστης απόδοσης του πλαισίου ως συνάρτηση της ενεργού ακτινοβολίας, E_e . Συνήθως, η εξάρτηση από την ακτινοβολία αμελείται και το βV_{mp} θεωρείται ότι έχει σταθερή τιμή.

βV_{mpo} = Θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση V_{mp} του πλαισίου σε επίπεδο ακτινοβολίας $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, ($\text{V}/^\circ\text{C}$).

$m\beta V_{mp}$ = Συντελεστής που περιγράφει την εξάρτηση του θερμοκρασιακού συντελεστή για την τάση V_{mp} από την ακτινοβολία, συνήθως θεωρείται μηδενικός, ($\text{V}/^\circ\text{C}$).

4.7 Θερμοκρασία Λειτουργίας Πλαισίου (Θερμοκρασιακό Μοντέλο)

Κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι απαραίτητη η πρόβλεψη της ετήσιας αναμενόμενης ενεργειακής παραγωγής. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται ένα θερμοκρασιακό μοντέλο για την εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας πλαισίου βασισμένο σε τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες: ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου και ενίοτε κατεύθυνση ανέμου. Για την άντληση των πληροφοριών που είναι απαραίτητες στο σχεδιασμό των ΦΒ συστοιχιών χρησιμοποιούνται δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και μετεωρολογικά δεδομένα που αντιστοιχούν στην εκάστοτε τοποθεσία. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από αναγνωρισμένες βάσεις δεδομένων ή μετεωρολογικά μοντέλα, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Στο συγκεκριμένο θερμοκρασιακό μοντέλο γίνεται χρήση μέσων ωριαίων τιμών ακτινοβολίας, θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ταχύτητας

ανέμου για την πρόβλεψη της αντίστοιχης θερμοκρασίας λειτουργίας του ΦΒ πλαισίου. Υπάρχει αβεβαιότητα τόσο για τα καταγεγραμμένα δεδομένα του περιβάλλοντος όσο και για τα αποτελέσματα του θερμοκρασιακού μοντέλου, ωστόσο η προσέγγιση που αναλύεται στη συνέχεια έχει αποδειχτεί επαρκής για σχεδιαστικούς σκοπούς.

Μετά την εγκατάσταση ενός ΦΒ συστήματος, η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία πλαισίου μπορούν να μετρηθούν άμεσα και τα αποτελέσματα να χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο απόδοσης. Με τις μετρηθείσες τιμές αποφεύγεται η “έμφυτη” αβεβαιότητα που σχετίζεται με την εκτίμηση της θερμοκρασίας πλαισίου βασισμένη σε περιβαλλοντικές παραμέτρους και βελτιώνεται η ακρίβεια του μοντέλου στην πρόβλεψη της αναμενόμενης απόδοσης του συστήματος.

Ένα απλούστερο εμπειρικό μοντέλο, όπως περιγράφεται από την εξίσωση (4.11), αναπτύχθηκε στα Sandia. Το μοντέλο αυτό έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε επίπεδα πλαίσια τοποθετημένα με ελεύθερη την πίσω όψη, σε επίπεδα πλαίσια με μονωμένη την οπίσθια επιφάνεια προσομοιώνοντας περιπτώσεις πλαισίων ενσωματωμένα σε κτίρια, καθώς και σε συγκεντρωτικά πλαίσια. Εκτιμά την αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας με ακρίβεια ± 5 °C και αβεβαιότητες αυτής της κλίμακας έχουν σαν αποτέλεσμα σφάλμα μικρότερο του 3% στην ισχύ εξόδου του πλαισίου.

Οι εμπειρικά προσδιορισμένοι συντελεστές (a, b) που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο καθορίζονται χρησιμοποιώντας χιλιάδες μετρήσεις θερμοκρασίας καταγεγραμμένες κατά τη διάρκεια πολλών διαφορετικών ημερών με το πλαίσιο να λειτουργεί σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας (ονομαστικές συνθήκες καθαρού ουρανού χωρίς απότομες θερμοκρασιακές μεταπτώσεις λόγω διαλειπόντων νεφών). Οι συντελεστές αυτοί επηρεάζονται από την κατασκευή του πλαισίου, το είδος της τοποθέτησης (mounting configuration), και την τοποθεσία και το ύψος που μετράται η ταχύτητα του ανέμου.

Η συνήθης μετεωρολογική πρακτική για την καταγραφή της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου είναι η τοποθέτηση του οργάνου μέτρησης (ανεμομέτρου) να γίνεται σε ύψος 10m σε περιοχή με μικρό αριθμό κτιρίων ή κατασκευών που εμποδίζουν την κίνηση του αέρα. Τα δεδομένα ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου που παρέχονται από τις μετεωρολογικές βάσεις δεδομένων έχουν καταγραφεί υπό τις παραπάνω συνθήκες. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι αναλύοντας τα

δεδομένα μετά την εγκατάσταση του συστήματος, το θερμοκρασιακό μοντέλο μπορεί να “ρυθμιστεί” ανάλογα καθορίζοντας νέους συντελεστές (a, b), οι οποίοι αντισταθμίζουν τις επιδράσεις του περιβάλλοντος χώρου και της θέσης του ανεμομέτρου όταν αυτές διαφέρουν από τις πρότυπες.

$$T_m = E \cdot \{e^{a-b \cdot WS}\} + T_a \quad (4.11)$$

όπου:

T_m = Θερμοκρασία οπίσθιας όψης πλαισίου, (°C)

T_a = Θερμοκρασία περιβάλλοντος, (°C)

E = Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του πλαισίου, (W/m²)

WS = Ταχύτητα ανέμου στο πρότυπο ύψος 10m, (m/s)

a = Εμπειρικά προσδιορισμένος συντελεστής που θέτει το άνω όριο της θερμοκρασίας πλαισίου σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου και υψηλή ηλιακή ακτινοβολία

b = Εμπειρικά προσδιορισμένος συντελεστής που καθορίζει το ρυθμό πτώσης της θερμοκρασίας πλαισίου καθώς η ταχύτητα ανέμου αυξάνεται

Η κατεύθυνση του ανέμου μπορεί να έχει μια μικρή αλλά αξιοσημείωτη επίδραση στη θερμοκρασία λειτουργίας του πλαισίου. Ωστόσο, ενσωματώνοντας την επίδραση της κατεύθυνσης του ανέμου στο θερμοκρασιακό μοντέλο θεωρείται ότι αυτό γίνεται ασκόπως πολύπλοκο. Επομένως, στην παρούσα προσέγγιση, η επίδραση της κατεύθυνσης του ανέμου στη θερμοκρασία λειτουργίας θεωρείται τυχαία με αποτέλεσμα να προστίθεται μεν κάποια αβεβαιότητα στο θερμοκρασιακό μοντέλο, αλλά να σταθμίζεται δε κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση. Παρόμοια, οι απότομες θερμοκρασιακές μεταπτώσεις που οφείλονται σε σύννεφα και η θερμοχωρητικότητα του πλαισίου είναι παράγοντες επίδρασης με παρεμφερή συμπεριφορά στη θερμοκρασία.

Η θερμοκρασία κελιού και η θερμοκρασία οπίσθιας επιφάνειας πλαισίου μπορεί να διαφέρουν αισθητά, ιδιαίτερα στα συγκεντρωτικά πλαίσια. Η θερμοκρασία των στοιχείων στο εσωτερικό του πλαισίου μπορεί να συνδεθεί με τη θερμοκρασία στην οπίσθια επιφάνεια του πλαισίου μέσω μιας απλής σχέσης. Η σχέση που δίνεται από την εξίσωση (4.12) βασίζεται στην υπόθεση μονοδιάστατης θερμικής αγωγιμότητας

των υλικών του πλαισίου που περιλαμβάνει τα ΦΒ στοιχεία. Η θερμοκρασία κελιού στο εσωτερικό του πλαισίου υπολογίζεται κατόπιν χρησιμοποιώντας μετρήσεις θερμοκρασίας οπίσθιας επιφάνειας και μια θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην πίσω επιφάνεια και τα ΦΒ στοιχεία.

$$T_c = T_m + \frac{E}{E_0} \cdot \Delta T \quad (4.12)$$

όπου:

T_c = Θερμοκρασία των στοιχείων στο εσωτερικό του πλαισίου, (°C)

T_m = Θερμοκρασία που μετράται στην οπίσθια επιφάνεια του πλαισίου, (°C)

E = Ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου, (W/m²)

E_0 = Ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς, (1000 W/m²)

ΔT = Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ στοιχείων και οπίσθιας επιφάνειας σε επίπεδο ακτινοβολίας 1000 W/m². Η διαφορά αυτή κυμαίνεται στους 2 με 3 °C για επίπεδα πλαίσια με ελεύθερη την πίσω όψη. Για επίπεδα πλαίσια με θερμικά μονωμένη την οπίσθια επιφάνεια η διαφορά μπορεί να θεωρηθεί μηδενική.

4.8 Εξισώσεις Απόδοσης Συστοιχιών

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι οι εξισώσεις (4.1) έως (4.10) μπορούν να εφαρμοστούν και για συστοιχίες ΦΒ πλαισίων απλώς λαμβάνοντας υπ' όψιν το συνδυασμό των εν σειρά και παράλληλων πλαισίων στη συστοιχία. Εάν ο αριθμός των εν σειρά πλαισίων σε μια σειριακή ακολουθία (module-string) είναι M_s , τότε οι τάσεις V_{oc} και V_{mp} που υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.3) και (4.4) αντίστοιχα πρέπει να πολλαπλασιαστούν με M_s . Εάν ο αριθμός των παράλληλων ακολουθιών στη συστοιχία είναι M_p , τότε τα ρεύματα I_{sc} , I_{mp} , I_x και I_{xx} που υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.1), (4.2), (4.9) και (4.10) αντίστοιχα πρέπει να πολλαπλασιαστούν με M_p . Η ενεργειακή απόδοση συστοιχίας όπως υπολογίζεται με αυτή τη μέθοδο βασίζεται στην αναμενόμενη απόδοση των μεμονωμένων πλαισίων, με αποτέλεσμα να είναι ελαφρώς “αισιόδοξη” καθώς δεν περιλαμβάνει απώλειες σε επίπεδο συστοιχίας, όπως διαφοροποιήσεις (mismatch) πλαισίων και καλωδιακές αντιστάσεις ηλεκτρικών συνδέσεων.

Ιδανικά, είναι διαθέσιμες σε κάποιες περιπτώσεις μετρήσεις απόδοσης (I-V) σε επίπεδο συστοιχίας, και σε αυτήν την περίπτωση η ακρίβεια του μοντέλου μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω. Οι μετρήσεις επιπέδου συστοιχίας παρέχουν τις τέσσερις βασικές παραμέτρους απόδοσης (I_{sco} , I_{mpo} , V_{oco} , V_{mpo}) στις πρότυπες συνθήκες αναφοράς καθώς επίσης και οχτώ επιπλέον συντελεστές ($C0$, $C1$, ..., $C7$). Οι φασματικές επιδράσεις, $f1(AMa)$, οι οπτικές απώλειες $f2(AOI)$ και οι θερμοκρασιακοί συντελεστές για τη συστοιχία θεωρείται ότι είναι διαθέσιμοι από αποτελέσματα δοκιμών σε μεμονωμένα πλαίσια. Χρησιμοποιώντας μετρήσεις συστοιχιών, η ηλεκτρική απόδοση ολόκληρης της συστοιχίας μπορεί να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια, και έτσι το συγκεκριμένο μοντέλο εσωκλείει και τις απώλειες επιπέδου συστοιχίας που σχετίζονται με διαφοροποιήσεις πλαισίων και καλωδιακές αντιστάσεις ηλεκτρικών συνδέσεων οι οποίες είναι δύσκολο να προβλεφθούν ή να προσδιοριστούν σαφώς. Στην ουσία, η συστοιχία μοντελοποιείται σαν να ήταν ένα πολύ μεγάλο πλαίσιο. Γενικά, η επίδραση της διαφοροποίησης των πλαισίων και των απωλειών αντιστάσεων είναι μικρή (<5%) σε σχέση με την απόδοση που αναμένεται από τις ονομαστικές τιμές των μεμονωμένων πλαισίων. Η βάση δεδομένων της Sandia περιλαμβάνει αρκετές συστοιχίες πλαισίων που έχουν μετρηθεί με τον παραπάνω τρόπο.

4.9 Προσδιορισμός της Ενεργού Ακτινοβολίας (E_e)

Αναφορικά με τη διαδικασία ελέγχου της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών, η μεγαλύτερη πηγή σφαλμάτων στην εκτίμηση της ισχύος σχετίζεται συνήθως με τα όργανα μέτρησης και τη διαδικασία ποσοτικοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχουν αρκετές πηγές συστηματικών λαθών στα αποτελέσματα των δοκιμών: τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποκρίνονται σε ένα μόνο τμήμα του ηλιακού φάσματος όπως περιγράφεται στην εικόνα 5, οι συσκευές μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πιθανό να αποκρίνονται σε όλα τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας ή σε ένα τμήμα παρόμοιο με αυτό των ΦΒ πλαισίων, η γωνία λήψης ακτινοβολίας του πλαισίου μπορεί να διαφέρει σημαντικά από αυτή του ηλιακού αισθητήρα, η απόκριση τόσο του πλαισίου όσο και του αισθητήρα διαφέρουν σημαντικά βάσει της γωνίας πρόσπτωσης και τέλος, ο αισθητήρας και το πλαίσιο μπορεί να έχουν τοποθετηθεί με διαφορετικό

προσανατολισμό. Η έννοια της “ενεργού ακτινοβολίας” παρέχει μία μέθοδο χειρισμού αυτών των συστηματικών επιδράσεων και περιορίζει την αβεβαιότητα που υπεισέρχεται στις διάφορες δοκιμές.

Ο πρωταρχικός σκοπός στον έλεγχο της απόδοσης και στον προσδιορισμό της I-V καμπύλης είναι ο καθορισμός μιας κατάλληλης τιμής για την “ενεργό ακτινοβολία”, E_e . Η ενεργός ακτινοβολία είναι η ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του πλαισίου στην οποία τα ΦΒ στοιχεία ουσιαστικά αποκρίνονται, αφού έχουν ληφθεί υπ’ όψιν οι επιδράσεις του ηλιακού φάσματος, οι οπτικές απώλειες εξαιτίας της γωνίας πρόσπτωσης και η ρύπανση των πλαισίων. Με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις η ενεργός ακτινοβολία προσδιορίζεται ως εξής.

Κατ’ αρχάς, για τον υπολογισμό της ενεργού ακτινοβολίας, E_e , είναι απαραίτητη η γνώση όλων των παραγόντων της εξίσωσης (4.13). Για την ποσοτικοποίηση των παραμέτρων που σχετίζονται με τις φασματικές επιδράσεις ($f_1(AM_a)$), τις οπτικές απώλειες ($f_2(AOI)$) και το κλάσμα της διάχυτης ακτινοβολίας στο οποίο αποκρίνεται το πλαίσιο (f_d), έχουν πραγματοποιηθεί εργαστηριακές μετρήσεις σε πλήθος μεμονωμένων πλαισίων. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων παρέχουν τους αντίστοιχους συντελεστές που διατηρούνται στη βάση δεδομένων της Sandia. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένοι συντελεστές είναι εφαρμόσιμοι και σε συστοιχίες ΦΒ πλαισίων.

Κατόπιν, απομένει ο προσδιορισμός των επιμέρους συνιστωσών της ολικής ακτινοβολίας, ακτινικής (E_b) και διάχυτης (E_d). Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, ακολουθείται η μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο της ηλιακής ακτινοβολίας που προηγήθηκε. Πιο συγκεκριμένα, με βάση τις ωριαίες τιμές ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, I , και με τη βοήθεια του μοντέλου του ανισοτροπικού ουρανού (HDKR μοντέλο) προσδιορίζονται οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας (I_{bt} , I_{dt}) σε επίπεδο αυθαίρετης κλίσης και προσανατολισμού.

Η εξίσωση (4.13) περιέχει επίσης έναν “παράγοντα ρύπανσης” (Soiling Factor, SF), ο οποίος εκτιμά τις αναπόφευκτες απώλειες ρύπανσης όταν γίνεται αναφορά σε πραγματικές συνθήκες εξωτερικού χώρου. Ο παράγοντας SF έχει τιμή ίση με τη μονάδα στην περίπτωση καθαρών συστοιχιών, ενώ συνήθως είναι μεγαλύτερος από 0,95 εκτός των περιπτώσεων που παρατηρείται αισθητή ρύπανση στη συστοιχία.

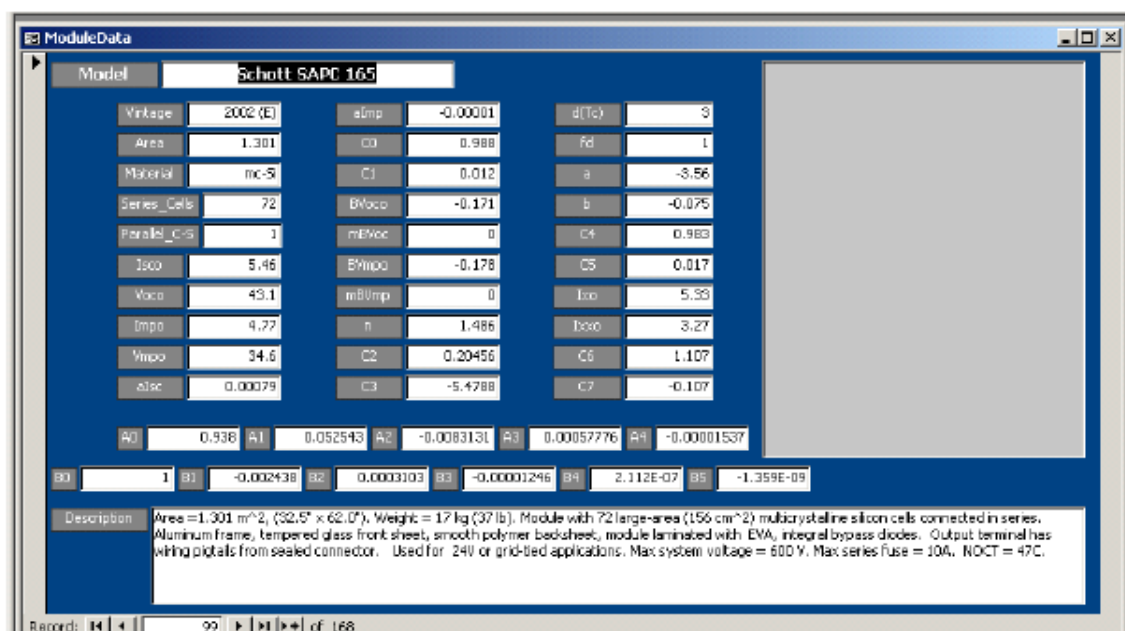
$$E_e = f_1(AM_a) \cdot \left\{ (E_b \cdot f_2(AOI) + f_d \cdot E_{diff}) / E_o \right\} \cdot SF \quad (4.13)$$

όπου $E_b = I_{bt}$ από το μοντέλο HDKR, (W/m²)

$E_d = I_{dt}$ από το μοντέλο HDKR, (W/m²)

4.10 Βάση Δεδομένων ΦΒ Πλαισίων

Η βάση δεδομένων ΦΒ πλαισίων που διατηρείται στον ιστοχώρο των εργαστηρίων Sandia, <http://www.sandia.gov/pv>, είναι ένας συνδυασμός παραμέτρων απόδοσης που παρέχονται από τους κατασκευαστές των πλαισίων και πειραματικών δεδομένων που έχουν μετρηθεί στα Sandia National Laboratories. Ο λόγος για τον οποίο περιλαμβάνονται πληροφορίες απόδοσης και από τις δύο πηγές αναλύεται στη συνέχεια. Αυτός ο συνδυασμός παραμέτρων (συντελεστών) με τη χρήση του μοντέλου απόδοσης επιτρέπει τη λεπτομερή προσομοίωση των χαρακτηριστικών απόδοσης ΦΒ πλαισίων και συστοιχιών για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει επίσης γενικές πληροφορίες όπως την τεχνολογία των στοιχείων και το μέγεθος, τις διαστάσεις πλαισίου και το βάρος του, τη μέγιστη τάση συστοιχίας και το μέγεθος της ασφάλειας καθώς και άλλα χαρακτηριστικά. Η εικόνα 4.8 παρουσιάζει μια σειρά δεδομένων για μια τυπική καταχώρηση.



