

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

Αναλυτικό Μοντέλο Ενεργειακής Απόδοσης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων με Ενσωμάτωση Εμπειρικών Δεδομένων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΑΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2009

ii



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

Αναλυτικό μοντέλο ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων με ενσωμάτωση εμπειρικών δεδομένων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΑΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΥ

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Ιουλίου 2009.

..... Α. Κλαδάς Καθηγητής Ε.Μ.Π. Σ. Μανιάς

..... Σ. Παπαθανασίου Καθηγητής Ε.Μ.Π. Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2009

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

Copyright © ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ 2009 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 το συγγραφέα.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης και αξιολόγησης της ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων, αναλυτικού χαρακτήρα. Ειδικότερα, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης της ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων, το οποίο να δέχεται ως εισόδους στοιχεία που δίνονται στο φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή (datasheet), μετεωρολογικά δεδομένα καθώς και τοποθεσία και διάταξη του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Υιοθετήθηκε η προσέγγιση της σύνθεσης δύο υπαρχόντων μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε το μοντέλο των πέντε παραμέτρων, που χαρακτηρίζεται από δυνατότητα αναλυτικής επίλυσης μέσω μαθηματικών σχέσεων, και το μοντέλο των Sandia National Laboratories, που βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις και μια βάση δεδομένων. Η σύνθεση έγκειται στο γεγονός της χρήσης ενός αναλυτικού μοντέλου πέντε παραμέτρων, που εμπλουτίζεται με πρόσθετες αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία της πληροφορίας που υπάρχει στις εμπειρικές σχέσεις του μοντέλου των Sandia National Laboratories και στη βάση δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό γίνεται προσπάθεια να ενσωματωθούν στοιχεία και από τα δύο μοντέλα.

Για το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης που αναπτύχθηκε κατασκευάστηκε λογισμικό σε Matlab, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το λογισμικό ενσωματώνει ένα φιλικό γραφικό περιβάλλον για αλληλεπίδραση με το χρήστη.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης συγκρίθηκαν τόσο με τα ακριβή αποτελέσματα που προβλέπει το μοντέλο των Sandia National Laboratories, όσο και με το μοντέλο πέντε παραμέτρων. Οι συγκρίσεις κατέδειξαν ότι το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης αν και αναλυτικό δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Λέξεις Κλειδιά

Φωτοβολταϊκή Συστοιχία, Μοντέλο ενεργειακής απόδοσης, Ενεργός ακτινοβολία, Θερμοκρασιακό μοντέλο, Συντελεστές απωλειών

ABSTRACT

The objective of this diploma thesis is to develop an analytical energy performance prediction model of photovoltaic systems. Especially, this energy performance model requires as input only data provided by the manufacturer, meteorological data and location as well as set-up of the photovoltaic system.

In order to achieve this goal already existing energy performance models were combined. More specifically, the analytical 5-parameter model developed by the University of Wisconsin and the energy performance model developed by Sandia National Laboratories were selected. The later is a model based on empirical equations, measurements and a related database. In this thesis, the developed energy performance model determines the desired five parameters and is enriched with more analytical mathematical equations which are derived from the use of the information existing in the empirical equations and database of the energy performance model of Sandia National Laboratories. In this way, an effort is made in order to combine elements of the two pre-mentioned models.

Software that implements the energy performance model was developed in Matlab environment and can be used as a reliable tool in the design of photovoltaic systems. The software also includes a graphical user interface with which the user can easily interact with the energy performance model data.

The results obtained by the developed energy performance model were compared with the ones of the performance model of Sandia National Laboratories as well as with those of the 5-parameter model. The comparisons demonstrated that the results were accurate and very satisfying.

Key Words

Photovoltaic Array, Energy Performance Model, Effective irradiance, Thermal Model, Derating Factors

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θερμές ευχαριστίες στον Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Σταύρο Παπαθανασίου, επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για τη συνολική καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π. κ. Ιάσονα Ρουτσολιά για την πολύτιμη βοήθεια και την αμέριστη συμπαράστασή του.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΙ	Н	v
ABSTRAC	Τν	'ni
ΕΥΧΑΡΙΣΤ	ΓΙΕΣi	X
ΠΕΡΙΕΧΟΝ	MENA	xi
 ΕΙΣΑ ΕΙΣΑ 	ΓΩΓΗ	1
2. HAIA	AKH AKTINOBUAIA KAI $\Phi\Omega$ 10BUATAIKO Φ AINOMENO.	3
2.1. H	Ηλιακή ακτινοβολία	3
2.1.1.	Μεγεθη και χαρακτηριστικα της ηλιακης ακτινοβολιας εκτος ατμόσφαιρας	4
2.1.2.	Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας	5
2.1.3.	Παράμετροι εξαρτώμενοι από τη γεωγραφική θέση συλλέκτη ή/και τη θέση του ήλιου	7
2.1.4.	Γεωμετρία κεκλιμένου συλλέκτη	13
2.1.5.	Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας, Ioh	16
2.1.6.	Υπολογισμός των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο	17
2.1.7.	Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο	18
2.2.	Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	24
3. ПЕРІ	ίγραφη μοντελών μεντε παραμετρών και sandi	A
NAT	IONAL LABORATORIES	27
3.1. N	Μοντέλο πέντε παραμέτρων	27
3.1.1.	Υπολογισμός των πέντε παραμέτρων αναφοράς	29
3.1.2.	Ενεργός ακτινοβολία	31
3.1.3.	Υπολογισμός των πέντε παραμέτρων σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας	34
3.2. N	Mοντέλο των Sandia National Laboratories	35

4. ПЕІ	ΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ			
4.1.	Ομαδοποίηση φωτοβολταϊκών πλαισίων της βάσης δεδομένων των Sandia National Laboratories			
4.1.1	. Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου «μεγάλου πάχους» 39			
4.1.2	. Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών επιστρώσεων, thin film40			
4.1.3	. Άλλες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων41			
4.2.	Ενεργός ακτινοβολία, Εε42			
4.2.1	. Οπτικές απώλειες43			
4.2.2	. Επιδράσεις των διακυμάνσεων του ηλιακού φάσματος46			
4.2.3	. Υπολογισμός ενεργού ακτινοβολίας48			
4.3.	Θερμοκρασιακό μοντέλο49			
4.4.	Ανάπτυξη μοντέλου ενεργειακής απόδοσης51			
4.5.	Μεταβολή των πέντε παραμέτρων σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας			
4.6.	Το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης σε φωτοβολταϊκά συστήματα61			
5. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ 67				
5.1.	Πρώτη ομάδα στοιχείων εισόδου67			
5.2.	Δεύτερη ομάδα στοιχείων εισόδου			
5.3.	Τρίτη ομάδα στοιχείων εισόδου			
5.4.	Ομάδα στοιχείων εξόδου73			
6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ				
6.1.	Συγκριτικά αποτελέσματα μοντέλου ενεργειακής απόδοσης			
6.1.1	. Πλαίσιο συγκρίσεων			
6.1.2	Αριθμητικά αποτελέσματα			
6.1.3	. Σχολιασμός αποτελεσμάτων			
6.2.	Αξιολόγηση της σχετικής σημασίας της ομαδοποίησης			
6.2.1	. Πλαίσιο συγκρίσεων			
6.2.2	. Αριθμητικά αποτελέσματα91			
6.2.3	. Σχολιασμός αποτελεσμάτων101			
7. ME.	ΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ			
ΣΤΗΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ ΖΩΓΡΑΦΟΥ103				
7.1.	Περιγραφή φωτοβολταϊκού σταθμού			
7.2.	Μελέτη της συστοιχίας Α1			
7.3.	Μελέτη της συστοιχίας Α2110			
7.4.	Συνολικά αποτελέσματα για το φωτοβολταϊκό σταθμό116			

8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	117
9.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	
10.	ПАРАРТНМА	123

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία και προσοχή στην ανάπτυξη φωτοβολταϊκών πλαισίων, έτσι ώστε να αξιοποιείται η ηλιακή ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση των φωτοβολταϊκών πάρκων είναι πλέον αρκετά διαδεδομένη και συμβάλλει στην περαιτέρω υιοθέτηση των ήπιων μορφών ενέργειας, οι οποίες είναι φιλικές προς το περιβάλλον.

Για την ευρεία χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει πραγματοποιηθεί σημαντική ερευνητική προσπάθεια σε διάφορους τομείς όπως μεταξύ άλλων στη χρήση διαφορετικών υλικών για την κατασκευή φωτοβολταϊκών πλαισίων με διάφορες τεχνολογίες, στους τρόπους υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων, στην ανάπτυξη εργαλείων σχεδίασης καθώς και στην υλοποίηση του απαραίτητου συνοδευτικού εξοπλισμού (αντιστροφείς, συσσωρευτές).

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στο αντικείμενο των μεθόδων πρόβλεψης της ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Για το θέμα αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις. Δύο από τις πιο επιτυχείς και ευρέως διαδεδομένες προσπάθειες αφορούν το μοντέλο πέντε παραμέτρων, που είναι αναλυτικού χαρακτήρα και το μοντέλο των Sandia National Laboratories, που βασίζεται σε μετρήσεις και εμπειρικές σχέσεις και δεδομένα.

Το μοντέλο των πέντε παραμέτρων έχει ως στόχο τη μοντελοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα. Σκοπός του είναι η πρόβλεψη της DC ενέργειας που παράγεται από το πλαίσιο σε δεδομένες συνθήκες. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί ως εισόδους μετεωρολογικά δεδομένα και δεδομένα που παρέχονται από το φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή (datasheet). Με βάση αυτά υπολογίζει την παραγόμενη τάση, ρεύμα και ισχύ.

Το μοντέλο των Sandia National Laboratories είναι ένα εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε ένα σύνολο εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν εμπειρικές σχέσεις που προσδιορίζουν το ρεύμα και την τάση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου και κατ' επέκταση μιας συστοιχίας (ή ενός συστήματος) για διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Οι παραπάνω εμπειρικές σχέσεις εμπεριέχουν ένα σημαντικό αριθμό συντελεστών, που έχουν προσδιοριστεί πειραματικά βάσει μετρήσεων. Στοιχεία του κατασκευαστή (datasheet) σε συνδυασμό με τις τιμές των προαναφερθέντων συντελεστών, που έχουν προσδιοριστεί για ένα μεγάλο αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων διαφορετικών τεχνολογιών και εταιριών, έχουν καταχωρηθεί σε μία βάση δεδομένων, η οποία αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του μοντέλου. Η βάση δεδομένων χρησιμοποιείται ευρέως από πολλούς κατασκευαστές φωτοβολταϊκών πλαισίων και σχεδιαστές ολοκληρωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ιδιαίτερα ακριβές, αλλά έχει τον περιορισμό ότι η πρόβλεψη της ενεργειακής απόδοσης είναι εφικτή μόνο για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που περιέχονται στη βάση δεδομένων.

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης και αξιολόγησης της ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων, αναλυτικού χαρακτήρα αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Ειδικότερα, στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή ενός μοντέλου πρόβλεψης της ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων, το οποίο να δέχεται ως εισόδους τα στοιχεία που δίνονται στο φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή (datasheet), μετεωρολογικά δεδομένα και την τοποθεσία και διάταξη του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος υιοθετήθηκε η προσέγγιση της σύνθεσης δύο υπαρχόντων μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε το μοντέλο των πέντε παραμέτρων, που χαρακτηρίζεται από δυνατότητα αναλυτικής επίλυσης μέσω μαθηματικών σχέσεων, και το μοντέλο των Sandia National Laboratories, που βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις και μια βάση δεδομένων. Η σύνθεση έγκειται στο γεγονός της χρήσης ενός αναλυτικού μοντέλου πέντε παραμέτρων, που εμπλουτίζεται με πρόσθετες αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες προκύπτουν από την επεξεργασία της πληροφορίας που υπάρχει στις εμπειρικές σχέσεις του μοντέλου των Sandia National Laboratories και στη βάση δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό γίνεται προσπάθεια να ενσωματωθούν στοιχεία και των δύο μοντέλων, έτσι ώστε να προκύπτουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, ανεξάρτητα από την ύπαρξή τους στη βάση δεδομένων των Sandia National Laboratories.

Για το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης που κατασκευάστηκε αναπτύχθηκε πρόγραμμα σε Matlab, που επιλύει αριθμητικά το μοντέλο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το πρόγραμμα ενσωματώνει ένα φιλικό γραφικό περιβάλλον για αλληλεπίδραση με το χρήστη.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης συγκρίνονται τόσο με τα αποτελέσματα που προβλέπει το μοντέλο των Sandia National Laboratories, όσο και με αυτά του μοντέλου πέντε παραμέτρων. Οι συγκρίσεις καταδεικνύουν ότι το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης αν και αναλυτικό δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Η δομή της παρούσας εργασίας έχει ως ακολούθως. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της γης και το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Στόχος είναι η παρουσίαση των απαραίτητων στοιχείων, μεγεθών και σχέσεων που απαιτούνται για την κατανόηση του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης παρά η πλήρης ανάλυση του αντικειμένου της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή των μοντέλων των πέντε παραμέτρων και των Sandia National Laboratories και στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται διεξοδικά το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης, που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Τα σχήματα που εμφανίζονται στα προηγούμενα κεφάλαια προέρχονται από [8, 26, 27, 40, 41, 42, 43]. Στο πέμπτο και έκτο κεφάλαιο, δίνονται για το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης το γραφικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης του προγράμματος με το χρήστη και συγκριτικά αποτελέσματα αντίστοιχα. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη του εγκατεστημένου φωτοβολταϊκού σταθμού στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου με τη χρήση του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης, ενώ στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται η σύνοψη των αποτελεσμάτων.

2. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

2.1. Ηλιακή ακτινοβολία

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της γης. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, είναι απαραίτητος ο ορισμός μεγεθών που αφορούν την κίνηση του ήλιου, τη γεωγραφική θέση του τόπου εγκατάστασης και τον προσανατολισμό και κλίση του ηλιακού συλλέκτη. Οι πληροφορίες προέρχονται από τα [8, 26, 27, 41, 42]. Στόχος δεν είναι η πλήρης ανάλυση του αντικειμένου της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά η παρουσίαση των απαραίτητων στοιχείων, μεγεθών και σχέσεων που απαιτούνται για την κατανόηση του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης, που παρουσιάζεται στο τέταρτο κεφάλαιο.

Η ηλιακή ενέργεια προέρχεται από τον πυρήνα του Ήλιου, όπου γίνεται η πυρηνική σύντηξη ατόμων υδρογόνου και ατόμων ηλίου. Κάθε δευτερόλεπτο αυτής της διεργασίας, 700 εκατομμύρια τόνοι υδρογόνου μετατρέπονται σε 695 εκατομμύρια τόνους ηλίου. Οι υπόλοιποι 5 εκατομμύρια τόνοι μετατρέπονται σε ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, η οποία εκλύεται από την επιφάνεια του Ήλιου στο διάστημα. Η ακτινοβολούσα επιφάνεια του Ήλιου (Σχήμα 2.1), γνωστή ως φωτόσφαιρα, έχει μέση θερμοκρασία περίπου 5800Kelvin. Το ενδιαφέρον εστιάζεται πρωτίστως στην ακτινοβολία που περιλαμβάνει μήκη κύματος από 0.25 έως 3.0μm, το τμήμα εκείνο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που περιέχει την περισσότερη ενέργεια που εκλύεται από τον ήλιο.



Σχήμα 2.1: Ο ηλιακός δίσκος

2.1.1. Μεγέθη και χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας

Στη συνέχεια δίνονται οι ορισμοί της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της ηλιακής σταθεράς:

Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας:

Ο ρυθμός με τον οποίο η ακτινοβολούμενη ηλιακή ενέργεια προσπίπτει σε μοναδιαία επιφάνεια, ονομάζεται ένταση ηλιακής ακτινοβολίας. Η μονάδα μέτρησής της είναι W/m².

Ηλιακή σταθερά G_{sc}:

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που εκπέμπει ο ήλιος πάνω σε μια επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση διάδοσής της έξω από την ατμόσφαιρα της γης, που βρίσκεται στη μέση απόσταση ήλιου-γης είναι γνωστή ως ηλιακή σταθερά G_{SC} (Σχήμα 2.2). Η τιμή G_{SC} =1367 W/m² πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε αυτή την εργασία [8].



Σχήμα 2.2: Ορισμός της ηλιακής σταθεράς G_{sc}

Όπως είναι γνωστό η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια περιοχή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του 24-ώρου, λόγω περιστροφής της γης περί τον άξονά της, και κατά την διάρκεια του έτους, λόγω περιστροφής της γης γύρω από τον ήλιο σε ελλειπτική τροχιά. Η μεταβολή της απόστασης της γης από τον ήλιο έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας.

Αν G_{on} είναι η ένταση της ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ήλιου τη n-ιοστή μέρα του έτους, θα είναι:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360}{365} \cdot n\right) \right]$$
 (2.1)

Όπου:

G_{SC}: ηλιακή σταθερά

n: η n-ιοστή μέρα του έτους, με n=1 η 1^η Ιανουαρίου και n=365 η 31^η Δεκεμβρίου

(Το όρισμα του συνημίτονου είναι σε μοίρες)

Η γραφική παράσταση της Gon συναρτήσει του n δίνεται στο Σχήμα 2.3:



Σχήμα 2.3: Μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας συναρτήσει των ημερών του έτους

2.1.2. Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέλθει στην ατμόσφαιρα, ένα μέρος της διαχέεται (από μόρια αέρα, νερού και σκόνης) ή απορροφάται (από O₃, H₂0, CO₂). Το μεσημέρι μιας ημέρας χωρίς συννεφιά περίπου το 25% της ηλιακής ακτινοβολίας σκεδάζεται ή απορροφάται καθώς διασχίζει την ατμόσφαιρα. Μόνο λοιπόν ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτει στο έδαφος χωρίς να έχει υποστεί κάποια

επίδραση. Αυτή η συνιστώσα της ακτινοβολίας ονομάζεται ακτινική ή άμεση ακτινοβολία.

Ένα μέρος της σκεδασμένης ηλιακής ακτινοβολίας επιστρέφει στο διάστημα, όμως το υπόλοιπο καταφέρνει να «φτάσει» στο έδαφος. Η ηλιακή αυτή ακτινοβολία της οποίας η κατεύθυνση έχει αλλάξει από τη σκέδαση στην ατμόσφαιρα, ονομάζεται διάχυτη ακτινοβολία. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

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

$$I = I_b + I_d \tag{2.2}$$

Όπου:

Ι: η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης I_b : η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο I_d : η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

Εάν η υπό εξέταση επιφάνεια είναι κεκλιμένη, τότε στον προηγούμενο ορισμό πρέπει να προσθέσουμε την ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από το έδαφος (ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία).

$$I_T = I_{b,T} + I_{d,T} + I_{refl,T}$$
(2.3)

Όπου:

 I_T : η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της γης $I_{b,T}$: η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο $I_{d,T}$: η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο $I_{refl,T}$: η ανακλώμενη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο επίπεδο

Προκείμενου να προσδιοριστούν οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας στην ίδια γεωγραφική θέση, I_{oh}. Για τον υπολογισμό αυτό απαιτείται ο ορισμός παραμέτρων που αφορούν τον προσδιορισμό της γεωγραφικής θέσης του τόπου εγκατάστασης και την κίνηση του ήλιου συναρτήσει της θέσης αυτού. Στη συνέχεια, ακολουθούν οι ορισμοί των μεγεθών αυτών:

2.1.3. Παράμετροι εξαρτώμενοι από τη γεωγραφική θέση συλλέκτη ή/και τη θέση του ήλιου

Γεωγραφικό πλάτος του τόπου φ:

Το γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης εκφράζει τη γωνία που σχηματίζει ο τόπος με τον ισημερινό (Σχήμα 2.5) και είναι:

$$-90^{\circ} \le \varphi \le 90^{\circ} \tag{2.4}$$

Σχήμα 2.5: Οι παράλληλοι της γης

Οι θετικές τιμές της γωνίας φ αντιστοιχούν στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ οι αρνητικές τιμές στο νότιο ημισφαίριο.

Γεωγραφικό μήκος του τόπου L_{loc}:

Το γεωγραφικό μήκος του τόπου εγκατάστασης εκφράζει τη γωνία (Σχήμα 2.6) που σχηματίζει ο τόπος με τον πρώτο μεσημβρινό (αστεροσκοπείο του Greenwich) και είναι:

$$-180^{\circ} \le L_{loc} \le 180^{\circ} \tag{2.5}$$

Σχήμα 2.6: Οι μεσημβρινοί της γης

Οι θετικές τιμές της γωνίας L_{loc} αντιστοιχούν στο δυτικό ημισφαίριο, ενώ οι αρνητικές τιμές στο ανατολικό ημισφαίριο.

Γωνία ανύψωσης ηλίου (a_s) και αζιμούθια γωνία ηλίου (γ_s):

Η θέση του ήλιου στον ουρανό περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες, την γωνία ανύψωσης του ήλιου (α_s) και την αζιμούθια γωνία του ήλιου (γ_s), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Η γωνία ανύψωσης ήλιου (α_s) είναι η γωνία μεταξύ του ορίζοντα και της ευθείας του σημείου του παρατηρητή με τον ήλιο. Η αζιμούθια γωνία ήλιου (γ_s) είναι η γωνιακή απόκλιση από το νότο της προβολής της ακτινικής συνιστώσας στο οριζόντιο επίπεδο.

Κατά την διάρκεια της ημέρας, η γωνία ανύψωσης του ήλιου (α_s) και η αζιμούθια γωνία του ήλιου (γ_s) μεταβάλλονται συνεχώς καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό. Η αζιμούθια γωνία του ήλιου (γ_s) είναι:

- Για νότιο προσανατολισμό $\gamma_s=0$
- Για γωνίες δυτικά από το νότο παίρνει θετικές τιμές.
- Για γωνίες ανατολικά από το νότο παίρνει αρνητικές τιμές.



Σχήμα 2.7: Ορισμοί γωνιών ηλίου α_s και γ_s

Ζενιθιακή γωνία του ήλιου θ_z:

Αντί για την γωνία ανύψωσης του ηλίου (α_s), χρησιμοποιείται συχνότερα η συμπληρωματική της γωνία, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, που ονομάζεται ζενιθιακή γωνία του ήλιου (θ_z).

Αέριος Μάζα (Air Mass) AM:

Αέριος μάζα ονομάζεται 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 (m) της αερίου μάζας (AM) δίνεται από τον τύπο:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \tag{2.6}$$

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:

$$AM = [\cos\theta_z + 0.5057 \cdot (96.080 - \theta_z)^{-1.634}]^{-1}$$
(2.7)

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

$$AM_{\alpha} = AM \cdot \left(\frac{P}{P_o}\right) \tag{2.8}$$

Απόκλιση ηλίου δ:

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας, η οποία εξαρτάται από την κίνηση της γης περί τον ήλιο, μπορεί να υπολογίζεται με ακρίβεια με βάση γεωμετρικές σχέσεις. Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η σχετική θέση του ήλιου και της γης. Η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές, ως αποτέλεσμα της μεταβολής της απόκλισης (δ), δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου, και στο επίπεδο του ισημερινού, όπως δείχνεται στο Σχήμα 2.8. Οι τιμές της απόκλισης του ήλιου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο.



Σχήμα 2.8: Η απόκλιση ηλίου δ

Άμεση συνέπεια των διαφορετικών τιμών της απόκλισης του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους είναι το γεγονός ότι οι κυκλικές τροχιές διαγράφονται βορειότερα στον ουρανό το καλοκαίρι, δηλαδή με νωρίτερη ανατολή και αργότερη δύση στο βόρειο ημισφαίριο. Το χειμώνα συμβαίνει το αντίθετο. Παράλληλα διαμορφώνονται οι αντίστοιχες μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στις διάφορες εποχές του έτους. Χρήσιμα μεγέθη για τη γενική εκτίμηση της καθημερινής και της εποχιακής διακύμανσης της ακτινοβολίας σε ένα τόπο, είναι η θεωρητική ηλιοφάνεια, δηλαδή το χρονικό διάστημα από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, καθώς και η μέση πραγματική ηλιοφάνεια που δείχνει το μέσο όρο των ωρών που ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα. Επίσης, ο αριθμός των ημερών με ηλιοφάνεια, στη διάρκεια των οποίων ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα σε ολόκληρο το διάστημα της ημέρας.

Η ηλιακή απόκλιση δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \frac{360 \cdot (284 + n)}{365} \tag{2.9}$$

Όπου:

n: η
 η-ιοστή μέρα του έτους, με n=1 η 1^η Ιανουαρίου και n=365
 η 31^η Δεκεμβρίου

(Το όρισμα του ημιτόνου είναι σε μοίρες).

Είναι δ=0° κατά την εαρινή ισημερία (21 Μαρτίου) και την φθινοπωρινή ισημερία (21 Σεπτεμβρίου), οπότε ο ήλιος ανατέλλει ακριβώς στην ανατολή και δύει στη δύση. Επίσης είναι δ=23.45° την 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο) και δ=-23.45° την 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Αυτά φαίνονται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9: Θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο

Μια άλλη αναπαράσταση με τη Γη ως κέντρο και τον ήλιο να κινείται γύρω από αυτή είναι πιο εύκολα αντιληπτή και φαίνεται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10: Γεωκεντρικό μοντέλο

Ηλιακός χρόνος t_s και ωριαία γωνία ηλίου ω:

Ο ηλιακός χρόνος είναι ο χρόνος που μετράται με βάση τη φαινόμενη κίνηση του ήλιου στον ουρανό και δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο του ωρολογίου.