Σχ. 4.8 Παράδειγμα εγγραφής της βάσης δεδομένων

Τα φύλλα προδιαγραφών των κατασκευαστών πλαισίων παρέχουν παραμέτρους απόδοσης σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς (Standard Reporting Conditions – SRC), όπως καθορίζονται από την American Society for Testing and Materials (ASTM). Οι SRC ορίζουν ρητά μια κατάσταση αναφοράς για τον έλεγχο και την περιγραφή της απόδοσης του πλαισίου. Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται ως 1000W/m^2 ηλιακή ακτινοβολία, ηλιακό φάσμα που αντιπροσωπεύει ηλιακό μεσημέρι με συνθήκες καθαρού ουρανού (αέρια μάζα=1,5), θερμοκρασία κελιού στο εσωτερικό του πλαισίου 25°C , και ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει κάθετα στην εμπρόσθια επιφάνεια του πλαισίου.

Οι κατασκευαστές πλαισίων έχουν κατασκευάσει και μετρήσει την απόδοση χιλιάδων πλαισίων, με συνέπεια να έχουν μια πλήρη εικόνα της στατιστικής κατανομής της απόδοσης που σχετίζεται με τα προϊόντα τους. Επιπλέον, όλοι οι κατασκευαστές έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν πρότυπα στοιχεία ή πλαίσια αναφοράς, τα οποία έχουν βαθμονομηθεί σε αναγνωρισμένους οργανισμούς ελέγχου. Τα πρότυπα αυτά στοιχεία επιτρέπουν στους κατασκευαστές να μετρούν και να καθορίζουν την απόδοση των πλαισίων τους με απόκλιση μικρότερη από $\pm 5\%$. Επομένως, η παρούσα βάση δεδομένων θεωρεί ότι οι παράμετροι απόδοσης που δίνονται από τους κατασκευαστές στις συνθήκες SRC είναι ακριβείς.

Στη βάση δεδομένων, οι τέσσερις βασικές παράμετροι απόδοσης στις συνθήκες SRC είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης, η τάση ανοικτοκύκλωσης, το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος και η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος, οι οποίες συμβολίζονται I_{sc0} , V_{oc0} , I_{mp0} και V_{mp0} αντίστοιχα. Εάν υπάρχει ένα “(E)” στη στήλη “Vintage” της βάσης, τότε οι τιμές για τις παραπάνω τέσσερις παραμέτρους προέρχονται από τα φύλλα προδιαγραφών των κατασκευαστών. Εάν δεν υπάρχει “(E)”, τότε οι παράμετροι αυτοί προέρχονται από μετρήσεις στα εργαστήρια Sandia για πλαίσια του ίδιου τύπου, και σε αυτή την περίπτωση αναγνωρίζεται ότι τα μετρούμενα πλαίσια μπορεί να είναι ή να μην είναι αντιπροσωπευτικά της μέσης παραγωγής του κατασκευαστή. Σε κάθε περίπτωση, οι υπόλοιπες παράμετροι που υπάρχουν στη βάση δεδομένων για κάθε πλαίσιο βασίζονται σε αποτελέσματα ελέγχων της Sandia, δηλ. θερμοκρασιακοί συντελεστές, συντελεστές ρεύματος και τάσης συναρτήσεως της ακτινοβολίας, συντελεστές φάσματος και συντελεστές γωνίας πρόσπτωσης.

Πολλές από τις παραμέτρους της βάσης δεδομένων όπως οι συντελεστές για την αέρια μάζα (a_0, \dots, a_4) και οι θερμοκρασιακοί συντελεστές για τα I_{sc} και I_{mp} (aI_{sc} ,

aI_{mp}) μπορούν να θεωρηθούν καθολικοί για τα πλαίσια ενός κατασκευαστή, αρκεί να χρησιμοποιούν όλα τον ίδιο τύπο στοιχείων. Οι συντελεστές της γωνίας πρόσπτωσης (b_0, \dots, b_5) μπορούν και αυτοί να θεωρηθούν καθολικοί για όλα τα επίπεδα πλαίσια με γυάλινη εμπρόσθια επιφάνεια. Ωστόσο, οι τελευταίοι συντελεστές διαφέρουν σημαντικά για συγκεντρωτικά πλαίσια και για επίπεδα πλαίσια με εμπρόσθια επιφάνεια που δεν είναι γυάλινη.

Τα φύλλα προδιαγραφών των κατασκευαστών παρέχουν επίσης το έτος κατασκευής, το συνολικό εμβαδόν, το υλικό των στοιχείων και τη διασύνδεση των μεμονωμένων στοιχείων στο πλαίσιο. Τυπικά, πολλά στοιχεία συνδέονται εν σειρά για το σχηματισμό μιας ακολουθίας στοιχείων (“cell-string”). Πολλές τέτοιες ακολουθίες στοιχείων μπορεί να συνδεθούν παράλληλα για την παραγωγή υψηλότερων επιπέδων ρεύματος στο πλαίσιο. Η βάση δεδομένων δηλώνει τον αριθμό των στοιχείων σε ένα cell-string, N_s , και τον αριθμό των παράλληλων cell-strings, N_p .

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης περιλαμβάνει μια εμπειρική έκφραση, όπως έχει αναλυθεί προηγουμένως, που συσχετίζει τη θερμοκρασία των στοιχείων με την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ταχύτητα του ανέμου. Στο μοντέλο αυτό χρησιμοποιούνται δύο εμπειρικά προσδιορισμένοι συντελεστές (a, b) και μια διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) μεταξύ των στοιχείων και της οπίσθιας επιφάνειας του πλαισίου. Οι παραπάνω συντελεστές που δίνονται στη βάση δεδομένων αντιστοιχούν στη πιο συνηθισμένη διάταξη τοποθέτησης των πλαισίων, δηλαδή πλαίσια τοποθετημένα με ανοικτή βάση στήριξης και με τις δύο επιφάνειες εκτεθειμένες στον άνεμο. Το θερμοκρασιακό μοντέλο εφαρμόζεται εξίσου και για άλλες διατάξεις τοποθέτησης, όπως για παράδειγμα πλαίσια άμεσα προσαρτημένα στη στέγη των κτιρίων, ωστόσο θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να προσδιορίζονται διαφορετικοί συντελεστές ανάλογοι της εκάστοτε διαμόρφωσης.

Κεφάλαιο 5

Παράγοντες Επίδρασης Στην Απόδοση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια ποσοτικοποίησης της επίδρασης των κυριότερων παραγόντων που επηρεάζουν τη διαθέσιμη από τα φβ πλαίσια dc-ενέργεια. Οι παραπάνω συγκρίνονται με άλλους παράγοντες, επιπέδου συστήματος, οι οποίοι συχνά συντελούν σε σημαντική μείωση της ac ενέργειας που αποδίδεται τελικά στο φορτίο σε σχέση με αυτή που δύναται να διαθέσει η συστοιχία [7], [8], [11].

5.1 Εισαγωγή

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων ή συστοιχιών μπορεί να περιγραφεί και να συγκριθεί με διάφορους τρόπους που περιλαμβάνουν την απόδοση ή μέγιστη ισχύ W_p στις πρότυπες συνθήκες αναφοράς, το κόστος ανά μονάδα μέγιστης ισχύος ($€/W_p$), την dc ενέργεια κανονικοποιημένη ως προς τη μέγιστη ισχύ (kWh/kW_p), ή τη μέση dc ενέργεια που παράγεται ανά ημέρα (kWh/d). Σε επίπεδο συστήματος, η απόδοση συχνά προσδιορίζεται από την ημερήσια ac ενέργεια που διανέμεται (kWh/d , ac), και πιθανόν ο πιο καθοριστικός δείκτης απόδοσης είναι αυτός που υπολογίζει το πραγματικό κόστος της ενέργειας ($€/kWh$, ac), το οποίο περιλαμβάνει το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης, καθώς επίσης και τη μακροχρόνια φθορά των μερών του συστήματος. Πλέον η πρόοδος που έχει επιτευχθεί στην κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την ετήσια ενεργειακή απόδοση τόσο διασυνδεδεμένων όσο και αυτόνομων φβ συστημάτων –σε επίπεδο πλαισίου αλλά και συστήματος- είναι αρκετά σημαντική.

5.2 Ενέργεια διαθέσιμη από φωτοβολταϊκά πλαίσια

Το πρώτο βήμα στην ανάλυση της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι μια ορθή εκτίμηση της dc ενέργειας που παρέχει η συστοιχία, ανάλογα με την εκάστοτε τοποθεσία και διάταξη του συστήματος. Οι πειραματικές διαδικασίες που αναπτύχθηκαν στα εργαστήρια της Sandia και το προκύπτον μοντέλο ενεργειακής απόδοσης, στο οποίο και βασίζεται η παρούσα εργασία, έχουν μέχρι στιγμής επιδείξει ικανοποιητική ακρίβεια για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Το συγκεκριμένο μοντέλο ενεργειακής απόδοσης λαμβάνει υπόψη ηλεκτρικές παραμέτρους του φωτοβολταϊκού πλαισίου, θερμοκρασιακούς συντελεστές, θερμοκρασία λειτουργίας σε συνάρτηση με περιβαλλοντικές συνθήκες, οπτικές απώλειες σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης ακτινοβολίας, μεταβολές του ηλιακού φάσματος κατά τη διάρκεια της ημέρας και προσανατολισμό των πλαισίων. Με βάση αυτό το μοντέλο και σε συνδυασμό με δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και μετεωρολογικά δεδομένα, γίνεται στη συνέχεια ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν τη διαθέσιμη ενέργεια από φβ πλαίσια του εμπορίου.

Από μετρήσεις που έχουν καταγραφεί προκύπτει ένα χρήσιμο συμπέρασμα με βάση τη σύγκριση της ετήσιας ενεργειακής απόδοσης διαφορετικών τεχνολογιών φβ πλαισίων που διατίθενται στο εμπόριο. Ο πίνακας 5.1 δίνει τα αποτελέσματα για πλαίσια 14 τεχνολογιών του εμπορίου, με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος για τρεις διαφορετικές τοποθεσίες στις ΗΠΑ, όπου και διεξάγονται τα πειράματα της Sandia, με δείκτη την αναμενόμενη μέση ετήσια dc ενέργεια που παράγεται ανά ημέρα (kWh/d). Τα εν λόγω αποτελέσματα είναι ανηγμένα σε ισοδύναμη 1-kWp συστοιχία για την κάθε τεχνολογία. Για λόγους αμεσότερης σύγκρισης, στον πίνακα δίνονται επίσης (σε παρένθεση) κανονικοποιημένες τιμές ενέργειας ως προς το πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si). Όπως παρατηρείται, με δεδομένη την αναγωγή σε ισοδύναμα μεγέθη ισχύος στις πρότυπες συνθήκες αναφοράς (SRC), συμπεραίνεται ότι όλες οι τεχνολογίες είναι ισοδύναμες σε σχέση με την αναμενόμενη ετήσια ενεργειακή απόδοση, με απόκλιση μικρότερη του 5%. Οι δύο εξαιρέσεις που απαντώνται στον πίνακα οφείλονται σε ιδιάζοντα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που καθορίζονται από τον κατασκευαστή (πιο συγκεκριμένα η απόδοση στις συνθήκες SRC επηρεάζεται σημαντικά από αντιστάσεις σειράς γεγονός που μπορεί να τροποποιηθεί μεταβάλλοντας τις αντιστάσεις αυτές κατάλληλα ώστε να βρεθούν εντός των επιτρεπτών ορίων).

Τύπος πλαισίου	mc-Si	mc-Si#2	mc-Si#3	mc-Si#4	mc-Si#5	c-Si	HIP-Si
<i>Albuquerque</i>	5.82 (1.00)	5.87 (1.01)	5.81 (1.00)	5.78 (0.99)	5.79 (0.99)	5.88 (1.01)	5.95 (1.02)
<i>Sacramento</i>	4.90 (1.00)	4.95 (1.01)	4.87 (0.99)	4.84 (0.99)	4.86 (0.99)	4.95 (1.01)	5.01 (1.02)
<i>Buffalo</i>	3.87 (1.00)	3.89 (1.01)	3.85 (0.99)	3.81 (0.98)	3.83 (0.99)	3.97 (1.02)	3.85 (0.99)
Τύπος πλαισίου	p-Si	a-Si	a-Si#2	CIS	CdTe	CdTe#2	CdTe#3
<i>Albuquerque</i>	5.67 (0.97)	6.46 (1.11)	5.80 (1.00)	6.07 (1.04)	5.73 (0.99)	6.56 (1.13)	5.74 (0.99)
<i>Sacramento</i>	4.72 (0.96)	5.43 (1.11)	4.83 (0.99)	5.03 (1.03)	4.83 (0.99)	5.65 (1.15)	4.78 (0.98)
<i>Buffalo</i>	3.74 (0.96)	4.24 (1.09)	3.80 (0.98)	3.92 (1.01)	3.87 (1.00)	4.25 (1.10)	3.71 (0.96)

Πίνακας 5.1 Μέση ετήσια dc παραγόμενη ενέργεια ανά ημέρα (kWh/day)

Η ετήσια dc ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο επηρεάζεται από έναν αριθμό αλληλεπιδρόντων παραγόντων, κάποιοι από τους οποίους σχετίζονται με το ίδιο το πλαίσιο και άλλοι οι οποίοι εξαρτώνται από περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της θέσης εγκατάστασης. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι οι ακόλουθοι: ολική ηλιακή ακτινοβολία, ισχύς πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς (Standard Reporting Condition), θερμοκρασία λειτουργίας (συντελεστής θερμοκρασιακής επίδρασης), εξάρτηση τάσης μέγιστης ισχύος (V_{mp}) από το επίπεδο ακτινοβολίας, ρύπανση, μεταβολές ηλιακού φάσματος και οπτικές απώλειες σε υψηλές τιμές γωνίας πρόσπτωσης. Η σχετική επίδραση των επτά αυτών παραγόντων στην ετήσια ενεργειακή παραγωγή εξετάζεται με τη βοήθεια του μοντέλου απόδοσης που περιγράφεται στην παρούσα εργασία.

5.2.1 Επίδραση 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. Η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια στο Buffalo, NY, είναι το 60% και στο Sacramento, CA, το 85% αυτής που προσπίπτει στην Albuquerque, NM. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι με τη σειρά της ευθέως εξαρτώμενη από τον προσανατολισμό του πλαισίου ως προς τον ήλιο. Για μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας, το πλαίσιο μπορεί να τοποθετηθεί σε στρεφόμενη βάση ανίχνευσης δύο αξόνων (2-axis solar tracker) έτσι ώστε να δέχεται συνεχώς κάθετα τις ακτίνες του ηλίου. Σε άλλες εφαρμογές, είναι επιθυμητό το πλαίσιο να τοποθετείται με οριζόντιο ή κατακόρυφο προσανατολισμό. Εν γένει, η συνήθης πρακτική προστάζει τα πλαίσια να τοποθετούνται υπό κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης και η οποία αποτελεί ένα καλό συμβιβασμό μεταξύ της ετήσιας ηλιακής απολαβής και του υψηλού κόστους μιας στρεφόμενης βάσης.

Ο πίνακας 5.2 δίνει την ετήσια ενεργειακή παραγωγή ενός τυπικού πλαισίου πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si) με αναφορά την ενέργεια που παράγεται υπό κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος για διαφορετικούς προσανατολισμούς και διατάξεις ανίχνευσης. Το κέρδος της “ανίχνευσης” του ήλιου βρίσκεται ότι εξαρτάται

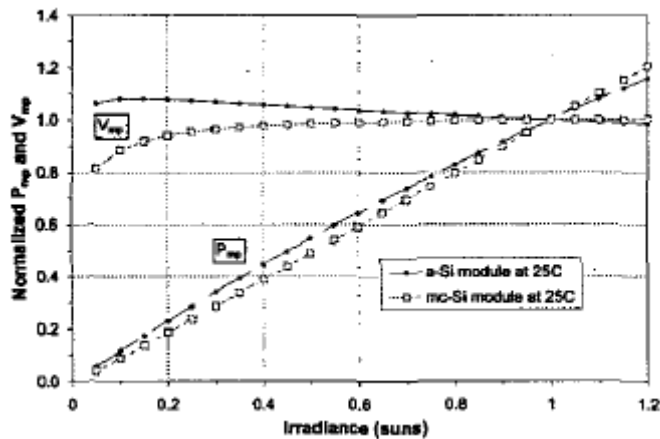
από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης και μάλιστα ότι είναι μέγιστο για περιοχές με υψηλά ποσοστά ακτινικής συνιστώσας της ακτινοβολίας, όπως στην Albuquerque.