Οι δύο χρόνοι συνδέονται με τη σχέση:

$$t_s = t_C + \left(\frac{L_{loc}}{15}\right) - T_C + E \tag{2.10}$$

Όπου:

t_s: ο ηλιακός χρόνος σε ώρες t_c: ο τοπικός χρόνος σε ώρες L_{loc}: το γεωγραφικό μήκος της θέσης του παρατηρητή σε μοίρες T_C: η τοπική ωρολογιακή ζώνη σε σχέση με GMT (Σχήμα 2.11) σε ώρες (για την Ελλάδα +2hours) E: μια εξίσωση χρόνου σε ώρες (Iqbal M., 1983 [8])

 $E = 3.82 \cdot (0.00075 + 0.001868 \cdot \cos B - 0.032077 \cdot \sin B - 0.014615 \cdot \cos 2B - 0.004089 \cdot \sin 2B)$

Όπου:

$$B = 360 \cdot \frac{n-1}{365}$$

n: η
 η·ιοστή μέρα του έτους, με n=1 η 1^η Ιανουαρίου και n=365
η 31^{η} Δεκεμβρίου

Η εξίσωση του χρόνου Ε είναι ένας παράγοντας που συνεκτιμά τις επιδράσεις της στροφής των αξόνων της γης κατά την περιστροφή της στο επίπεδο της εκλειπτικής και της εκκεντρότητας της τροχιάς της.



Σχήμα 2.11: Χρονικές ζώνες

Η ημερήσια κίνηση της γης απεικονίζεται με την ημερήσια περιστροφή της ουράνιας σφαίρας περί τον πολικό άξονα και η στιγμιαία θέση του ήλιου περιγράφεται από την ωριαία γωνία ω, η οποία ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του μεσημβρινού που περνάει από τον ήλιο και του μεσημβρινού που περνάει από τη θέση της εγκατάστασης. Είναι ω=0° κατά το ηλιακό μεσημέρι και αυξάνει με ρυθμό 15°/h=0.25°/min. Λαμβάνεται ω<0° για πμ και ω>0° για μμ. Η ωριαία γωνία του ήλιου ω υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega = (t_s - 12) \cdot 15 \tag{2.11}$$

Όπου ω, η ωριαία γωνία του ήλιου σε ώρες.

2.1.4. Γεωμετρία κεκλιμένου συλλέκτη

Στη συνέχεια ορίζονται οι γωνίες που περιγράφουν τη γεωμετρία ενός κεκλιμένου συλλέκτη:

Γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας θ:

Η γωνία θ ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της ακτινικής συνιστώσας της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια και της καθέτου στην επιφάνεια αυτή.

Προσανατολισμός του συλλέκτη (β), αζιμούθια γωνία επιφάνειας (γ):

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως η θέση του ήλιου στον ουρανό, έτσι και ο προσανατολισμός ενός επίπεδου στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από δύο γωνίες, την κλίση (β) και την αζιμούθια γωνία επιφάνειας (γ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12.

Η κλίση του συλλέκτη (β) είναι η δίεδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα και μπορεί να πάρει τιμές από 0° μέχρι 180°. Για γωνίες β>90° το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω.

Η αζιμούθια γωνία επιφάνειας του συλλέκτη (γ) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από -180° μέχρι +180°. Η γωνία -180° (που συμπίπτει με την +180°) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς το βορρά, η γωνία -90° προς την ανατολή, η γωνία 0° προς το νότο και η γωνία +90° προς τη δύση.

Προφανώς, η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας, πάνω σε ένα επίπεδο συλλέκτη θα υφίσταται όταν η επιφάνειά του είναι κάθετη προς τη κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης (θ) είναι 0°. Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έχουν κατασκευαστεί μηχανικές διατάξεις που επαναπροσανατολίζουν συνεχώς τον συλλέκτη (π.χ. με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή ή φωτοκύτταρων), ώστε η επιφάνεια του να αντικρίζει πάντα κάθετα τον ήλιο. Οι διατάξεις όμως αυτές είναι πολύπλοκες και δαπανηρές. Έτσι, η χρήση τους δικαιολογείται μόνον σε περιπτώσεις ειδικών εφαρμογών.



Σχήμα 2.12: Γωνίες προσανατολισμού του συλλέκτη

Στις συνηθισμένες περιπτώσεις οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται έτσι ώστε η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, κατά τη διάρκεια του έτους. Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας συνδέεται με τις άλλες γωνίες της ηλιακής γεωμετρίας, που αναφέρθηκαν παραπάνω, με τη σχέση :

 $\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\varphi$ $\cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta$ $\cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega$

και
$$\cos \theta = \cos \theta_z \cdot \cos \beta + \sin \theta_z \cdot \sin \beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma)$$

Σε αρκετές περιπτώσεις 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, β=90° και η εξίσωση γίνεται:

$$\cos \theta = -\sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \gamma$$
$$\cdot \sin \omega$$

Για οριζόντιες επιφάνειες, η γωνία πρόσπτωσης (θ) 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, β=0°, και η εξίσωση γίνεται:

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta$$

• Η ωριαία γωνία δύσης του ήλιου $ω_s$ προκύπτει θέτοντας $θ_z = 90^\circ$:

$$cos\omega_{s} = -\frac{sin\varphi \cdot sin\delta}{cos\varphi \cdot cos\delta} = -tan\varphi \cdot tan\delta$$

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:

$$N = \frac{2}{15} \cdot \cos^{-1}(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \tag{2.12}$$

Οι επίπεδοι συλλέκτες χρησιμοποιούν την άμεση, τη διάχυτη και την ανακλώμενη ακτινοβολία (Σχήμα 2.13) και συνήθως τοποθετούνται, όπως αναφέρθηκε, υπό σταθερή κλίση και προσανατολισμό κατά τη διάρκεια του έτους. Η επιλογή του ευνοϊκού προσανατολισμού και της κλίσης του συλλέκτη είναι το σημαντικότερο μέτρο για τη βελτίωση του ηλιακού κέρδους, αφού επηρεάζει σημαντικά το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη. Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, για τη διάρκεια του έτους, είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου, και η αζιμούθια γωνία είναι 0° (προς το νότο). Λόγω όμως της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου (δ) στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε επογή. Έτσι, αν επιδιώκεται να παράγει το σύστημα όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου 10° ως 15° μικρότερη από την παράλληλο του τόπου, ενώ για τον χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου 10° ως 15° μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου. Αν στο έδαφος υπάρχει επιφάνεια με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης (π.γ. χιόνι) απαιτείται μεγαλύτερη κλίση. Ο βέλτιστος προσανατολισμός για την αζιμούθια γωνία επιφάνειας είναι νότιος ($\gamma=0^\circ$), ενώ απόκλιση κατά 20°-30° από το νότο έχει μικρή επίδραση στην ετήσια συλλεγόμενη ενέργεια.

Τα παραπάνω ισχύουν για τη συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που έρχεται σαν δέσμη από τον ήλιο. Για τις άλλες, από ενεργειακή άποψη λιγότερο σημαντικές, μορφές της ηλιακής ακτινοβολίας, ο κυριότερος παράγοντας είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης του συλλέκτη, ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου. Έτσι, όσο η κλίση απέχει περισσότερο από το οριζόντιο, τόσο μεγαλύτερο ποσό ανακλώμενης ακτινοβολίας από το έδαφος δέχεται ο συλλέκτης, αλλά και τόσο μικρότερο ποσό διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό.



Σχήμα 2.13: Η άμεση, ανακλώμενη και διάχυτη ακτινοβολία

Για παράδειγμα, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό, η βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι περίπου 10 - 15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους. Έτσι, ο συλλέκτης αντικρίζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται αφθονότερα τη διάχυτη ακτινοβολία.

2.1.5. Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας, I_{oh}

Όπως αναφέρθηκε G_{on} είναι η ένταση της ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας, μετρούμενη σε κάθετο προς τις ακτίνες επίπεδο, οπότε η ένταση στο οριζόντιο επίπεδο θα είναι:

$$G_o = G_{on} \cdot \cos \theta_z \tag{2.13}$$

Όπου:

 G_o : η ένταση στο οριζόντιο επίπεδο εκτός της ατμόσφαιρας $cos \theta_z$: η τιμή που υπολογίζεται από την σχέση 2.14

$$\cos\theta_z = \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\varphi \cdot \sin\delta \tag{2.14}$$

Ολοκληρώνοντας τις σχέσεις 2.13 και 2.14 στο πεδίο του χρόνου, η ωριαία μέση ακτινοβολία που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας σε κάθε ώρα του χρόνου δίνεται από τη σχέση:

$$I_{oh} = \frac{12}{\pi} \cdot G_{on} \cdot \left[\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \frac{\pi}{180} \cdot (\omega_2 - \omega_1) \cdot \sin\delta \cdot \sin\varphi \right]$$
(2.15)

Όπου:

ω1: η ωριαία γωνία του ήλιου στην αρχή της ώρας

ω2: η ωριαία γωνία του ήλιου στο τέλος της ώρας

Η πρώτη τιμή που παίρνει η $ω_1$ είναι η $-ω_s$, η ωριαία γωνία της ανατολής του ήλιου και η τελευταία τιμή της $ω_2$ είναι η + $ω_s$, η ωριαία γωνία της δύσης του ήλιου. (Όλα τα ορίσματα των τριγωνομετρικών σχέσεων είναι σε μοίρες)

> 2.1.6. Υπολογισμός των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός από τις μεταβολές που υφίσταται λόγω της κίνησης της γης περί τον ήλιο, και οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν με βάση γεωμετρικές σχέσεις, υφίσταται έντονες διακυμάνσεις λόγω της παρεμβολής της ατμόσφαιρας. Οι διακυμάνσεις αυτές διακρίνονται ανάλογα με το αν πρόκειται για αίθρια ατμόσφαιρα, δηλαδή δεν υπάρχουν νέφη, ή μη αίθρια (νεφελώδη) ατμόσφαιρα, χωρίς όμως να μπορεί να γίνει σαφής διάκριση. Έτσι από τις μετρήσεις της συνολικής ηλιακής ενέργειας *I* σε οριζόντιο επίπεδο στην τοποθεσία της εγκατάστασης, μπορεί να υπολογισθεί ο συντελεστής καθαρότητας της ατμόσφαιρας από το λόγο:

$$K_T = \frac{I}{I_{oh}} \tag{2.16}$$

Όπου:

Ι: η μετρούμενη ολική ένταση της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο I_{oh} : η ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας στην ίδια θέση.

Ο συντελεστής K_T αποτελεί χαρακτηριστικό του τόπου εγκατάστασης και συχνά δίδεται σε πίνακες ως μέση μηνιαία τιμή. Έχει καταδειχθεί 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.

Από σχέσεις συσχέτισης διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας που έχουν διατυπωθεί [1], υπολογίζεται ο λόγος της διάχυτης ακτινοβολίας I_d προς την ολική I, ως συνάρτηση του συντελεστή καθαρότητας K_T .

Εδώ επιλέχθηκε η εξίσωση του Erbs (Erbs et al, 1982 [10]):

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases}
1.0 - 0.09 \cdot K_T, & K_T \leq 0.22 \\
0.9511 - 0.1604 \cdot K_T + 4.388 \cdot K_T^2 - 16.638 \cdot K_T^3 + 12.336 \cdot K_T^4, 0.22 < K_T \leq 0.80 \\
0.165, & K_T > 0.80
\end{cases}$$
(2.17)

Αφού λοιπόν έχει υπολογιστεί η διάχυτη ακτινοβολία, εύκολα υπολογίζεται η ακτινική (I_b) . Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σε οριζόντιο επίπεδο η ηλιακή ακτινοβολία έχει δύο συνιστώσες, οπότε:

$$I_b = I - I_d \tag{2.18}$$

2.1.7. Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Μετά τον προσδιορισμό των δύο συνιστωσών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης, είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο.

Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της γης αποτελείται από τρείς συνιστώσες (Σχήμα 2.14), την ακτινική που προέρχεται από τον ηλιακό δίσκο, τη διάχυτη που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο και την ανακλώμενη που προέρχεται από το έδαφος της γύρω περιοχής.

$$I_T = I_{b,T} + I_{d,T} + I_{refl,T}$$
(2.19)



Σχήμα 2.14: Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ακτινική ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης θ. Η διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία από την άλλη, δεν εξαρτώνται από τον προσανατολισμό του επιπέδου και ούτε προέρχονται από όλο τον ουράνιο θόλο ή το έδαφος της γύρω περιοχής. Η διάχυτη ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο προέρχεται μόνο από το τμήμα του ουρανού που "βλέπει" το επίπεδο. Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη για κάθε μία από τις συνιστώσες και ένας συντελεστής διόρθωσης.

Υπολογισμός της ακτινικής και ανακλώμενης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας

Ο συντελεστής διόρθωσης για την ακτινική ηλιακή ακτινοβολία (R_b), είναι ο λόγος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο ($I_{b,T}$), προς αυτήν στο οριζόντιο επίπεδο (I_b), ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \tag{2.20}$$

Όπου:

θ: η γωνία πρόσπτωσης σε μοίρες θ_z: η ζενιθιακή γωνία σε μοίρες

Συνεπώς, η ακτινική ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο είναι:

$$I_{b,T} = R_b \cdot I_b \tag{2.21}$$

Αντίστοιχα, για την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία ($I_{refl,T}$), ο συντελεστής διόρθωσης είναι το γινόμενο του συντελεστή ανάκλασης του εδάφους (ρ_g) και του όρου $\frac{(1-cos\beta)}{2}$, όπου β η κλίση του συλλέκτη (Σχήμα 2.15).

Συνεπώς, η ανακλώμενη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο είναι:

$$I_{refl,T} = I \cdot \rho_g \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2} \tag{2.22}$$

Όπου:

β: η κλίση του συλλέκτη σε μοίρες ρg: ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους Ι: ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο



Σχήμα 2.15: Γεωμετρία της πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

Υπολογισμός της διάχυτης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας

Η διάχυτη ακτινοβολία αποτελείται από τρεις επιμέρους συνιστώσες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16. 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.

$$I_{d,T} = I_{d,T,iso} + I_{d,T,cs} + I_{d,T,hz}$$
(2.23)

Όπου οι δείκτες iso, cs και hz αναφέρονται στην ισοτροπική, περιγραμματική, και στην φωτεινότητα του ορίζοντα ακτινοβολία.



Σχήμα 2.16: Οι τρεις συνιστώσες της διάχυτης ακτινοβολίας

Τα μοντέλα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο διαφοροποιούνται στον τρόπο υπολογισμού των επιμέρους συνιστωσών της διάχυτης ακτινοβολίας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο μοντέλα τα οποία λαμβάνουν υπόψη και τις τρεις συνιστώσες της διάχυτης ακτινοβολίας:

Μοντέλο Ανισοτροπικού Ουρανού HDKR (Hay, Davies, Klucher, Reindl μοντέλο)

Στη συνέχεια, περιγράφεται το μοντέλο HDKR σύμφωνα με το [8]. Οι Hay και Davies θεωρούν ότι η περιγραμματική συνιστώσα της διάχυτης ακτινοβολίας έχει την ίδια κατεύθυνση με την ακτινική και 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:

$$I_{d,T} = I_d \cdot \left[(1 - A_i) \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + A_i \cdot R_b \right]$$
(2.24)

Όπου:

$$\begin{split} A_i = \frac{I_b}{I_{oh}} : & \text{anisotropikóg deíktig, pou eínal o lógog tig aktinkýg aktindbolíaz se orizóntio epíped (I_b) pros tin nliakú aktindbolía ektóg atmósquiraz (I_{oh}) . Υπό aíθriez sunθúkez παίρνει υψηλές timéz, enw se sunθúkez sunnegiáz, ópou apousiázel η aktinký sunistws, o deíktig A_i eína musen$$

Οι Reindl et al. τροποποιούν το παραπάνω μοντέλο με την προσθήκη ενός όρου παρεμφερούς με του Klucher, που λαμβάνει υπόψη την τρίτη συνιστώσα δηλαδή τη φωτεινότητα του ορίζοντα. Συνεπώς, η διάχυτη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο σύμφωνα με το μοντέλο HDKR δίνεται από τη σχέση:

$$I_{d,T} = I_d \cdot \left[(1 - A_i) \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \cdot \left[1 + f \cdot \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] + A_i \cdot R_b \right]$$
(2.25)

Όπου:

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}}$$
, Ι είναι η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο

Συνεπώς η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο σύμφωνα με το HDKR μοντέλο περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_T = (I_b + I_d \cdot A_i) \cdot R_b + I_d \cdot (1 - A_i) \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) \cdot \left[1 + f \cdot \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] + I \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)$$
(2.26)

Μοντέλο Ανισοτροπικού Ουρανού Perez et al.

Το μοντέλο των Perez et al. [29, 30, 31] βασίζεται, σύμφωνα με το [8], σε μια πιο λεπτομερή ανάλυση των τριών συνιστωσών της διάχυτης ακτινοβολίας, η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_{d,T} = I_d \cdot \left[(1 - F_1) \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + F_1 \cdot \frac{a}{b} + F_2 \cdot \sin\beta \right]$$
(2.27)

Όπου:

F1: συντελεστής της περιγραμματικής συνιστώσας

 F_2 : συντελεστής της φωτεινότητας του ορίζοντα

a,b: όροι που λαμβάνουν υπόψη τις γωνίες πρόσπτωσης του κώνου της περιγραμματικής συνιστώσας σε κεκλιμένες και οριζόντιες επιφάνειες

$$\alpha = max(0, \cos\theta) \tag{2.28}$$

$$b = max[\cos(85^\circ), \cos\theta_z] \tag{2.29}$$

Με τους ορισμούς των όρων α, b (σχέσεις 2.28, 2.29) προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο συντελεστής R_b λαμβάνει ίδιες τιμές με το λόγο $\frac{\alpha}{b}$ για τις ώρες κατά τις οποίες τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παρουσιάζουν ικανοποιητική παραγωγή.

Οι συντελεστές F₁, F₂ που προαναφέρθηκαν είναι συναρτήσεις τριών παραμέτρων: της ζενιθιακής γωνίας (θz), της καθαρότητας του ουρανού (ε) και της φωτεινότητάς του (Δ).

Η καθαρότητα του ουρανού (ε) δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_d + I_n}{I_d} + 5.535 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_z^3}{1 + 5.535 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_z^3}$$
(2.30)

Όπου:

 $I_n = \frac{I_b}{\cos \theta_z}$: ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδο κάθετο στην ακτινοβολία.

θ_z: ζενιθιακή γωνία (σε μοίρες)

Η φωτεινότητα του ουρανού (Δ) δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta = m \cdot \frac{I_d}{G_{on}} \tag{2.31}$$

 $O\pi ov$:

 G_{on} : η ηλιακή ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας

 $m = \frac{1}{\cos \theta_{\tau}}$: η αέριος μάζα. Ο τύπος αυτός αποτελεί μια καλή προσέγγιση της αερίου μάζας για ζενιθιακές γωνίες από 0° έως 70° στο επίπεδο της θάλασσας, όπως έχει ήδη αναφερθεί.
Οι τιμές των συντελεστών F_1 , F_2 είναι συναρτήσεις άλλων επιμέρους συντελεστών, οι οποίοι έχουν προέλθει από στατιστική επεξεργασία δεδομένων. Οι τιμές των συντελεστών αυτών εξαρτώνται από την τιμή της καθαρότητας του ουρανού (ε) σύμφωνα με τον Πίνακα 1:

3	f ₁₁	f ₁₂	f ₁₃	f ₂₁	f ₂₂	f ₂₃
0-1.065	-0,008	0,588	-0,062	-0,060	0,072	-0,022
1.065-1.230	0,130	0,683	-0,151	-0,019	0,066	-0,029
1.230-1.500	0,330	0,487	-0,221	0,055	-0,064	-0,026
1.500-1.950	0,568	0,187	-0,295	0,109	-0,152	-0,014
1.950-2.800	0,873	-0,392	-0,362	0,226	-0,406	0,001
2.800-4.500	1,132	-1,237	-0,412	0,288	-0,823	0,056
4.500-6.200	1,060	-1,600	-0,359	0,264	-1,127	0,131
6.200-∞	0,678	-0,327	-0,250	0,156	-1,377	0,251

Πίνακας 1: Τιμές εμπειρικών συντελεστών

Τα οχτώ διαστήματα του ε είναι κλειστά από την αριστερή πλευρά και ανοιχτά από τη δεξιά, δηλαδή για ε=1.065 π.χ. επιλέγουμε το δεύτερο διάστημα για τον υπολογισμό των συντελεστών.

Οι συντελεστές $F_1,\ F_2$ υπολογίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις, όπου θ_z σε μοίρες:

$$F_{1} = f_{11} + f_{12} \cdot \Delta + \frac{\pi \cdot \theta_{z}}{180} \cdot f_{13}$$
(2.32)

$$F_2 = f_{12} + f_{22} \cdot \Delta + \frac{\pi \cdot \theta_z}{180} \cdot f_{23}$$
(2.33)

Αφού λοιπόν υπολογίστηκε η διάχυτη ακτινοβολία, περιλαμβάνοντας και τις τρεις συνιστώσες, μπορεί να προσδιοριστεί η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο προσθέτοντας την ακτινική και ανακλώμενη συνιστώσα. Έτσι τελικά:

$$I_T = I_b \cdot R_b + I_d \cdot \left[\left(1 - F_1\right) \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + F_1 \cdot \frac{a}{b} + F_2 \cdot \sin\beta \right] + I \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)$$
(2.34)

2.2. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζεται στις βασικές ιδιότητες των ημιαγώγιμων υλικών σε ατομικό επίπεδο. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε μια επιφάνεια είτε ανακλάται, είτε την διαπερνά (διαπερατότητα), είτε απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας. Η απορρόφηση του φωτός ουσιαστικά σημαίνει την μετατροπή του σε μια άλλη μορφή ενέργειας (σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας), η οποία συνήθως είναι η θερμότητα.

Παρόλα αυτά όμως υπάρχουν υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα υλικά είναι οι ημιαγωγοί και σε αυτά οφείλεται η τεράστια τεχνολογική πρόοδος που έχει συντελεστεί στον τομέα της ηλεκτρονικής και συνεπακόλουθα στον ευρύτερο χώρο της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών.

Γενικότερα τα υλικά στην φύση σε σχέση με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους εμπίπτουν σε τρεις κατηγορίες: τους αγωγούς του ηλεκτρισμού, τους μονωτές και τους ημιαγωγούς. Ένας ημιαγωγός έχει την ιδιότητα να μπορεί να ελέγχει την ηλεκτρική του αγωγιμότητα είτε μόνιμα είτε δυναμικά.

Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει με τη μορφή πακέτων ενέργειας ή φωτονίων. Τα φωτόνια όταν προσπίπτουν σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο διαπερνούν την επαφή τύπου n και «χτυπούν» τα άτομα της περιοχής τύπου p. Τα ηλεκτρόνια της περιοχής τύπου p αρχίζουν και κινούνται μεταξύ των οπών ώσπου τελικά φτάνουν στην περιοχή της ένωσης p-n της διόδου όπου και έλκονται πλέον από το θετικό πεδίο της εκεί περιοχής. Αφού ξεπεράσουν το ενεργειακό χάσμα αυτής της περιοχής, είναι αδύνατον να επιστρέψουν. Στο κομμάτι της επαφής n πλέον υπάρχει μια περίσσεια ηλεκτρονίων που μπορεί να αξιοποιηθεί. Αυτή η περίσσεια των ηλεκτρονίων μπορεί να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα εάν τοποθετηθεί μια διάταξη όπως ένας μεταλλικός αγωγός στο πάνω μέρος της επαφής n και στο κάτω της επαφής p και ένα φορτίο ενδιάμεσα με τέτοιο τρόπο ώστε να κλείσει ένας αγώγιμος δρόμος για το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται. Αυτή είναι η γενική αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου

Το ευρύτερα διαδεδομένο υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων στην βιομηχανία είναι το πυρίτιο. Είναι ίσως και το μοναδικό υλικό που υπάρχει σε αφθονία στη φύση. Το πυρίτιο σήμερα αποτελεί την πρώτη ύλη για το 90% της αγοράς των φωτοβολταϊκών.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του πυριτίου είναι:

- Μπορεί να βρεθεί πάρα πολύ εύκολα στην φύση. Είναι το δεύτερο σε αφθονία υλικό που υπάρχει στον πλανήτη μετά το οξυγόνο. Το διοξείδιο του πυριτίου SiO₂ (ή κοινώς η άμμος) και ο χαλαζίτης αποτελούν το 28% του φλοιού της γης. Είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον.
- Μπορεί εύκολα να λιώσει και να μορφοποιηθεί. Επίσης είναι σχετικά εύκολο να μετατραπεί στην μονοκρυσταλλική του μορφή.
- Οι ηλεκτρικές του ιδιότητες μπορούν να διατηρηθούν μέχρι και στους 125°C κάτι που επιτρέπει την χρήση του πυριτίου σε ιδιαίτερα δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτός είναι και ο λόγος που τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου ανταπεξέρχονται σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

 Πολύ σημαντικό στοιχείο, που συνέβαλε στην γρήγορη ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων τα τελευταία χρόνια, ήταν η ήδη αναπτυγμένη τεχνολογία, στην βιομηχανία της επεξεργασίας του πυριτίου, στον τομέα της ηλεκτρονικής (υπολογιστές, τηλεοράσεις κλπ).

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορα κριτήρια, σύμφωνα με το υλικό κατασκευής τους, τον τρόπο επεξεργασίας τους, το πάχος των στοιχείων κ.α. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες ομαδοποιήσεις [14, 22, 23, 26, 40].

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΕΝΤΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ SANDIA NATIONAL LABORATORIES

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλά μοντέλα πρόβλεψης της ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος [2, 7, 15, 18, 24, 28, 32, 36]. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στα [3, 5, 11, 21]. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μία σύντομη περιγραφή δύο διαφορετικής λογικής μοντέλων πρόβλεψης της ενεργειακής απόδοσης, που επελέγησαν μεταξύ των παραπάνω. Αρχικά θα παρουσιαστεί ένα αναλυτικό μοντέλο, το μοντέλο πέντε παραμέτρων, που αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Winsconsin [6, 7, 13] και στη συνέχεια ένα μοντέλο βασισμένο σε μετρήσεις και ένα σύνολο εμπειρικών σχέσεων, που προτάθηκε από τα Sandia National Laboratories [18, 43].

3.1. Μοντέλο πέντε παραμέτρων

Το μοντέλο πέντε παραμέτρων έχει ως στόχο τη μοντελοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα. Σκοπός του είναι η πρόβλεψη της DC ενέργειας που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε δεδομένες συνθήκες λειτουργίας, ενώ μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε επίπεδο φωτοβολταϊκής συστοιχίας και σταθμού. Όπως περιγράφεται στο [7], το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί ως εισόδους μετεωρολογικά δεδομένα και δεδομένα που παρέχονται από το φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή (datasheet). Με βάση αυτά υπολογίζει την παραγόμενη τάση, ρεύμα και ισχύ.

Πιο αναλυτικά το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναπαρίσταται ως ένα κύκλωμα απλής διόδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1:



Σχήμα 3.1: Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού πλαισίου

Οι παράμετροι αυτού του κυκλώματος είναι πέντε και απαριθμούνται παρακάτω:

- I_L: φωτορεύμα
- I_o : anastroqo reúma kórou tης διόδου
- R_s: αντίσταση σε σειρά (series resistance).
- R_{sh} : εγκάρσια αντίσταση (shunt resistance)
- α: τροποποιημένος ιδανικός συντελεστής της διόδου

Για να προσδιοριστούν το ρεύμα, η τάση και συνεπώς η ισχύς που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο πρέπει να υπολογιστούν οι παραπάνω πέντε παράμετροι.

Ο τροποποιημένος ιδανικός συντελεστής της διόδου ισούται με:

$$a = \frac{N_s \cdot n \cdot k \cdot T_c}{q} \tag{3.1}$$

Όπου:

q: το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

k: η σταθερά του Boltzmann

n: ο ιδανικός συντελεστής της διόδου

Ns: ο αριθμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά

 T_C : η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου (Kelvin)

Η σχέση που συνδέει την τάση (V) και το ρεύμα (I) για δεδομένη θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία είναι η εξής:

$$I = I_L - I_o \cdot \left[e^{\frac{V + I \cdot R_s}{a}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}$$
(3.2)

Με τη χρήση του μοντέλου πέντε παραμέτρων είναι δυνατόν να χαραχθεί η γραφική παράσταση I-V για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου και να υπολογιστεί η DC παραγόμενη ισχύς.



Σχήμα 3.2: Καμπύλη I-V σε κανονικές συνθήκες για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο YL165

Μια καμπύλη I-V για δοσμένη ένταση ακτινοβολίας και δοσμένη θερμοκρασία λειτουργίας του πλαισίου φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 3.2 για το πλαίσιο YL165, όπου σημειώνονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά μεγέθη για το πλαίσιο:

- I_{sc,ref}=7.9A: Ρεύμα βραχυκυκλώσεως στην έξοδο του πλαισίου για τάση εξόδου V=0V
- V_{oc,ref}=29V: Τάση ανοιχτοκυκλώσεως για ρεύμα I=0A
- Σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point): Το σημείο μέγιστης ισχύος είναι το σημείο της I-V καμπύλης όπου αντιστοιχεί το ορθογώνιο με την μέγιστη επιφάνεια. Η ισχύς στο σημείο αυτό, για δοσμένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο
- Imp,ref=7.2A: Ρεύμα μέγιστης ισχύος
- V_{mp,ref}=23V: Τάση μέγιστης ισχύος

Τα παραπάνω μεγέθη έχουν δείκτη *ref* γιατί οι συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας στις οποίες αναφέρονται (ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m² και θερμοκρασία 25°C ή 298K) ονομάζονται κανονικές συνθήκες λειτουργίας και αποτελούν σημείο αναφοράς.

Στη συνέχεια προσδιορίζεται ο τρόπος υπολογισμού των πέντε παραμέτρων στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας όπως επίσης η ενεργός ακτινοβολία και οι τιμές των πέντε παραμέτρων για διάφορες (αυθαίρετες) συνθήκες λειτουργίας.

3.1.1. Υπολογισμός των πέντε παραμέτρων αναφοράς

Για τον υπολογισμό των πέντε παραμέτρων, που προαναφέρθηκαν, πρέπει να σχηματιστούν πέντε ανεξάρτητες εξισώσεις. Οι τιμές των παραμέτρων επηρεάζονται από τις συνθήκες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου και σημείο αναφοράς τους θεωρείται η τιμή τους στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας (ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m² και θερμοκρασία 25°C ή 298K).

Τρεις εξισώσεις μπορούν να σχηματιστούν από τα δεδομένα που παρέχονται από τον κατασκευαστή, δηλαδή το ρεύμα βραχυκυκλώσεως ($I_{sc,ref}$), την τάση ανοιχτοκυκλώσεως ($V_{oc,ref}$) και τις μέγιστες τιμές ρεύματος και τάσης ($I_{mp,ref}$, $V_{mp,ref}$) για κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Μια τέταρτη εξίσωση προκύπτει από το γεγονός ότι η παράγωγος της ισχύος ως προς την τάση στο σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος είναι μηδενική. Τέλος, η πέμπτη προκύπτει από τον θερμοκρασιακό συντελεστή για την τάση ανοιχτοκυκλώσεως β_{νoc}.

Αντικαθιστώντας λοιπόν στην εξίσωση I(V) (σχέση 3.2) τις πληροφορίες που διατίθενται προκύπτουν οι παρακάτω πέντε εξισώσεις, που προσδιορίζουν τις πέντε παραμέτρους για κανονικές συνθήκες:

1. Για το ρεύμα βραχυκυκλώσεως I=I $_{sc.ref}$, V=0:

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \cdot \left[e^{\frac{I_{sc,ref} \cdot R_{s,ref}}{a_{ref}}} - 1 \right] - \frac{I_{sc,ref} \cdot R_{s,ref}}{R_{sh,ref}}$$
(3.3)

2. Για την τάση ανοιχτοκυκλώσεως I=0, V=V_{oc,ref}:

$$0 = I_{L,ref} - I_{o,ref} \cdot \left[e^{\frac{V_{oc,ref}}{a_{ref}}} - 1 \right] - \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh,ref}}$$
(3.4)

3. Fia to shmeio mégisths iscúos I=I_mp,ref, V=V_mp,ref:

$$I_{mp,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \cdot \left[e^{\frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_{s,ref}}{a_{ref}}} - 1 \right] - \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_{s,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (3.5)$$

4. Για το σημείο μέγιστης ισχύος:

$$\frac{dP}{dV_{mp}} = 0 \Longrightarrow$$

$$\frac{d(I \cdot V)}{dV_{mp}} = I_{mp} + V_{mp} \cdot \frac{dI}{dV_{mp}} = 0$$
(3.6)

Όπου:

$$\frac{dI}{dV_{mp}} = \frac{\frac{-I_o}{a} \cdot e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{a}} - \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{I_o \cdot R_s}{a} \cdot e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{a}} + \frac{R_s}{R_{sh}}}$$
(3.7)

$$\beta_{Voc} = \frac{\partial V}{\partial T_{I=0}} \approx \frac{V_{oc,ref} - V_{oc,Tc}}{T_{c,ref} - T_c}$$
(3.8)

Για το σχηματισμό της πέμπτης εξίσωσης σύμφωνα με το [7], χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες εξισώσεις, που προσδιορίζουν τη θερμοκρασιακή εξάρτηση των α, I_L , I_o .

Αρχικά επιλέγουμε τη θερμοκρασία $T_{c,10}=T_{c,ref}+10K=308K$.

Το φωτορεύμα σε θερμοκρασία κοντά στη θερμοκρασία αναφοράς (308K) ισούται με:

$$I_{L,10} = I_{L,ref} + \alpha_{Isc} \cdot (T_{C,10} - T_{c,ref})$$
(3.9)

Ο τροποποιημένος ιδανικός συντελεστής της διόδου σε θερμοκρασία κοντά στη θερμοκρασία αναφοράς (308K) ισούται με:

$$\frac{\alpha_{10}}{a_{ref}} = \frac{T_{C,10}}{T_{C,ref}}$$
(3.10)

Το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου σε θερμοκρασία κοντά στη θερμοκρασία αναφοράς (308K) ισούται με:

$$\frac{I_{o,10}}{I_{o,ref}} = \left[\frac{T_{C,10}}{T_{C,ref}}\right]^3 \cdot e^{\left[\frac{q}{k} \cdot \left(\frac{E_g}{T_{C,ref}} - \frac{E_g}{T_{C,10}}\right)\right]}$$
(3.11)

Τέλος χρησιμοποιείται η σχέση 3.2 που συνδέει το ρεύμα με την τάση και με αντικατάσταση των μεγεθών ισχύει ότι:

$$I_{L,10} = I_{o,10} \cdot \left[e^{\frac{V_{oc,Tc}}{a_{ref}}} - 1 \right] - \frac{V_{oc,Tc}}{R_{sh,ref}}$$
(3.12)

Ο δείκτης 10 σε όλα τα μεγέθη εκφράζει την τιμή της θερμοκρασίας, η οποία είναι 10K μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Με το συνδυασμό των σχέσεων 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 και 3.12 σχηματίζεται η πέμπτη εξίσωση που συνδέει τα α_{ref} , $I_{L,ref}$, $I_{o,ref}$, $R_{sh,ref}$. Οι σχέσεις που παρατέθηκαν παραπάνω εκφράζουν τη θερμοκρασιακή εξάρτηση των α, I_L , I_o και θα παρουσιαστούν αναλυτικά στη συνέχεια του κεφαλαίου.

3.1.2. Ενεργός ακτινοβολία

Η ενεργός ηλιακή ακτινοβολία (E_e) εκφράζει το κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου και στο οποίο ουσιαστικά αποκρίνεται το πλαίσιο. Για τον υπολογισμό της ενεργούς ακτινοβολίας λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες λόγω διακυμάνσεων του ηλιακού φάσματος και οι οπτικές απώλειες και χρησιμοποιείται το μοντέλο του ισοτροπικού ουρανού για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο.

Επιδράσεις των διακυμάνσεων του ηλιακού φάσματος:

Διάφορα σωματίδια της ατμόσφαιρας απορροφούν επιλεκτικά την ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα να παρατηρούνται φασματικές απώλειες. Μια εμπειρική σχέση έχει αναπτυχθεί ώστε να ποσοτικοποιεί τις απώλειες αυτές [7]:

$$f_1(AM) = a_0 + a_1 \cdot AM + a_2 \cdot AM^2 + a_3 \cdot AM^3 + a_4 \cdot AM^4 \quad (3.13)$$

Στο μοντέλο πέντε παραμέτρων, επιλέγεται το παρακάτω σύνολο τιμών για τους συντελεστές a_0 , a_1 , a_2 , a_3 και a_4 , το οποίο θεωρείται αντιπροσωπευτικό για όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια:

 $a_0 = 0.918093$ $a_1 = 0.086257$ $a_2 = -0.024459$ $a_3 = 0.002816$ $a_4 = -0.000126$

Οπτικές απώλειες

Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας θ επηρεάζει την ποσότητα της ακτινοβολίας στην οποία αποκρίνεται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από 65° περίπου, η ποσότητα της ανακλώμενης ακτινοβολίας είναι πιο μεγάλη απ' ότι για μικρότερες γωνίες πρόσπτωσης. Η ανάκλαση και η απορρόφηση της ακτινοβολίας από το πλαίσιο εξαρτώνται από τη γωνία πρόσπτωσης και εκφράζονται από τη συνάρτηση $K_{τα}(\theta)$ (incidence angle modifier). Η συνάρτηση αυτή ορίζεται ως ο λόγος της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας για κάποια γωνία πρόσπτωσης θ προς την μεταδιδόμενη ακτινοβολία για μηδενική γωνία πρόσπτωσης. Η συνάρτηση $K_{τα}(\theta)$ διαφέρει για ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε σχέση με έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη γιατί ο υαλοπίνακας μπορεί να είναι ενσωματωμένος στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και συνεπώς μειώνονται οι απώλειες λόγω διάθλασης.

Ο νόμος του Snell προσδιορίζει τη γωνία διάθλασης θ_r:

$$\theta_r = \arcsin\left(n \cdot \sin\theta\right) \tag{3.14}$$

Όπου:

θ: η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας n: ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού (n=1.526)

Μια καλή προσέγγιση της μεταδιδόμενης ηλιακής ακτινοβολίας από το πλαίσιο σύμφωνα με το νόμο του Bouguer είναι:

$$\tau(\theta) = e^{-(K \cdot L/\cos\theta_r)} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\sin^2(\theta_r - \theta)}{\sin^2(\theta_r + \theta)} + \frac{\tan^2(\theta_r - \theta)}{\tan^2(\theta_r + \theta)} \right) \right]$$
(3.15)

Όπου:

K: συντελεστής μη-στιλπνότητας (glazing extinction coefficient), θεωρείται $4m^{-1}$ η τιμή του "white water" γυαλιού.

L: πάχος του υαλοπίνακα (glazing thickness), θεωρείται 2mm τιμή λογική για φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Η συνάρτηση Κ_{τα}(θ) ισούται:

$$K_{\tau\alpha}(\theta) = \frac{\tau(\theta)}{\tau(0)} \tag{3.16}$$

Ο υπολογισμός της συνάρτησης $K_{\tau\alpha}(\theta)$ γίνεται ξεχωριστά για την ακτινική, τη διάχυτη και την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, επειδή έχουν διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης (μέσες τιμές των γωνιών αυτών δίνονται στο [8]).

• Μοντέλο ισοτροπικού ουρανού

Το μοντέλο πέντε παραμέτρων για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο χρησιμοποιεί το μοντέλο ισοτροπικού ουρανού, όπως αυτό προτάθηκε από τους Liu και Jordan (1963) [8]. Σε αυτό το μοντέλο θεωρείται ότι η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο αποτελείται από τρεις συνιστώσες: την ακτινική, τη διάχυτη και την ανακλώμενη. Στο δεύτερο κεφάλαιο, έχει αναφερθεί ότι η διάχυτη συνιστώσα απαρτίζεται από τρεις επιμέρους συνιστώσες. 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. Στο μοντέλο του ισοτροπικού ουρανού λαμβάνεται υπόψη μόνο η ισοτροπική συνιστώσα της διάχυτης ακτινοβολίας. Συνεπώς, η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο (με κλίση β), υπολογίζεται σύμφωνα με το μοντέλο ισοτροπικού ουρανού από την παρακάτω σχέση:

$$I_T = I_b \cdot R_b + I_d \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + I \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)$$
(3.17)

Κατά συνέπεια, η ενεργός ακτινοβολία δίνεται από:

$$E_e = f_1(AM) \cdot \left\{ I_b \cdot R_b \cdot K_{\tau\alpha,b} + I_d \cdot K_{\tau\alpha,d} \cdot \frac{(1+\cos\beta)}{2} + I \cdot \rho_g \cdot K_{\tau\alpha,g} \cdot \frac{(1-\cos\beta)}{2} \right\}$$
(3.18)

Όπου:

 I_b : η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο R_b : ο λόγος της ακτινικής συνιστώσας σε κεκλιμένη επιφάνεια προς την ακτινική συνιστώσα σε οριζόντια επιφάνεια (σχέση 2.20)

 I_d : η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο β: η κλίση του συλλέκτη ρg: ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους Ι: η ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο

3.1.3. Υπολογισμός των πέντε παραμέτρων σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας

Τροποποιημένος ιδανικός συντελεστής της διόδου, α

Όπως προκύπτει από τον ορισμό του τροποποιημένου ιδανικού συντελεστή της διόδου, α, υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ αυτού και της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, η οποία περιγράφεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_C}{T_{C,ref}} \tag{3.19}$$

Όπου:

α_{ref}, $T_{C,ref}$: ο τροποποιημένος ιδανικός συντελεστής της διόδου και η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου (Kelvin) για κανονικές συνθήκες λειτουργίας

α, T_C: ο τροποποιημένος ιδανικός συντελεστής της διόδου και η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου (Kelvin) για αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας.

• Ανάστροφο ρεύμα κόρου, I_o

Για το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου I_0 δίνεται η παρακάτω εξίσωση, η οποία περιγράφει την εξάρτηση αυτού από τη θερμοκρασία.

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = \left[\frac{T_C}{T_{C,ref}}\right]^3 \cdot e^{\left[\frac{q}{k} \cdot \left(\frac{E_{g,Tcref}}{T_{C,ref}} - \frac{E_{g,Tc}}{T_C}\right)\right]}$$
(3.20)

Όπου:

k: η σταθερά του Boltzmann

q: το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

 $E_{g,TCref,}\ T_{C,ref}$ το ενεργειακό διάκενο και η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε Kelvin στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας

 $E_{g,T},\ T_C$: το ενεργειακό διάκενο και η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε Kelvin στις αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας

 $I_{o,ref}$: το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας

Το ενεργειακό διάκενο εμφανίζει μια μικρή εξάρτηση από τη θερμοκρασία, η οποία περιγράφεται με την παρακάτω σχέση για κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, η οποία εφαρμόζεται για όλους τους τύπους φωτοβολταϊκών πλαισίων:

$$\frac{E_{g,Tc}}{E_{g,Tcref}} = 1-0.0002677 \cdot \left(T_C - T_{C,ref}\right)$$
(3.21)

Φωτορεύμα I_L

Το φωτορεύμα I_L έχει περίπου γραμμική εξάρτηση από την ενεργό ηλιακή ακτινοβολία (E_e). Το I_L επηρεάζεται επίσης από την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου (T_C) και το θερμοκρασιακό συντελεστή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (α_{Isc}). Η εξίσωση που περιγράφει αυτές τις εξαρτήσεις δίνεται παρακάτω:

$$I_L = E_e \cdot \left[I_{L,ref} + \alpha_{Isc} \cdot \left(T_C - T_{c,ref} \right) \right]$$
(3.22)

• Εγκάρσια αντίσταση R_{sh}

Για την εγκάρσια αντίσταση (shunt resistance) R_{sh} , η οποία επηρεάζει την κλίση της I-V καμπύλης στο σημείο βραχυκυκλώσεως, δίδεται η παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{R_{sh}}{R_{sh,ref}} = \frac{f_1(AM)}{E_e} \tag{3.23}$$

Όπου τα μεγέθη που έχουν δείκτη *ref* αναφέρονται σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας ενώ τα υπόλοιπα σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας.

• Αντίσταση σε σειρά R_s

Όσον αφορά τη μεταβολή της αντίστασης σε σειρά (series resistance) R_s σε σχέση με τις συνθήκες λειτουργίας, έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις [6], εκ των οποίων επιλέγεται τελικά η R_s να είναι σταθερή επειδή επηρεάζει σε μικρό βαθμό τη μορφή της I-V καμπύλης.

3.2. Μοντέλο των Sandia National Laboratories

Ένα εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος έχει αναπτυχθεί από τα Sandia National Laboratories [17, 19, 43]. Ο οργανισμός αυτός έχει διεξάγει λεπτομερείς μετρήσεις για μία ευρεία ποικιλία φωτοβολταϊκών πλαισίων. Σύμφωνα με αυτές τις μετρήσεις έχει σχηματίσει μια βάση δεδομένων που περιέχει ένα μεγάλο αριθμό συντελεστών ανά φωτοβολταϊκό πλαίσιο και στην οποία στηρίζεται το εν λόγω μοντέλο. Ειδικότερα, το μοντέλο βασίζεται σε ένα σύνολο εξισώσεων (δίνονται στο παράρτημα), οι οποίες περιλαμβάνουν εμπειρικές σχέσεις που προσδιορίζουν το ρεύμα και την τάση για διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Οι παραπάνω εμπειρικές σχέσεις εμπεριέχουν ένα σημαντικό αριθμό συντελεστών, που έχουν προσδιοριστεί πειραματικά βάσει μετρήσεων. Το σύνολο των στοιχείων του κατασκευαστή (datasheet) σε συνδυασμό με τις τιμές των προαναφερθέντων συντελεστών, που έχουν προσδιοριστεί για σημαντικό αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων διαφορετικών τεχνολογιών και εταιριών, έχουν καταχωρηθεί σε μία βάση δεδομένων που αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του μοντέλου. Η βάση δεδομένων χρησιμοποιείται ευρέως από πολλούς κατασκευαστές φωτοβολταϊκών πλαισίων και σχεδιαστές ολοκληρωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Το μοντέλο των Sandia National Laboratories επιτυγχάνει ακρίβεια και ευρύτητα αποδοχής για πολλές διαφορετικές εταιρίες κατασκευής φωτοβολταϊκών πλαισίων. Έχει υποστεί εκτενείς ελέγχους σε εξωτερικό περιβάλλον και τα αποτελέσματα αυτού έχουν συγκριθεί με αντίστοιχα άλλων εργαστηρίων και οργανισμών ελέγχου. Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη ηλεκτρικές, θερμικές, φασματικές και οπτικές επιδράσεις για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Τα Sandia National Laboratories έχουν αναπτύξει ένα θερμοκρασιακό μοντέλο για την εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου βασισμένο σε τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες: ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος και ταχύτητα ανέμου. Στο θερμοκρασιακό μοντέλο γίνεται χρήση μέσων ωριαίων τιμών των παραπάνω μεγεθών. Οι φασματικές και οι οπτικές απώλειες περιγράφονται από πολυωνυμικές εμπειρικές σχέσεις συναρτήσει της αέριου μάζας και της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Παρά τα προτερήματα του μοντέλου των Sandia National Laboratories που παρουσιάστηκαν παραπάνω, το μοντέλο έχει ένα σημαντικό περιορισμό. Η πρόβλεψη της ενεργειακής απόδοσης είναι εφικτή μόνο για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που περιέχονται στη βάση δεδομένων.

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή ενός μοντέλου πρόβλεψης της ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων, το οποίο να δέχεται ως εισόδους δεδομένα από το φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή (datasheet), μετεωρολογικά δεδομένα και την τοποθεσία και διάταξη του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος υιοθετήθηκε η προσέγγιση της σύνθεσης δύο υπαρχόντων μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε το μοντέλο των πέντε παραμέτρων, που χαρακτηρίζεται από δυνατότητα αναλυτικής επίλυσης μέσω μαθηματικών σχέσεων, και το μοντέλο των Sandia National Laboratories, που βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις και μια βάση δεδομένων. Το μοντέλο των Sandia National Laboratories παρουσιάζει ακριβή αποτελέσματα, αλλά περιορίζεται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια που περιέχονται στη βάση δεδομένων. Η σύνθεση έγκειται στο γεγονός της χρήσης ενός αναλυτικού μοντέλου πέντε παραμέτρων, που εμπλουτίζεται με πρόσθετες αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες προκύπτουν από την επεξεργασία της πληροφορίας που υπάρχει στις εμπειρικές σχέσεις του μοντέλου των Sandia National Laboratories και στη βάση δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό γίνεται η προσπάθεια να ενσωματωθούν στοιχεία και των δύο μοντέλων, ώστε να προκύπτουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, ανεξάρτητα από την ύπαρξή τους στη βάση δεδομένων των Sandia National Laboratories.

Η συνέχεια του κεφαλαίου πραγματεύεται τα ακόλουθα θέματα, που οδηγούν στη σύνθεση του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης. Ειδικότερα, εξετάζεται ο υπολογισμός της ενεργούς ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Επίσης, παρουσιάζεται η λεπτομερής κατασκευή του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης. Σε όλα τα παραπάνω θέματα υπεισέρχεται η αναγκαιότητα υπολογισμού, μέσω εμπειρικών σχέσεων, μεγεθών με βάση το μοντέλο των Sandia National Laboratories. Οι εμπειρικές σχέσεις περιέχουν ένα σημαντικό αριθμό παραμέτρων, οι τιμές των οποίων υπάρχουν στη βάση δεδομένων ανά συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στόχος είναι να χρησιμοποιηθούν οι εμπειρικές σχέσεις των Sandia National Laboratories για όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, ανεξάρτητα με τον εάν υπάρχουν στη βάση δεδομένων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση της πληροφορίας που βρίσκεται στη βάση δεδομένων μέσω ομαδοποίησης, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

4.1. Ομαδοποίηση φωτοβολταϊκών πλαισίων της βάσης δεδομένων των Sandia National Laboratories

Η ιδέα έγκειται στο πως μπορούν να ομαδοποιηθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της βάσης δεδομένων των Sandia National Laboratories, ώστε η κάθε ομάδα να χαρακτηρίζεται από τιμές συντελεστών που γειτνιάζουν και αυτό για κάθε συντελεστή που θα χρησιμοποιηθεί. Με βάση την ομαδοποίηση αυτή, θα μπορεί να γίνει χρήση των εμπειρικών σχέσεων ανά ομάδα φωτοβολταϊκών πλαισίων, με σημαντική ακρίβεια. Με αυτό τον τρόπο, για ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, που δεν βρίσκεται στη βάση δεδομένων των Sandia National Laboratories, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν οι τιμές των συντελεστών μιας ομάδας, στην οποία το υπόψη φωτοβολταϊκό πλαίσιο θα έχει ενταχθεί σύμφωνα με κάποια κριτήρια.

Η βάση δεδομένων των Sandia National Laboratories περιέχει 29 εμπειρικούς συντελεστές για κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στο μοντέλο ενεργειακής απόδοσης, που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται εννέα συντελεστές και συγκεκριμένα οι $I_{xo}/I_{sc,ref}$, a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a, b, ΔT , οι οποίοι επεξηγούνται στη πορεία του κεφαλαίου και στο παράρτημα. Στη προσπάθεια εύρεσης των ομάδων με κριτήριο τη γειτνίαση των τιμών των εννέα συντελεστών ακολουθήθηκαν τα εξής:

- Η μαθηματική επεξεργασία των τιμών των εννέα συντελεστών από τη βάση δεδομένων [38]
- Η μελέτη των κατηγοριοποιήσεων των φωτοβολταϊκών πλαισίων σύμφωνα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία [14, 22, 23, 26, 40]

Υιοθετήθηκαν τελικά εννέα ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων, όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

- 1. 2-Junction άμορφο πυρίτιο (2-a-Si)
- 2. 3-Junction άμορφο πυρίτιο (3-a-Si)
- 3. Thin film τελουριούχο κάδμιο (CdTe)
- 4. Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CIS)
- 5. Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si)
- 6. Πολυκρυσταλλικά με πλήρως τετραγωνισμένες κυψέλες (EFG)
- 7. Υβριδικά φωτοβολταϊκά (HIT)
- 8. Πολυκρυσταλλικά (mc-Si)
- 9. Πυριτίου τεχνολογίας thin film (Si-Film)

Στη συνέχεια, για κάθε μία από τις παραπάνω ομάδες υπολογίστηκαν η μέση τιμή και η διασπορά για κάθε ένα συντελεστή. Παρατηρείται ότι η διασπορά για κάθε ένα από τους εννέα συντελεστές που επιλέχθηκαν είναι πολύ μικρή και συνεπώς η χρήση του μέσου όρου του συντελεστή ανά ομάδα αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση. Αυτό το επιχείρημα ενισχύεται λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά ομάδα είναι μεγάλος, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται η διακριτότητα με βάση την τεχνολογία. Τα παραπάνω δείχνονται ενδεικτικά για τους συντελεστές α₀, α₁ στον Πίνακα 2 που ακολουθεί.