	<i>Albuquerque</i>	<i>Sacramento</i>	<i>Buffalo</i>
Κλίση ίση με γεωγραφικό πλάτος	1.00	1.00	1.00
Οριζόντια	0.86	0.90	0.90
Κατακόρυφη	0.73	0.71	0.83
Ανίχνευση σε 1 άξονα	1.21	1.23	1.15
Ανίχνευση σε 2 άξονες	1.32	1.31	1.23

Πίνακας 5.2 Επίδραση της κλίσης και του συστήματος ανίχνευσης του ήλιου στην ετήσια απόδοση (βάση αναφοράς-κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος)

5.2.2 Τάση μέγιστης ισχύος (V_{mp}) συναρτήσει της ακτινοβολίας

Ο παράγοντας επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην τάση μέγιστης ισχύος (V_{mp}), παράγοντας που σχετίζεται με το ίδιο το πλαίσιο, δεν καθορίζεται από τους κατασκευαστές πλαισίων, ωστόσο μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ετήσια ενεργειακή παραγωγή. Βασικά, ο παράγοντας αυτός περιγράφει πόσο καλά συμπεριφέρεται το πλαίσιο σε χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας. Η εικόνα 5.1 παρουσιάζει την εξάρτηση της τάσης V_{mp} από την ακτινοβολία, όπως μετρήθηκε για δύο διαφορετικά πλαίσια. Στην περίπτωση του πλαισίου άμορφου πυριτίου (a-Si), η τάση V_{mp} αυξάνεται καθώς μειώνεται η ακτινοβολία, με αποτέλεσμα η τάση λειτουργίας του να είναι υψηλότερη σε χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς (ακτινοβολία 1 ήλιου). Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να φανεί σημαντική ιδιαίτερα σε τοποθεσίες με υψηλό ποσοστό συννεφιασμένων ημερών, καθώς είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αυξημένη ετήσια παραγωγή μέχρι και 10%. Σημειώνεται ότι τα πλαίσια a-Si και CdTe#2 του πίνακα 5.1 εμφάνισαν μια αξιοσημείωτα υψηλή ετήσια απόδοση κυρίως λόγω αυτής της επίδρασης της ακτινοβολίας στην τάση V_{mp} . Ωστόσο και οι σχετικά μικρότεροι θερμοκρασιακοί συντελεστές για αυτά τα πλαίσια συνεισφέρουν περίπου 2% στην αυξημένη ενεργειακή παραγωγή.



Σχ. 5.1 Μεταβολή V_{mp} και P_{mp} συναρτήσει της ακτινοβολίας

5.2.3 Θερμοκρασία Λειτουργίας και Θερμοκρασιακοί Συντελεστές

Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μεταβάλλεται σε σχέση με τη θερμοκρασία λειτουργίας του, σε βαθμό που καθορίζεται από τους θερμοκρασιακούς συντελεστές του. Τόσο το παραγόμενο από το πλαίσιο ρεύμα όσο και η τάση επηρεάζονται ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία λειτουργίας. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, η τάση τυπικά μειώνεται ενώ το ρεύμα αυξάνεται, με σημαντικότερη επίδραση αυτήν στην τάση. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι πρότυπες συνθήκες (ASTM Standard Reporting Condition) χρησιμοποιούνται ως συνθήκες αναφοράς για την απόδοση των πλαισίων, με τη θερμοκρασία των στοιχείων να καθορίζεται στους 25 °C. Συνεπώς, η σχετική απόδοση ενός πλαισίου και αντίστοιχα η παραγωγή του είναι μειωμένες σε συνθήκες λειτουργίας στις οποίες η θερμοκρασία των στοιχείων είναι υψηλότερη από 25 °C. Η θερμοκρασία λειτουργίας επηρεάζεται από το σχεδιασμό του πλαισίου (επίπεδο ή συγκεντρωτικό), την τεχνική τοποθέτησής του (ανοιχτή βάση στήριξης, προσαρτημένα σε στέγη), το επίπεδο της ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, την ταχύτητα του ανέμου και σε μικρότερο βαθμό από την κατεύθυνση του ανέμου. Το εμπειρικό θερμοκρασιακό μοντέλο των Sandia λαμβάνει υπόψη του αυτές τις επιδράσεις και σχετίζει τη θερμοκρασία των στοιχείων με περιβαλλοντικές παραμέτρους (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου). Στην παρούσα ανάλυση, η ευαισθησία της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής στους θερμοκρασιακούς συντελεστές ερευνάται με τον υπολογισμό του

λόγου της ετήσιας ενέργειας με εφαρμογή των θερμοκρασιακών συντελεστών, προς την ενέργεια θεωρώντας ότι η απόδοση του πλαισίου δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

Ο πίνακας 5.3 δίνει τα αποτελέσματα της θερμοκρασιακής επίδρασης των πλαισίων για τρεις διαφορετικές τοποθεσίες. Οι θερμοκρασιακοί συντελεστές της ισχύος αιχμής, P_{mp} , για τρία διαφορετικά πλαίσια είναι περίπου $-0,5\%/^{\circ}\text{C}$ για το mc-Si, $-0,25\%/^{\circ}\text{C}$ για το a-Si και $-0,4\%/^{\circ}\text{C}$ για το συγκεντρωτικό. Όπως συμπεραίνεται, η επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας στην ετήσια απόδοση εξαρτάται τόσο από την τεχνολογία του πλαισίου όσο και από τις επικρατούσες συνθήκες περιβάλλοντος. Παρ' όλα αυτά, το μέγεθος της επίδρασης στην ετήσια ενεργειακή απόδοση μπορεί να είναι μικρότερο από ότι συνήθως θεωρείται.

	mc-Si	a-Si	Concentrator
<i>Albuquerque</i>	0.94	0.98	0.91
<i>Sacramento</i>	0.93	0.97	0.91
<i>Buffalo</i>	0.99	1.00	0.96

Πίνακας 5.3 Θερμοκρασιακή επίδραση στην ετήσια απόδοση ΦΒ πλαισίου

5.2.4 Μεταβολές στο Ηλιακό Φάσμα

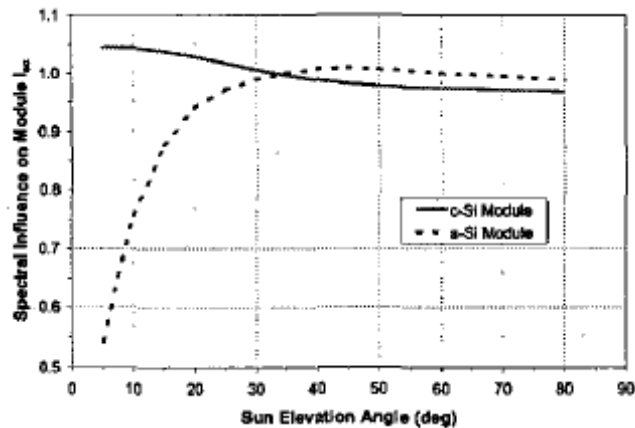
Η ποσοτικοποίηση της επίδρασης της ωριαίας μεταβολής του ηλιακού φάσματος στην ενεργειακή παραγωγή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου συνιστά μια αρκετά σύνθετη διαδικασία. Καθώς το ηλιακό φάσμα που χαρακτηρίζεται από την τιμή $AM=1.5$, όπως έχει καθοριστεί από την ASTM, χρησιμοποιείται ως αναφορά για τις προδιαγραφές απόδοσης των πλαισίων, η ετήσια παραγωγή του πλαισίου θεωρείται σχετικά ανεξάρτητη από τις μεταβολές στο ηλιακό φάσμα. Οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά τη διάρκεια της ημέρας και με την πάροδο των εποχών σταθμίζονται κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση. Ο πίνακας 5.4 δείχνει την ευαισθησία της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής στο ηλιακό φάσμα υπολογίζοντας το λόγο της ετήσιας ενέργειας συμπεριλαμβανομένων των επιδράσεων του ηλιακού φάσματος, προς την ενέργεια θεωρώντας ότι η απόδοση

του πλαισίου δεν επηρεάζεται από μεταβολές στο ηλιακό φάσμα. Το προς εξέταση πλαίσιο a-Si, παρατηρείται ότι έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία, ωστόσο η επίδραση στην ετήσια απόδοση δεν είναι μεγαλύτερη από 3%. Η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, στην οποία ένα συγκεντρωτικό πλαίσιο αποκρίνεται, παρουσιάζει σχετικά μικρότερη διακύμανση στη φασματική κατανομή, σε σύγκριση με την ολική (global) ακτινοβολία στην οποία αποκρίνονται τα επίπεδα πλαίσια. Ως εκ τούτου, η ετήσια ενέργεια που παράγεται από ένα συγκεντρωτικό πλαίσιο παρουσιάζει μικρότερη ευαισθησία στο ηλιακό φάσμα σε σχέση με τα επίπεδα πλαίσια.

	mc-Si	a-Si	Concentrator
<i>Albuquerque</i>	0.993	0.992	0.996
<i>Sacramento</i>	1.002	0.978	1.001
<i>Buffalo</i>	1.004	0.973	1.001

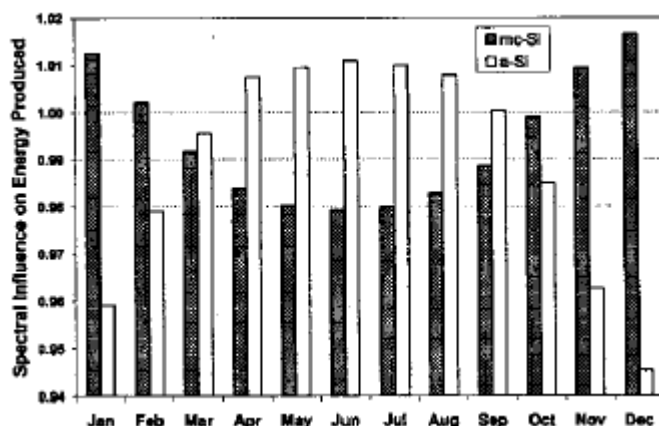
Πίνακας 5.4 Επίδραση ηλιακού φάσματος στην ετήσια απόδοση ΦΒ πλαισίου

Παρόλο που η μέση ετήσια επίδραση στην ενέργεια μπορεί να είναι μικρή, η κατανόηση της ημερήσιας και εποχιακής επίδρασης που έχει το μεταβαλλόμενο ηλιακό φάσμα στην απόδοση του ΦΒ πλαισίου είναι άκρως σημαντική. Η εικόνα 5.2 απεικονίζει την επίδραση της μεταβολής του ηλιακού φάσματος στο κανονικοποιημένο ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, καθώς η γωνία ανύψωσης του ήλιου αυξάνεται προχωρώντας προς το μεσημέρι και έπειτα μειώνεται. Η συμπεριφορά που αποτυπώνεται στην εικόνα αυτή για ένα mc-Si και ένα a-Si πλαίσιο εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της φασματικής απόκρισης των μεμονωμένων στοιχείων του πλαισίου.



Σχ. 5.2 Επίδραση του ηλιακού φάσματος στο ρεύμα I_{sc} συναρτήσει της γωνίας ανύψωσης του ήλιου

Η φασματική αυτή επίδραση στην ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια εξαρτάται επίσης από την εποχή του έτους, καθώς το καλοκαίρι ο ήλιος παραμένει σε υψηλές γωνίες ανύψωσης (χαμηλές τιμές αέριας μάζας) για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με το χειμώνα, όπου παρατηρούνται μικρότερες γωνίες ανύψωσης (υψηλές τιμές αέριας μάζας). Για να γίνει εμφανές αυτό το εποχιακό φαινόμενο, υπολογίστηκε η μέση ημερήσια παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του ηλιακού φάσματος, και οι τιμές που προέκυψαν διαιρέθηκαν με την αντίστοιχη παραγόμενη ενέργεια θεωρώντας ότι δεν υπάρχει εξάρτηση από το ηλιακό φάσμα. Η εικόνα 5.3 δείχνει τις προκύπτουσες αναλογίες για δύο πλαίσια, ένα mc-Si κι ένα a-Si, και τα δύο με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης. Σημειώνεται ότι η φασματική επίδραση έχει σαν αποτέλεσμα μια εποχιακή διακύμανση και για τις δύο τεχνολογίες, με σημαντικότερη όμως αυτή για το a-Si πλαίσιο. Η ιδιόζουσα αυτή εποχιακή συμπεριφορά για τα a-Si πλαίσια έχει παρατηρηθεί σε μακροχρόνιες παρακολουθήσεις απόδοσης a-Si φβ συστημάτων.



Σχ. 5.3 Εποχιακή μεταβολή της επίδρασης του ηλιακού φάσματος

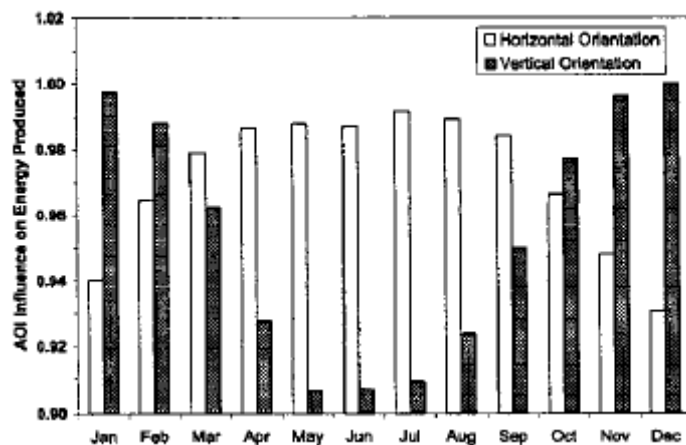
5.2.5 Επίδραση Γωνίας Πρόσπτωσης Ηλιακής Ακτινοβολίας

Ο τελευταίος παράγοντας που επηρεάζει την παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια dc ενέργεια είναι η επίδραση των οπτικών απωλειών που μεταβάλλονται με την γωνία πρόσπτωσης, υπό την οποία οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν στο πλαίσιο. Η επίδραση αυτή σχετίζεται κυρίως με την ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς η απόκριση του πλαισίου στη διάχυτη ακτινοβολία είναι κατά κύριο λόγο ανεξάρτητη του προσανατολισμού του. Στην περίπτωση επιπέδων πλαισίων, οι οπτικές απώλειες σχετίζονται με τις απώλειες ανάκλασης της εμπρόσθιας γυάλινης επιφάνειας. Η ανάκλαση της γυάλινης επιφάνειας αυξάνεται σημαντικά για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60° περίπου. Αποτέλεσμα αυτού είναι μικρότερη ποσότητα ακτινοβολίας να φτάνει στα στοιχεία στο εσωτερικού του πλαισίου και ως εκ τούτου η παραγόμενη ενέργεια να μειώνεται σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Όπως και η επίδραση των μεταβολών του ηλιακού φάσματος, έτσι και η επίδραση από αυτή την οπτική απώλεια στην ετήσια ενεργειακή παραγωγή είναι σχετικά μικρή. Παρ' όλα αυτά μπορεί να προκαλέσει μια σημαντική εποχιακή (μηνιαία) μεταβολή, ανάλογα με τον προσανατολισμό του πλαισίου. Ο πίνακας 5.5 συνοψίζει την επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης στην ετήσια ενεργειακή παραγωγή ενός mc-Si πλαισίου για τέσσερις διαφορετικούς προσανατολισμούς σε τρεις διαφορετικές τοποθεσίες. Στην περίπτωση πλαισίου τοποθετημένου σε στρεφόμενη βάση ανίχνευσης δύο αξόνων ($AOI=0^\circ$), η απώλεια στην ενέργεια εξαιτίας της γωνίας πρόσπτωσης είναι μηδενική. Όπως φαίνεται στον πίνακα, η μέγιστη επίδραση στην

ετήσια ενέργεια είναι σχετικά μικρή, περίπου 4%, για την περίπτωση κατακόρυφα τοποθετημένου πλαισίου, ενώ για την τυπική περίπτωση πλαισίου τοποθετημένου υπό κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος η ετήσια απώλεια είναι μόνο 1% (περίπου). Η εποχιακή (μηνιαία) επίδραση στην ενεργειακή παραγωγή φαίνεται στο Σχήμα 5.4 για ένα mc-Si πλαίσιο τοποθετημένο οριζόντια ή κάθετα στην Albuquerque. Τέλος, σημειώνεται ότι στην ιδιαίτερη περίπτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων ενσωματωμένων σε κτίρια, η επίδραση αυτή της γωνίας πρόσπτωσης στη μηνιαία ενεργειακή παραγωγή θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη φάση του σχεδιασμού του συστήματος.

	Ανίχνευση σε 2 άξονες	Κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος	Οριζόντια	Κατακόρυφη
<i>Albuquerque</i>	1	0.989	0.976	0.960
<i>Sacramento</i>	1	0.989	0.981	0.957
<i>Buffalo</i>	1	0.993	0.985	0.975

Πίνακας 5.5 Επίδραση οπτικών απωλειών εξαιτίας της γωνίας πρόσπτωσης (AOI) στην ετήσια απόδοση ΦΒ πλαισίου για διαφορετικές διατάξεις



Σχ. 5.4 Εποχιακή μεταβολή της επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης

5.3 ας Ενέργεια Διαθέσιμη από Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Η κατανόηση όλων των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και την αξιοπιστία τους είναι σημαντική. Η ανάλυση

των βασικών παραγόντων που επιδρούν στην dc ενεργειακή παραγωγή μεμονωμένων πλαισίων αποτελεί βασικό βήμα προς αυτή την κατεύθυνση. Ωστόσο, οι παράγοντες επιπέδου πλαισίου που συζητήθηκαν προηγουμένως, θα πρέπει να εξεταστούν σε σχέση με τους παράγοντες επιπέδου συστήματος, οι οποίοι είναι δυνατόν να τους υπερκεράσουν.

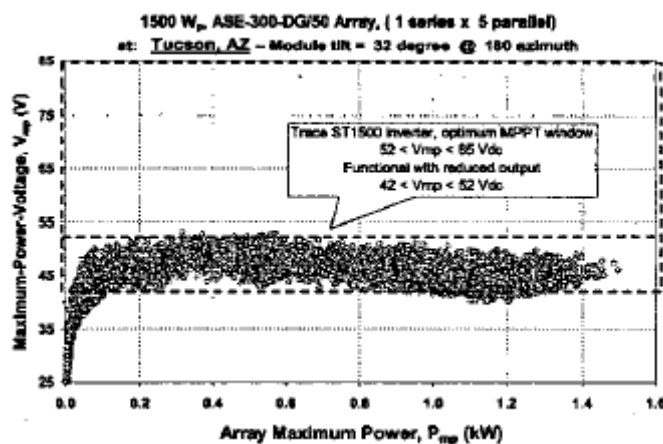
Οι παράγοντες σε επίπεδο συστήματος εισάγουν ενεργειακές απώλειες εξαιτίας διαφοροποιήσεων – αστοχιών (mismatch) στα πλαίσια εντός της συστοιχίας, ρύπανσης, καλωδιακών και τερματικών αντιστάσεων, φθοράς (degradation) λόγω ηλικίας (μείωση απόδοσης συστοιχίας) και ασυμβατότητας των μερών του συστήματος. Επιπροσθέτως, τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν απώλειες που σχετίζονται με την απόδοση του μετατροπέα συναρτήσει του φορτίου και της θερμοκρασίας, κυκλωματικές απώλειες μετατροπέα, ικανότητα παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος (maximum-power-point-tracking, MPPT), μόνωση μετασχηματιστών κλπ. Από την άλλη, τα αυτόνομα συστήματα παρουσιάζουν απώλειες και περιορισμούς στο σχεδιασμό τους που σχετίζονται με την ικανότητα του ρυθμιστή φορτίου (charge controller) (αξιοποίηση της dc ενέργειας που διατίθεται από τη συστοιχία), τη χωρητικότητα του συσσωρευτή, την ικανότητα φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή. Σε ελλειπώς σχεδιασμένα συστήματα, συνδυασμοί των παραπάνω παραγόντων μπορεί να έχουν σαν συνέπεια αδυναμία οδήγησης του φορτίου, προκαλώντας απώλειά του.