Ομάδα	Μέση τιμή α₀	Διασπορά α ₀	Μέση τιμή α1	Διασπορά α1
2-a-Si	0,924008	0,000969	0,111976	0,001051
3-a-Si	1,047	2,05E-31	0,000821	4,9E-38
CdTe	0,930683	0,00031	0,063737	0,000157
CIS	0,921429	1,29E-06	0,071273	2,06E-06
c-Si	0,93186	9,76E-05	0,060582	9,04E-05
EFG	0,935996	4E-10	0,053645	8,02E-34
HIT	0,927122	3,03E-05	0,061477	3,61E-05
mc-Si	0,928828	0,00011	0,064233	0,000107
Si-Film	0,928633	3,4E-06	0,072106	9,13E-06

Πίνακας 2: Μέση τιμή και διασπορά για τους συντελεστές α₀,α₁ για τις εννέα ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων

Όπου στη συνέχεια απαιτείται, παρουσιάζεται η ανάλυση μέσης τιμής και διασποράς για όλους τους συντελεστές.

Για λόγους πληρότητας, ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των ομάδων, που επιλέχθηκαν, προκειμένου να δειχθούν τα φυσικά και τεχνολογικά χαρακτηριστικά των εννέα ομάδων. Σημειώνεται ωστόσο ότι αυτή δεν είναι η μοναδική ομαδοποίηση. Σχετικός σχολιασμός ακολουθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

4.1.1. Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου «μεγάλου πάχους»

Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, c-Si)

Το πάχος τους είναι γύρω στα 0.3 χιλιοστά. Η απόδοσή τους στη βιομηχανία κυμαίνεται από 15 - 18% για το ολόκληρο το πλαίσιο. Εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24.7%. Το μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας ή αλλιώς "ενεργειακής πυκνότητας". Ένα άλλο χαρακτηριστικό τους είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου.

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

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

4.1.2. Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών επιστρώσεων, thin film

Φωτοβολταϊκά στοιχεία δισεληνοϊνδιούχου χαλκού (CuInSe2 ή CIS, με προσθήκη γάλλιου CIGS)

Ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοσή του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11%.

Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18.8% η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γάλλιου η απόδοσή του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο (CIGS). Το πρόβλημα που παρατηρείται είναι ότι το υλικό υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.

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

Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγώγιμου υλικού (πυρίτιο) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Εξαιτίας της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλή.

Ο χαρακτηρισμός άμορφο προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Οι αποδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά thin film πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6 έως 8% ενώ εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%.

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

Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παραχθεί η ίδια ποσότητα ενέργειας απαιτείται σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά τη διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον παρέχουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0.0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά.

Φωτοβολταϊκά στοιχεία EFG (Edge Defined Film-Fed Growth) πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Η διαδικασία μορφοποίησης EFG παράγει στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon). Ο τρόπος κατασκευής είναι ο ακόλουθος: ένας οκταγωνικός κύβος από γραφίτη βυθίζεται σε λιωμένο πυρίτιο. Σχηματίζονται οκταγωνικοί σωλήνες στους οποίους τοποθετείται φώσφορος και ένα επίχρισμα που αποτρέπει την ανάκλαση. Το σχήμα και οι ηλεκτρικές ιδιότητες των EFG πολυκρυσταλλικών πλαισίων μοιάζουν περισσότερο με πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Φωτοβολταϊκά στοιχεία τελουριούχου καδμίου (CdTe)

Το τελουριούχο κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV (\approx 1.14eV) το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα ως εκ τούτου έχει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα όπως τη δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές παρασκευής προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Εργαστηριακά η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία CdTe έχει φθάσει το 16%. Πειραματικά αποτελέσματα δίνονται στο [4]. Μελλοντικά αναμένεται το κόστος τους να μειωθεί αρκετά. Τροχοπέδη για την χρήση τους αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με ορισμένες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης τους.

4.1.3. Άλλες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων

Υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία (HIT)

Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. Τα HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer) είναι τα πιο γνωστά εμπορικά υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία και αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου, που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές το 17.2% και το οποίο σημαίνει ότι απαιτείται μικρότερη επιφάνεια για να επιτευχθεί η ίδια εγκατεστημένη ισχύς. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19.7%. Άλλα πλεονεκτήματα για τα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η εξίσου υψηλή τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Ωστόσο, το υβριδικό φωτοβολταϊκό είναι σχετικά ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Φωτοβολταϊκά στοιχεία multi-junction άμορφου πυριτίου (2-a-Si, 3-a-Si)

Στις υπόλοιπες τεχνολογίες για τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου απαραίτητο είναι τα προσπίπτοντα φωτόνια να έχουν μια ελάχιστη ενέργεια. Αυτή η ελάχιστη ενέργεια διαφοροποιείται από υλικό σε υλικό, αφού έχουν διαφορετικό ενεργειακό διάκενο. Ο περιορισμός αυτός παρακάμπτεται, χρησιμοποιώντας δύο ή περισσότερα διαφορετικά φωτοβολταϊκά στοιχεία, με περισσότερα από ένα ενεργειακά διάκενα για την κατασκευή ενός ενιαίου φωτοβολταϊκού στοιχείου. Τέτοια είναι το multi-junction στοιχεία και μπορούν να μετατρέψουν σε ηλεκτρική ενέργεια μεγαλύτερο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 4.1: Μορφή 3-junction φωτοβολταϊκού στοιχείου

Σε ένα τυπικό multi-junction φωτοβολταϊκό στοιχείο, επιμέρους στοιχεία με διαφορετικό ενεργειακό διάκενο τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο. Το επάνω στοιχείο έχει το μεγαλύτερο ενεργειακό διάκενο. Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο έως τρία διαφορετικά φωτοβολταϊκά στοιχεία (Σχήμα 4.1). Περαιτέρω στοιχεία για την κατηγορία αυτή δίνονται στο [16].

4.2. Ενεργός ακτινοβολία, E_e

Η ενεργός ηλιακή ακτινοβολία (E_e) εκφράζει το κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου και στο οποίο ουσιαστικά αποκρίνεται το πλαίσιο. Για τον υπολογισμό της ενεργούς ακτινοβολίας λαμβάνονται υπόψη οι οπτικές απώλειες καθώς και οι απώλειες λόγω διακυμάνσεων του ηλιακού φάσματος.

4.2.1. Οπτικές απώλειες

Οι οπτικές απώλειες σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ποικίλλουν ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης. Η μετάδοση, ανάκλαση και απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο επηρεάζει την απόδοση αυτού. Τα μεγέθη αυτά είναι συναρτήσεις του δείκτη διάθλασης (n) και του συντελεστή μηστιλπνότητας (K, glazing extinction coefficient), οι οποίοι εν γένει επηρεάζονται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Στην παρούσα εργασία θεωρούνται ανεξάρτητοι από αυτό [8].

Στην περίπτωση ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2, η ηλιακή ακτινοβολία, αφού διαβεί το διαφανές κάλυμμα και φθάσει στην απορροφητική επιφάνεια, διαχωρίζεται, και ένα μέρος της απορροφάται, ενώ ένα άλλο ανακλάται πίσω στο κάλυμμα προκαλώντας μια διαδοχική σειρά ανακλάσεων και απορροφήσεων.



Σχήμα 4.2: Σχηματική παράσταση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη με δύο καλύμματα

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 να φτάνει μικρότερη ποσότητα ακτινοβολίας στα στοιχεία στο εσωτερικού του πλαισίου και ως εκ τούτου η παραγόμενη ενέργεια να μειώνεται σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης.

Ο Fresnel έχει εισάγει, για λείες επιφάνειες, σχέσεις που αφορούν την ανάκλαση μη πολωμένης ηλιακής ακτινοβολίας από το μέσο 1, με δείκτη διάθλασης n₁, σε μέσο 2, με δείκτη διάθλασης n₂.



Σχήμα 4.3: Διάδοση ηλιακής ακτινοβολίας σε δύο μέσα

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \tag{4.1}$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \tag{4.2}$$

$$r = \frac{l_r}{l_i} = \frac{1}{2} \cdot (r_{\perp} + r_{\parallel})$$
(4.3)

Όπου:

θ1: η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας

θ2: η γωνία διάθλασης

 r_{\perp} : η κάθετη συνιστώσα της ακτινοβολίας

 r_{\parallel} : η παράλληλη συνιστώσα της ακτινοβολίας

r: η ανακλώμενη ακτινοβολία

Συνεπώς προκύπτει ότι η μεταδιδόμενη ακτινοβολία, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες λόγω ανάκλασης, είναι:

$$\tau_r = 1 - r = 1 - \frac{1}{2} \cdot (r_{\perp} + r_{\parallel}) \tag{4.4}$$

Η σχέση που συνδέει τις γωνίες θ_1 , θ_2 περιγράφεται από το νόμο του Snell, ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} \tag{4.5}$$

Για τον αέρα, που είναι το μέσο 1, ο δείκτης διάθλασης λαμβάνεται ίσος με $n_1=1$ και για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, που είναι το μέσο 2, ίσος με $n_2=1.526$, δηλαδή το δείκτη διάθλασης του γυαλιού.

Όσον αφορά τις απώλειες λόγω απορρόφησης ακολουθείται ο νόμος του Bouguer, ο οποίος περιγράφει τη μετάδοση της ακτινοβολίας σε ένα μερικώς διάφανο υλικό, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες λόγω απορρόφησης σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\tau_a = e^{-\frac{K \cdot L}{\cos \theta_2}} \tag{4.6}$$

Όπου:

K: συντελεστής μη-στιλπνότητας (glazing extinction coefficient), θεωρείται $4m^{-1}$ η τιμή του "white water" γυαλιού.

L: πάχος του υαλοπίνακα (glazing thickness), θεωρείται 2mm τιμή λογική για φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Κατά συνέπεια, ο λόγος της συνολικά μεταδιδόμενης ακτινοβολίας στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε αυτό, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις απώλειες λόγω ανάκλασης όσο και τις απώλειες λόγω απορρόφησης δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = \frac{\mathbf{l}_{transmitted}}{\mathbf{l}_{incident}} = \tau_r \cdot \tau_\alpha \tag{4.7}$$

Η ανάκλαση και η απορρόφηση της ακτινοβολίας από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο εξαρτώνται από τη γωνία πρόσπτωσης και εκφράζονται από τη συνάρτηση $K_{\tau\alpha}(\theta)$ (incidence angle modifier). Η συνάρτηση αυτή ορίζεται ως ο λόγος της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας για κάποια γωνία θ προς την μεταδιδόμενη ακτινοβολία για μηδενική γωνία πρόσπτωσης.

Συνοψίζοντας, ισχύουν τα εξής:

Η γωνία διάθλασης $θ_r$:

$$\theta_r = \arcsin\left(n \cdot \sin\theta\right) \tag{4.8}$$

Η σχέση 4.7, γίνεται:

$$\tau(\theta) = e^{-(K \cdot L/\cos\theta_r)} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\sin^2(\theta_r - \theta)}{\sin^2(\theta_r + \theta)} + \frac{\tan^2(\theta_r - \theta)}{\tan^2(\theta_r + \theta)} \right) \right]$$
(4.9)

Όπου:

θ: η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας K=4m⁻¹ L=2mm n=1.526

Στη συνέχεια, ορίζονται οι συντελεστές $K_{\tau\alpha}(\theta)$ για τις επιμέρους συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας, την ακτινική, τη διάχυτη και την ανακλώμενη.

Για την ακτινική συνιστώσα η συνάρτηση $K_{\tau \alpha, b}(\theta)$ ισούται με:

$$K_{\tau\alpha,b}(\theta) = \frac{\tau(\theta)}{\tau(0)} \tag{4.10}$$

Η προηγηθείσα ανάλυση αφορά αποκλειστικά την ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, γιατί αυτή προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο με γωνία θ. Οι γωνίες πρόσπτωσης της διάχυτης (θ_d) και της ανακλώμενης ακτινοβολίας (θ_{refl}) δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις [8]:

Για τη διάχυτη ακτινοβολία:

$$\theta_d = 59.7 - 0.1388 \cdot \beta + 0.001497 \cdot \beta^2 \tag{4.11}$$

Για την ανακλώμενη ακτινοβολία:

$$\theta_{refl} = 90 - 0.5788 \cdot \beta + 0.002693 \cdot \beta^2 \tag{4.12}$$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών $K_{t\alpha,d}$ της διάχυτης και $K_{t\alpha,refl}$ της ανακλώμενης συνιστώσας χρησιμοποιούνται οι σχέσεις 4.8, 4.9 και 4.10 με τις προαναφερθείσες γωνίες πρόσπτωσης αντίστοιχα (σχέσεις 4.11 και 4.12).

4.2.2. Επιδράσεις των διακυμάνσεων του ηλιακού φάσματος

Διάφορα σωματίδια της ατμόσφαιρας απορροφούν επιλεκτικά την ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα να παρατηρούνται φασματικές απώλειες. Τα Sandia National Laboratories διεξήγαγαν μετρήσεις και δοκιμές, με σκοπό την εξάλειψη της επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, και ως εκ τούτου την απομόνωση των επιδράσεων των διακυμάνσεων του ηλιακού φάσματος [19]. Η σχέση που ποσοτικοποιεί τις επιδράσεις αυτές δίδεται παρακάτω:

$$f_1(AM) = \frac{I_{sc_t}}{E^*} \cdot \frac{E_0^*}{I_{sc_{to}}}$$
(4.13)

Όπου:

 I_{sc_t} : μετρούμενο ρεύμα βραχυκυκλώσεως για το υπό δοκιμή φωτοβολταϊκό πλαίσιο στη θερμοκρασία αναφοράς (25°C), σε επίπεδο κάθετο στην ακτινοβολία για το υφιστάμενο υπό δοκιμή φάσμα

 $I_{sc_{to}}$: μετρούμενο ρεύμα βραχυκυκλώσεως για το υπό δοκιμή φωτοβολταϊκό πλαίσιο στη θερμοκρασία αναφοράς (25°C), σε επίπεδο κάθετο στην ακτινοβολία AM=1.5

 E^* : μετρούμενη από το πυρανόμετρο ηλιακή ακτινοβολία για το υπό δοκιμή φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε επίπεδο κάθετο στην ακτινοβολία για το υφιστάμενο υπό δοκιμή φάσμα

 E_0^* : μετρούμενη από το πυρανόμετρο ηλιακή ακτινοβολία για το υπό δοκιμή φωτοβολταϊκό σε επίπεδο κάθετο στην ακτινοβολία AM=1.5

Ύστερα από μια σειρά μετρήσεων και δοκιμών παρατηρήθηκε ότι η σχέση $f_1(AM)$ είναι επαναλαμβανόμενη για κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Έτσι, αναπτύχθηκε μια εμπειρική σχέση που ποσοτικοποιεί τις απώλειες αυτές [19]:

$$f_1(AM) = a_0 + a_1 \cdot AM + a_2 \cdot AM^2 + a_3 \cdot AM^3 + a_4 \cdot AM^4 \quad (4.14)$$

Οι συντελεστές α₀, α₁, α₂, α₃, α₄ δίνονται από τη βάση δεδομένων που παρέχουν τα Sandia National Laboratories. Με το ίδιο σκεπτικό που αναπτύχθηκε σε προηγούμενο εδάφιο παρατηρείται ότι για τους εμπειρικούς αυτούς συντελεστές προκύπτει μια σταθερή τιμή ανάλογα με την κατηγορία στην οποία βρίσκεται το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Στο υποκεφάλαιο 4.1 παρουσιάστηκαν η μέση τιμή και η διασπορά για τους συντελεστές α₀, α₁. Παρακάτω δίνεται ο Πίνακας 3, με τη μέση τιμή και τη διασπορά για τους υπόλοιπους συντελεστές α₂, α₃, α₄ ανά ομάδα. Παρατηρείται αντίστοιχη συμπεριφορά με αυτή του Πίνακα 2.

Ομάδα	Μέση	Διασπορά	Μέση	Διασπορά	Μέση	Διασπορά
	τιμή α2	α2	τιμή α3	α3	τιμή α4	α4
2-a-Si	-0,04817	7,85E-05	0,004873	1,03E-06	-0,00015	1,23E-09
3-a-Si	-0,0259	0	0,003174	7,84E-37	-0,00011	7,65E-40
CdTe	-0,013	3,69E-07	0,000878	1,73E-08	-2,1E-05	4,23E-11
CIS	-0,0144	3,31E-07	0,001218	7,24E-09	-3,6E-05	1,21E-11
c-Si	-0,01155	1,14E-05	0,000971	3,89E-07	-3,3E-05	1,73E-09
EFG	-0,00794	3,13E-36	0,000522	0	-1,3E-05	2,99E-42
HIT	-0,00976	4,8E-06	0,000602	1,53E-07	-1,1E-05	5,29E-10
mc-Si	-0,01247	8,41E-06	0,000979	1,02E-07	-2,7E-05	1,36E-10
Si-Film	-0,01889	2,43E-06	0,001688	3,38E-08	-4,9E-05	3,92E-11

Πίνακας 3: Μέση τιμή και διασπορά για τους συντελεστές α₂,α₃,α₄ για τις εννέα ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η προηγούμενη θεώρηση μπορεί να ενισχυθεί λαμβάνοντας υπόψη το φυσικό φαινόμενο που λαμβάνει χώρα. Όταν τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουν με ένα ελάχιστο επίπεδο ενέργειας σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο μπορούν να διασπάσουν τους ατομικούς δεσμούς του υλικού και να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια, τα οποία θα προκαλέσουν την εμφάνιση του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό το ελάχιστο επίπεδο ενέργειας των φωτονίων ονομάζεται ενεργειακό διάκενο (energy gap E_g) και είναι η ενέργεια που απαιτείται από ένα ηλεκτρόνιο για να μετακινηθεί από τη ζώνη σθένους (Valence band) στη ζώνη αγωγιμότητας (Conduction band) (Σχήμα 4.4). Το ενεργειακό διάκενο εξαρτάται από το υλικό και την ατομική δομή αυτού.

Η ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας μετράται σε eV. Φωτόνια με διαφορετική ενέργεια αντιστοιχούν σε διαφορετικά μήκη κύματος ακτινοβολίας. Όλο το ηλιακό φάσμα, από υπέρυθρο μέχρι υπεριώδες, καλύπτει ενέργειες από 0.5eV μέχρι 2.9eV. Το κόκκινο φως έχει περίπου 1.7eV και το μπλε 2.7eV. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μικρότερη είναι η ενέργεια των φωτονίων.

Σημαντικό για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι να μπορέσουν να μετατρέψουν όσο μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτό εξαρτάται από το ενεργειακό διάκενο, που με τη σειρά του προσδιορίζει σε ποιο μέρος του ηλιακού φάσματος αποκρίνεται το υλικό.



Σχήμα 4.4: Ενεργειακό διάκενο

Υλικά με χαμηλότερο ενεργειακό διάκενο μπορούν να εκμεταλλευτούν ένα μεγαλύτερο εύρος του ηλιακού φάσματος με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μεγαλύτερη ποσότητα ρεύματος. Παρόλα αυτά, κάτι τέτοιο δε σημαίνει απαραίτητα ότι η καλύτερη επιλογή υλικών είναι αυτά με χαμηλό ενεργειακό διάκενο. Το ενεργειακό διάκενο επηρεάζει επιπλέον τη τιμή της μέγιστης τάσης που ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μπορεί να εμφανίσει. Επομένως, όσο μεγαλύτερο είναι το ενεργειακό διάκενο τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση ανοιχτοκυκλώσεως. Ως γνωστόν, η ισχύς είναι το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος. Η επιλογή υλικών με ενεργειακό διάκενο από 1eV έως 1.8eV είναι επιθυμητή.

Το ηλεκτρικό ρεύμα, λοιπόν, που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο επηρεάζεται από την κατανομή του ηλιακού φάσματος, η οποία μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Παρατηρείται μια συστηματική επιρροή του ηλιακού φάσματος στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, διαφορετική ανά υλικό.

4.2.3. Υπολογισμός ενεργού ακτινοβολίας

Στο μοντέλο ενεργειακής απόδοσης, η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζεται από το μοντέλο των Perez et al. [29, 30, 31], όπως αυτό περιγράφεται στο δεύτερο κεφάλαιο. Η επιλογή του μοντέλου αυτού έγινε επειδή εμφανίζει αρκετά ακριβή αποτελέσματα σύμφωνα με το [8]. Συνεπώς η ενεργός ακτινοβολία του φωτοβολταϊκού πλαισίου δίνεται από τη σχέση 4.15:

$$\mathbf{E}_{e} = f_{1}(\mathbf{A}\mathbf{M}) \cdot \left\{ I_{b,T} \cdot K_{\tau\alpha,b} + I_{d,T} \cdot K_{\tau\alpha,d} + I_{refl,T} \cdot K_{\tau\alpha,refl} \right\}$$
(4.15)

Όπου:

 $I_{b,T}$: η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο $I_{d,T}$: η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο $I_{refl,T}$: η ανακλώμενη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

4.3. Θερμοκρασιακό μοντέλο

Για την πρόβλεψη της ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού σταθμού απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Σχετικές εργασίες που αναφέρονται στο θέμα είναι οι [9, 18, 20, 33, 34, 35]. Τα Sandia National Laboratories έχουν αναπτύξει ένα εμπειρικό θερμοκρασιακό μοντέλο που έχει ως εισόδους ωριαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας του ανέμου και ως έξοδο τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Μετά την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού σταθμού, μπορεί να μετρηθεί η ακριβής τιμή της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων για τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θερμοκρασία αυτή αντί για την εκτιμημένη από το θερμοκρασιακό μοντέλο. Παρόλα αυτά, έχει αποδειχθεί ότι το θερμοκρασιακό μοντέλο είναι επαρκές για σχεδιαστικούς σκοπούς.

Το θερμοκρασιακό μοντέλο των Sandia National Laboratories έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε επίπεδα πλαίσια τοποθετημένα με ελεύθερη την πίσω όψη καθώς και σε επίπεδα πλαίσια με μονωμένη την οπίσθια επιφάνεια προσομοιώνοντας περιπτώσεις πλαισίων ενσωματωμένων σε κτίρια. Εκτιμά την αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας με ακρίβεια ±5°C και αβεβαιότητες αυτής της κλίμακας έχουν ως αποτέλεσμα σφάλμα μικρότερο του 3% στην ισχύ εξόδου του πλαισίου.

Οι εμπειρικά προσδιορισμένοι συντελεστές (α, b) που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο καθορίζονται χρησιμοποιώντας πολλές 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) καθώς 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 δεν 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 (α, b), οι οποίοι αντισταθμίζουν τις επιδράσεις του περιβάλλοντος χώρου και της θέσης του ανεμομέτρου όταν αυτές διαφέρουν από τις πρότυπες. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στο [18].

Η θερμοκρασία στην οπίσθια επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$T_m = I_T \cdot \{e^{\alpha + b \cdot WS}\} + T_a \tag{4.16}$$

Όπου:

 T_m : Θερμοκρασία οπίσθιας όψης πλαισίου (°C)

*Τ*_α: Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)

Ι_T: Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του πλαισίου (W/m²) WS: Ταχύτητα ανέμου στο πρότυπο ύψος 10m (m/s)

α: 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 επίδραση στη θερμοκρασία λειτουργίας του πλαισίου. Ωστόσο, ενσωματώνοντας την επίδραση της κατεύθυνσης του ανέμου στο θερμοκρασιακό μοντέλο θεωρείται ότι αυτό γίνεται δυσανάλογα 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 καθώς και η θερμοχωρητικότητα του πλαισίου είναι παράγοντες επίδρασης με παρεμφερή συμπεριφορά στη θερμοκρασία.

Η θερμοκρασία των στοιχείων και η θερμοκρασία της οπίσθιας επιφάνειας του πλαισίου μπορεί να διαφέρουν αισθητά. Οι δύο θερμοκρασίες μπορούν να συνδεθούν με την παρακάτω σχέση, η οποία βασίζεται στην υπόθεση της μονοδιάστατης θερμικής αγωγιμότητας των υλικών του πλαισίου που περιλαμβάνει τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

$$T_c = T_m + \frac{I_T}{I_{T,ref}} \cdot \Delta T \tag{4.17}$$

Όπου:

 $T_c:$ Θερμοκρασία των στοιχείων στο εσωτερικό του πλαισίου (°C) $T_m:$ Θερμοκρασία που μετράται στην οπίσθια επιφάνεια του πλαισίου (°C) $I_T:$ Ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου (W/m²) $I_{T ref}:$ Ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς (1000 W/m²)

ΔΤ: 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.

Η παράμετρος ΔΤ παίρνει δύο διαφορετικές τιμές. Την τιμή $\Delta T=3$ °C εάν αναφερόμαστε σε φωτοβολταϊκά πλαίσια με ελεύθερη την πίσω όψη και την τιμή $\Delta T=0$ °C σε περιπτώσεις πλαισίων ενσωματωμένων σε κτίρια

Οι τιμές των συντελεστών α, b που χρησιμοποιούνται στο θερμοκρασιακό μοντέλο δίνονται στη βάση δεδομένων των Sandia National Laboratories. Όπως προαναφέρθηκε αντί για τις ακριβείς τιμές των συντελεστών για κάθε πλαίσιο χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές ανά κατηγορία, δεδομένου ότι παρουσιάζουν μικρή διασπορά. Ο Πίνακας 4 περιέχει τις μέσες τιμές και διασπορές των α, b για κάθε ομάδα.

Ομάδα	Μέση τιμή α	Διασπορά α	Μέση τιμή b	Διασπορά b
2-a-Si	-3,47	0	-0,0594	6,02E-35
3-a-Si	-3,2726	0,14861	-0,086	0,001139
CdTe	-3,47	2,22E-31	-0,0594	5,42E-35
CIS	-3,47	2,3E-31	-0,0594	0
c-Si	-3,55384	0,006927	-0,07568	4,17E-05
EFG	-3,4736	0,000324	-0,06002	9,73E-06
HIT	-3,59638	0,006663	-0,07442	0,000109
mc-Si	-3,52734	0,009741	-0,07309	4,31E-05
Si-Film	-3,56	2,09E-31	-0,075	2,04E-34

Πίνακας 4: Μέση τιμή και διασπορά για τους συντελεστές α,b για τις εννέα ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων

4.4. Ανάπτυξη μοντέλου ενεργειακής απόδοσης

.

Η ηλεκτρική συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να περιγραφεί σύμφωνα με το μοντέλο της απλής διόδου [8, 27]. Το κύκλωμα έχει μια αντίσταση σε σειρά, που περιλαμβάνει τις αναπόφευκτες αντιστάσεις μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια, και μια εγκάρσια αντίσταση, που περιλαμβάνει τις διαρροές ρεύματος λόγω κατασκευαστικών ελαττωμάτων. Η τάση στο φορτίο δίνεται στο Σχήμα 4.5 με το γράμμα "V". Το παρακάτω κύκλωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου καλά για μεμονωμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία, πλαίσια και συστοιχίες.



Σχήμα 4.5: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού πλαισίου

Εφαρμόζοντας το νόμο του Kirchoff προκύπτει ότι:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} (4.18)$$

Αναλύοντας περαιτέρω τη σχέση 4.18, δηλαδή το ρεύμα που διέρχεται από την εγκάρσια αντίσταση και το ρεύμα της διόδου, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση, που συνδέει την τάση και το ρεύμα για δεδομένη θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία.

$$I = I_L - I_o \cdot \left[e^{\frac{V + I \cdot R_s}{a}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}$$
(4.19)

Όπου:

I_L: φωτορεύμα

Ιο: ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου

 R_s : αντίσταση σε σειρά (series resistance).

 R_{sh} : εγκάρσια αντίσταση (shunt resistance)

α: τροποποιημένος ιδανικός συντελεστής της διόδου

$$a = \frac{N_s \cdot n \cdot k \cdot T_C}{q} \tag{4.20}$$

Όπου:

q: το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

k: η σταθερά του Boltzmann

n: ο ιδανικός συντελεστής της διόδου

 N_S : ο αριθμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά

T_C: η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου (Kelvin)

Η μικρότερη φωτοβολταϊκή οντότητα είναι το φωτοβολταϊκό στοιχείο ή κελί. Ορισμένος αριθμός στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά ή/και παράλληλα σχηματίζουν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Πολλά φωτοβολταϊκά πλαίσια εν σειρά ή/και παράλληλα δημιουργούν μια φωτοβολταϊκή συστοιχία, όπως άλλωστε φαίνεται και στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Φωτοβολταϊκά στοιχεία, πλαίσια και συστοιχίες

Ως ελάχιστη μονάδα θεωρείται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Σε αυτό το επίπεδο άλλωστε γίνονται και οι μετρήσεις που δίνονται από τον κατασκευαστή. Όμως στην πραγματικότητα η ελάχιστη μονάδα είναι το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Οι σχέσεις που συνδέουν τις προαναφερθείσες παραμέτρους σε επίπεδο πλαισίου και στοιχείου δίνονται παρακάτω:

$$\alpha = N_s \cdot a_{cell} \tag{4.21}$$

$$I_L = N_p \cdot I_{L,cell} \tag{4.22}$$

$$I_o = N_p \cdot I_{o,cell} \tag{4.23}$$

$$R_s = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_{s,cell} \tag{4.24}$$

$$R_{sh} = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_{sh,cell} \tag{4.25}$$

Η γραφική παράσταση μεταξύ ρεύματος και τάσης στην έξοδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου καλείται χαρακτηριστική εξόδου Ι-V και έχει επικρατήσει να παριστάνεται στο πρώτο τεταρτημόριο. Μια τέτοια καμπύλη για δοσμένη ένταση ακτινοβολίας και δοσμένη θερμοκρασία λειτουργίας του πλαισίου φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 4.7 για το πλαίσιο YL170.



Σχήμα 4.7: Καμπύλη Ι-V σε κανονικές συνθήκες για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ΥL170

Στην καμπύλη του Σχήματος 4.7 σημειώνονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά μεγέθη για το πλαίσιο:

- I_{sc.ref}=8.1A: Ρεύμα βραχυκυκλώσεως του πλαισίου για τάση εξόδου V=0V
- V_{oc,ref}=29V: Τάση ανοιχτοκυκλώσεως για ρεύμα I=0A
- Σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point): Το σημείο μέγιστης ισχύος είναι το σημείο της I-V καμπύλης όπου αντιστοιχεί το ορθογώνιο με την μέγιστη επιφάνεια. Η ισχύς στο σημείο αυτό, για δοσμένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο
- Imp,ref=7.4A: Ρεύμα μέγιστης ισχύος
- V_{mp,ref}=23V: Τάση μέγιστης ισχύος

Τα παραπάνω μεγέθη έχουν δείκτη *ref* γιατί οι συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας στις οποίες αναφέρονται (ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m² και θερμοκρασία 25°C ή 298K), ονομάζονται κανονικές συνθήκες λειτουργίας και αποτελούν σημείο αναφοράς. Η γραφική παράσταση ρεύματος-τάσης (I-V) τροποποιείται όταν αλλάζουν οι συνθήκες λειτουργίας. Συνεπώς, μεταβάλλονται και οι παράμετροι που περιγράφουν αυτή τη γραφική παράσταση.

Για να υπολογιστούν το ρεύμα, η τάση και συνεπώς η ισχύς που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο πρέπει να προσδιοριστούν πέντε παράμετροι (α, I_o , I_L , R_s , R_{sh}).

Αρχικά, προσδιορίζονται οι πέντε αυτές παράμετροι για τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας (ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m² και θερμοκρασία 25°C ή 298K). Στόχος του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης είναι η πρόβλεψη της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου χρησιμοποιώντας μόνο δεδομένα που παρέχονται από τον κατασκευαστή (datasheet) και τα οποία είναι:

- Ρεύμα βραχυκυκλώσεως σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας (I_{sc,ref})
- Τάση ανοιχτοκυκλώσεως σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας (V_{oc,ref})
- Ρεύμα μέγιστης ισχύος σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας (Imp,ref)
- Τάση μέγιστης ισχύος σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας (Imp,ref)
- Θερμοκρασιακό συντελεστή για την τάση ανοιχτοκυκλώσεως (β_{Voc})
- Θερμοκρασιακό συντελεστή για το ρεύμα βραχυκυκλώσεως (α_{Isc})
- Αριθμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά (Ns)

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα μπορούν να σχηματιστούν τέσσερις εξισώσεις, από τις πέντε που απαιτούνται ώστε να υπολογιστούν οι πέντε παράμετροι.

Οι πρώτες τρεις εξισώσεις προκύπτουν από την εξίσωση I(V) (σχέση 4.19), για τα σημεία βραχυκυκλώσεως, ανοιχτοκυκλώσεως και μέγιστης ισχύος.

1. Για το ρεύμα βραχυκυκλώσεως I=I $_{sc.ref}$, V=0:

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \cdot \left[e^{\frac{I_{sc,ref} \cdot R_{s,ref}}{a_{ref}}} - 1 \right] - \frac{I_{sc,ref} \cdot R_{s,ref}}{R_{sh,ref}}$$
(4.26)

2. Για την τάση ανοιχτοκυκλώσεως I=0, V=V $_{oc,ref}$:

$$0 = I_{L,ref} - I_{o,ref} \cdot \left[e^{\frac{V_{oc,ref}}{a_{ref}}} - 1 \right] - \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh,ref}}$$
(4.27)

3. Fia to shmeio mégisthz iscúoz I=I_mp,ref, V=V_mp,ref:

$$I_{mp,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \cdot \left[e^{\frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_{s,ref}}{a_{ref}}} - 1 \right] - \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_{s,ref}}{R_{sh,ref}}$$
(4.28)

4. Η τέταρτη εξίσωση προκύπτει από το γεγονός ότι για το σημείο μέγιστης ισχύος ισχύει ότι η παράγωγος της ισχύος ως προς την τάση είναι μηδενική:

Για το σημείο μέγιστης ισχύος:

$$\frac{dP}{dV_{mp}} = 0 \Longrightarrow$$

$$\frac{d(I \cdot V)}{dV_{mp}} = I_{mp} + V_{mp} \cdot \frac{dI}{dV_{mp}} = 0$$
(4.29)

Όπου:

$$\frac{dI}{dV_{mp}} = \frac{\frac{-I_o}{a} \cdot e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{a}} - \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{I_o \cdot R_s}{a} \cdot e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{a}} + \frac{R_s}{R_{sh}}}$$
(4.30)

Για το σχηματισμό της πέμπτης εξίσωσης το μοντέλο των πέντε παραμέτρων
 [7] χρησιμοποιεί τον θερμοκρασιακό συντελεστή της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (β_{Voc}), όπως περιγράφεται στο τρίτο κεφάλαιο.

Στην παρούσα εργασία, η πέμπτη εξίσωση προκύπτει διαφορετικά σε μια προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία της βάσης δεδομένων των Sandia National Laboratories. Στο μοντέλο απόδοσης των Sandia National Laboratories χρησιμοποιούνται πέντε σημεία για να προσδιοριστεί η βασική μορφή της καμπύλης Ι-V και να επιτευχθεί μια κατά το δυνατόν ακριβέστερη προσέγγιση ολόκληρης της καμπύλης Ι-V σε περιπτώσεις που η τάση λειτουργίας είναι διαφορετική από τη βέλτιστη (Vmp). Τα τρία σημεία της καμπύλης I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι το ρεύμα βραχυκυκλώσεως, η τάση ανοιγτοκυκλώσεως και το σημείο μέγιστης ισχύος. Το τέταρτο σημείο (I_x) υπολογίζεται για τάση ίση με το μισό της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (V_{oc}), και το πέμπτο σημείο (I_{xx}) για τάση ίση με το ημιάθροισμα της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως και της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος (V_{mp}). Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 4.8:



Σχήμα 4.8: Περιγραφή των πέντε σημείων του μοντέλου Sandia National Laboratories

Η βάση δεδομένων των Sandia National Laboratories περιέχει τιμές για το ρεύμα ($I_{x,ref}$) σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Εάν κανονικοποιηθεί η τιμή αυτή ($I_{x,ref}$) ως προς το ρεύμα βραχυκυκλώσεως στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας ($I_{sc,ref}$), τότε προκύπτει μια νέα μεταβλητή (έστω $i_{x,ref}$). Ο Πίνακας 5 περιέχει τις μέσες τιμές και διασπορές του κανονικοποιημένου μεγέθους

 $(i_{x,ref})$ ανά ομάδα. Η $i_{x,ref}$ παρουσιάζει τη συμπεριφορά μικρής διασποράς ανά ομάδα, που έχει παρατηρηθεί και στους υπόλοιπους συντελεστές της βάσης δεδομένων και κατά συνέπεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή για κάθε ομάδα.

Ομάδα	Μέση τιμή i _{x,ref}	Διασπορά i _{x,ref}
2-a-Si	0,912454	1,66E-05
3-a-Si	0,923858	3,56E-05
CdTe	0,924599	4E-05
CIS	0,966207	0,000114
c-Si	0,984485	5,73E-05
EFG	0,98612	1,08E-05
HIT	0,991288	3,78E-05
mc-Si	0,984077	4,99E-05
Si-Film	0,966869	0,000241

Πίνακας 5: Μέση τιμή και διασπορά για το μέγεθος i _{x,ref} για τις εννέα ομάδες	
φωτοβολταϊκών πλαισίων	

Για να σχηματιστεί η πέμπτη εξίσωση του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης αρκεί να πολλαπλασιαστεί το κανονικοποιημένο ρεύμα $(i_{x,ref})$ με το ρεύμα βραχυκυκλώσεως του υπό εξέταση φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Η πέμπτη και τελευταία εξίσωση προκύπτει από τη σχέση 4.19 για το σημείο $\left(\frac{V_{oc,ref}}{2}, I_{x,ref}\right)$, όπου $I_{x,ref} = i_{x,ref} \cdot I_{sc,ref}$.

Δηλαδή τελικά, η πέμπτη εξίσωση δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_{x,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \cdot \left[e^{\frac{V_{oc,ref}}{2} + I_{x,ref} \cdot R_{s,ref}} - 1 \right]$$

$$- \frac{\frac{V_{oc,ref}}{2} + I_{x,ref} \cdot R_{s,ref}}{R_{sh,ref}}$$

$$(4.31)$$

Η χρήση αυτής της εξίσωσης σε σχέση με αυτή που προτείνει το μοντέλο πέντε παραμέτρων έχει το χαρακτηριστικό ότι προσεγγίζει ακριβέστερα την καμπύλη I-V στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνει ακριβέστερες προβλέψεις για οποιεσδήποτε συνθήκες λειτουργίας (Ως μέτρο σύγκρισης θεωρούνται τα αποτελέσματα του μοντέλου των Sandia National Laboratories).

4.5. Μεταβολή των πέντε παραμέτρων σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας

Τροποποιημένος ιδανικός συντελεστής της διόδου (α):

Στη σχέση 4.20 ορίστηκε ο τροποποιημένος ιδανικός συντελεστής της διόδου α. Παρατηρείται ότι υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ αυτού και της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, η οποία περιγράφεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_C}{T_{C,ref}} \tag{4.32}$$

Όπου:

α_{ref} ,T_{C,ref}: ο τροποποιημένος ιδανικός συντελεστής της διόδου και η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου (Kelvin) για κανονικές συνθήκες λειτουργίας

α , T_C : ο τροποποιημένος ιδανικός συντελεστής της διόδου και η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου (Kelvin) για αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας

Έχει παρατηρηθεί ότι ο συντελεστής α δεν επηρεάζεται από τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης, εάν αυξηθεί η τιμή του α τότε η καμπύλη I-V μετακινείται προς τα δεξιά, αυξάνοντας την τάση ανοιχτοκυκλώσεως, ενώ αφήνει αναλλοίωτη την τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως.

2. Ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου (I_o)

Το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου εξαρτάται από τη θερμοκρασία (T_C), από το ενεργειακό διάκενο του υλικού (E_g) καθώς και από τον αριθμό των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά (N_s). Σε αντίθεση με τον τροποποιημένο ιδανικό συντελεστή της διόδου, εάν αυξηθεί η τιμή του I_o τότε η καμπύλη I-V μετακινείται προς τα αριστερά, μειώνοντας την τιμή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και της τάσης του σημείου μέγιστης ισχύος. Το ανάστροφο ρεύμα κόρου δεν επηρεάζεται επίσης από τα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η παρακάτω εξίσωση που αναπτύχθηκε από τον Townsend [7, 8] παρουσιάζει την μεταβολή του I_0 στις συνθήκες λειτουργίας:

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = \left[\frac{T_C}{T_{C,ref}}\right]^3 \cdot e^{\left[\frac{E_g \cdot N_s}{a_{ref}} \left(1 - \frac{T_{C,ref}}{T_C}\right)\right]}$$
(4.33)

Όπου: k: η σταθερά του Boltzmann E_{g.}: το ενεργειακό διάκενο
$T_{C,ref}$: η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε Kelvin στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας

 T_C : η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε Kelvin στις αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας

 $I_{o,ref}$: το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας

3. То $\phi \omega \tau o \rho \epsilon \dot{\nu} \mu \alpha (I_L)$

Το φωτορεύμα εξαρτάται από την ενεργό ακτινοβολία (E_e), τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου (T_c), το θερμοκρασιακό συντελεστή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (α_{Isc}) και από άλλες παραμέτρους. Όταν αυξάνεται το I_L τότε η καμπύλη I-V μετακινείται προς τα πάνω και αυξάνεται το ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

Ο Townsend πρότεινε το 1989 [7, 8] μια εξίσωση που προσδιορίζει το φωτορεύμα για οποιεσδήποτε συνθήκες λειτουργίας:

$$I_L = I_T \cdot \left[I_{L,ref} + \alpha_{Isc} \cdot \left(T_C - T_{c,ref} \right) \right]$$
(4.34)

Η σχέση 4.34 δεν λαμβάνει υπόψη τις φασματικές αλλά ούτε και τις οπτικές απώλειες. Μια τροποποιημένη εξίσωση δίνεται παρακάτω, ώστε να είναι πιο ακριβής [7, 8]:

$$I_L = E_e \cdot \left[I_{L,ref} + \alpha_{Isc} \cdot \left(T_C - T_{c,ref} \right) \right]$$
(4.35)

Όπου:

 $E_e:$ η ενεργός ακτινοβολία (περιλαμβάνει τις οπτικές απώλειες και τις φασματικές απώλειες)

Ιτ: η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

IL, ref: το φωτορεύμα στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας

α_{Isc}: ο θερμοκρασιακός συντελεστής του ρεύματος βραχυκυκλώσεως

 $T_{\rm C}$: η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου στις αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας

 $T_{C,\text{ref}}$ η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας

4. Αντίσταση σε σειρά (R_s)

Η αντίσταση σε σειρά επηρεάζεται από τη θερμοκρασία (T_C) καθώς και από την ενεργό ακτινοβολία (E_e) και τη συνάρτηση της αερίου μάζας f₁(AM). Η παράμετρος αυτή επιδρά στις τιμές του ρεύματος και της τάσης μέγιστης λειτουργίας (I_{mp}, V_{mp}). Όσο αυξάνεται η R_s, μειώνονται οι τιμές των I_{mp}, V_{mp}. Δεν επηρεάζει καθόλου τις τιμές του ρεύματος βραχυκυκλώσεως και της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως.

Παρακάτω δίνεται η εξίσωση που περιγράφει τη μεταβολή της R_s [6]:

$$\frac{E_{e}}{f_{1}(AM)} = \frac{\frac{a_{ref}}{I_{o,ref}} \cdot e^{-\frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_{s,ref}}{a_{ref}}} + R_{s,ref}}{\frac{a}{I_{o}} \cdot e^{-\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_{s}}{a}} + R_{s}}$$
(4.36)

Όπου:

Τα μεγέθη με δείκτη ref αναφέρονται σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

α: ο τροποποιημένος ιδανικός συντελεστής της διόδου στις αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας

 I_o : το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου στις αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας

 I_{mp}, V_{mp} : το ρεύμα και η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος στις αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας

 $\Sigma \tau \eta v \text{ scient 4.36 wg times twv } I_{mp}, V_{mp} \text{ crossing} solution of a koloubeg prosegnises, prokeimenou na katastei dunatog o upologismos thg timus thg antistash <math display="inline">R_s$ [6].

Το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος έχει γραμμική εξάρτηση από το λόγο της ενεργούς ακτινοβολίας (E_e) προς τη συνάρτηση της αέριου μάζας $f_1(AM)$.

Αυτό μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω εξίσωση:

$$I_{mp} = I_{mp,ref} \cdot \frac{E_e}{f_1(AM)} \tag{4.37}$$

Η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος έχει γραμμική εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Αυτό μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{mp} = V_{mp,ref} + \beta_{Voc} \cdot \left(T_C - T_{C,ref}\right)$$
(4.38)

Με όλες τις παραμέτρους γνωστές μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της R_s λύνοντας τη μη γραμμική εξίσωση 4.36. Κάποιες από τις λύσεις που προκύπτουν λαμβάνουν αρνητικές τιμές. Οι τιμές αυτές της αντίστασης δεν έχουν φυσικό νόημα αλλά επιφέρουν ακριβέστερα αποτελέσματα πρόβλεψης.

5. Εγκάρσια αντίσταση (R_{sh})

Η τιμή της εγκάρσιας αντίστασης επηρεάζει την κλίση της καμπύλης Ι-V στο σημείο βραχυκυκλώσεως. Όταν η τιμή της αυξάνεται, τότε η κλίση μειώνεται. Μια καλή προσέγγιση της μεταβολής της R_{sh} [7] σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας είναι:

$$\frac{R_{sh}}{R_{sh,ref}} = \frac{f_1(AM)}{E_e} \tag{4.39}$$

Μετά τον υπολογισμό των πέντε παραμέτρων στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας είναι δυνατό να προσδιοριστεί η μορφή της καμπύλης I-V στις συνθήκες αυτές, αφού έχει υπολογιστεί η αναλυτική εξίσωση που συνδέει το ρεύμα με την τάση.

$$I = I_L - I_o \cdot \left[e^{\frac{V + I \cdot R_s}{a}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}$$
(4.40)

Αν θεωρηθεί ότι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο λειτουργεί μόνιμα στο σημείο μέγιστης ισχύος τότε μπορεί να βρεθεί η ισχύς στο σημείο αυτό χωρίς να απαιτείται η χάραξη της συνολικής μορφής της καμπύλης, επιλύοντας το παρακάτω σύστημα:

$$\frac{dP}{dV_{mp}} = \frac{d(I \cdot V)}{dV_{mp}} = 0 \tag{4.41}$$

$$I_{mp} = I_L - I_o \cdot \left[e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{a}} - 1 \right] - \frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{R_{sh}}$$
(4.42)

4.6. Το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης σε φωτοβολταϊκά συστήματα

Το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο έχει ως εισόδους μετεωρολογικά δεδομένα (ηλιακή ακτινοβολία Ι, ταχύτητα ανέμου WS, ατμοσφαιρική πίεση P και θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a), δεδομένα του φωτοβολταϊκού πλαισίου που παρέχονται από το φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή ($I_{sc,ref}$, $V_{oc,ref}$, $I_{mp,ref}$, a_{Isc} , β_{Voc} , N_s) καθώς και τη θέση και προσανατολισμό του φωτοβολταϊκού πλαισίου (κλίση πλαισίου β, γεωγραφικό πλάτος φ, κ.α.). Αρχικά υπολογίζεται η ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο στον συγκεκριμένο τόπο (Plane Of Array Radiation). Στη συνέχεια με τη βοήθεια του θερμοκρασιακού μοντέλου ή μετρήσεων προσδιορίζεται η θερμοκρασία του πλαισίου. Οι διαδικασίες αυτές απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 4.9.

Σε περίπτωση που αντί για ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης πραγματεύεται μια φωτοβολταϊκή συστοιχία (αποτελούμενη από όμοια πλαίσια), τότε απλώς στο τέλος πολλαπλασιάζεται η παραγόμενη ισχύς με τον αριθμό των πλαισίων σε σειρά (M_s) και τον αριθμό των πλαισίων που είναι παράλληλα (M_p). Όσον αφορά το ρεύμα της συστοιχίας, το ρεύμα του πλαισίου πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των πλαισίων που είναι παράλληλα (M_p) ενώ αντίστοιχα για την τάση της συστοιχίας πολλαπλασιάζεται η τάση του πλαισίου με τον αριθμό των πλαισίων σε σειρά (M_s). Σε επίπεδο φωτοβολταϊκού συστήματος η αναγωγή είναι παρόμοια, δηλαδή πολλαπλασιάζουμε την ισχύ με τον αριθμό των σειρών συστοιχιών (N_{row}) και τον αριθμό των συστοιχιών ανά σειρά (N_{array}) (για όμοιες συστοιχίες).

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν μπορεί να προσδιοριστεί η παραγόμενη DC ενέργεια για δεδομένο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα ροής του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης σε επίπεδο φωτοβολταϊκού πλαισίου

Για να μετατραπεί η DC ενέργεια σε AC γίνεται η χρήση αντιστροφέων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10 τα φωτοβολταϊκά συστήματα που συνδέονται στο δίκτυο αποτελούνται από δύο κύρια χαρακτηριστικά [14, 26]:

- Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια
- Το σύστημα του αντιστροφέα (inverter)



Σχήμα 4.10: Σύνδεση του φωτοβολταϊκού συστήματος στο ηλεκτρικό δίκτυο

Οι αντιστροφείς (inverters) μετατρέπουν την DC ενέργεια σε AC. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από διαφορετικές τεχνολογίες inverters. Αρχικά, οι αντιστροφείς αποτελούνταν από μια συγκεκριμένη διάταξη θυρίστορ. Όμως λόγω της κακής ποιότητας ρεύματος και τάσης που παρήγαγαν, επειδή περιείχαν πολλές αρμονικές, αντικαταστάθηκαν από inverters με τρανζίστορ (IGBT, MOSFET). Ορισμένα κριτήρια αξιολόγησης των inverters παρουσιάζονται παρακάτω:

- απόδοση: είναι πάνω από 90%
- κόστος
- ποιότητα του παραγόμενου ρεύματος και τάσης (χωρίς πολλές αρμονικές)
- ικανότητα υπερφόρτωσης
- ικανότητα εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)
- ασφάλεια

Όπως αναφέρθηκε οι inverters μπορούν να προσδιορίσουν το σημείο μέγιστης λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος. Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του MPPT [5, 12] και πραγματεύονται κυρίως τα εξής ζητήματα:

- ακρίβεια προσδιορισμού του MPPT
- επιτυχής εύρεση του MPPT σε περίπτωση μερικής σκίασης, όταν πραγματοποιείται τοπικό μέγιστο
- γρήγορη προσαρμογή του MPPT σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες, όταν π.χ. «περνάει» ένα σύννεφο

Συντελεστές απωλειών:

Οι απώλειες που λαμβάνονται υπόψη [39], με τους αντίστοιχους συντελεστές, στο μοντέλο ενεργειακής απόδοσης παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Απώλειες πριν τον αντιστροφέα:

Παράγοντας Απωλειών	Θεωρηθείσα Τιμή
Απώλειες λόγω Διακύμανσης του	
Ηλιακού Φάσματος	
Οπτικές Απώλειες	Περιλαμβάνονται στο μοντέλο
Απώλειες λόγω Χαμηλής Ακτινοβολίας	ενεργειακής απόδοσης
Απώλειες λόγω Υψηλής Θερμοκρασίας	
Απώλειες λόγω Σκίασης	1
Απώλειες λόγω Επικαθίσεων Ρύπων	0.95
Απώλειες λόγω της DC Καλωδίωσης	0.98
Απώλειες λόγω διόδων και συνδέσεων	0.995
Απώλειες λόγω διαφοροποίησης μεταξύ	0.08
των χαρακτηριστικών των πλαισίων	0.98
Συνολικός συντελεστής απωλειών πριν	0 0078
τον αντιστροφέα	0.2070

Απώλειες λόγω σκίασης:

Η σκίαση των φωτοβολταϊκών πλαισίων οφείλεται σε γειτονικά κτίρια ή άλλα παραπλήσια αντικείμενα. Επίσης στην περίπτωση φωτοβολταϊκού συστήματος η σκίαση οφείλεται στις γειτονικές σειρές πλαισίων, που σκιάζουν η μία την άλλη.