Παρόλο που τα εκάστοτε αποτελέσματα εξαρτώνται κατά κάποιο τρόπο από το είδος και την τοποθεσία του πλαισίου, ο πίνακας 5.6 παρουσιάζει μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης των διαφορετικών παραγόντων που επιδρούν στην ac παραγωγή του συστήματος, σε συνδυασμό με το εύρος της πιθανής μεταβολής που προκαλούν. Οι πειραματικές μετρήσεις που έχουν διεξαχθεί σε περιπτώσεις νέων σε ηλικία συστημάτων, παρέχουν μια εκτίμηση του εύρους της επίδρασης από την διαφοροποίηση των πλαισίων στην απόδοση της συστοιχίας. Ωστόσο αυτό το εύρος μπορεί να αυξηθεί με τα χρόνια λειτουργίας του συστήματος καθώς η διαφοροποίηση των πλαισίων είναι πιθανό να επιδεινωθεί. Τέλος, το ζήτημα της επιλογής μετατροπέα συμβατού με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της φβ συστοιχίας αποτελεί σχεδιαστική πρόκληση εδώ και πολλά χρόνια.

Παράγοντες επίδρασης ac παραγωγής	Εύρος (%)
Προσανατολισμός πλαισίου	-25 – +30
Συσσωρευτές	-30 – -5
MPPT	-30 – -5
Μετατροπείς-μετασχηματιστές	-20 – -5
Απόκλιση από ονομαστικές προδιαγραφές	-15 – 0
Θερμοκρασιακοί συντελεστές	-10 – -2
Φθορά λόγω “γήρατος” (% / έτος)	-7 – 0.5
Εξάρτηση V_{mp} από ακτινοβολία	-5 – +5
Ρύπανση	-10 – 0
Οπτικές απώλειες (γωνία πρόσπτωσης)	-5 – 0
Διαφοροποιήσεις-αστοχίες πλαισίων	-5 – 0
Διακυμάνσεις ηλιακού φάσματος	-3 – +1

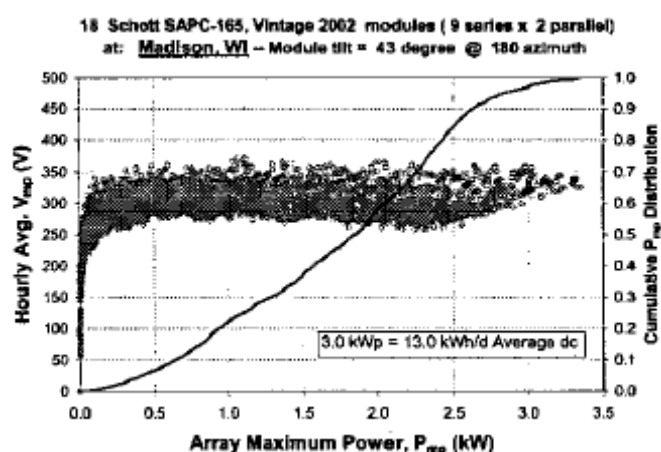
Πίνακας 5.6 Παράγοντες επίδρασης ac παραγωγής ΦΒ συστήματος

Παραδείγματα των συνεπειών που έχει η επιλογή των διαφόρων μερών του συστήματος, στην αξιοποίηση της dc ενέργειας που διατίθεται από τη συστοιχία και στην προκύπτουσα ετήσια ac παραγωγή, για δύο διαφορετικά διασυνδεδεμένα συστήματα, παρουσιάζονται στις εικόνες 5.5, 5.6 και 5.7. Η εικόνα 5.5 απεικονίζει ένα διάγραμμα των ωριαίων τιμών της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος (V_{mp}) συναρτήσει του επιπέδου μέγιστης ισχύος της συστοιχίας. Στο διάγραμμα αυτό υπερτίθεται το “παράθυρο τάσης εισόδου” του μετατροπέα που χρησιμοποιείται στο ΦΒ σύστημα. Σε αυτή την περίπτωση, οι απαιτήσεις του μετατροπέα δεν ταιριάζουν με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της συστοιχίας, ή με άλλα λόγια το αποτέλεσμα είναι σημαντική μείωση στην ενέργεια εξαιτίας της μειωμένης απόδοσης του μετατροπέα.

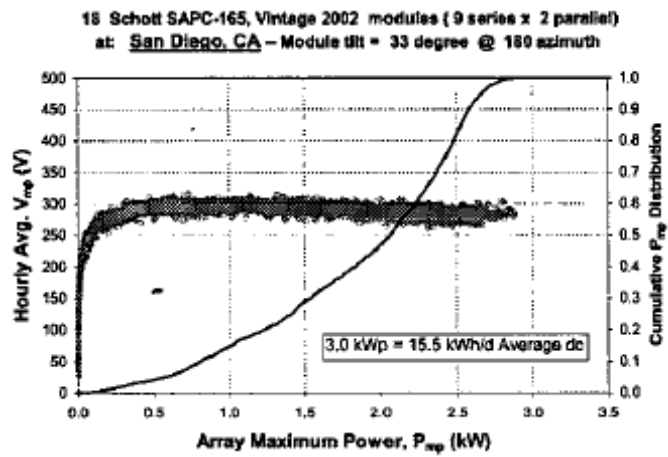


Σχ. 5.5 Ωριαίες τιμές V_{mp} συναρτήσει της P_{mp} ενός ΦΒ συστήματος 1.5kWp

Οι εικόνες 5.6 και 5.7 απεικονίζουν μια περίπτωση στην οποία το ίδιο σχεδιαστικά διασυνδεδεμένο σύστημα εξετάζεται για δύο θέσεις εγκατάστασης με εντελώς διαφορετικά μετεωρολογικά χαρακτηριστικά. Σε αυτή την περίπτωση, ο μετατροπέας που επιλέχθηκε έχει ευρύ MPPT παράθυρο τάσης ($250 < V < 550$ Vdc), ονομαστική ισχύ εισόδου 2,5 kW και ανώτατο όριο ισχύος 2,7 kW πάνω από το οποίο η ισχύς που παράγεται από τη συστοιχία περιορίζεται. Η μοντελοποίηση της απόδοσης της συστοιχίας παρέχει αρκετά συμπεράσματα, σημαντικά για το σχεδιασμό του συστήματος. Και για τις δύο θέσεις εγκατάστασης, το εύρος της τάσης V_{mp} της συστοιχίας είναι ελαφρώς υψηλότερο του κατώτατου ορίου (250 Vdc) του παραθύρου MPPT του μετατροπέα. Το εύκρατο κλίμα στο San Diego έχει σαν αποτέλεσμα μια στενή ζώνη τάσεων V_{mp} σε σύγκριση με το Madison, όπου παρατηρούνται μεγάλης σχετικά διάρκειας ημέρες και εποχιακές διακυμάνσεις στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για το ίδιο μέγεθος συστοιχίας, περίπου 20% περισσότερη ετήσια dc ενέργεια είναι διαθέσιμη από τη συστοιχία στο San Diego σε σχέση με αυτή στο Madison. Όπως φαίνεται από την καμπύλη αθροιστικής κατανομής της ισχύος P_{mp} , υψηλότερο ποσοστό της ετήσιας dc ενέργειας διαθέσιμης από τη συστοιχία στο Madison υπερβαίνει το όριο ισχύος εισόδου του μετατροπέα (2,7 kW) από ότι στο San Diego. Το ποσοστό αυτό στο Madison είναι περίπου 10% σε σύγκριση με το 3% που παρατηρείται στο San Diego.



Σχ. 5.6 Ωριαίες τιμές V_{mp} συναρτήσεως της P_{mp} ενός ΦΒ συστήματος 3.0kWp (Madison, WI)



Σχ. 5.7 Ωριαίες τιμές V_{mp} συναρτήσει της P_{mp} ενός ΦΒ συστήματος 3.0kWp (San Diego, CA)

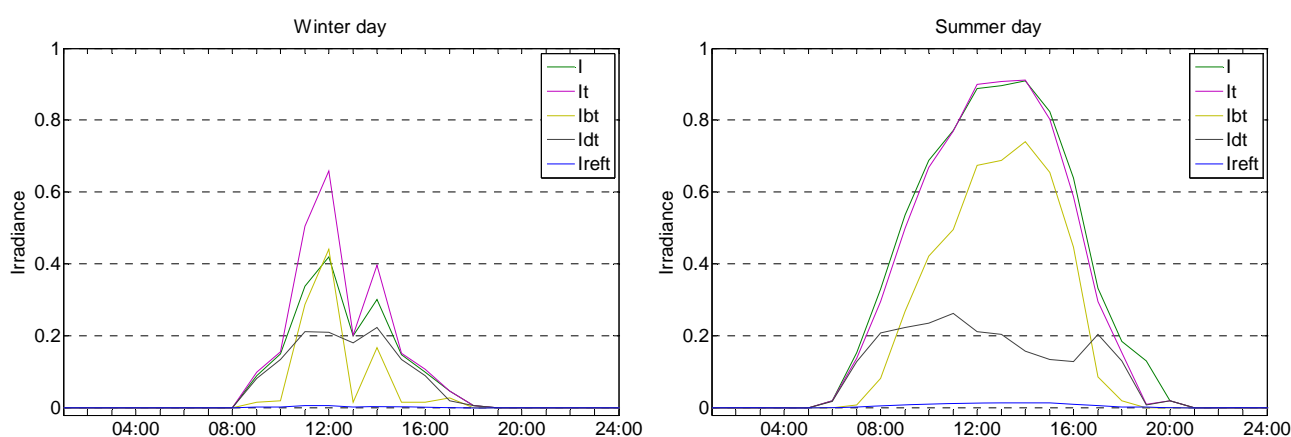
Κεφάλαιο 6

Εφαρμογή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια σειρά εφαρμογών του μοντέλου που αναπτύχθηκε. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ως είσοδοι χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της θέσης εγκατάστασης (γεωγραφικό μήκος και πλάτος) και των ΦΒ πλαισίων (είδος πλαισίου, κλίση κτλ). Αρχικά γίνεται η ανάλυση που σχετίζεται με την ακτινοβολία που προσπίπτει σε έναν κεκλιμένο συλλέκτη. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ηλεκτρική συμπεριφορά των πλαισίων όπως προκύπτει από την εφαρμογή του ενεργειακού μοντέλου που αναπτύχθηκε. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου αναφορικά με την απόδοση ενός τυπικού φωτοβολταϊκού σταθμού και γίνεται διερεύνηση των παραγόντων που επιδρούν στην τελική διαθέσιμη ενέργεια που διατίθεται στο δίκτυο.

6.1 Ηλιακή Ακτινοβολία

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός ΦΒ συλλέκτη μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συνιστώσες: την άμεση ή ακτινική, τη διάχυτη και την ανακλώμενη ακτινοβολία. Τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, που είναι διαθέσιμα για μια συγκεκριμένη τοποθεσία όμως, δίνονται υπό μορφή ωριαίων τιμών ολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο. Ο προσδιορισμός των επιμέρους συνιστωσών καθώς και της ολικής ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη όπως προκύπτει από το μοντέλο απόδοσης για δύο τυπικές ημέρες, μια χειμωνιάτικη και μια θερινή, δίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 6.1 Ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας δύο τυπικών ημερών

Όπως είναι αναμενόμενο η τιμή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, I , είναι αισθητά μειωμένη το χειμώνα. Αυτό έχει ως συνέπεια να παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά και από την ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο, I_t . Αυτό που αξίζει να σημειωθεί ωστόσο είναι ότι κατά τη διάρκεια του χειμώνα παρατηρείται σημαντικό κέρδος στην λαμβανόμενη ηλιακή ενέργεια εξαιτίας της κλίσης του συλλέκτη, ενώ το καλοκαίρι οι I και I_t σχεδόν συμπίπτουν. Αυτός – το ενεργειακό όφελος στη διάρκεια του έτους – είναι και ο κυριότερος λόγος, όπως θα δειχθεί και στη συνέχεια, που η κλίση των ΦΒ συλλεκτών επιλέγεται να έχει μια συγκεκριμένη τιμή. Η διάχυτη ακτινοβολία, I_{dt} , ως μέρος της ολικής στο επίπεδο του συλλέκτη, I_t , είναι υψηλότερη κατά τη διάρκεια του χειμώνα και συνεισφέρει σημαντικά στην ολική ενώ η ανακλώμενη ακτινοβολία, I_{reft} , αποτελεί ένα πολύ μικρό

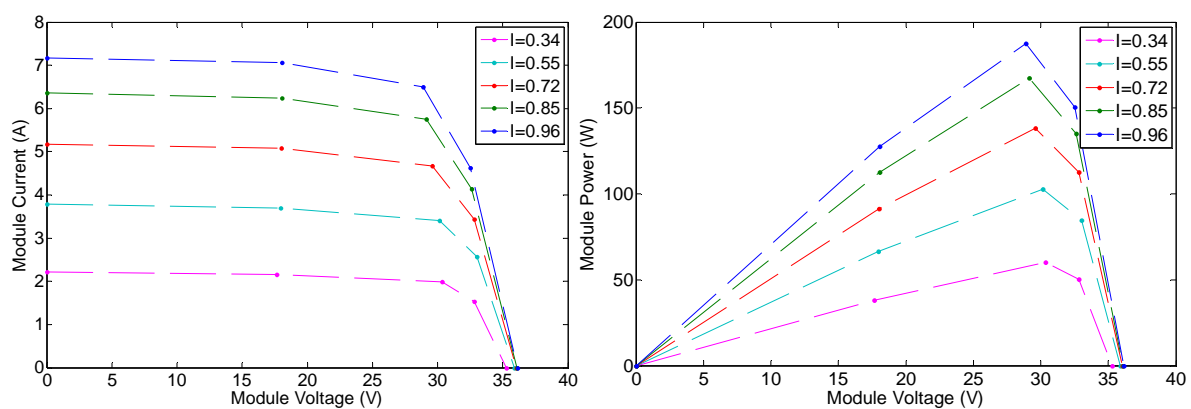
μέρος της συνολικής. Η τιμή της τελευταίας, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και βασικά από το συντελεστή ανάκλασης που προσεγγίζει καλύτερα την εκάστοτε θέση εγκατάστασης του ΦΒ σταθμού. Στη συνέχεια δίνεται ένας πίνακας με τις τυπικές τιμές που παίρνει ο συγκεκριμένος συντελεστής για διάφορους τύπους περιβάλλοντος.

Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης
Επιφάνεια νερού, θάλασσα	0,05
Ασφαλτόστρωμα	0,07
Αγρός με σκοτεινόχρωμο χώμα	0,08
Πράσινος αγρός	0,15
Βραχώδης επιφάνεια	0,20
Επιφάνεια παλαιού τσιμέντου	0,24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου ή χρωματισμένη με ανοιχτό χρώμα	0,30
Χιόνι	0,60

Πίνακας 6.1 Τυπικές τιμές συντελεστή ανάκλασης

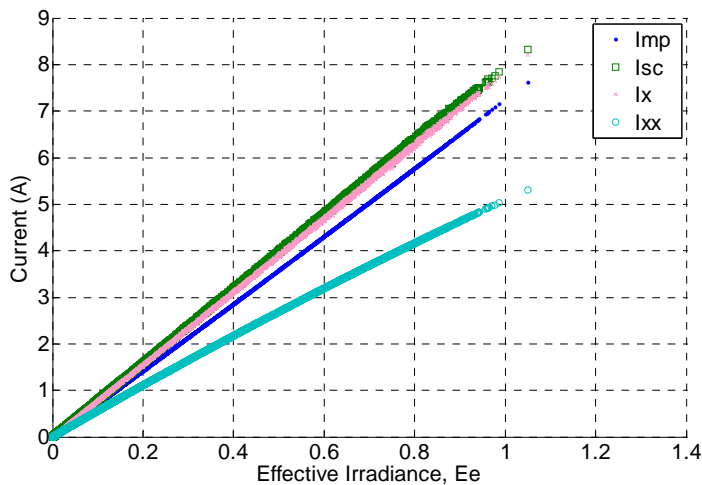
6.2 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

Το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, προσδιορίζει πέντε χαρακτηριστικά σημεία της I-V καμπύλης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου κι από αυτά εξάγεται και η παραγόμενη ισχύς του. Οι προκύπτουσες I-V και P-V για ένα πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου 208Wp του εμπορίου δίνονται στη συνέχεια για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας.



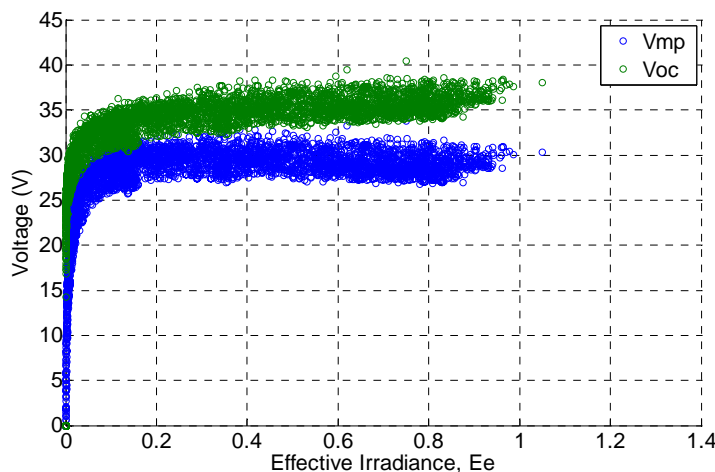
Σχ. 6.2 Χαρακτηριστικές I-V και P-V για ένα ΦΒ πλαίσιο 208Wp

Όπως είναι γνωστό από τη θεωρία το ρεύμα ενός ΦΒ πλαισίου εξαρτάται γραμμικά από την ακτινοβολία. Αυτό σημαίνει πως μείωση της ακτινοβολίας έχει σαν αποτέλεσμα ανάλογη μείωση στο ρεύμα εξόδου. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται ακριβώς αυτή η σχέση όπως προκύπτει από την εφαρμογή του μοντέλου για το ίδιο πλαίσιο των 208Wp.