Απώλειες λόγω Επικαθίσεων Ρύπων:

Οι ρύποι που συσσωρεύονται στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να είναι σκόνη, χιόνι καθώς και οποιοδήποτε άλλο στοιχείο που εμποδίζει την ηλιακή ακτινοβολία να «φτάσει» τον ηλιακό συλλέκτη. Η επικάθιση των ρύπων εξαρτάται από την τοποθεσία και τις καιρικές συνθήκες. Οι ρύποι είναι περισσότεροι σε περιοχές με μεγάλη κυκλοφορία αυτοκινήτων, ρύπανση και λίγες βροχοπτώσεις. Στην περίπτωση του χιονού οι επιπτώσεις στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο εξαρτώνται από τη χρονική διάρκεια επικάθισης αυτού.

Απώλειες λόγω της DC Καλωδίωσης:

Οι απώλειες αυτές αφορούν τις αντιστάσεις που παρουσιάζονται μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων και του αντιστροφέα λόγω των καλωδιώσεων.

Απώλειες λόγω διόδων και συνδέσεων:

Η πτώση τάσης που παρατηρείται στις διόδους, όταν εμποδίζουν τη ροή ρεύματος με αντίστροφη φορά και οι αντιστάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ συνδέσεων περιγράφονται με το συγκεκριμένο συντελεστή απωλειών.

Απώλειες λόγω διαφοροποίησης μεταξύ των χαρακτηριστικών των πλαισίων:

Οι απώλειες διαφοροποίησης οφείλονται στο γεγονός ότι τα πλαίσια που αποτελούν τη συστοιχία στην πραγματικότητα δεν είναι μεταξύ τους πανομοιότυπα. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζονται αποκλίσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών τάσης ρεύματος (I-V) των πλαισίων. Στην ουσία τα πλαίσια έχουν μεταξύ τους, έστω και ελάχιστα, διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Στην πράξη αυτό το φαινόμενο επηρεάζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ολόκληρης της συστοιχίας με συνέπεια να παρουσιάζεται απώλεια ισχύος στο MPPT.

Παράγοντας Απωλειών	Θεωρηθείσα Τιμή		
Απώλειες Λόγω της ΑC Καλωδίωσης	0.99		
Απώλειες λόγω απόδοσης του	1		
αντιστροφέα	I		
Απώλειες λόγω εύρους τάσης του			
αντιστροφέα	Περιλαμβάνονται στο μοντέλο ενεργειακής απόδοσης		
Απώλειες λόγω μέγιστης ισχύος εισόδου			
του αντιστροφέα			
Απώλειες λόγω διαθεσιμότητας	0.08		
συστήματος	0.98		
Συνολικός συντελεστής απωλειών μετά	0.0702		
τον αντιστροφέα	0.9702		

Απώλειες μετά τον αντιστροφέα:

Απώλειες Λόγω της ΑC Καλωδίωσης:

Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει υπόψη τις αντιστάσεις που παρουσιάζονται μεταξύ του αντιστροφέα και του σημείου σύνδεσης το δίκτυο.

Απώλειες λόγω απόδοσης του αντιστροφέα:

Ο συντελεστής αυτός αφορά το συντελεστή απόδοσης του αντιστροφέα.

Απώλειες λόγω διαθεσιμότητας συστήματος:

Ο συντελεστής αυτός περιλαμβάνει τις απώλειες που υπάρχουν όταν το σύστημα αποσυνδέεται για λόγους συντήρησης.

Απώλειες λόγω μέγιστης ισχύος εισόδου του αντιστροφέα και λόγω εύρους τάσης του αντιστροφέα:

Οι απώλειες αυτές έχουν ενσωματωθεί στο μοντέλο ενεργειακής απόδοσης. Όταν η παραγόμενη DC ισχύς είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη ισχύ εισόδου του αντιστροφέα (Wp) τότε τίθεται ίση με τη μέγιστη αυτή ισχύ. Αντίστοιχα, όταν η τάση στην έξοδο του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι εκτός του εύρους του αντιστροφέα τότε η ισχύς μηδενίζεται.

Οι συνολικές απώλειες προκύπτουν από το γινόμενο των συντελεστών απωλειών πριν και μετά τον αντιστροφέα. Συνεπώς ο συνολικός συντελεστής απωλειών (DR) για τις παραπάνω θεωρούμενες τιμές είναι:

DR = 0.8808

Performance Ratio:

To Performance Ratio (PR) επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών συστημάτων [14, 25]. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται από την σχέση 4.43:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \tag{4.43}$$

Όπου:

 Y_f : είναι η τελική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα (E) διαιρεμένη με την ονομαστική ισχύ του συστήματος (P₀). Η μονάδα μέτρησης του Y_f είναι ώρες. Με τον δείκτη αυτό κανονικοποιείται η παραγόμενη ενέργεια ως προς την εγκατεστημένη ισχύ και ως εκ τούτου είναι δυνατή η σύγκριση συστημάτων διαφορετικών μεγεθών.

 Y_r : είναι η συνολική λαμβανόμενη ηλιακή ενέργεια διαιρεμένη με την ακτινοβολία αναφοράς (1000W/m²). Η μονάδα μέτρησης του Y_r είναι ώρες. Ο δείκτης αυτός εκφράζει τη διαθέσιμη στο σύστημα ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια εξαρτάται από τη θέση εγκατάστασης και τον προσανατολισμό, και διαφοροποιείται σημαντικά από μήνα σε μήνα και από έτος σε έτος.

Το Performance Ratio ποσοτικοποιεί τη συνολική επίδραση των απωλειών στην τελική ενέργεια που λαμβάνεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Οι απώλειες αυτές περιλαμβάνουν χαμηλή απόδοση μετατροπέα, καλωδιώσεις, διαφοροποιήσεις πλαισίων, θερμοκρασία λειτουργίας, απώλειες λόγω ανάκλασης στην επιφάνεια των συλλεκτών, ρύπανση κ.α. 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 συντελεστή αυτού παρουσιάζονται αυξημένες κατά τη διάρκεια του χειμώνα σε σχέση με το καλοκαίρι.

5. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε το θεωρητικό υπόβαθρο του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε λογισμικό σε Matlab που επιλύει αριθμητικά το μοντέλο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το γραφικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης του λογισμικού με το χρήστη. Το γραφικό περιβάλλον απαρτίζεται από τρία παράθυρα εισόδου στοιχείων και ένα εξόδου.

5.1. Πρώτη ομάδα στοιχείων εισόδου

Το πρώτο παράθυρο προορίζεται για εισαγωγή στοιχείων που αφορούν την ηλιακή ακτινοβολία:

Solar Radiation Electrical Characteristics Program	
Latitude (in decade form)	Insert weather data
Longitude (in decade form)	Add File Delete File Read Data
Slope of solar collector (in degrees)	
PV module azimuth angle (in degrees)	
Local time zone	Ground reflectance factor Mounting position of PV 0.24 open-rack
(in hours)	

Σχήμα 5.1: Γραφική διεπαφή για την εισαγωγή δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας

Σε αυτό το παράθυρο ζητείται η εισαγωγή των παρακάτω στοιχείων:

Γεωγραφικό πλάτος (Latitude):

Το γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης εκφράζει τη γωνία που σχηματίζει ο τόπος με τον ισημερινό και είναι:

$$-90^{\circ} \le \varphi \le 90^{\circ}$$

Οι θετικές τιμές της γωνίας φ αφορούν το βόρειο ημισφαίριο, ενώ οι αρνητικές τιμές το νότιο ημισφαίριο. Η γωνία πρέπει να γραφεί σε δεκαδική μορφή.

Γεωγραφικό μήκος (Longitude):

Το γεωγραφικό μήκος του τόπου εγκατάστασης εκφράζει τη γωνία που σχηματίζει ο τόπος με τον πρώτο μεσημβρινό (αστεροσκοπείο του Greenwich) και είναι:

$$-180^o \le L_{loc} \le 180^o$$

Οι θετικές τιμές της γωνίας L_{loc} αφορούν το δυτικό ημισφαίριο, ενώ οι αρνητικές τιμές το ανατολικό ημισφαίριο. Η γωνία πρέπει να γραφεί σε δεκαδική μορφή.

Γωνία κλίσης του ηλιακού συλλέκτη (Slope of solar collector):

Η κλίση του συλλέκτη (β) είναι η δίεδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα και μπορεί να πάρει τιμές από 0° μέχρι 180°. Για γωνίες β>90° το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω

Αζιμούθια γωνία επιφάνειας του συλλέκτη (PV module azimuth angle):

Η αζιμούθια γωνία επιφάνειας του συλλέκτη (γ) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από -180° μέχρι +180°. Η γωνία -180° (που συμπίπτει με την +180°) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς το βορρά, η γωνία -90° προς την ανατολή, η γωνία 0° προς το νότο και η γωνία +90° προς τη δύση.

Τοπική ωρολογιακή ζώνη σε σχέση με GMT σε ώρες (Local time zone relative to GMT in hours):

Για την Ελλάδα +2hours

Συντελεστής ανάκλασης του εδάφους (ground reflectance factor):

Ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται στο έδαφος. Ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους, ορίζεται και ο συντελεστής ανάκλασης αυτού. Η τιμή 0.24 αναφέρεται σε επιφάνεια παλιού τσιμέντου.

Είδος τοποθέτησης του φωτοβολταϊκού πλαισίου (mounting position of PV):

Ανάλογα με τη θέση του πλαισίου, δηλαδή εάν είναι τοποθετημένο με ελεύθερη την οπίσθια επιφάνεια ή εάν είναι τοποθετημένο σε κτίριο, επιλέγεται η αντίστοιχη καταχώρηση.

Για την εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων:

Τα μετεωρολογικά δεδομένα εισάγονται σε μορφή excel αναζητώντας το αρχείο με τη βοήθεια του γραφικού περιβάλλοντος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2:

Insert weather data				
Add File	Delete File	Read Data!		
		<u>^</u>		
		~		

Σχήμα 5.2: Γραφική διεπαφή εισαγωγής μετεωρολογικών δεδομένων

Το αντίστοιχο φύλλο excel πρέπει να περιέχει, με την εξής σειρά και μονάδες μέτρησης, τα παρακάτω δεδομένα:

- > Ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (σε kW/m²)
- > Θερμοκρασία περιβάλλοντος (σε °C)
- > Ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10 m από το έδαφος (σε m/s)
- > Ατμοσφαιρική πίεση (σε mmHg)

5.2. Δεύτερη ομάδα στοιχείων εισόδου

Στο δεύτερο παράθυρο γίνεται η εισαγωγή στοιχείων που αφορούν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος (Σχήμα 5.3):

Solar Radiation Ele	ctrical Characteristics	Program		
PV module	components	Inverter	Derating factors	
Iscref	Vocref	Inverter's maximum power point tracker (MPPT)	Mismatch 0.97	
Impref	Vmpref	Voltage range (V) Min	Diodes and connections 0.995 DC wiring 0.98	
alsc	bVoc	Inverter's upper limit for	Soiling 0.95	
Ns		DC input power (kW)	Shading 1 Total pre-inverter derate factor 0.9078	
Ms	Мр		AC wiring 0.99	
Nrow	Narray		Inverter 1 System availability 0.98	
Materia	al of PV		Total post-inverter derate factor 0.9702	
2-a-Si	~		TOTAL DERATE FACTOR 0.8807	

Σχήμα 5.3: Γραφική διεπαφή για την εισαγωγή δεδομένων σχετικών με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος

Χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου (PV module components):

Ρεύμα βραχυκυκλώσεως: Isc,ref σε Α

Τάση ανοιχτοκυκλώσεως: V_{oc,ref} σε V

Ρεύμα μέγιστης ισχύος: Ι_{mp,ref} σε Α

Τάση μέγιστης ισχύος: $V_{mp,ref}$ σε V

Θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση ανοιχτοκυκλώσεως: b_{Voc} σε $V/^{o}C$ ή V/K

Θερμοκρασιακός συντελεστής για το ρεύμα βραχυκυκλώσεως: α_{Isc} σε V/°C ή V/K

Αριθμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά: Ns

Αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά: Ms

Αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων παράλληλα: Μ_P

Αριθμός των σειρών των φωτοβολταϊκών συστοιχιών: Ν_{row}

Αριθμός των φωτοβολταϊκών συστοιχιών ανά σειρά: N_{array}

Τεχνολογία κατασκευής του φωτοβολταϊκού πλαισίου:

Επιλογή από τις παρακάτω κατηγορίες: 2-Junction άμορφο πυρίτιο (2-a-Si) 3-Junction άμορφο πυρίτιο (3-a-Si) Thin film τελουριούχο κάδμιο (CdTe) Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CIS) Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) Πολυκρυσταλλικά με πλήρως τετραγωνισμένες κυψέλες (EFG) Υβριδικά φωτοβολταϊκά (HIT) Πολυκρυσταλλικά (mc-Si) Πυριτίου τεχνολογίας thin film (Si-Film)

Χαρακτηριστικά του αντιστροφέα:

Για να ληφθούν υπόψη οι απώλειες λόγω μέγιστης ισχύος εισόδου του αντιστροφέα και λόγω εύρους τάσης του αντιστροφέα, τα παρακάτω στοιχεία είναι απαραίτητα.

Εύρος τάσεων του ΜΡΡΤ παραθύρου:

Ελάχιστη DC τάση σε V (Voltage range Min) Μέγιστη DC τάση σε V (Voltage range Max)

Ανώτατο όριο DC ισχύος εισόδου (Inverter's upper limit for DC input power): Η τιμή εισάγεται σε kW.

Συντελεστές απωλειών (Derating factors):

Οι απώλειες αυτές έχουν περιγραφεί στο τέλος του προηγούμενου κεφαλαίου. Η αντιστοιχία των ελληνικών με τους αγγλικούς όρους είναι η ακόλουθη:

Aπ ωλειες πριν τον αντιστροφέα (pre-inverter derating factor):

- Απώλειες λόγω διαφοροποίησης μεταξύ των χαρακτηριστικών των πλαισίων (Mismatch)
- Απώλειες λόγω διόδων και συνδέσεων (Diodes and connections)
- Απώλειες λόγω της DC καλωδίωσης (DC wiring)

- Απώλειες λόγω επικαθίσεων ρύπων (Soiling)
- Απώλειες λόγω σκίασης (Shading)

Απώλειες μετά τον αντιστροφέα (post-inverter derating factor):

- Απώλειες λόγω της AC καλωδίωσης (AC wiring)
- Απώλειες λόγω απόδοσης του αντιστροφέα (Inverter)
- Απώλειες λόγω διαθεσιμότητας συστήματος (System availability)

5.3. Τρίτη ομάδα στοιχείων εισόδου

Στο τρίτο και τελευταίο παράθυρο (Σχήμα 5.4) δίνονται παράμετροι που αφορούν την χρονική περίοδο υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης. Επίσης, επιλέγονται τα επιθυμητά γραφήματα.

Solar Radiatio	on Electrical Characteristics	Program
RUN	THE PROGRAM:	PRESENTED GRAPHS
Froi	n: 1st January 💙 il: 31st January 💌	 I-V curve at STC conditions Average radiation on tilted surface Energy DC production of module per month Energy DC production of one array per month Energy DC production of PV system per month Energy AC production of PV system per month with all losses in consideration
	Run	

Σχήμα 5.4: Γραφική διεπαφή για την επιλογή λοιπών παραμέτρων του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης

Τα δυνατά γραφήματα είναι:

- I-V καμπύλη για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας.
- Μέση ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήνα
- Ενεργειακή DC παραγωγή από ένα μόνο φωτοβολταϊκό πλαίσιο
- Ενεργειακή DC παραγωγή από μία φωτοβολταϊκή συστοιχία
- Ενεργειακή DC παραγωγή από το φωτοβολταϊκό σύστημα
- Ενεργειακή AC παραγωγή από το φωτοβολταϊκό σύστημα λαμβάνοντας υπόψη όλες τις προαναφερθείσες απώλειες

5.4. Ομάδα στοιχείων εξόδου

Ως έξοδο ο χρήστης λαμβάνει αφενός τα γραφήματα που έχει δηλώσει και αφετέρου το παρακάτω παράθυρο καθώς και όλες τις πληροφορίες που υπάρχουν ως μεταβλητές στο περιβάλλον του Matlab μετά την ολοκλήρωση εκτέλεσης του προγράμματος.

Energy production for specified period of time of one module:	KWh
Energy DC production for specified period of time of one array:	KWh
Energy DC production for specified period of time of PV system:	KWh
Energy AC production for specified period of time of PV system with all losses taken into consideration:	KWh
Energy losses due to MPPT tracking:	%
Performance Ratio:	

Σχήμα 5.5: Γραφική διεπαφή αποτελεσμάτων του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης

Οι πληροφορίες που δίνονται στο παράθυρο είναι οι εξής:

- Ενεργειακή DC παραγωγή από ένα μόνο φωτοβολταϊκό πλαίσιο για το επιλεγμένο χρονικό διάστημα
- Ενεργειακή DC παραγωγή από μία φωτοβολταϊκή συστοιχία για το επιλεγμένο χρονικό διάστημα
- Ενεργειακή DC παραγωγή από το φωτοβολταϊκό σύστημα για το επιλεγμένο χρονικό διάστημα
- Ενεργειακή AC παραγωγή από το φωτοβολταϊκό σύστημα λαμβάνοντας υπόψη όλες τις προαναφερθείσες απώλειες για το επιλεγμένο χρονικό διάστημα
- Ενεργειακές απώλειες που οφείλονται στις απώλειες MPPT του αντιστροφέα
- Performance Ratio (PR)

6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Σε παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η αξιολόγηση του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης, που περιγράφηκε αναλυτικά στο τέταρτο κεφάλαιο. Το κεφάλαιο διαρθρώνεται σε δύο μέρη.

Στο πρώτο μέρος ελέγχονται τα αποτελέσματα του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με τα αποτελέσματα του μοντέλου των Sandia National Laboratories. Το μοντέλο των Sandia National Laboratories θεωρείται ακριβές, αφού τα αποτελέσματα αυτού βασίζονται σε μετρήσεις. Επίσης παρουσιάζονται για σύγκριση τα αποτελέσματα του μοντέλου πέντε παραμέτρων, που παρουσιάστηκε στο τρίτο κεφάλαιο, με τα αποτελέσματα του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης. Οι συγκρίσεις αφορούν φωτοβολταϊκά πλαίσια που εμπεριέχονται στη βάση δεδομένων των Sandia National Laboratories. Τέλος, παρατίθενται συνολικά σχόλια.

Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου γίνονται συγκρίσεις που καταδεικνύουν τη σχετική σημασία της ομαδοποίησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων που θεωρήθηκε για το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης μαζί με αντίστοιχα σχόλια.

Σημειώνεται ότι στο κεφάλαιο αυτό ο όρος energy model αντιστοιχεί στο μοντέλο ενεργειακής απόδοσης του τετάρτου κεφαλαίου.

6.1. Συγκριτικά αποτελέσματα μοντέλου ενεργειακής απόδοσης

6.1.1. Πλαίσιο συγκρίσεων

Για την αξιολόγηση του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης θα θεωρηθεί ως μοντέλο αναφοράς το μοντέλο των Sandia National Laboratories. Για λόγους πληρότητας, η σύγκριση περιλαμβάνει και τα αποτελέσματα του μοντέλου πέντε παραμέτρων, το οποίο περιγράφεται στο τρίτο κεφάλαιο. Η σύγκριση γίνεται για εννέα διαφορετικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, για τα οποία υπάρχει η σχετική πληροφορία στη βάση δεδομένων των Sandia National Laboratories, και τα οποία ανήκουν σε κάθε μία από τις εννέα ομάδες, που ορίστηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης μπορεί να προβλέψει την παραγόμενη AC ενέργεια ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Οι συγκρίσεις που ακολουθούν ωστόσο, περιορίζονται στην πρόβλεψη της DC ενέργειας, πριν δηλαδή από τον αντιστροφέα. Πιο συγκεκριμένα, η σύγκριση θα γίνει σε επίπεδο πλαισίου, δηλαδή θα συγκριθεί η παραγόμενη DC ενέργεια που προκύπτει από ένα μόνο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ειδικότερα οι συγκρίσεις θα αφορούν:

Την καμπύλη I-V στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας (Standard Test Conditions STC):

Το μοντέλο των Sandia National Laboratories [18] απεικονίζει την καμπύλη I-V με τη βοήθεια πέντε σημείων. Τα τρία σημεία της καμπύλης I-V ενός πλαισίου είναι το ρεύμα βραχυκυκλώσεως, η τάση ανοιχτοκυκλώσεως και το σημείο μέγιστης ισχύος. Το τέταρτο σημείο (I_x) υπολογίζεται για τάση ίση με το μισό της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (V_{oc}), και το πέμπτο (I_{xx}) για τάση ίση με το ημιάθροισμα της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (V_{oc}) και της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος (V_{mp}).

Όσον αφορά το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης και το μοντέλο πέντε παραμέτρων είναι γνωστή η αναλυτική σχέση του ρεύματος και της τάσης συνεπώς προκύπτει εύκολα η αντίστοιχη γραφική παράσταση I-V.

Τη μηνιαία παραγόμενη DC ενέργεια.

Στα αντίστοιχα διαγράμματα θα παρουσιάζεται η συνολικά παραγόμενη ενέργεια για κάθε μήνα του έτους.

Τη συνολικά παραγόμενη DC ενέργεια σε διάστημα ενός χρόνου.

Στους υπολογισμούς που ακολουθούν για το κάθε μοντέλο δεν λαμβάνονται υπόψη οι υπάρχουσες απώλειες, όπως για παράδειγμα οι απώλειες λόγω επικαθίσεων ρύπων. Το σφάλμα στις παραγόμενες DC ενέργειες υπολογίζεται ως εξής:

$$error = \frac{\varepsilon v \varepsilon \rho \gamma \varepsilon \iota \alpha_{Sandia} - \varepsilon v \varepsilon \rho \gamma \varepsilon \iota \alpha_{\mu o \nu \tau \varepsilon \lambda o \nu}}{\varepsilon v \varepsilon \rho \gamma \varepsilon \iota \alpha_{Sandia}} \cdot 100\%$$

Επιπλέον, δεν λαμβάνεται η απόλυτη τιμή του σφάλματος, προκειμένου να καθίσταται εμφανές εάν πρόκειται για υποτίμηση ή υπερεκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας.

Για τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών εφαρμόζονται στα μοντέλα οι ίδιες χρονοσειρές με μετεωρολογικά δεδομένα από τον ίδιο γεωγραφικό τόπο.

Οι χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων περιλαμβάνουν:

- Ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (σε kW/m²)
- > Θερμοκρασία περιβάλλοντος (σε °C)
- > Ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10 m από το έδαφος (σε m/s)
- Ατμοσφαιρική πίεση (σε mmHg)

Η αναγωγή της μετρούμενης ακτινοβολίας από το οριζόντιο επίπεδο στο επίπεδο των φωτοβολταϊκών συλλεκτών έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω:

- τη βέλτιστη κλίση τοποθέτησης του πλαισίου
- κλίση 30°
- τον προσανατολισμό του πλαισίου
 - νότιος προσανατολισμός (μηδενική γωνία αζιμούθιου)

- το συντελεστή ανάκλασης του εδάφους
 - λαμβάνεται ίσος με 0.08 (που αντιστοιχεί σε είδος επιφάνειας αγρού με σκοτεινόχρωμο χρώμα)

6.1.2. Αριθμητικά αποτελέσματα

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συγκρίσεις για κάθε μία από τις εννέα ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων. Για κάθε ομάδα έχει επιλεγεί ενδεικτικά ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο από τη βάση δεδομένων των Sandia National Laboratories. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται συνοπτικά τα στοιχεία των εννέα πλαισίων που εξετάστηκαν καθώς και η ομάδα που αυτά ανήκουν.

Πίνακας 6: Στοιχεία από το datasheet των φωτοβολταϊκών πλαισίων, που θα χρησιμοποιηθούν στις συγκρίσεις

Όνομα πλαισίου	Ομάδα	P _{mp,ref} (W)	I _{sc,ref} (A)	V _{oc,ref} (V)	I _{mp,ref} (A)	V _{mp,ref} (V)	β _{Voc} (V/ ^o C)	$\alpha_{\rm Isc}$ (V/°C)	Ns
8-BP-P275	c-Si	563.91	18.3	43.15	16.61	33.95	-0.17	0.00033	72
Sharp ND- 208U1F	mc-Si	208.15	7.99	36.3	7.25	28.71	-0.135	0.00058	60
ASE-100- ATF/17(100)	EFG	99.76	6.4	21.1	5.8	17.2	-0.076	0.00078	36
Shell Solar ST10	CIS	9.98	0.74	21	0.64	15.6	-0.0906	0.000013	42
Astropower APX-65	Si- Film	65.20	4.7	20.5	4	16.3	-0.107	0.00082	39
BP Solar BP980	CdTe	80.10	3	45.2	2.48	32.3	-0.152	0.00035	57
Sanyo HIP- 2717	HIT	27.87	1.82	21.6	1.63	17.1	-0.0629	0.000368	32
Solarex MST-43LV	2-a-Si	40.67	3.272	21.73	2.556	15.91	-0.105	0.00067	16
Uni-Solar US-32	3-a-Si	32.17	2.616	21.52	2.122	15.16	-0.0975	0.00082	11

Όπου:

- Pmp,ref: Ισχύς στο σημείο μέγιστης ισχύος
- Isc, ref: Ρεύμα βραχυκυκλώσεως
- Voc, ref: Τάση ανοιχτοκυκλώσεως
- I_{mp,ref}: Ρεύμα μέγιστης ισχύος
- V_{mp,ref}: Τάση μέγιστης ισχύος
- β_{Voc}: Θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση ανοιχτοκυκλώσεως
- α_{Isc}: Θερμοκρασιακός συντελεστής για το ρεύμα βραχυκυκλώσεως
- Ns: Αριθμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά

Τα τρία μοντέλα (μοντέλο των Sandia National Laboratories, μοντέλο ενεργειακής απόδοσης και πέντε παραμέτρων) υπολογίζουν την ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο με διαφορετικούς τρόπους:

- Το μοντέλο των Sandia National Laboratories χρησιμοποιεί το HDKR μοντέλο, όπως αυτό έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο δύο.
- Το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης χρησιμοποιεί το μοντέλο των Perez et al., το οποίο παρουσιάζεται στο κεφάλαιο δύο.
- Το μοντέλο πέντε παραμέτρων επιλέγει το ισοτροπικό μοντέλο, το οποίο παρατίθεται στο κεφάλαιο τρία.

Πριν την παρουσίαση των συγκρίσεων για κάθε ομάδα, δίνεται στο Σχήμα 6.1 η μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο ανά μήνα για τα τρία διαφορετικά μοντέλα υπολογισμού της (HDKR, Perez et al και Isotropic):



Σχήμα 6.1: Μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Παρατηρούνται κάποιες αποκλίσεις ανάμενα στα τρία αποτελέσματα. Σύμφωνα με το [8] το μοντέλο των Perez et al. είναι πιο ακριβές, αν και πιο πολύπλοκο από τα υπόλοιπα.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα για κάθε ομάδα ανά σελίδα:



Πίνακας παρουσίασης των υπολογιζόμενων ενεργειών και σφαλμάτων

Μοντέλο	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
Sandia National Laboratories	915.99	-
Energy model	920.40	-0.48
5-parameter model	1062.70	-16.01





Πίνακας παρουσίασης των υπολογιζόμενων ενεργειών και σφαλμάτων

Μοντέλο	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
Sandia National Laboratories	343.14	-
Energy model	341.51	0.48
5-parameter model	358.51	-4.48

Σχήμα 6.3: Συγκριτικά αποτελέσματα για το πλαίσιο Sharp ND-208U1F



TT/	,	A 97	,	^ /
Πινακας πα	1001)AIAANC T	(INV 1) π OAOVI(OHEV(UN ENEUNEIUUN KUI	σωαλματων
III WARAS NO	poooraongr		or crepterer har	υψωνματων

Μοντέλο	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
Sandia National Laboratories	161.81	-
Energy model	161.96	-0.09
5-parameter model	156.22	3.45

Σχήμα 6.4: Συγκριτικά αποτελέσματα για το πλαίσιο ASE-100-ATF/17(100)



Μοντέλο	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
Sandia National Laboratories	15.426	-
Energy model	15.450	-0.16
5-parameter model	21.490	-39.32

Σχήμα 6.5: Συγκριτικά αποτελέσματα για το πλαίσιο Shell Solar ST10



Μοντέλο	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
Sandia National Laboratories	101.19	-
Energy model	100.77	0.42
5-parameter model	100.68	0.50

Σχήμα 6.6: Συγκριτικά αποτελέσματα για το πλαίσιο Astropower APX-65



Πίνακας παρουσίασης των υπολογιζόμενων ενεργειών και σφαλμάτων

Μοντέλο	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
Sandia National Laboratories	128.64	-
Energy model	129.86	-0.09
5-parameter model	153.50	-19.32

Σχήμα 6.7: Συγκριτικά αποτελέσματα για το πλαίσιο BP Solar BP980



Μοντέλο	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
Sandia National Laboratories	46.747	-
Energy model	47.592	-2.02
5-parameter model	50.662	-8.37





Μοντέλο	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
Sandia National Laboratories	65.628	-
Energy model	64.728	1.37
5-parameter model	68.047	-3.69

Σχήμα 6.9: Συγκριτικά αποτελέσματα για το πλαίσιο Solarex MST-43LV



Μοντέλο	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
Sandia National Laboratories	58.634	-
Energy model	57.563	1.83
5-parameter model	53.389	8.94

Σχήμα 6.10: Συγκριτικά αποτελέσματα για το πλαίσιο Uni-Solar US-32

6.1.3. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όσον αφορά την πρώτη ομάδα συγκρίσεων παρατηρείται ότι το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης, που περιγράφηκε στο τέταρτο κεφάλαιο, αν και αναλυτικό μοντέλο, δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα του μοντέλου των Sandia National Laboratories. Κατά συνέπεια το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης κρίνεται αρκετά αξιόπιστο ενώ ταυτόγρονα έγει το πλεονέκτημα ότι καλύπτει το σύνολο των φωτοβολταϊκών πλαισίων, με μοναδική προϋπόθεση την ένταξη αυτών σε κάποια από τις εννέα διαθέσιμες ομάδες. Το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης δίνει συστηματικά καλύτερα αποτελέσματα από το μοντέλο πέντε παραμέτρων (έχοντας ως αναφορά τα αποτελέσματα του μοντέλου των Sandia National Laboratories), που περιγράφηκε στο τρίτο κεφάλαιο. Ο υπολογιστικός χρόνος επίλυσης του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης είναι πολύ μικρός, παρά την πολυπλοκότητα των σχέσεων που περιλαμβάνει, και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα ως σχεδιαστικό εργαλείο φωτοβολταϊκών συστημάτων. Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η σύνθεση στοιχείων τόσο από το μοντέλο πέντε παραμέτρων όσο και από το μοντέλο των Sandia National Laboratories, δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ειδικότερα, η ομαδοποίηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε εννέα ομάδες και η χρήση μιας καινούργιας εξίσωσης στον υπολογισμό των πέντε παραμέτρων σε συνθήκες αναφοράς συνέβαλαν στα πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης.

6.2. Αξιολόγηση της σχετικής σημασίας της ομαδοποίησης

6.2.1. Πλαίσιο συγκρίσεων

Μια δεύτερη σειρά συγκρίσεων αναφορικά με τη σημασία της ομαδοποίησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων που έγινε στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η κατηγοριοποίηση έγινε σύμφωνα με τα φυσικά χαρακτηριστικά των πλαισίων, την τεχνολογία κατασκευής αυτών και τη μαθηματική ανάλυση των χρησιμοποιούμενων συντελεστών από τη βάση δεδομένων των Sandia National Laboratories.

Ο έλεγχος που θα πραγματοποιηθεί έγκειται στη μελέτη της επίδρασης διαφορετικών ομαδοποιήσεων στο μοντέλο ενεργειακής απόδοσης. Πιο συγκεκριμένα, θα θεωρηθούν επιπρόσθετα οι εξής ομαδοποιήσεις:

Όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια:

- κατατάσσονται σε μία ομάδα (1 category)
- κατατάσσονται σε τέσσερις ομάδες (4 categories)



Τα παραπάνω απεικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα:

Σχήμα 6.11: Γραφική απεικόνιση των τριών ομαδοποιήσεων

Στη πρώτη προσέγγιση (1 category) για κάθε συντελεστή υπολογίζεται ο μέσος όρος από τους αντίστοιχους μέσους όρους των εννέα ομάδων, από τα στοιχεία της βάσης δεδομένων των Sandia National Laboratories.

Στη δεύτερη προσέγγιση τα πλαίσια ομαδοποιούνται σε τέσσερις ομάδες (4 categories), σύμφωνα με τη φύση αυτών, όπως δείχνεται και στο Σχήμα 6.11, και με αντίστοιχη λογική όπως προηγούμενα υπολογίζονται οι τιμές των συντελεστών.

Οι ομάδες είναι:

- 1. Ομάδα c-Si: Φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου (c-Si)
- 2. Ομάδα mc-Si: Φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si)
- 3. Ομάδα Thin film: Φωτοβολταϊκά πλαίσια thin film (CdTe, EFG, CIS, HIT, Si-Film)
- 4. Ομάδα Multi-junction a-Si: Φωτοβολταϊκά πλαίσια multi-junction άμορφου πυριτίου (2-a-Si, 3-a-Si)

Για τη σύγκριση των δύο εναλλακτικών ομαδοποιήσεων χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα από τις εννέα ομάδες, η οποία θεωρείται ως τρίτη προσέγγιση.

Με τον τρόπο αυτό θα ελεγχθεί η ευαισθησία του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης σχετικά με τις επιλεγόμενες ομαδοποιήσεις. Ως αναφορά, θεωρούνται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ομαδοποίηση σε εννέα κατηγορίες. Για να είναι πιο ευανάγνωστα τα διαγράμματα που ακολουθούν, δεν συμπεριλήφθηκαν τα αποτελέσματα του μοντέλου των Sandia National Laboratories, αφού αυτά πρακτικά συμπίπτουν με τα αποτελέσματα του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης με εννέα ομάδες (9 categories). Επίσης, σημειώνεται ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που επιλέχθηκαν για το δεύτερο μέρος συγκρίσεων είναι τα ίδια με αυτά του πρώτου μέρους, ώστε να μπορεί άμεσα να γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά του μοντέλου των Sandia National Laboratories.

Σε αυτό το μέρος συγκρίσεων δίνονται τα παρακάτω:

• Η καμπύλη I-V στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας (Standard Test Conditions STC):

Στο μοντέλο ενεργειακής απόδοσης είναι γνωστή η αναλυτική σχέση του ρεύματος και της τάσης οπότε μπορούμε εύκολα να βρούμε τη γραφική παράσταση αυτών, για τις περιπτώσεις της μίας, των τεσσάρων και των εννέα ομάδων.

• Η μέση θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου ανά μήνα

Η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου, όπως έχει αναφερθεί στο τέταρτο κεφάλαιο, υπολογίζεται με τη βοήθεια του θερμοκρασιακού μοντέλου που αναπτύχθηκε από τα Sandia National Laboratories [18].

• Η μηνιαία παραγόμενη DC ενέργεια.

Στα αντίστοιχα διαγράμματα θα παρουσιάζεται η συνολικά παραγόμενη ενέργεια για κάθε μήνα του έτους.

• Η συνολικά παραγόμενη DC ενέργεια σε διάστημα ενός χρόνου.

Στους υπολογισμούς που ακολουθούν για κάθε μία προσέγγιση δεν λαμβάνονται υπόψη οι υπάρχουσες απώλειες, όπως λόγω επικαθίσεων ρύπων. Το σφάλμα στις παραγόμενες DC ενέργειες υπολογίζεται ως εξής:

$$error = \frac{\varepsilon v \acute{\varepsilon} \rho \gamma \varepsilon \iota \alpha_{9 \ categories} - \varepsilon v \acute{\varepsilon} \rho \gamma \varepsilon \iota \alpha_{1 \ \acute{\eta} \ 4 \ categories}}{\varepsilon v \acute{\varepsilon} \rho \gamma \varepsilon \iota \alpha_{9 \ categories}} \cdot 100\%$$

Επιπλέον, δεν λαμβάνεται η απόλυτη τιμή του σφάλματος, προκειμένου να καθίσταται εμφανές εάν πρόκειται για υποτίμηση ή υπερεκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας.

Επιλέχθηκαν τα παραπάνω στοιχεία για παρουσίαση των αποτελεσμάτων, γιατί σε αυτά υπεισέρχονται οι εμπειρικές σχέσεις των Sandia National Laboratories.

6.2.2. Αριθμητικά αποτελέσματα

Στη συνέχεια δίνεται ο Πίνακας 7 που παρουσιάζει σε ποια κατηγορία, ανάλογα με την επιλεγμένη προσέγγιση, ανήκει το κάθε εξεταζόμενο πλαίσιο. Στην περίπτωση που οι ομάδες της δεύτερης (4 categories) και της τρίτης (9 categories) προσέγγισης συμπίπτουν παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα της 1 category και των 9 categories, αφού αυτά των 4 categories και 9 categories είναι ίδια.

Πίνακας 7: Παρουσίαση ομαδοποιήσεων ανά φωτοβολταϊκό πλαίσιο για τις τρεις
προσεγγίσεις

Ονομα πλαισίου	1 category	4 categories	9 categories
8-BP-P275	Global	c-Si	c-Si
Sharp ND-208U1F	Global	mc-Si	mc-Si
ASE-100-ATF/17(100)	Global	Thin film	EFG
Shell Solar ST10	Global	Thin film	CIS
Astropower APX-65	Global	Thin film	Si-Film
BP Solar BP980	Global	Thin film	CdTe
Sanyo HIP-2717	Global	Thin film	HIT
Solarex MST-43LV	Global	Multi-junction a-Si	2-a-Si
Uni-Solar US-32	Global	Multi-junction a-Si	3-a-Si



Ομαδοποίηση	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
1 category	907.18	1.44
9 categories	920.40	-

Σχήμα 6.12: Παρουσίαση αποτελεσμάτων για 3 διαφορετικές ομαδοποιήσεις για το 8-BP-P275



Ομαδοποίηση	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
1 category	338.02	1.02
9 categories	341.51	_

Σχήμα 6.13: Παρουσίαση αποτελεσμάτων για 3 διαφορετικές ομαδοποιήσεις για το Sharp ND-208U1F



Ομαδοποίηση	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σ φάλμα (%)
1 category	151.09	6.71
4 categories	168.21	-3.85
9 categories	161.96	-

Σχήμα 6.14: Παρουσίαση αποτελεσμάτων για 3 διαφορετικές ομαδοποιήσεις για το ASE-100-ATF/17(100)


Πίνακας παρουσίασης των υπολογιζόμενων ενεργειών και σφαλμάτων

Ομαδοποίηση	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
1 category	16.034	-3.78
4 categories	15.086	2.36
9 categories	15.450	-

Σχήμα 6.15: Παρουσίαση αποτελεσμάτων για 3 διαφορετικές ομαδοποιήσεις για το Shell Solar ST10



Πίνακας παρουσίασης των υπολογιζόμενων ενεργειών και σφαλμάτων

Ομαδοποίηση	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
1 category	115.21	-14.34
4 categories	98.110	2.64
9 categories	100.77	-

Σχήμα 6.16: Παρουσίαση αποτελεσμάτων για 3 διαφορετικές ομαδοποιήσεις για το Astropower APX-65



Πίνακας παρουσίασης των υπολογιζόμενων ενεργειών και σφαλμάτων

Ομαδοποίηση	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
1 category	145.26	-11.86
4 categories	134.63	-3.67
9 categories	129.86	-

Σχήμα 6.17: Παρουσίαση αποτελεσμάτων για 3 διαφορετικές ομαδοποιήσεις για το BP Solar BP980



Πίνακας παρουσίασης των υπολογιζόμενων ενεργειών και σφαλμάτων

Ομαδοποίηση	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
1 category	46.162	3.21
4 categories	48.835	-2.40
9 categories	47.692	-

Σχήμα 6.18: Παρουσίαση αποτελεσμάτων για 3 διαφορετικές ομαδοποιήσεις για το Sanyo HIP-2717



Πίνακας παρουσίασης των υπολογιζόμενων ενεργειών και σφαλμάτων

Ομαδοποίηση	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
1 category	66.779	-3.17
4 categories	63.281	2.24
9 categories	64.728	-

Σχήμα 6.19: Παρουσίαση αποτελεσμάτων για 3 διαφορετικές ομαδοποιήσεις για το Solarex MST-43LV



Πίνακας παρουσίασης των υπολογιζόμενων ενεργειών και σφαλμάτων

Ομαδοποίηση	Παραγόμενη DC ενέργεια (KWh)	Σφάλμα (%)
1 category	5.1437	10.64
4 categories	5.8777	-2.11
9 categories	5.7563	-

Σχήμα 6.20: Παρουσίαση αποτελεσμάτων για 3 διαφορετικές ομαδοποιήσεις για το Uni-Solar US-32

6.2.3. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το δεύτερο μέρος συγκρίσεων είχε ως στόχο την αξιολόγηση της επίδρασης του τρόπου ομαδοποίησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων στα αποτελέσματα του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης. Αποδεικνύεται ότι τα αποτελέσματα είναι αρκετά ικανοποιητικά ακόμη και στην περίπτωση της μίας μόνο ομάδας. Επίσης, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των διαφορετικών ομάδων καταλήγουμε εν γένει ακριβέστερα αποτελέσματα, αφού διαπιστώθηκε ότι η περίπτωση των τεσσάρων ομάδων εμφάνισε καλύτερα αποτελέσματα από τα αντίστοιχα αποτελέσματα της μίας ομάδας. Ανεξάρτητα δηλαδή από τον αριθμό των επιλεγμένων ομάδων, εφόσον η διασπορά των τιμών των χρησιμοποιούμενων συντελεστών παραμένει μικρή, τα προκύπτοντα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Η υιθέτηση εννέα ομάδων, όπως αναφέρθηκε στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζει αρκετά ακριβή αποτελέσματα και αφού δεν αυξάνει την πολυπλοκότητα, είναι η βέλτιστη επιλογή σύμφωνα με τα δεδομένα, όπως αυτά περιγράφονται στην τρέχουσα έκδοση της βάσης δεδομένων των Sandia National Laboratories.

7. ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ ΖΩΓΡΑΦΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό ακολουθεί η μελέτη της απόδοσης του εγκατεστημένου φωτοβολταϊκού σταθμού στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Αρχικά, παρουσιάζεται η περιγραφή του φωτοβολταϊκού σταθμού, που απαρτίζεται από δύο συστοιχίες A1, A2. Στη συνέχεια, μελετώνται χωριστά οι συστοιχίες A1, A2 και στο τέλος παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα για το φωτοβολταϊκό σταθμό.

7.1. Περιγραφή φωτοβολταϊκού σταθμού

Χρησιμοποιήθηκαν φωτοβολταϊκά πλαίσια της εταιρίας ΥΙΝGLΙ διαφορετικών τιμών ισχύος εξόδου. Συγκεκριμένα έχουν εγκατασταθεί πλαίσια των 165W, 170W και 210W, τα οποία περιγράφονται στον Πίνακα 8.

NUMBER	ТҮРЕ	CELL SIZE (mm)	WEIGHT (kg)	MAXIMUM POWER (W)	V _{mp,ref} (V)	I _{mp,ref} (A)
YL165	165(23)P1310*990	156*156*0.21	15.4	165	23	7.2
YL170	175(35)P1310*990	156*156*0.21	15.4	170	23	7.4
YL210	210(29)P1650*1030	156*156*0.21	18.7	210	29.5	7.2

Πίνακας 8: Περιγραφή χρησιμοποιούμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων

Το σύστημα αποτελείται από πενήντα (50) φωτοβολταϊκά πλαίσια των 165W, έξι (6) των 170W και επτά (7) των 210W, τα οποία διαμορφώνουν δύο φωτοβολταϊκές συστοιχίες, Α1 και Α2, όπως φαίνεται στον Πίνακα 9:

TT /	•	п /	,	,
Πινακας	9:	1120170000	συστοιγιων	συστηματος
	- •		0000.000.	000000

Όνομα	Φωτοβολταϊκά πλαίσια				
συστοιχίας	165W	170W	210W		
A1	24	-	-		
A2	26	6	7		

Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες που εγκαθίστανται και συνδέονται στο δίκτυο παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.1 και 7.2.



Σχήμα 7.1: Διαγραμματική αναπαράσταση συστοιχίας Α1



Σχήμα 7.2: Διαγραμματική αναπαράσταση συστοιχίας Α2

Η συστοιχία A1 αποτελείται από 24 πλαίσια των 165Wp (3.96kWp συνολικά), συνδεδεμένα σε δύο παράλληλες ομάδες των 12 πλαισίων η κάθε μία. Η DC έξοδος είναι 276V και 14,4A (οι τιμές αναφέρονται στην μέγιστη ισχύ εξόδου της συστοιχίας). Η συστοιχία A1 συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός αντιστροφέα Wurth Solar Star a6000.

Η συστοιχία A2 χωρίζεται σε τρεις μικρότερες συστοιχίες, A2-1 A2-2 και A2-3, οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο με δύο διαφορετικούς αντιστροφείς. Η ομαδοποίηση τους σε μία συστοιχία έγκειται στην εγκατάστασή τους στην ίδια δομή στήριξης. Η A2-1 αποτελείται από 26 πλαίσια των 165W, τα οποία διαμορφώνουν δύο σειρές 13 πλαισίων συνδεδεμένων παράλληλα. Η συνολική ισχύς είναι 4.290kWp, με DC έξοδο τάσης και ρεύματος 299V και 14.4A. Η A2-2 αποτελείται από 6 πλαίσια των 170W, με συνολική ισχύ 1.020kWp και DC έξοδο 138V και 7.4A. Τα 7 φωτοβολταϊκά πλαίσια των 210W συνδέονται σε σειρά σχηματίζοντας τη συστοιχία A2-3. Η συνολική ισχύς είναι 1.47kWp με DC έξοδο 206.5V και 7.2A. Για την A2-1 χρησιμοποιείται ένας αντιστροφέας Wurth Solar Star a6000, ενώ για τις συστοιχίες A2-2 και A2-3 χρησιμοποιείται ο αντιστροφέας Power One PVI-3.6-OUTD-W-US. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της συστοιχίας A2 είναι 6780W.

Για τον αντιστροφέα Wurth Solar Star a6000, ισχύει ότι η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς που μπορεί να επιτευχθεί είναι 6600W (με μέγιστο ρεύμα 22A DC και μέγιστη τάση 600V DC). Οι διαστάσεις του αντιστροφέα είναι 554 x 260 x 190 (mm) και το βάρος του 16.3kg. Ο αντιστροφέας Power One PVI-3.6-OUTD-W-US έχει μέγιστη DC ισχύ ίση με 4150W (με μέγιστο ρεύμα 32A DC και μέγιστη τάση 600V DC) διαστάσεις 547x352x208 (mm) και το βάρος του είναι 17kg.

Η ακόλουθη φωτογραφία (Σχήμα 7.3) παρουσιάζει την ακριβή τοποθεσία εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών.



Σχήμα 7.3: Φωτογραφία συστοιχιών Α1 και Α2

Οι συστοιχίες Α1 και Α2 τοποθετήθηκαν σε δύο χώρους στάθμευσης του κτηρίου της Σχολής ΗΜΜΥ, δημιουργώντας δύο σκίαστρα.

Για την πρόβλεψη της απόδοσης του φωτοβολταϊκού σταθμού είναι απαραίτητα:

Η γεωγραφική θέση του φωτοβολταϊκού σταθμού είναι στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου από όπου και προέρχονται οι χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων για το έτος 2004.

Οι χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων περιλαμβάνουν:

- > Ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (σε kW/m²)
- > Θερμοκρασία περιβάλλοντος (σε °C)
- > Ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10 m από το έδαφος (σε m/s)
- Ατμοσφαιρική πίεση (σε mmHg)

Η αναγωγή της μετρούμενης ακτινοβολίας από το οριζόντιο επίπεδο στο επίπεδο των φωτοβολταϊκών συλλεκτών έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω:

- τη γεωγραφική θέση της συστοιχίας:
 - > γεωγραφικό πλάτος 37.97 (σε δεκαδική μορφή) Βόρεια
 - γεωγραφικό μήκος 23.78 (σε δεκαδική μορφή) Ανατολικά
- την τοπική ωρολογιακή ζώνη σε σχέση με το GMT (για την Ελλάδα +2ώρες)
- τη βέλτιστη κλίση τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων
 - κλίση 30°
- τον προσανατολισμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων
 - νότιος προσανατολισμός (μηδενική γωνία αζιμούθιου)
- το συντελεστή ανάκλασης του εδάφους
 - λαμβάνεται ίσος με 0.20

Ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους εξαρτάται από τη μορφολογία της τοποθεσίας που είναι εγκατεστημένος ο φωτοβολταϊκός σταθμός. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το περιβάλλον στο οποίο εγκαθίσταται ο φωτοβολταϊκός σταθμός αποτελείται από άσφαλτο, χώμα και ανοιχτά χρωματισμένο τσιμέντο. Σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα [37] και λαμβάνοντας υπόψη όσα προαναφέρθηκαν, ο συντελεστής ανάκλασης τίθεται ίσος με 0.2.

Τύπος 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 παλιού τσιμέντου	0.24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου ή χρωματισμένη με ανοιχτό χρώμα	0.30
Χιόνι	0.60

Πίνακας 10: Συντελεστές ανάκλασης ανά τύπο επιφάνειας

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο των φωτοβολταϊκών πλαισίων όλων των συστοιχιών, υπολογίστηκε σύμφωνα με το μοντέλο των Perez et al. και η μέση τιμή της ανά μήνα παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.4:



Σχήμα 7.4: Μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία

Στη συνέχεια γίνεται η μελέτη της ενεργειακής απόδοσης κάθε μίας φωτοβολταϊκής συστοιχίας χωριστά. Οι υπολογισμοί γίνονται για τη περίοδο ενός έτους (2004). Σε κάθε συστοιχία παρουσιάζονται:

- Η I-V καμπύλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας
- Η παραγόμενη DC ενέργεια από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε διάρκεια ενός έτους
- Η παραγόμενη DC ενέργεια από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία σε διάρκεια ενός έτους
- Η παραγόμενη AC ενέργεια από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία λαμβάνοντας υπόψη όλες τις απώλειες, που περιγράφονται στο κεφάλαιο πέντε
- Διάφοροι δείκτες που περιγράφουν την ενεργειακή απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας

7.2. Μελέτη της συστοιχίας Α1

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία Α1 έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Φ/B συστοιχία: $M_p=2$ παράλληλες ακολουθίες

 $M_s=12$ πλαίσια σε σειρά ανά ακολουθία

Για τη σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται αντιστροφέας της εταιρίας Wurth Solergy τύπου SolarStar a6000 με στοιχεία που δίνονται στον Πίνακα 11 όπως δίνονται στο φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή (datasheet). Ο αντιστροφέας αυτός εξυπηρετεί λοιπόν συνολικά 24 φωτοβολταϊκά πλαίσια, ολικής εγκατεστημένης ισχύος 24×165=3.96kWp.