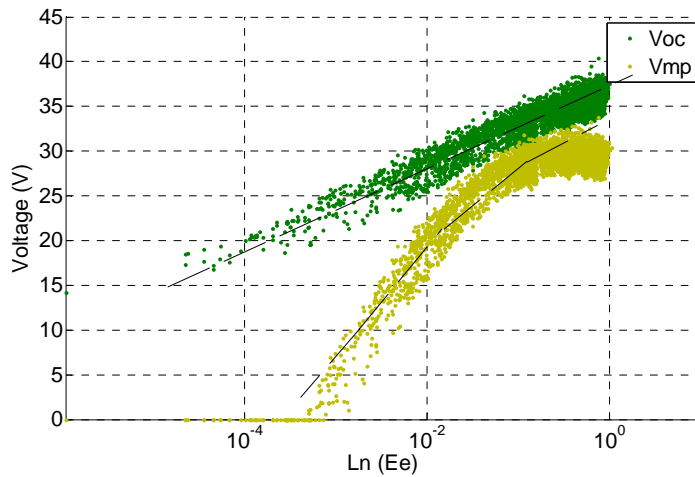


Σχ. 6.3 Γραφική παράσταση του ρεύματος σε συνάρτηση με την ακτινοβολία

Από την άλλη πλευρά, για την τάση ενός ΦΒ πλαισίου γνωρίζουμε ότι εξαρτάται λογαριθμικά από την ακτινοβολία και κατά συνέπεια προκύπτουν τα ακόλουθα αντίστοιχα διαγράμματα.

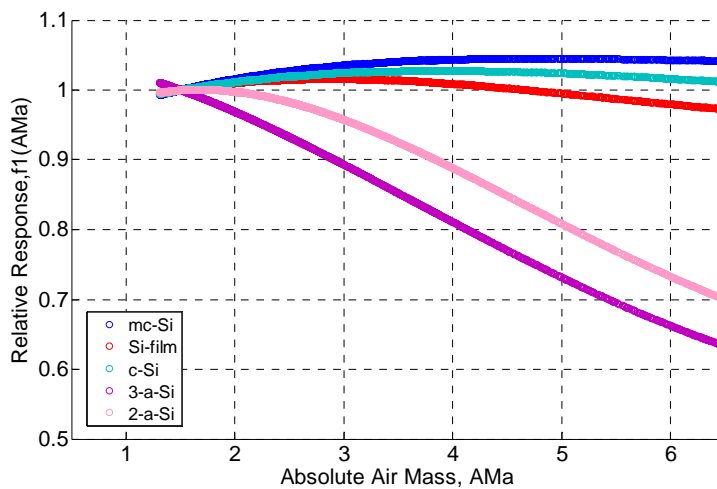


Σχ.6.4 Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με την ακτινοβολία

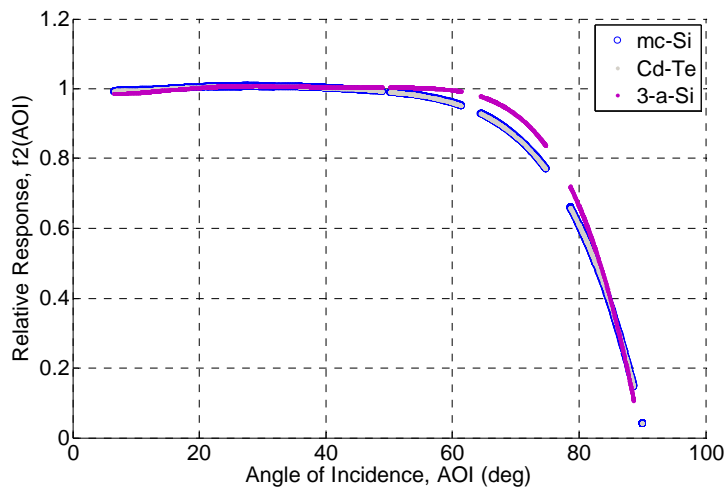


Σχ. 6.5 Μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με το λογάριθμο της ακτινοβολίας

Σαν ακτινοβολία έχει ληφθεί εδώ η “ενεργός” ακτινοβολία, E_e , η οποία αντιστοιχεί στην πραγματική ακτινοβολία στην οποία αποκρίνονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αφού ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις της γωνίας πρόσπτωσης (AOI) και του φάσματος της ακτινοβολίας (AMa). Οι επιδράσεις αυτές για διαφορετικούς τύπους πλαισίων δίνονται στη συνέχεια.



Σχ. 6.6 Μεταβολή του συντελεστή f_1 που εκφράζει τις απώλειες εξαιτίας του ηλιακού φάσματος συναρτήσει της AMa



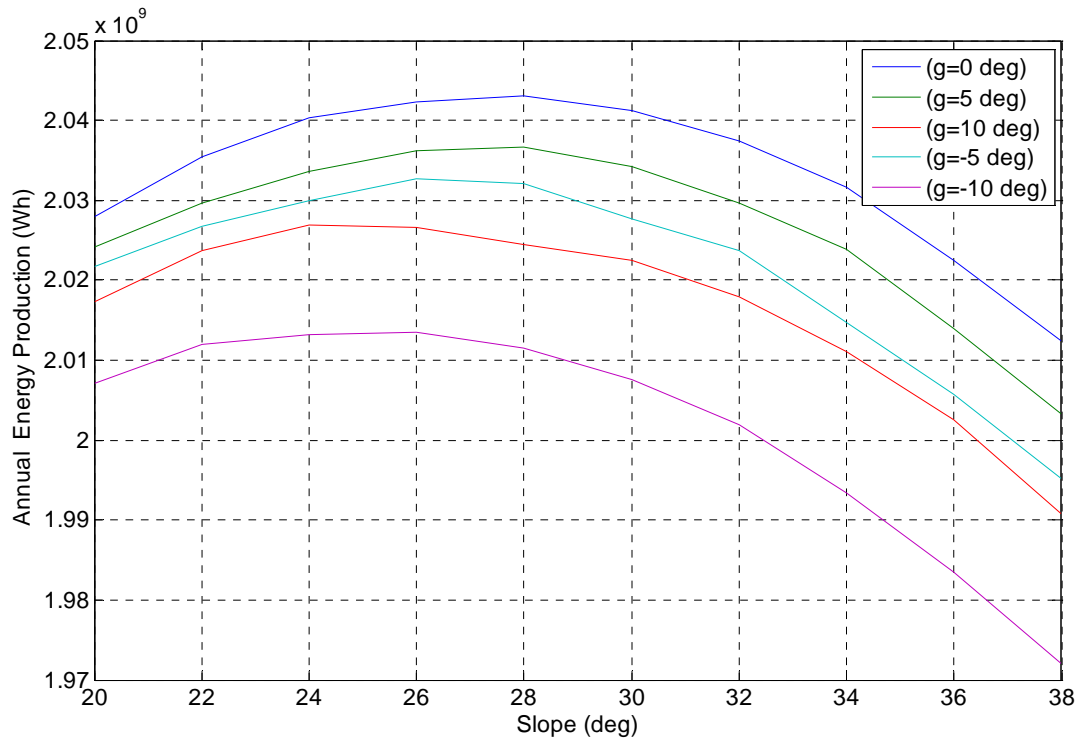
Σχ. 6.7 Μεταβολή του συντελεστή f_2 που εκφράζει τις απώλειες εξαιτίας της γωνίας πρόσπτωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης

6.3 Κλίση και Προσανατολισμός

Ένα σημαντικό ερώτημα στο οποίο καλείται να απαντήσει κάποιος κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός ΦΒ συστήματος είναι η γωνία κλίσης με την οποία θα τοποθετηθούν οι συλλέκτες και επιπρόσθετα ο προσανατολισμός τους ως προς το Νότο. Για να απαντηθεί το παραπάνω ερώτημα έγινε μια σειρά προσομοιώσεων τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται συγκεντρωμένα στη συνέχεια.

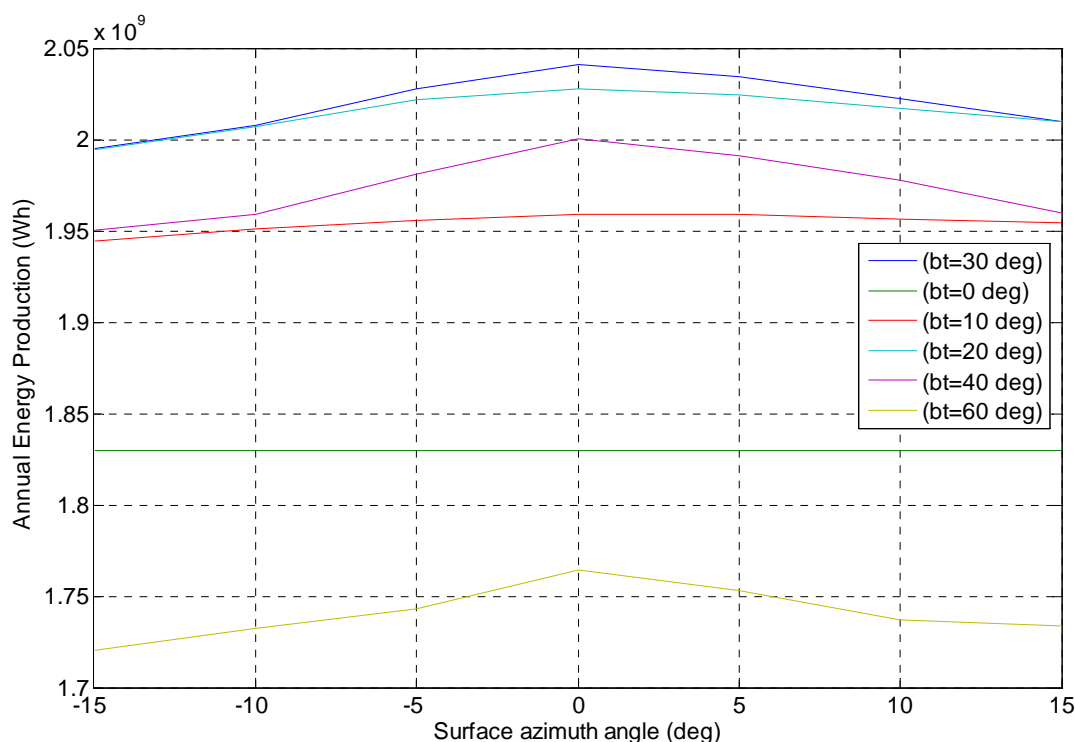
Ο ΦΒ σταθμός που εξετάστηκε αποτελείται από 9 σειρές συστοιχιών καθεμιά από τις οποίες αποτελείται από 7 συστοιχίες (συνολικά 63 συστοιχίες). Η κάθε συστοιχία αποτελείται από 4 σειρές πλαισίων συνδεδεμένων παράλληλα καθεμιά από τις οποίες έχει 21 πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά. Κάθε πλαίσιο (τεχνολογίας πολυκρυσταλλικού πυριτίου) παράγει ισχύ 208Wp ενώ η ισχύς εξόδου της συστοιχίας είναι 17,472kWp και του ΦΒ σταθμού 1,1MWp. Το πρώτο διάγραμμα που ακολουθεί δίνει την ετήσια παραγωγή του σταθμού ως συνάρτηση της κλίσης β των συλλεκτών. Όπως είναι φανερό η βέλτιστη κλίση είναι γύρω στις 30° (συγκεκριμένα για τη δεδομένη χρονοσειρά προκύπτει ίση με 28° για $\gamma=0^\circ$). Αυτό ισχύει για διάφορους προσανατολισμούς (αζιμούθια γωνία συλλέκτη) γ και επιβεβαιώνει τον κανόνα που προτάζει η κλίση να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης (εδώ ίσο περίπου με 37°). Στην πράξη το επιθυμητό είναι η κλίση αυτή να είναι μειωμένη κατά 10° το καλοκαίρι και αυξημένη κατά 10° το χειμώνα. Το

αποτέλεσμα των 28° συνεπώς δικαιολογείται από το γεγονός ότι το καλοκαίρι είναι η περίοδος με το μεγαλύτερο ηλιακό δυναμικό κι έτσι η επίδραση στη συνολική ετήσια παραγωγή είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του χειμώνα.



Σχ. 6.8 Ετήσια ενεργειακή παραγωγή ως συνάρτηση της κλίσης β

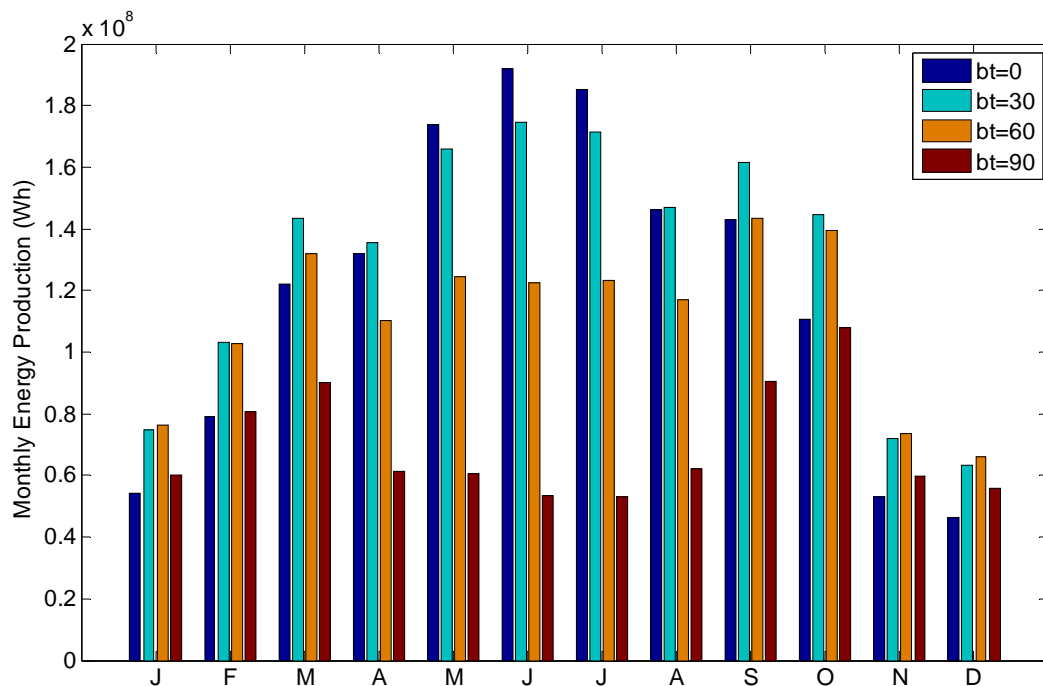
Κατάλληλες προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν και για τον προσδιορισμό του βέλτιστου προσανατολισμού των συστοιχιών ως προς το Νότο. Όπως φαίνεται κι από το διάγραμμα που ακολουθεί η μέγιστη παραγωγή επιτυγχάνεται για $\gamma=0^\circ$, δηλαδή για πλαίσια στραμμένα προς το νότο, ανεξάρτητα από τη γωνία κλίσης τους. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι η εξάρτηση αυτή της παραγωγής από τον προσανατολισμό είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη εξάρτηση από την κλίση.



Σχ. 6.9 Ετήσια ενεργειακή παραγωγή ως συνάρτηση του προσανατολισμού γ

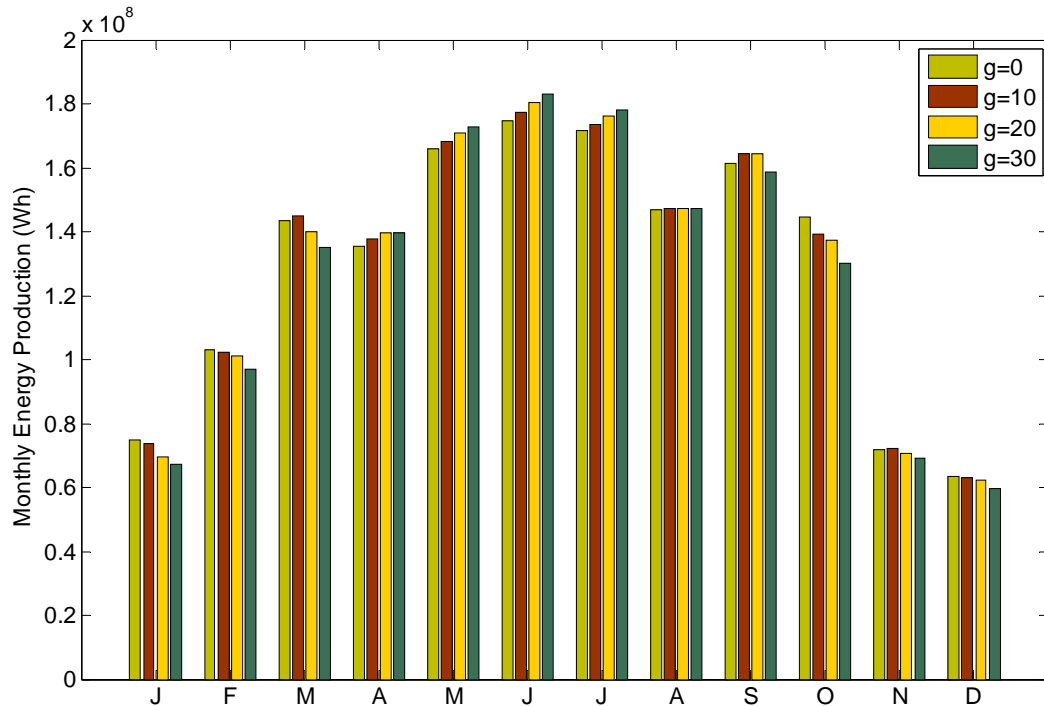
Στη συνέχεια δίνονται τα ιστογράμματα που αντιστοιχούν στις μηνιαίες τιμές ενέργειας του ΦΒ συστήματος όπως προκύπτουν για διαφορετικές κλίσεις και προσανατολισμούς. Στην πρώτη περίπτωση, Σχ. 6.10, παρουσιάζεται η παραγωγή για δεδομένο προσανατολισμό $\gamma=0^\circ$. Ενώ έχει αποδειχθεί παραπάνω ότι η βέλτιστη κλίση είναι αυτή των 30° , παρατηρείται μια εποχιακή διαφοροποίηση όταν λαμβάνονται υπόψη οι μηνιαίες τιμές παραγόμενης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι κατά του θερινούς μήνες η παραγωγή ενέργειας μεγιστοποιείται για μηδενική κλίση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά τους θερινούς μήνες ο ήλιος διασχίζει βορειότερα τον ουράνιο θόλο σε σχέση με το χειμώνα. Τότε οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν κάθετα στα ΦΒ πλαίσια όταν αυτά είναι σε μικρότερη κλίση, και κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα να προκύπτει μεγαλύτερη ακτινική συνιστώσα ακτινοβολίας, η οποία αποτελεί και το μεγαλύτερο μέρος της ενεργού ακτινοβολίας στην οποία τα πλαίσια αποκρίνονται. Τους χειμερινούς μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο παρουσιάζεται μέγιστη παραγωγή για κλίση $\beta=60^\circ$. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από τον κανόνα που προαναφέραμε και ο οποίος προστάζει αύξηση της κλίσης των συλλεκτών κατά τη διάρκεια του χειμώνα

κατά 10° (εδώ με γεωγραφικό πλάτος 37° , η κλίση των 60° είναι αυτή που ακολουθεί καλύτερα αυτόν τον κανόνα). Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, πρέπει να σημειωθεί ότι βασικό παράγοντα στα επιμέρους αποτελέσματα αποτελούν και τα πραγματικά δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, που είναι κάθε φορά διαθέσιμα, και τα οποία είναι δυνατό να παρουσιάζουν μια όχι και τόσο ομαλή συμπεριφορά όσο αυτή που είναι θεωρητικώς αναμενόμενη.