	Παράθι	Παράθυρο λειτουργίας ΜΡΡΤ				
Όνομα αντιστροφέα	Ανώτατο όριο DC ισχύος εισόδου (kWp)	Ελάχιστη DC τάση εισόδου (V)	Μέγιστη DC τάση εισόδου (V)	Απόδοση του αντιστροφέα		
Wurth Solergy SolarStar a6000	6.6	90	560	0.97		

	Πίνακας 11: Στοι	γεία αντιστροα	oéα Wurth S	Solergy	SolarStar	a6000
--	------------------	----------------	-------------	---------	-----------	-------

Στην συστοιχία A1 χρησιμοποιούνται 24 πλαίσια YL165, τα χαρακτηριστικά των οποίων σύμφωνα με το φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή (datasheet) δίνονται στον Πίνακα 12:

Πίνακας 12: Στοιχεία datasheet για το YL165

Όνομα πλαισίου	Ομάδα	P _{mp,ref} (W)	I _{sc,ref} (A)	V _{oc,ref} (V)	I _{mp,ref} (A)	V _{mp,ref} (V)	β _{Voc} (V/K)	α _{Isc} (V/K)	Ns
YL165	mc-Si	165	7.9	29	7.2	23	-0.1073	0.00474	48

Οι απώλειες που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία παρουσιάζονται στον Πίνακα 13, όπως δίνονται στο [39].

Πίνακας 13: Παράγοντες απωλειών

Είδος απωλειών	Mismatch	Diodes and connections	DC wiring	Soiling	Shading	AC wiring	Inverter's efficiency	System availability	Total derate factor
	0.98	0.995	0.98	0.95	1	0.99	0.97	0.98	0.85433



Σχήμα 7.5: Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη συστοιχία Α1

7.3. Μελέτη της συστοιχίας Α2

Η συστοιχία A2, όπως έχει ήδη αναφερθεί, απαρτίζεται από τρεις επιμέρους συστοιχίες. Στη συνέχεια, γίνονται οι υπολογισμοί χωριστά για κάθε μία από τις τρεις επιμέρους συστοιχίες.

• Συστοιχία Α2-1:

Χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά πλαίσια YL165, με χαρακτηριστικά κατασκευαστή όπως αυτά έχουν ήδη αναφερθεί παραπάνω στον Πίνακα 12.

Φ/B συστοιχία: $M_p=2$ παράλληλες ακολουθίες $M_s=13$ πλαίσια σε σειρά ανά ακολουθία

Για τη σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται αντιστροφέας της εταιρίας Wurth Solergy τύπου SolarStar a6000, του οποίου τα χαρακτηριστικά έχουν αναφερθεί για τη συστοιχία A1 στον Πίνακα 11. Ο αντιστροφέας αυτός εξυπηρετεί λοιπόν συνολικά 26 πλαίσια, ολικής εγκατεστημένης ισχύος 26×165=4.29 kWp.

Τα σχήματα της I-V καμπύλης στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας καθώς και αυτό της παραγόμενης DC ενέργειας από το YL165 έχουν ήδη παρουσιαστεί για τη συστοιχία A1 και για το λόγο αυτό δεν παρατίθενται.



Energy production for specified period of time of one module:	261.8803	KWh
Energy DC production for specified period of time of one array:	6808.8872	KWh
Energy DC production for specified period of time of PV system:	6808.8872	KWh
Energy AC production for specified period of time of PV system with all losses taken into consideration:	6123.2323	KWh
Energy losses due to MPPT tracking:	0	%
Performance Ratio:	0.76127	

Σχήμα 7.6: Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη συστοιχία Α2-1

• Συστοιχία Α2-2

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία Α2-2 έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Φ/Β συστοιχία: M_p=1 παράλληλες ακολουθίες M_s=6 πλαίσια σε σειρά ανά ακολουθία

Για τη σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται αντιστροφέας της εταιρίας Power One PVI-3.6-OUTD-W-US, με στοιχεία που δίνονται στον Πίνακα 14, όπως δίνονται στο φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή (datasheet). Οι συστοιχίες A2-2, A2-3 συνδέονται σε δύο εισόδους του αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας αυτός εξυπηρετεί λοιπόν συνολικά 13 πλαίσια, τις συστοιχίες A2-2, A2-3, ολικής εγκατεστημένης ισχύος 6×170+7×210=2.49 kWp

Πίνακας 14: Στοιχεία αντιστροφέα Power One PVI-3.6-OUTD-W-US

	IPPT			
Όνομα αντιστροφέα	Ανώτατο όριο DC ισχύος εισόδου (kWp)	Ελάχιστη DC τάση εισόδου (V)	Μέγιστη DC τάση εισόδου (V)	Απόδοση του αντιστροφέα
Power One PVI- 3.6-OUTD-W-US	4.15	50	580	0.968

Στη συστοιχία A2-2 χρησιμοποιούνται 6 πλαίσια YL170, τα χαρακτηριστικά των οποίων σύμφωνα με το φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή (datasheet) δίνονται στον Πίνακα 15:

Πίνακας 15: Στοιχεία datasheet για το YL170

Όνομα πλαισίου	Ομάδα	P _{mp,ref} (W)	I _{sc,ref} (A)	V _{oc,ref} (V)	I _{mp,ref} (A)	V _{mp,ref} (V)	β _{Voc} (V/K)	α _{Isc} (V/K)	Ns
YL170	mc-Si	170	8.1	29	7.4	23	-0.1073	0.00486	48

Οι απώλειες που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία παρουσιάζονται στον Πίνακα 16, όπως δίνονται στο [39].

Πίνακας 16: Παράγοντες απωλειών

Είδος απωλειών	Mismatch	Diodes and connections	DC wiring	Soiling	Shading	AC wiring	Inverter's efficiency	System availability	Total derate factor
	0.98	0.995	0.98	0.95	1	0.99	0.968	0.98	0.8526



Σχήμα 7.7: Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη συστοιχία Α2-2

• Συστοιχία Α2-3

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία Α2-3 έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Φ/Β συστοιχία: Mp=1 παράλληλες ακολουθίες Ms=7 πλαίσια σε σειρά ανά ακολουθία

Για τη σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται ο ίδιος αντιστροφέας με τη συστοιχία A2-2, δηλαδή της εταιρίας Power One PVI-3.6-OUTD-W-US, τα στοιχεία του οποίου έχουν δοθεί προηγουμένως.

Στην συστοιχία A2-3 χρησιμοποιούνται 7 πλαίσια YL210, τα χαρακτηριστικά των οποίων σύμφωνα με το φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή (datasheet) δίνονται στον Πίνακα 17:

Πίνακας	17:	Στοιχεία	datasheet	για το	YL210
---------	-----	----------	-----------	--------	-------

Όνομα πλαισίου	Ομάδα	P _{mp,ref} (W)	I _{sc,ref} (A)	V _{oc,ref} (V)	I _{mp,ref} (A)	V _{mp,ref} (V)	β _{Voc} (V/ºC)	$\alpha_{\rm Isc}$ (V/°C)	Ns
YL210	mc-Si	210	7.8	36	7.2	29.5	-0.1332	0.0078	60

Οι απώλειες που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία παρουσιάζονται στον Πίνακα 18, όπως δίνονται στο [39].

Πίνακας 18: Παράγοντες απωλειών

Είδος απωλειών	Mismatch	Diodes and connections	DC wiring	Soiling	Shading	AC wiring	Inverter's efficiency	System availability	Total derate factor
	0.98	0.995	0.98	0.95	1	0.99	0.968	0.98	0.8526



7.4. Συνολικά αποτελέσματα για το φωτοβολταϊκό σταθμό

Σύμφωνα με τη μελέτη των συστοιχιών Α1, Α2 προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Συστοιχία		Συνολι παραγόμεν	κή DC η ενέργεια	Συνολική ΑC παραγόμενη ενέργεια (KWh)		
		(KV	Vh)			
А	.1	6285.	1267	5652.2144		
A2-1		6808.8872		6123.2323		
A2-2	A2	1612.9095	10787.82	1447.5863	9694.324	
A2-3		2366.0221		2123.5049		
Σύν	ολο	1707	2.95	15346.54		

Πίνακας 19: Συνολικά αποτελέσματα φωτοβολταϊκού πάρκου

Τα παραπάνω μεγέθη απεικονίζονται σε μορφή ιστογράμματος ανά μήνα στο Σχήμα 7.9:



Σχήμα 7.9: Παρουσίαση αποτελεσμάτων για το φωτοβολταϊκό σταθμό

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία ασχολήθηκε με την ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης και αξιολόγησης της ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων, αναλυτικού χαρακτήρα. Ειδικότερα, στόχος της ήταν η ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης, το οποίο να δέχεται ως εισόδους στοιχεία που δίνονται στο φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή (datasheet), μετεωρολογικά δεδομένα και την τοποθεσία και διάταξη του φωτοβολταϊκού συστήματος. Το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης κατασκευάστηκε από τη σύνθεση των μοντέλων των πέντε παραμέτρων και των Sandia National Laboratories.

Το αναπτυχθέν μοντέλο βασίστηκε στην ομαδοποίηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων της βάσης δεδομένων των Sandia National Laboratories σε εννέα ομάδες, ώστε η κάθε ομάδα να χαρακτηρίζεται από τιμές συντελεστών αντιπροσωπευτικές ως προς τα μέλη της. Σύμφωνα με αυτό, έγινε χρήση των εμπειρικών σχέσεων ανά ομάδα φωτοβολταϊκών πλαισίων, με σημαντική ακρίβεια. Με αυτόν τον τρόπο, διατηρήθηκε η ακρίβεια υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, ακόμη και εάν αυτό δεν βρίσκεται στη βάση δεδομένων των Sandia National Laboratories.

Οι συγκρίσεις, που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο έξι, καταδεικνύουν ότι το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης, που περιγράφηκε στο κεφάλαιο τέσσερα, αν και αναλυτικό μοντέλο, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα του μοντέλου των Sandia National Laboratories. Κατά συνέπεια το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης κρίνεται αρκετά αξιόπιστο ενώ ταυτόχρονα έχει το πλεονέκτημα ότι καλύπτει το σύνολο των φωτοβολταϊκών πλαισίων, με μοναδική προϋπόθεση την ένταξη αυτών σε κάποια από τις εννέα διαθέσιμες ομάδες. Το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης δίνει συστηματικά καλύτερα αποτελέσματα από το μοντέλο πέντε παραμέτρων (έχοντας ως βάση αναφοράς τα αποτελέσματα του μοντέλου των Sandia National Laboratories), που περιγράφηκε στο τρίτο κεφάλαιο. Ο υπολογιστικός χρόνος επίλυσης του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης είναι πολύ μικρός, παρά την πολυπλοκότητα των σχέσεων που περιλαμβάνει, και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα ως σχεδιαστικό εργαλείο φωτοβολταϊκών συστημάτων. Για το παρόν μοντέλο ενεργειακής απόδοσης αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab σχετικό λογισμικό, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο υπολογισμού απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων. Συμπερασματικά, η σύνθεση στοιχείων τόσο από το μοντέλο πέντε παραμέτρων όσο και από το μοντέλο των Sandia National Laboratories, δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τέλος, το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης είναι ανθεκτικό και δίνει ορθά αποτελέσματα ακόμη και με διαφορετικά κριτήρια ομαδοποίησης.

Ένα επόμενο βήμα στην αξιολόγηση του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης θα ήταν η επαλήθευση των αποτελεσμάτων του μοντέλου για ένα μεγάλο αριθμό φωτοβολταϊκών συστημάτων με τη βοήθεια μετρήσεων σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Επίσης, σημειώνεται ότι όσο ανανεώνεται και επεκτείνεται η βάση δεδομένων των Sandia National Laboratories, θα πρέπει να τροποποιείται κατάλληλα το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης, ώστε να εξακολουθεί να παρουσιάζει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] F.J. Batlles, M.A. Rubio, J. Tovar, F.J. Olmo, L. Alados-Arboledas: Empirical modeling of hourly direct irradiance by means of hourly global irradiance, 2000 Elsevier Science Ltd
- [2] J.W.H. Betcke, E.A. Alsema: Evaluation of the performance of PV system designs in The Netherlands in 1997-2000, University of Utrecht
- [3] Christopher P. Cameron, William E. Boyson, Daniel M. Riley, Sandia National Laboratories: Comparison of PV system performance-model predictions with measured PV system performance, 33rd IEEE PVSC, San Diego, CA 2008
- [4] Thomas Carlsson: Experimental Setup for Full Scale Field Tests of CdTe and CIS Thin–film PV Modules, M.S. Thesis, Department of Engineering Physics and Mathematics, Helsinki University of Technology
- [5] Anna J. Carr: A Detailed Performance Comparison of PV Modules of Different Technologies and The Implications for PV System Design Methods, July 2005
- [6] Widalys De Soto: Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance, M.S. Thesis, Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, 2004
- [7] W. De Soto, S.A. Klein and W.A. Beckman: Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance, 2006
- [8] John A. Duffie and William A. Beckman: Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd edition, Wiley, New York, NY, 1991
- [9] K. Emery, J. Burdick, Y. Caiyem, D. Dunlavy, H. Field, B. Kroposki, T. Moriarty, L. Ottoson, S. Rummel, T. Strand, and M.W. Wanlass National Renewable Energy Laboratory: Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems
- [10] DG Erbs, SA Klein and JA. Duffie: Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. Solar Energy 1982;28:293–302
- [11] A. Hunter Fanney, Brian P. Dougherty and Mark W. Davis: Evaluating Building Integrated Photovoltaic Performance Models, 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) May 20-24th, 2002
- [12] K.H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino and M. Osakada: Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions, IEEE 1995
- [13] Bryan Fry: Simulation of Grid-Tied Building Integrated Photovoltaic Systems, M.S. Thesis, Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, 1998
- [14] A. Goetzberger and V.U. Hoffmann: Photovoltaic Solar Energy Generation, Springer
- [15] B.T. Griffith and P.G. Ellis: Photovoltaic and Solar Thermal Modeling with the EnergyPlus Calculation Engine, July 2004 NREL
- [16] David L. King, Jay A. Kratochvil, and William E. Boyson, Sandia National Laboratories: Stabilization and Performance characteristics of commercial amorphous-silicon PV modules

- [17] D. L. King, B. R. Hansen, J. A.: Dark Current-Voltage Measurements on Photovoltaic Modules as a Diagnostic or Manufacturing Tool, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 29-October 3, 1997
- [18] D. L. King, W. E. Boyson, J. A. Kratochvil, Sandia National Laboratories: Photovoltaic Array Performance Model
- [19] David L. King, Jay A. Kratochvil and William E. Boyson: Measuring Solar Spectral and Angle-of-Incidence Effects on Photovoltaic Modules and Solar Irradiance Sensors, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 29-October 3, 1997
- [20] D.L. King, J.A. Kratochvil and W.E. Boyson: Temperature coefficients for PV modules and arrays: measurement methods, difficulties and results, IEEE 1997
- [21] D.L. King and P.E. Eckert: Characterizing (rating) the performance of large photovoltaic arrays for all operating conditions, IEEE 1996
- [22] A. Luque and S. Hegedus: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Wiley, England, 2002
- [23] Olivia Mah: Fundamentals of Photovoltaic Materials, 1998
- [24] J. F. Manwell, A. Rogers, G. Hayman, C. T. Avelar, J. G. McGowan, U. Abdulwahid and K. Wu: Hybrid2- a Hybrid System Simulation Model Theory Manual, Department of Mechanical Engineering, University of Massachusetts
- [25] Marion B., Adelstein J. and Boyle K.: Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems, 31st IEEE Photovoltaics Specialists, Florida, 2005
- [26] Tom Markvart and Luis Castafier: Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, Elsevier
- [27] Roger A. Messenger and Jerry Ventre: Photovoltaic Systems Engineering, 2nd edition, 2004 by CRC Press LLC
- [28] Eduardo I. Ortiz-Rivera and F.Z. Peng: Analytical Model for a Photovoltaic Module using the Electrical Characteristics provided by the Manufacturer Data Sheet, 2005 IEEE
- [29] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky and R. Stewart: Modeling Daylight availability and Irradiance components from direct and global Irradiance
- [30] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals and A. Zelenka: Making full use of the Clearness Index for parameterizing hourly insolation conditions.
- [31] R. Perez, R. Seals, A. Zelenka and P. Ineichen: Climatic evaluation of models that predict hourly direct irradiance from hourly global irradiance: prospects for performance improvements
- [32] Dezso Sera, Remus Teodorescu and Pedro Rodriguez: PV panel model based on datasheet values, 2007 IEEE
- [33] E. Skoplaki, J.A. Palyvos: Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations, 2008 Elsevier Ltd
- [34] G.M. Tina and S. Scrofani: Electrical and thermal model for PV module temperature evaluation, IEEE 2008
- [35] C.M. Whitaker, H.J. Wenger, A. Iliceto, G. Chimento, F. Paletta: Effects of irradiance and other factors on PV temperature coefficients, 1991 IEEE
- [36] Weidong Xiao, William G. Dunford, Antoine Capel: A Novel Modeling Method for Photovoltaic Cells, 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference
- [37] Καγκαράκη Κ: Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, Εκδόσεις Συμμετρία

- [38] Γ. Κοκολάκης και Ι. Σπηλιώτης: Εισαγωγή στη Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική, Εκδόσεις Συμεών, 1999
- [39] http://www.nrel.gov/rredc/pvwatts/changing_parameters.html
- [40] http://www.earthscan.co.uk/
- [41] http://www.physicalgeography.net
- [42] http://solardat.uoregon.edu/SolarRadiationBasics.html
- [43] <u>http://www.sandia.gov/pv</u>

10. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Μοντέλο ενεργειακής απόδοσης των Sandia National Laboratories:

Τα Sandia National Laboratories έχουν αναπτύξει ένα μοντέλο πρόβλεψης της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, συστοιχίας και κατ' επέκταση συστήματος [18]. Ο οργανισμός αυτός έχει διεξάγει λεπτομερείς μετρήσεις για μία ευρεία ποικιλία φωτοβολταϊκών πλαισίων. Σύμφωνα με αυτές τις μετρήσεις έχει σχηματίσει μια βάση δεδομένων που περιέχει ένα μεγάλο αριθμό συντελεστών ανά φωτοβολταϊκό πλαίσιο και στην οποία στηρίζεται το εν λόγω μοντέλο. Οι παρακάτω εξισώσεις περιγράφουν την ηλεκτρική απόδοση σε επίπεδο φωτοβολταϊκού πλαισίου, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με κατάλληλη αναγωγή για οποιαδήποτε φωτοβολταϊκή συστοιχία.

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \cdot f_1(AM) \cdot \left\{ \left(I_{b,T} \cdot f_2(\theta) + f_d \cdot I_{d,T} \right) / I_{T,ref} \right\} \cdot \left\{ 1 + \alpha_{Isc} \cdot \left(T_C - T_{C,ref} \right) \right\}$$

$$I_{mp} = I_{mp,ref} \cdot \left\{ C_0 \cdot E_e + C_1 \cdot E_e^2 \right\} \cdot \left\{ 1 + \alpha_{Imp} \cdot \left(T_C - T_{C,ref} \right) \right\}$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + N_s \cdot \delta(T_C) \cdot \ln(E_e) + \beta_{Voc}(E_e) \cdot \left(T_C - T_{C,ref} \right)$$

$$V_{mp} = V_{mp,ref} + N_s \cdot \delta(T_C) \cdot \ln(E_e) + C_3 \cdot N_s \cdot \left\{ \delta(T_C) \cdot \ln(E_e) \right\}^2 + \beta_{Vmp}(E_e) \cdot \left(T_C - T_{C,ref} \right)$$

$$P_{mp} = I_{mp} \cdot V_{mp}$$

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

$$I_x = I_{x,ref} \cdot \{C_4 \cdot E_e + C_5 \cdot E_e^2\} \cdot \{1 + \alpha_{Isc} \cdot (T_c - T_{c,ref})\}$$

$$I_{xx} = I_{xx,ref} \cdot \{C_6 \cdot E_e + C_7 \cdot E_e^2\} \cdot \{1 + \alpha_{Imp} \cdot (T_c - T_{c,ref})\}$$

Όπου:

$$E_e = I_{sc} / [I_{sc,ref} \cdot \{1 + \alpha_{Isc} \cdot (T_c - T_{c,ref})\}]$$
$$\delta(T_c) = n \cdot k \cdot (T_c + 273.15)/q$$

Βασικοί Ορισμοί Παραμέτρων Πλαισίου

$$\begin{split} I_{sc} &= \text{Peύμα βραχυκύκλωσης (A)} \\ I_{mp} &= \text{Peύμα σημείου μέγιστης ισχύος (A)} \\ I_{x} &= \text{Peύμα σε τάση V=} 0.5 \cdot V_{oc} (A) \end{split}$$

 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)

 $FF = \Sigma untelestής Πλήρωσης (αδιάστατο)$

Ns= Αριθμός φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά σε μια ακολουθία

N_p= Αριθμός ακολουθιών συνδεδεμένων παράλληλα σε ένα πλαίσιο

k = Σταθερά του Boltzmann

q = Στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

 T_{C} = Θερμοκρασία στοιχείων στο εσωτερικό του πλαισίου (°C). Προσδιορίζεται από μετρήσεις θερμοκρασίας στην πίσω όψη του πλαισίου, ή από θερμοκρασιακό μοντέλο χρησιμοποιώντας δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και μετεωρολογικά δεδομένα.

T_{C,ref}= Θερμοκρασία αναφοράς (τυπικά 25°C)

I_{T,ref}= Ακτινοβολία αναφοράς (τυπικά 1000W/m²)

 $\delta(T_C)$ = "Θερμική τάση" ανά στοιχείο σε θερμοκρασία T_C

 E_e = Η «ενεργός» ηλιακή ακτινοβολία. Η μεταβλητή αυτή περιγράφει το κλάσμα της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου και στο οποίο ουσιαστικά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποκρίνονται

 C_0 , $C_1 = E_{\mu\pi}$ ειρικά προσδιορισμένοι συντελεστές που συσχετίζουν το ρεύμα I_{mp} με την ενεργό ακτινοβολία E_e . $C_0 + C_1 = 1$ (αδιάστατοι)

 C_2 , $C_3 = E$ μπειρικά προσδιορισμένοι συντελεστές που συσχετίζουν την τάση V_{mp} με την ενεργό ακτινοβολία.(ο C_2 είναι αδιάστατος και ο C_3 έχει μονάδες 1/V)

 C_4 , $C_5 = E$ μπειρικά προσδιορισμένοι συντελεστές που συσχετίζουν το ρεύμα I_x με την ενεργό ακτινοβολία E_e . $C_4 + C_5 = 1$ (αδιάστατοι)

 C_6 , $C_7 = E$ μπειρικά προσδιορισμένοι συντελεστές που συσχετίζουν το ρεύμα I_{xx} με την ενεργό ακτινοβολία, E_e . $C_6 + C_7 = 1$ (αδιάστατοι)

n = Εμπειρικά προσδιορισμένος «συντελεστής ποιότητας διόδου» που σχετίζεται με τα μεμονωμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία ενός πλαισίου, με τυπική τιμή κοντά στη μονάδα (αδιάστατος).

 $I_{b,T}$ = Ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου, $(W\!/\,m^2)$

 $I_{d,T}$ = Διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου, (W/ $m^2)$

 $I_{T,ref}$ = Ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς, τυπικά 1000W/m²

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

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 στην ατμόσφαιρα.

θ= Γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας του ήλιου (σε μοίρες)

 $f_1(AM)$ = Εμπειρικά προσδιορισμένη πολυωνυμική συνάρτηση που σχετίζει την επίδραση του ηλιακού φάσματος στο ρεύμα I_{sc} με τη μεταβολή της αέριας μάζας κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπου:

$$f_1(AM) = a_0 + a_1 \cdot AM + a_2 \cdot AM^2 + a_3 \cdot AM^3 + a_4 \cdot AM^4$$

 $f_2(\theta)$ = Εμπειρικά προσδιορισμένη πολυωνυμική συνάρτηση που σχετίζει την επίδραση των οπτικών απωλειών στο ρεύμα I_{sc} με τη γωνία πρόσπτωσης (θ), όπου:

$$f_2(\theta) = b_0 + b_1 \cdot \theta + b_2 \cdot \theta^2 + b_3 \cdot \theta^3 + b_4 \cdot \theta^4 + b_5 \cdot \theta^5$$

α_{Isc}= Θερμοκρασιακός συντελεστής για το ρεύμα *I*sc

 α_{Imp} = Κανονικοποιημένος θερμοκρασιακός συντελεστής για το ρεύμα I_{mp} , (1/°C). Κανονικοποιημένος με τον ίδιο τρόπο όπως το α_{Isc} .

 $\beta_{\text{Voc}}(E_e) = \beta_{\text{Voc,ref}} + m_{\beta \text{Voc}} \cdot (1 - E_e)$, (V/°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.

 $\beta_{Voc,ref}$ Θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση V_{oc} του πλαισίου σε επίπεδο ακτινοβολίας 1000 W/m², (V/°C).

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

 $\beta_{Vmp}(E_e) = \beta_{Vmp,ref} + m_{\beta Vmp} \cdot (1 - E_e), (V/°C).$ Θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση στο σημείο μέγιστης απόδοσης του πλαισίου ως συνάρτηση της ενεργού ακτινοβολίας, E_e.

 $\beta_{Vmp,ref}$ = Θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση V_{mp} του πλαισίου σε επίπεδο ακτινοβολίας 1000 W/m², (V/°C).

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

Θερμοκρασιακό μοντέλο:

Για την πρόβλεψη της ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού σταθμού είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, ως συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας του ανέμου. Τα Sandia National Laboratories έχουν αναπτύξει ένα εμπειρικό θερμοκρασιακό μοντέλο που περιγράφεται με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$T_m = I_T \cdot \{e^{\alpha + b \cdot WS}\} + T_a$$

Όπου:

 T_m = Θερμοκρασία οπίσθιας όψης πλαισίου (°C)

 T_{α} = Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)

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

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

α= 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

$$T_c = T_m + \frac{I_T}{I_{T,ref}} \cdot \Delta T$$

Όπου:

 $T_c = Θ$ ερμοκρασία των στοιχείων στο εσωτερικό του πλαισίου (°C)

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

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

 $I_{T,ref}$ = 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.