Σχ. 6.10 Μηνιαία παραγωγή ενέργειας για διάφορες κλίσεις β των ΦΒ συστοιχιών ($\gamma=0^\circ$)

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η εποχιακή διαφοροποίηση της παραγόμενης ενέργειας για δεδομένη κλίση $\beta=30^\circ$ και για διάφορους προσανατολισμούς των ΦΒ πλαισίων. Τα αποτελέσματα που εξάγονται δεν ακολουθούν μια καθορισμένη συμπεριφορά και οδηγούν στο συμπέρασμα ότι επηρεάζονται σημαντικά από την εκάστοτε διαθέσιμη χρονοσειρά ακτινοβολίας. Πάντως, όπως φαίνεται κι από το ακόλουθο διάγραμμα, οι μεταβολές στον προσανατολισμό δεν έχουν τόσο σημαντική επίδραση στην ενέργεια που παράγει ένα ΦΒ πλαίσιο, όσο έχει η κλίση του, γεγονός που επισημαίνεται συχνά και στη βιβλιογραφία.

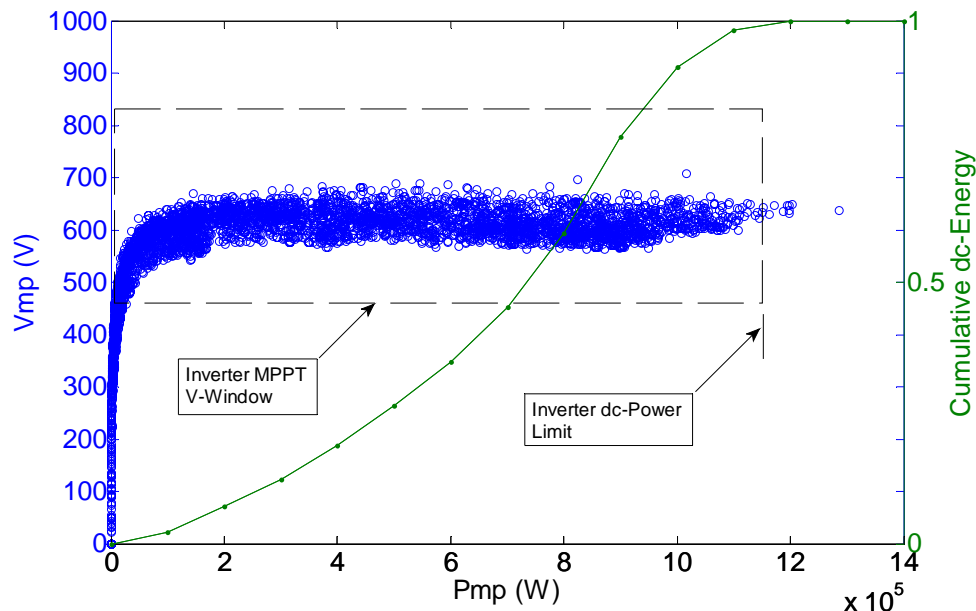


Σχ. 6.11 Μηνιαία παραγωγή ενέργειας για διαφορετικούς προσανατολισμούς γ των ΦΒ συστοιχιών ($\beta=30^\circ$)

6.4 Χαρακτηριστικά Μετατροπέα

Απαραίτητο στοιχείο κάθε ΦΒ συστήματος αποτελούν οι μετατροπείς, οι διατάξεις που μετατρέπουν τη συνεχή ενέργεια που παράγεται από τα ΦΒ πλαίσια σε εναλλασσόμενη που τροφοδοτεί συγκεκριμένα φορτία ή το δίκτυο. Τα χαρακτηριστικά του μετατροπέα, που είναι πολύ σημαντικά τόσο στη φάση του σχεδιασμού ενός συστήματος όσο και στην ανάλυση της απόδοσής του, είναι αυτά που συνοψίζονται από τον όρο “παράθυρο” του μετατροπέα. Με τον όρο αυτό προσδιορίζεται το εύρος της τάσης στο οποίο πραγματοποιείται ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT) και το επιτρεπόμενο όριο της ισχύος εισόδου του μετατροπέα. Στο ενεργειακό μοντέλο που αναπτύχθηκε έχει προσομοιωθεί το παραπάνω “παράθυρο” και στο σημείο αυτό αναλύεται η επίδρασή του στην αναμενόμενη απόδοση του ΦΒ συστήματος.

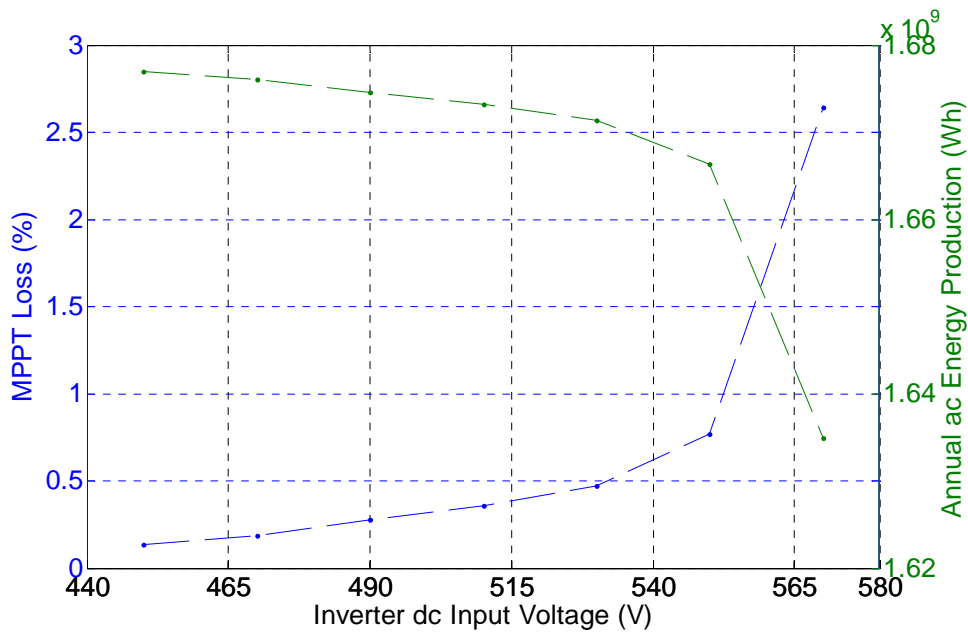
Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρατίθενται η παραγόμενη ισχύς του ΦΒ σταθμού που περιγράφηκε προηγουμένως σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του μετατροπέα.



Σχ. 6.12 Παραγόμενη ισχύς και χαρακτηριστικά μετατροπέα

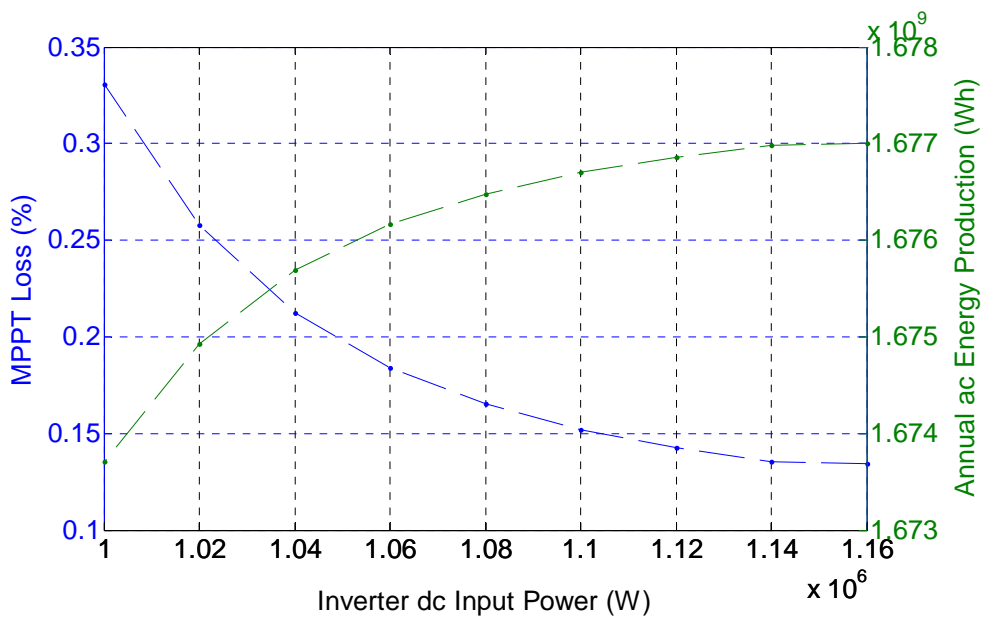
Ο ΦΒ σταθμός που εξυπηρετείται από τον συγκεκριμένο μετατροπέα έχει εγκατεστημένη ισχύ 1,1MW και ονομαστική τάση μέγιστης ισχύος 605V. Ο μετατροπέας αντίστοιχα έχει παράθυρο MPPT που προσδιορίζεται από τάση που βρίσκεται στα όρια 450V – 820V και μέγιστη ισχύ εισόδου 1,160MW όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα. Το σύνολο της παραγωγής, όπως προκύπτει για τα συγκεκριμένα δεδομένα, παρουσιάζεται για τάσεις μέσα στα όρια του μετατροπέα κι επιπλέον η ισχύς που παράγεται από τα πλαίσια σε πολύ λίγες περιπτώσεις ξεπερνά το όριο μέγιστης ισχύος εισόδου του μετατροπέα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, όπως αναλύεται και στη συνέχεια, χαμηλές απώλειες που οφείλονται στα χαρακτηριστικά του μετατροπέα. Κάτι τέτοιο βέβαια είναι αναμενόμενο ότι δε συμβαίνει σε περιπτώσεις που τα χαρακτηριστικά του μετατροπέα δεν “ακολουθούν” αυτά του συστήματος.

Οι γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν συνοψίζουν τις απώλειες MPPT και την αντίστοιχη διαθέσιμη από το σύστημα ac ενέργεια για διαφορετικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα και για το συγκεκριμένο ΦΒ σταθμό.



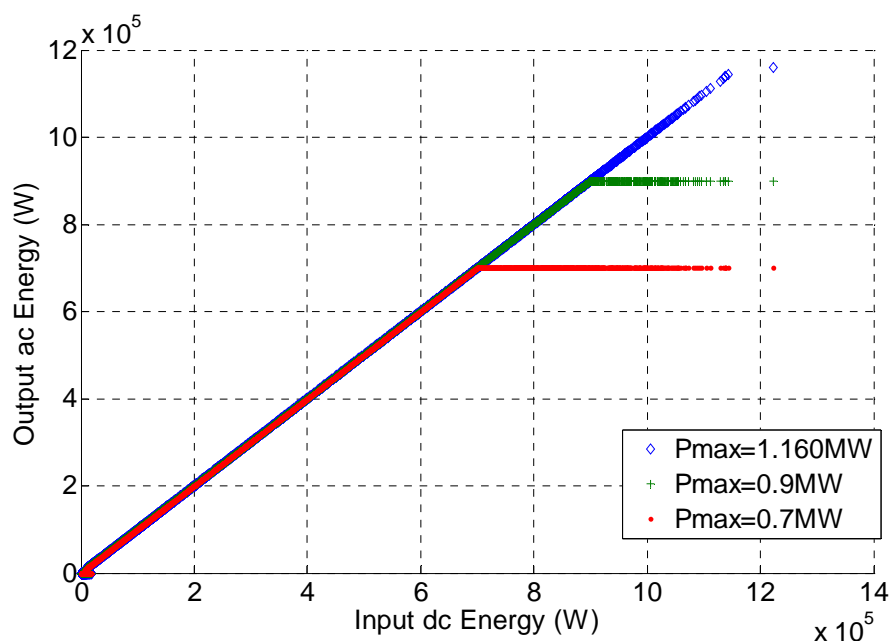
Σχ. 6.13 Απώλειες MPPT και διαθέσιμη ενέργεια συναρτήσει του ορίου τάσης εισόδου του μετατροπέα

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα οι απώλειες μένουν αρκετά χαμηλές για παράθυρα που ορίζονται από τάσεις χαμηλότερες των 530V. Από εκεί και πέρα αυξάνονται κατακόρυφα, καθώς απορρίπτεται μεγάλο μέρος της παραγόμενης από τα πλαίσια ισχύος, η οποία προκύπτει πλέον για τάσεις μικρότερες του παραθύρου του μετατροπέα.



Σχ. 6.14 Απώλειες MPPT και διαθέσιμη ενέργεια συναρτήσει του ορίου ισχύος εισόδου του μετατροπέα

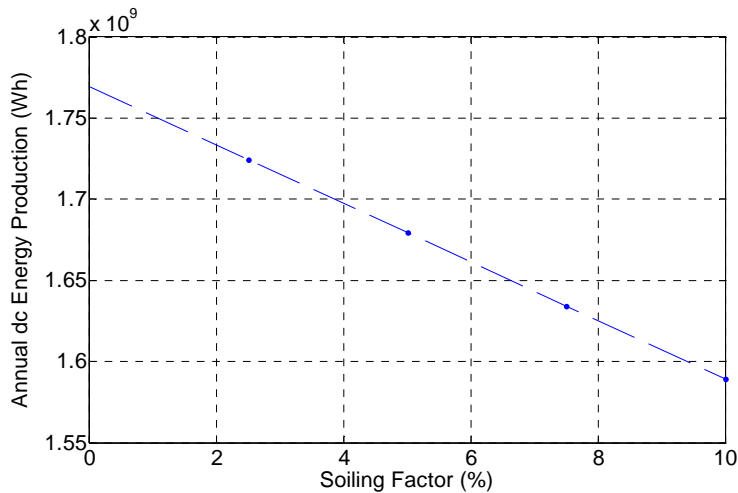
Στην περίπτωση της μείωσης του ορίου μέγιστης ισχύος εισόδου του μετατροπέα παρατηρείται όπως είναι αναμενόμενο αύξηση των απωλειών. Ωστόσο, επειδή εδώ δεν απορρίπτεται η παραγόμενη από τα πλαίσια ισχύς αλλά περιορίζεται στο ανώτατο όριο του μετατροπέα η συνολικές απώλειες είναι πολύ χαμηλότερες από αυτές που προκύπτουν από τη μεταβολή της τάσης εισόδου. Η συμπεριφορά αυτή, του περιορισμού της ισχύος εισόδου του μετατροπέα, φαίνεται εποπτικά στο παρακάτω σχήμα για διάφορες τιμές παραθύρου ισχύος.



Σχ.6.15 Περιορισμός εισερχόμενης ισχύος στο μετατροπέα

6.5 Ρύπανση Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε θεωρήθηκε ένας σταθερός παράγοντας ρύπανσης των πλαισίων κατά τη διάρκεια του έτους. Ο παράγοντας αυτός επιδρά – μειώνει την ενεργό ακτινοβολία που φτάνει τελικά στα ΦΒ στοιχεία των πλαισίων και κατά συνέπεια προκαλεί μείωση της παραγόμενης ενέργειας. Η μείωση αυτή είναι ανάλογη, όπως είναι αναμενόμενο, του σταθερού αυτού συντελεστή απωλειών λόγω ρύπανσης (Σχ. 6.16). (Μια τυπική τιμή του συντελεστή αυτού που χρησιμοποιείται συχνά στην πράξη είναι 5%).

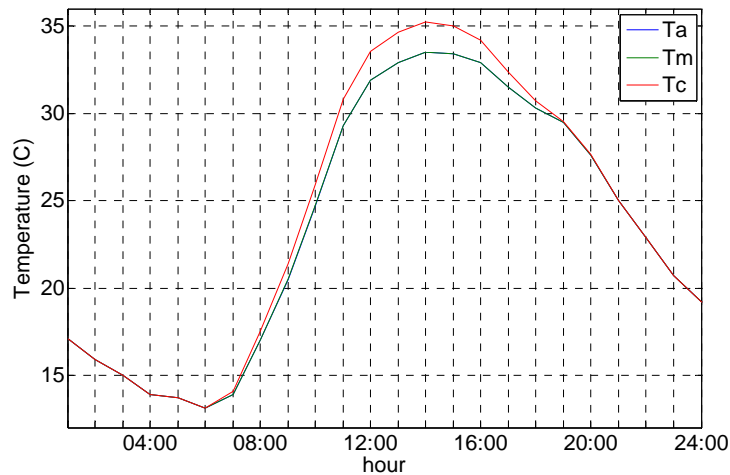


Σχ. 6.16 Ετήσια ενεργειακή παραγωγή συναρτήσει του συντελεστή ρύπανσης

6.6 Θερμοκρασία

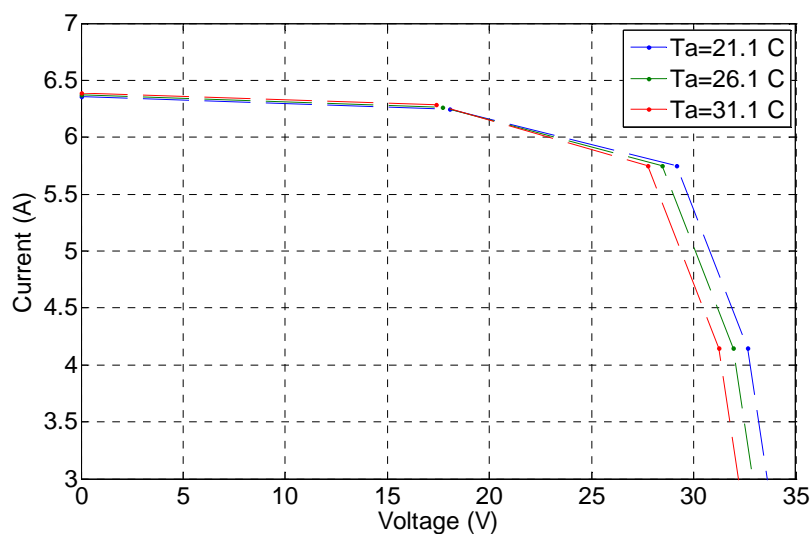
Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η απόδοση των ΦΒ πλαισίων εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μάλιστα αρνητικά. Αυτό σημαίνει ότι αύξηση της θερμοκρασίας, οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές παραγόμενης ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, η τάση των πλαισίων παρουσιάζει αρνητική εξάρτηση, ενώ το ρεύμα μια μικρότερη θετική με αποτέλεσμα η συνολική επίδραση της θερμοκρασίας στην ισχύ να είναι αρνητική.

Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, έχει ενσωματωθεί μια εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των στοιχείων που βασίζεται σε διαθέσιμες μετρήσεις θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ακτινοβολίας, ταχύτητας ανέμου καθώς και σε κάποιους εμπειρικά προσδιορισμένους συντελεστές που σχετίζονται με τον εκάστοτε τύπο πλαισίου και είναι συγκεντρωμένοι στη βάση δεδομένων των εργαστηρίων της Sandia. Στη συνέχεια δίνονται δύο τυπικά γραφήματα, ένα με τον συσχετισμό θερμοκρασίας περιβάλλοντος και θερμοκρασίας ΦΒ στοιχείων κι ένα που παρουσιάζει τη μεταβολή της χαρακτηριστικής $I - V$ για διαφορετικές θερμοκρασίες.



Σχ. 6.17 Θερμοκρασίες περιβάλλοντος – οπίσθιας επιφάνειας – ΦΒ στοιχείων

Η θερμοκρασία της οπίσθιας όψης του πλαισίου, από το παραπάνω σχήμα, συμπίπτει ουσιαστικά με αυτήν του περιβάλλοντος ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας των ΦΒ στοιχείων όπως ήταν αναμενόμενο είναι αυξημένη.



Σχ. 6.18 Χαρακτηριστική I-V για διαφορετικές θερμοκρασίες

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται καθαρά οι επιδράσεις της θερμοκρασίας. Η αρνητική επίδραση στην τάση, η θετική στο ρεύμα και η συνολικά αρνητική στη μέγιστη ισχύ.

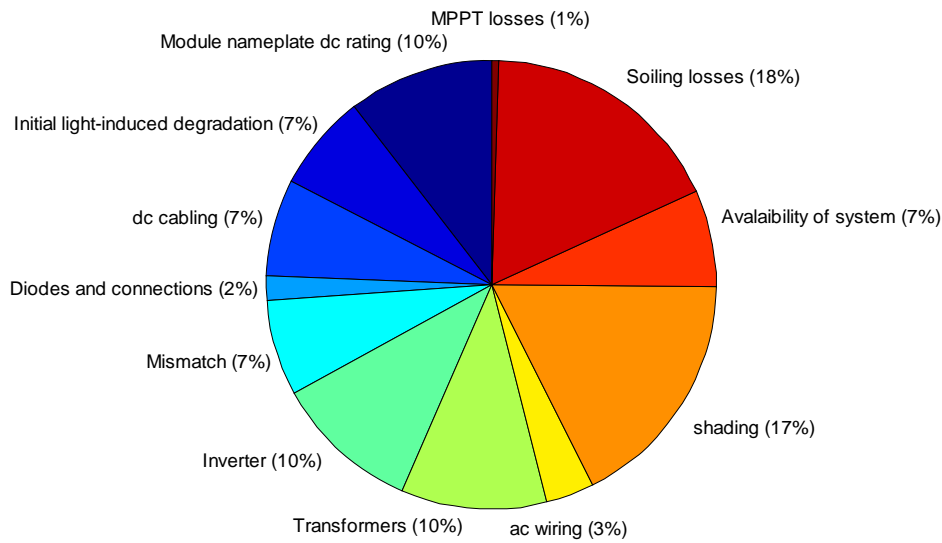
6.7 Συντελεστής Απωλειών

Σε κάθε ΦΒ σύστημα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τελική ac ενέργεια που διανέμεται στο φορτίο ή το δίκτυο είναι μειωμένη σε σχέση με αυτήν που έχουν τη δυνατότητα να παράγουν τα ΦΒ πλαίσια υπό καθορισμένες συνθήκες (ακτινοβολία, θερμοκρασία κλπ). Οι απώλειες που παρουσιάζονται σχετίζονται με μια σειρά παραγόντων που επιδρούν στα διαφορετικά μέρη του συστήματος. Οι απώλειες αυτές, στην παρούσα εργασία, έχουν λάβει μια τυπική τιμή που προκύπτει από τον συνδυασμό των επιμέρους συνιστωσών. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται συγκεντρωμένες οι τιμές αυτές καθώς επίσης και το εύρος στο οποίο κυμαίνονται.

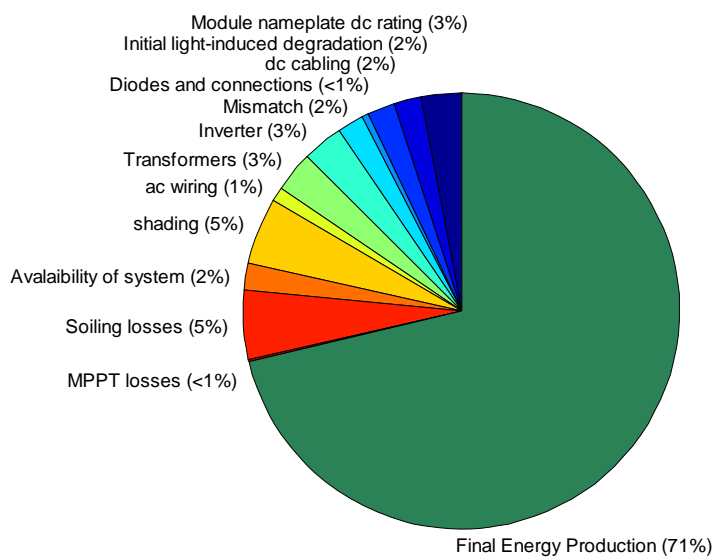
Είδος Απώλειας	Τυπική τιμή	Εύρος
Απόκλιση από ονομαστικές τιμές του φύλλου προδιαγραφών	0,97	0,85 – 1,05
Πρώτη ακτινοβολία	0,98	0,90 – 0,99
dc καλωδιώσεις	0,98	0,97 – 0,99
Δίοδοι και διασυνδέσεις	0,995	0,99 – 0,997
Αστοχία (mismatch)	0,98	0,97 – 0,985
Μετατροπέας	0,97	0,93 – 0,98
Μετασχηματιστές	0,97	0,96 – 0,98
ac καλωδιώσεις	0,99	0,98 – 0,993
Σκίαση	0,95	0,0-1,00
Διαθεσιμότητα συστήματος	0,98	0,00 – 0,995
Σύνολο	0,79	

Πίνακας 6.2 Παράγοντες μείωσης ac ενέργειας

Στον παραπάνω συντελεστή μείωσης προστίθενται οι απώλειες μείωσης λόγω ρύπανσης και οι απώλειες που οφείλονται στο παράθυρο του μετατροπέα. Η συνεισφορά των επιμέρους απωλειών καθώς και η τελική ενέργεια που λαμβάνεται από το σύστημα φαίνονται στα παρακάτω κυκλικά διαγράμματα.

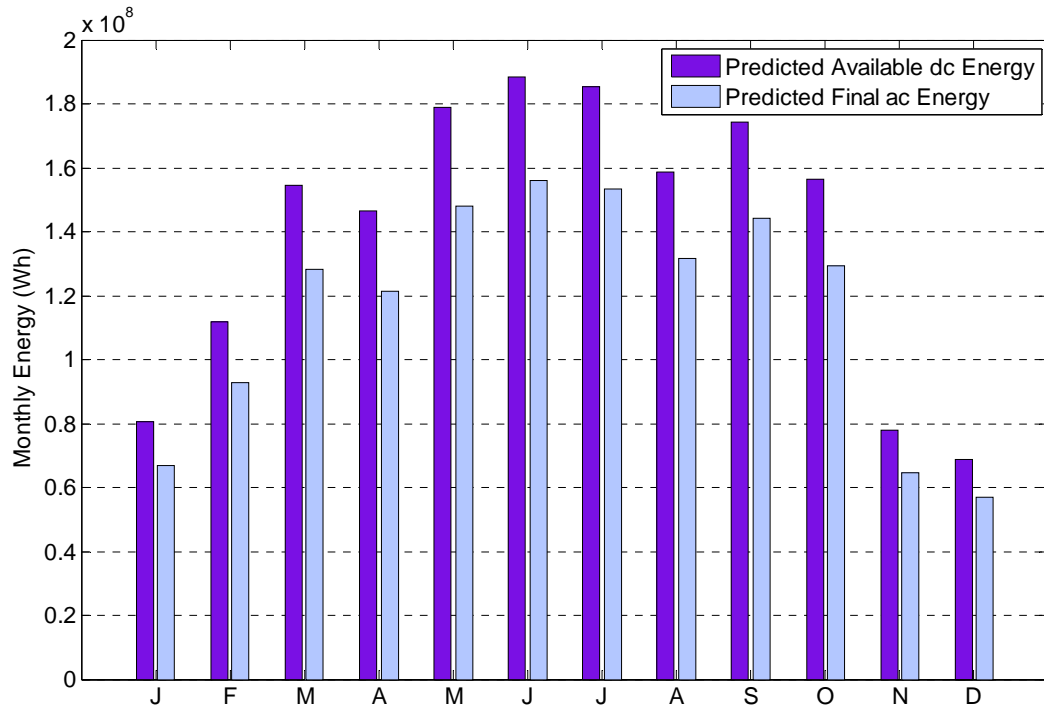


Σχ. 6.19 Συνεισφορά επιμέρους απωλειών στη συνολική απώλεια του συστήματος



Σχ. 6.20 Απώλειες συστήματος και παραγόμενη ac ενέργεια

Στο σημείο αυτό παρατίθεται η μηνιαία ενεργειακή παραγωγή σε συνδυασμό με την τελική ac ενέργεια που διατίθεται στο δίκτυο, αφού πρώτα έχουν συμπεριληφθεί όλες οι πιθανές απώλειες που προαναφέρθηκαν.



Σχ. 6.21 Μηνιαία παραγωγή ενέργειας ΦΒ συστήματος

6.8 Συντελεστής Απόδοσης (Performance Ratio)

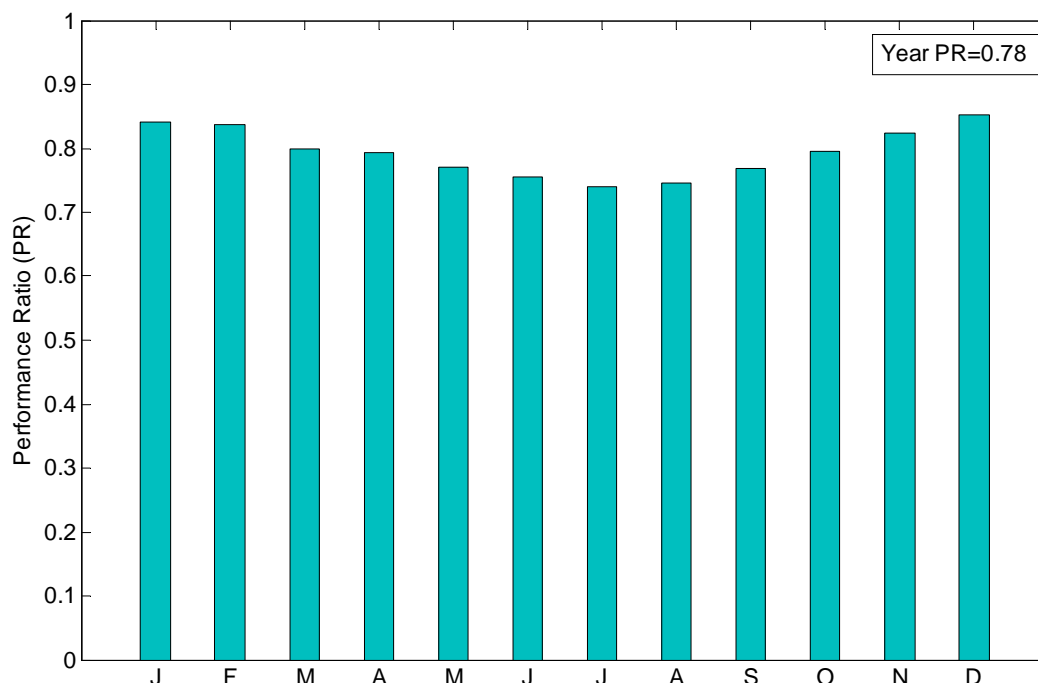
Η απόδοση των ΦΒ συστημάτων προσδιορίζεται από διάφορες παραμέτρους. Ωστόσο, ένας συντελεστής που επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και χρησιμοποιείται συχνά είναι ο συντελεστής απόδοσης (PR-Performance Ratio) [4]. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r}$$

Y_f είναι η καθαρή ενέργεια που παράγεται από το σύστημα διαιρεμένη με την ονομαστική ισχύ του συστήματος, δηλ. $Y_f = \frac{E}{P_0}$ με μονάδες (kWh/kW) ή (ώρες). Με τον δείκτη αυτό κανονικοποιείται η παραγόμενη ενέργεια ως προς την εγκατεστημένη ισχύ κι έτσι είναι δυνατή η σύγκριση συστημάτων διαφορετικών μεγεθών.

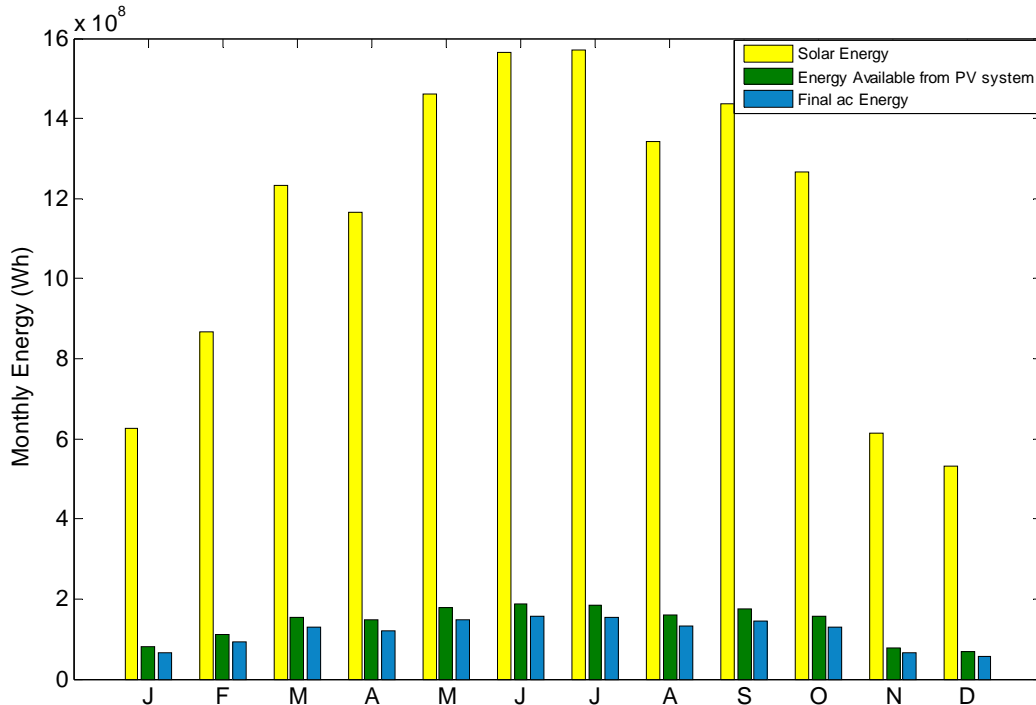
Y_r είναι η συνολική λαμβανόμενη ηλιακή ενέργεια διαιρεμένη με την ακτινοβολία αναφοράς (συνήθως 1000W/m^2), δηλ. $Y_r = \frac{H}{G}$ με μονάδες όπως και πριν τις ώρες. Ο δείκτης αυτός εκφράζει τη διαθέσιμη στο σύστημα ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια εξαρτάται από τη θέση εγκατάστασης, τον προσανατολισμό και διαφοροποιείται σημαντικά από μήνα σε μήνα ή από έτος σε έτος.

Ο συντελεστής απόδοσης PR ποσοτικοποιεί τη συνολική επίδραση των απωλειών στην τελική ενέργεια που λαμβάνεται από ένα ΦΒ σύστημα. Οι απώλειες αυτές περιλαμβάνουν χαμηλή απόδοση μετατροπέα, καλωδιώσεις, αστοχία πλαισίων, θερμοκρασία λειτουργίας, απώλειες λόγω ανάκλασης στην επιφάνεια των συλλεκτών, ρύπανση κ.ά. Η τιμή του δίνεται συνήθως σε μηνιαία ή ετήσια βάση. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι εξαιτίας των απωλειών που οφείλονται στη θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων οι τιμές του παρουσιάζονται αυξημένες κατά τη διάρκεια του χειμώνα σε σχέση με το καλοκαίρι. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται οι μεταβολές του PR κατά τη διάρκεια του έτους 2001 για το ΦΒ σταθμό 1,1MWp με χαρακτηριστικά αυτά που αναφέρθηκαν πιο πάνω καθώς επίσης και η ετήσια τιμή του.



Σχ. 6.22 Συντελεστής απόδοσης PR για το ΦΒ σταθμό 1,1MWp για το έτος 2001

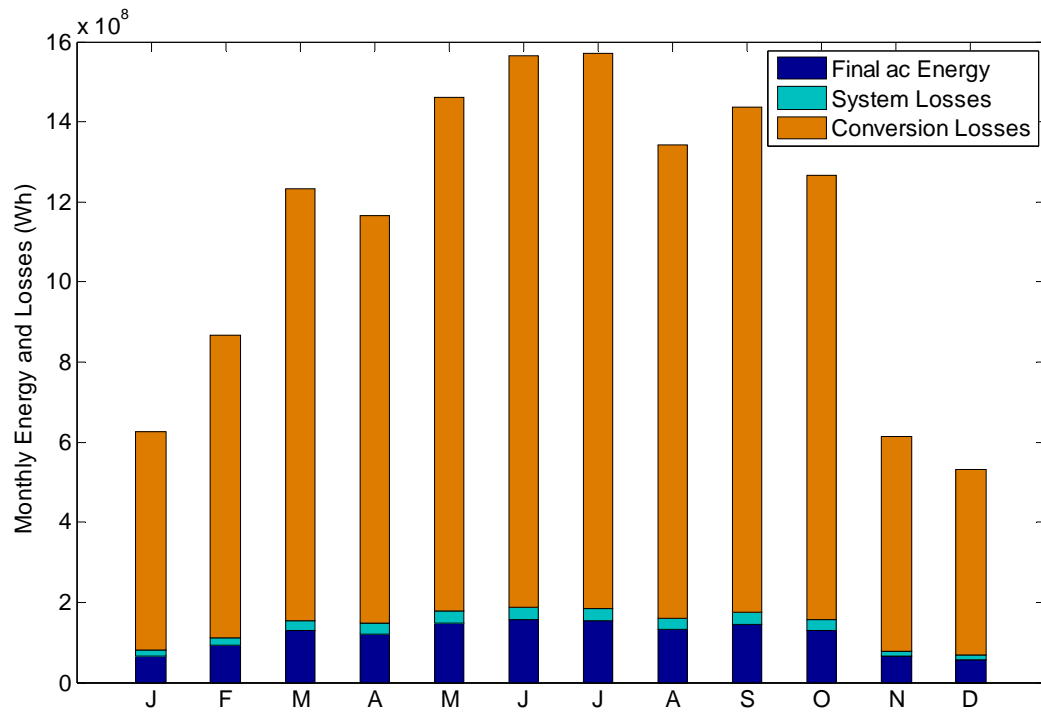
Στο ακόλουθο διάγραμμα δίνονται οι μηνιαίες τιμές της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στις ΦΒ συστοιχίες του σταθμού, η αντίστοιχη ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν και η τελική ac ενέργεια που τροφοδοτεί το δίκτυο.



Σχ. 6.23 Ηλιακή και αντίστοιχη ηλεκτρική ενέργεια ΦΒ σταθμού

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω ιστόγραμμα η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στα ΦΒ πλαίσια και η οποία τελικά μετατρέπεται σε ηλεκτρική είναι χαμηλή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ικανότητα μετατροπής των ΦΒ πλαισίων η οποία δεν ξεπερνά το 13%. Το ποσοστό αυτό διαφέρει ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται όμως για την πλειονότητα των εφαρμογών, οι οποίες στις μέρες μας χρησιμοποιούν πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου, κυμαίνεται μεταξύ 12-14%.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωμένες οι απώλειες μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική, οι απώλειες συστήματος, οι οποίες περιλαμβάνουν οποιεσδήποτε απώλειες υπεισέρχονται στην τελική ενέργεια που διατίθεται στο δίκτυο, καθώς επίσης και η τελική ac παραγωγή.



Σχ. 6.24 Ενέργεια και απώλειες ΦΒ συστήματος

Κεφάλαιο **7**

Συμπεράσματα

7.1 Γενικά

Το μοντέλο εκτίμησης ενεργειακής απόδοσης που αναπτύχθηκε παρέχει τη δυνατότητα διεξοδικής ανάλυσης ενός ΦΒ συστήματος. Το εύρος των εφαρμογών που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο σε συνδυασμό με την ανάλυση που προηγήθηκε οδηγούν σε κάποια γενικά συμπεράσματα.

Αρχικά, όπως ήταν αναμενόμενο, η παραγόμενη από το σύστημα ενέργεια εξαρτάται άμεσα από τη θέση εγκατάστασης καθώς αυτή είναι που καθορίζει τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες. Επιπλέον, για την ίδια θέση εγκατάστασης η ετήσια παραγωγή μεταβάλλεται από έτος σε έτος αφού αλλάζουν και τα αντίστοιχα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται.

Στη συνέχεια πρέπει να αναφερθεί η εποχιακή διακύμανση που παρατηρείται τόσο στην ενέργεια που παράγεται από τα ΦΒ πλαίσια και οφείλεται στη διαφοροποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας όσο και στην επίδραση ορισμένων συντελεστών απωλειών. Ενδεικτικά αναφέρεται η θερμοκρασία, η αυξημένη τιμή της οποίας κατά τους θερινούς μήνες έχει ως αποτέλεσμα εντονότερη επίδρασή της στην παραγόμενη ενέργεια κατά την περίοδο αυτή.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ο καθοριστικός ρόλος της σωστής επιλογής των υπολοίπων μερών που απαρτίζουν ένα ΦΒ σύστημα και η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις από τις αναμενόμενες τιμές ενέργειας που διατίθεται τελικά στο δίκτυο.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, το μοντέλο που αναπτύχθηκε βασίζεται στο μοντέλο ενεργειακής απόδοσης που προτάθηκε από τους King *et al.* μετά από εκτεταμένες πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν από τα εργαστήριά τους. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι το εν λόγω μοντέλο επιλέχθηκε ως βάση αναφοράς κυρίως λόγω της ακρίβειας που επιτυγχάνει. Ωστόσο παρουσιάζει υψηλή πολυπλοκότητα σε σχέση με άλλα υπάρχοντα μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά δεν επιτυγχάνουν μεν τέτοια συμφωνία μεταξύ προβλεπόμενων και μετρούμενων τιμών, δεν απαιτούν όμως τη χρήση τόσο μεγάλου αριθμού παραμέτρων. Οι συγκεκριμένες παράμετροι δεν είναι διαθέσιμες παρά μόνο για ένα συγκεκριμένο αριθμό πλαισίων, που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων των Sandia, γεγονός που αποτελεί το αρνητικό σημείο του αναπτυχθέντος μοντέλου.

7.2 Περαιτέρω διερεύνηση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια όσο το δυνατόν καλύτερης ανάλυσης των παραμέτρων που επιδρούν στην τελική ενέργεια που παράγεται από ένα ΦΒ σύστημα. Ωστόσο, για κάποιες από αυτές τις παραμέτρους έχουν προταθεί πιο σύνθετα μοντέλα περιγραφής της επίδρασής τους από την απλή λύση μιας σταθερής ετήσιας τιμής που επιλέχθηκε εδώ. Η ενσωμάτωση τέτοιων μοντέλων στο κυρίως σώμα του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης θα οδηγήσει σαφώς σε βελτίωση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Τέλος, κρίνεται σκόπιμη η επιβεβαίωση του μοντέλου που αναπτύχθηκε μέσα από τη σύγκριση των εκτιμώμενων τιμών με πραγματικές μετρήσεις, οι οποίες θα προκύψουν από πειραματικές διαδικασίες και οι οποίες δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθούν στα χρονικά πλαίσια που τίθενται για την εκπόνηση μιας διπλωματικής εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Duffie JA, Beckman WA “Solar Engineering of Thermal Processes” 2nd edition, Wiley, New York, NY, 1991
- [2] Καγκαράκη Κ. “Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία”, Εκδόσεις Συμμετρία
- [3] Παπαδόπουλος Μιχ. “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1997
- [4] Tom Markvart, Luis Castaner “Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications”, Elsevier
- [5] Steven Hegedus, Antonio Luque “Handbook of Photovoltaic Science and Engineering”, Wiley, England, 2002
- [6] King D. L., Boyson W. E., Kratochvil J. A. “Photovoltaic Array Performance Model”, Albuquerque, New Mexico, 2004
- [7] King D. L., Boyson W. E., Kratochvil J. A. “Analysis of Factors Influencing the Annual Energy Production of Photovoltaic Systems”, Albuquerque, New Mexico, 2002
- [8] Marion B., Adelstein J., Boyle K. “Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems”, 31st IEEE Photovoltaics Specialists, Florida, 2005
- [9] <http://photovoltaics.sandia.gov/>
- [10] www.nrel.gov/homer/
- [11] http://www.nrel.gov/rredc/pvwatts/changing_parameters.html
- [12] <http://www.mtpc.org/cleanenergy/solar/paneltypes.htm>
- [13] <http://www.earthscan.co.uk/Portals/0/Files/Sample%20Chapters/9781844074426.pdf>

Παράρτημα

Ακολούθως παρατίθεται ο κώδικας που συντάχθηκε σε γλώσσα MATLAB για την υλοποίηση του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης και ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στις απαραίτητες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο κεφάλαιο των εφαρμογών.

```

db=xlsread('db.xls');

XR=xlsread('xron01.xls');
%XR=xlsread('xron00.xls');

I=XR(:,2); %Radiation on the horizontal plane (kW/m2)
Ta=XR(:,3); %Ambient air temperature (oC)
WS=XR(:,4); %Wind speed measured at standard 10-m height (m/s)
P=XR(:,5); %Atmospheric pressure at the test site (mm Hg)
RF=XR(:,6); %Rainfall (mm)

f=37.42; %Latitude (deg in decade form)
bt=30; %Slope (deg in decade form)
g=0; %Surface azimuth angle (deg in decade form)
Lloc=22.11; %Longitude (deg in decade form)
GMT=+2; %Local Time Zone (h)
Gsc=1.367; %Solar constant (kW/m2)
rg=0.24; %Ground reflectance (%)
type=151; %module type
Ms=21; %Number of modules connected in series in each module-
string
Mp=4; %Number of module-strings connected in parallel
SF=0.05; % Soiling factor

Ns=db(type,4);
Np=db(type,5);
Isc=db(type,6);
Voco=db(type,7);
Impo=db(type,8);
Vmpto=db(type,9);
aIsc=db(type,10);
aImp=db(type,11);
C0=db(type,12);
C1=db(type,13);
bVoc0=db(type,14);
mbVoc=db(type,15);
bVmp0=db(type,16);
mbVmp=db(type,17);
ndb=db(type,18);
C2=db(type,19);
C3=db(type,20);
a0=db(type,21);
a1=db(type,22);
a2=db(type,23);
a3=db(type,24);
a4=db(type,25);
b0=db(type,26);
b1=db(type,27);
b2=db(type,28);
b3=db(type,29);
b4=db(type,30);
b5=db(type,31);
DT=db(type,32);
fd=db(type,33);
a=db(type,34);
b=db(type,35);
C4=db(type,36);
C5=db(type,37);

```

```

Ixo=db(type,38);
Ixxo=db(type,39);
C6=db(type,40);
C7=db(type,41);

To=25;           %Reference cell temperature (oC)
Eo=1;           %Reference solar irradiance (kW/m2)
Po=760;         %Atmospheric pressure at sea level (mm Hg)

for n=1:1:365
    Gon(n)=Gsc*(1+0.033*cosd(360*n/365)); %Extraterrestrial
                                         radiation on a plane
                                         normal to the radiation on
                                         the nth day of the year
                                         (kW/m2)

    B(n)=360*(n-1)/365;
    E(n)=3.82*(0.000075+0.001868*cosd(B(n))-0.032077*sind(B(n))...
              -0.014615*cosd(2*B(n))-0.04089*sind(2*B(n))); %Equation
                                                             of time(h)

    d(n)=23.45*sind(360*(284+n)/365); %Solar declination(deg)
    cosws(n)=-tand(f)*tand(d(n));
    ws(n)=acosd(cosws(n));

    for tc=1:1:24 %Civil time(h)
        k=(n-1)*24+tc;
        dd(k)=d(n);
        GGon(k)=Gon(n);
        ts(k)=tc+(Lloc/15)-GMT+E(n); %Solar time(h)

        wws(k)=ws(n);

        w(k)=(ts(k)-12)*15; %Solar hour angle
        costh(k)=sind(dd(k))*sind(f)*cosd(bt)...
                 -sind(dd(k))*cosd(f)*sind(bt)*cosd(g)...
                 +cosd(dd(k))*cosd(f)*cosd(bt)*cosd(w(k))...
                 +cosd(dd(k))*sind(f)*sind(bt)*cosd(g)*cosd(w(k))...
                 +cosd(dd(k))*sind(bt)*sind(g)*sind(w(k));
        th(k)=acosd(costh(k)); %Angle of incidence (deg)

        costhz(k)=cosd(dd(k))*cosd(f)*cosd(w(k))+sind(dd(k))*sind(f);
        thz(k)=acosd(costhz(k)); %Zenith angle (deg)

        if th(k)>=87 || thz(k)>=87
            Rb(k)=0;
        else
            Rb(k)=costh(k)/costhz(k); %Ratio of beam radiation
                                       on tilted surface to that on
                                       horizontal surface (%)
        end

        w1(k)=(ts(k)-0.5-12)*15; %Solar hour angle at the
                                   beginning of an hour period (deg
                                   in decade form)
        w2(k)=(ts(k)+0.5-12)*15; %Solar hour angle at the end
                                   of an hour period (deg in
                                   decade form)

        Ioh(k)=(12/pi)*GGon(k)*(cosd(f)*cosd(dd(k))*(sind(w2(k))-
        sind(w1(k)))+(pi/180)*(w2(k)-w1(k))*sind(dd(k))*sind(f));
        %Extraterrestrial radiation on a horizontal surface for an hour period
        (kW/m2)

        if Ioh(k)<0
            Ioh(k)=0;
        end

        if Ioh(k)==0 || Ioh(k)<I(k)
            Kt(k)=0;
        end
    end
end

```

```

else
    Kt(k)=I(k)/Ioh(k);           %Hourly clearness index (%)
end
if Kt(k)<=0.22
    Id(k)=I(k)*(1.-0.09*Kt(k));
else
    if Kt(k)<=0.8
        Id(k)=I(k)*(0.9511-0.1604*Kt(k)+4.388*(Kt(k))^2-
            16.638*(Kt(k))^3+12.336*(Kt(k))^4);
    else
        Id(k)=I(k)*0.165;
    end
end

Ib(k)=I(k)-Id(k);               %Beam radiation on the horizontal
                                surface (kW/m2)
Ibt(k)=Ib(k)*Rb(k);            %Beam radiation on the tilted
                                surface (kW/m2)

if Ioh(k)==0
    Ai(k)=0;
else
    Ai(k)=Ib(k)/Ioh(k);         %Anisotropy index (%)
end

if I(k)==0
    F(k)=0;
else
    F(k)=sqrt(Ib(k)/I(k));
end

Idt(k)=Id(k)*((1-
Ai(k))*((1+cosd(bt))/2)*(1+F(k)*(sind(bt/2))^3)+Ai(k)*Rb(k));
                                %Diffuse radiation on the tilted surface (kW/m2)

Ireft(k)=I(k)*rg*((1-cosd(bt))/2); %Ground reflected
                                radiation on the tilted surface (kW/m2)

It(k)=Ibt(k)+Idt(k)+Ireft(k);   %Total radiation on the
                                tilted surface - HDKR model (kW/m2)

end

end

for k=2:1:8760

if ((I(k)<I(k-1) && It(k)>It(k-1)) || (I(k)>I(k-1) && It(k)<It(k-1))) &&
(Ib(k)+Id(k)*Ai(k))~= 0

Rb(k)=(I(k)-Id(k)*(1-Ai(k))*((1+cosd(bt))/2)*(1+F(k)*(sind(bt/2))^3)-
Ireft(k))/(Ib(k)+Id(k)*Ai(k));
Ibt(k)=Ib(k)*Rb(k);
Idt(k)=Id(k)*((1-
Ai(k))*((1+cosd(bt))/2)*(1+F(k)*(sind(bt/2))^3)+Ai(k)*Rb(k));
It(k)=Ibt(k)+Idt(k)+Ireft(k);

end

end

for k=1:1:8760

kB=1.38066*(10^(-23));           %Boltzmann's constant (J/K)
q=1.60218*(10^(-19));           %Elementary charge (coulomb)

AM(k)=(coshz(k)+0.5057*(96.080-thz(k))^-1.634)^(-1); %Air mass

```

```

AMa(k)=AM(k)*(P(k)/Po);           %Absolute air mass (dimensionless)

if thz(k)>=87
    AMa(k)=0;
end

AOI(k)=th(k);           %Solar angle of incidence (degrees)

if th(k)>=90
    AOI(k)=90;
end

f1(k)=a0+a1*AMa(k)+a2*AMa(k)^2+a3*AMa(k)^3+a4*AMa(k)^4;           %Empirically
determined polynomial relating the solar spectral influence on Isc to air
mass variation over the day

f2(k)=b0+b1*AOI(k)+b2*AOI(k)^2+b3*AOI(k)^3+b4*AOI(k)^4+b5*AOI(k)^5;
%Empirically determined polynomial relating optical influences on Isc to
solar anle of incidence (AOI)

Eb(k)=Ibt(k);           %Beam component of solar irradiance incident on
the module surface (kW/m2)
Ediff(k)=Idt(k);           %Diffuse component of solar irradiance incident
on the module surface (kW/m2)
Et(k)=It(k);           %Solar irradiance incident on module surface
(kW/m2)

Ee(k)=(f1(k)*(Eb(k)*f2(k)+fd*Ediff(k)))*(1-SF);
%"Effective" solar irradiance to which the PV cells in the module actually
respond (dimensionless or "suns")

if Ee(k)<0
    Ee(k)=0;
end

Tm(k)=Et(k)*((exp(1))^(a+b*WS(k)))+Ta(k); %Back -surface module
temperature (oC)
Tc(k)=Tm(k)+Et(k)/Eo*DT;           %Cell temperature inside module (oC)
dTc(k)=ndb*kB*(Tc(k)+273.15)/q; %'Thermal voltage' per cell at
temperature Tc

Isc(k)=Isc0*Ee(k)*(1+aIsc*(Tc(k)-To)); %Short-circuit current (A)
Imp(k)=Impo*(C0*Ee(k)+C1*Ee(k)^2)*(1+aImp*(Tc(k)-To)); %Current at
the maximum-power point (A)

if Ee(k)==0
    Voc(k)=0;
    Vmp(k)=0;
else

Voc(k)=Voco+Ns*dTc(k)*log(Ee(k))+bVoc(k)*(Tc(k)-To);
%Open-circuit voltage (V)

Vmp(k)=Vmpo+C2*Ns*dTc(k)*log(Ee(k))+C3*Ns*((dTc(k)*log(Ee(k)))^2)+bVmp(k)*(T
c(k)-To);
%Voltage at maximum-power point (V)
end

if Voc(k)<0
    Voc(k)=0;
end

if Vmp(k)<0
    Vmp(k)=0;
end
end

```

```

Pmp(k)=Imp(k)*Vmp(k);           %Power at maximum-power point (W)

if Isc(k)==0 || Voc(k)==0
    FF(k)=0;
else
    FF(k)=Pmp(k)/(Isc(k)*Voc(k));           %Fill factor (dimensionless)
end

Ix(k)=Ixo*(C4*Ee(k)+C5*Ee(k)^2)*(1+aIsc*(Tc(k)-To));
%Current at module V=0.5*Voc (A)

Ixx(k)=Ixxo*(C6*Ee(k)+C7*Ee(k)^2)*(1+aImp*(Tc(k)-To));
%Current at module V=0.5*(Voc+Vmp) (A)

Iscarray(k)=Mp*Isc(k);
Imparray(k)=Mp*Imp(k);
Vocarray(k)=Ms*Voc(k);
Vmparray(k)=Ms*Vmp(k);
Ixarray(k)=Mp*Ix(k);
Ixxarray(k)=Mp*Ixx(k);
Pmparray(k)=Imparray(k)*Vmparray(k);

if Iscarray(k)==0 || Vocarray(k)==0
    FFarray(k)=0;
else
    FFarray(k)=Pmparray(k)/(Iscarray(k)*Vocarray(k));
end
Pmpnom(k)=63*Pmparray(k);
if Pmpnom(k)>1160000
    Pmpnomac(k)=1160000;
else
    Pmpnomac(k)=Pmpnom(k);
end
if Vmparray(k)<450 || Vmparray(k)>820
    Pmpnomac(k)=0;
end

Etotal=sum(Pmp)           %Annual production of one single module (Wh)
Etotalarray=sum(Pmparray) %Annual production of one array(21*4
                        modules) (Wh)
Enom=sum(Pmpnom)         %Annual production of one group of arrays
                        (9*7 arrays) (Wh)
Enomac=sum(Pmpnomac)     %Annual production of one group of arrays
                        with MPPT loss (9*7 arrays) (Wh)
DRfactor=0.97*0.98*0.98*0.995*0.98*0.97*0.97*0.99*1*1*0.98*0.95;
Pmpfin=DRfactor*Pmpnomac;
Efinal=DRfactor*Enomac

```