

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΒΙΩΣΙΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ Γ. ΣΑΒΒΑΚΗ

ΧΑΝΙΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2014

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Αναπλ. Καθηγητής ΤΣΟΥΤΣΟΣ ΘΕΟΧΑΡΗΣ *(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)* Καθηγητής ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ Επίκουρη Καθηγήτρια ΚΟΛΟΚΟΤΣΑ ΔΙΟΝΥΣΙΑ



ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΣΑΒΒΑΚΗΣ

Διπλωματούχος Μηχανικός Περιβάλλοντος,

Πολυτεχνείου Κρήτης.

© 2014 – All rights reserved

Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης, για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στην Περιβαλλοντική και Υγειονομική Μηχανική.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή Θεοχάρη Τσούτσο για τη στήριξή του σε επιστημονικό και φιλικό επίπεδο καθ' όλη τη διάρκεια των τελευταίων ετών.

Επίσης, οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον εργαστηριακό υπεύθυνο κ. Κανάκη Ιωάννη για τη βοήθεια που μου παρείχε σε διάφορα στάδια κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, ευχαριστώ τα μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής, την Επίκουρη Καθηγήτρια κ. Κολοκοτσά Διονυσία και τον Καθηγητή κ. Σταυρακάκη Γεώργιο.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, και ειδικότερα τους γονείς μου, για την υπομονή και την αμέριστη συμπαράσταση τους σε όλα τα βήματα της ζωής μου.

Νικόλαος Γ. Σαββάκης

Πίνακας περιεχομένων

ABSTRACT
Πίνακας Συντομογραφιών
Κατάλογος Πινάκων
Κατάλογος Διαγραμμάτων20
Κατάλογος Εικόνων
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ
1.1 Γενικά
1.2 Η παγκόσμια αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων
1.2.1 Η φωτοβολταϊκή ενέργεια σε διεθνές επίπεδο
1.2.2 Η φωτοβολταϊκή ενέργεια στην Ελλάδα
1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων
1.4 Αντικείμενο-Σκοπός της μελέτης
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ
2.1 Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία
2.1.1 Αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων
2.1.2 Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων
2.1.2.1 Η Τεχνολογία Λεπτών Υμενίων (Thin Film)
2.1.2.2 Άμορφο υδρογονωμένο πυρίτιο (a-Si:Η)
2.1.2.3 Το Φαινόμενο Staebler-Wronski
2.1.2.4 Φωτοβολταϊκά στοιχεία μικροκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου (a- Si/μc-Si)
2.2 Ανάλυση της απόδοσης των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων
2.3 Η έννοια της θερμοκρασίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα
2.3.1 Η επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων
2.3.2 Μοντελοποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων/πλαισίων
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ⁰ :ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
3.1 Περιγραφή της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκού συστήματος65
3.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία
3.1.2 Σκοπός του φωτοβολταϊκού συστήματος65
3.1.3 Γεωγραφική θέση του φωτοβολταϊκού συστήματος

"Αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς πρότυπης Φωτοβολταϊκής εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης"

2	0	1	4
	_		

3.2 Κατάσταση Περιβάλλοντος67
3.2.1 Κλιματολογικά στοιχεία67
3.3 Περιγραφή κύριου εξοπλισμού του φωτοβολταϊκού συστήματος
3.3.1 Γενικά στοιχεία
3.3.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια74
3.3.3 Αντιστροφέας DC/AC (Inverter)
3.3.4 Χωροθέτηση του φωτοβολταϊκού συστήματος
3.3.4.1 Προσανατολισμός και κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων
3.3.4.2 Έλεγχος πιθανής σκίασης
3.3.4.3 Βάσεις στήριξης
3.3.5 Καλωδίωση
3.3.5.1 Καλώδια DC
3.3.5.2 Καλώδια ΑC
3.3.5.3 Καλώδια βοηθητικής εγκατάστασης
3.4 Περιγραφή συστήματος επίβλεψης83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ
4.1 Εισαγωγή
4.2 Μεθοδολογία υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο
4.2.3 MataBolic artivoBolíac strác Atuágogiogo 87
4.2.4 Ορισμοι
4.2.5 Kateboovolj aktivikijs obviolaods aktivopolijas $(2, 2, 5)$
$4.2.6 \Pi$ Emopolog ing avakadong ing ing industry aktivopolitag
4.2.7.1 Υπολογισμός της πλιακής ακπνοβολίας εκτός της απμοσφαίρας
4.2.7.2 Υπολογισμος των συνιστωσων της ηλιακής ακτινοβολίας σε ορίζοντίο επίπεδο
4.2.7.3 Υπολογισμός της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο95
4.2.7.4 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες με νότιο προσανατολισμό
4.2.7.5 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες με τυχαίο προσανατολισμό
4.2.7.6 Υπολογισμός ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες με τυχαίο προσανατολισμό
4.2.7.7 Ο Αλγόριθμος αναγωγής των πειραματικών τιμών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, από το οριζόντιο στο κεκλιμένο επίπεδο

4.3 Μεθοδολογία ανάλυσης της ενεργειακής συμπεριφοράς φωτοβολταϊκών συστημάτων	04
4.3.1 Εισαγωγή	04
4.3.2 Ενεργειακή ανάλυση φωτοβολταϊκών συστημάτων1	05
4.4 Διερεύνηση της σχέσης βαθμού απόδοσης-θερμοκρασίας στα φωτοβολτα συστήματα	аїка́ 12
4.5 Θεωρητική προσέγγιση του φωτοβολταϊκού συστήματος -Λογισμικά προσομοίωσης	13
4.5.1 Περιγραφή του λογισμικού PVGIS1	14
4.5.2 Περιγραφή του λογισμικού Sunny Design (SMA) 1	15
4.5.3 Περιγραφή του λογισμικού RETScreen1	16
4.6 Αξιολόγηση εμπειρικών μοντέλων προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων1	17
4.6.1 Επιλογή Μοντέλων	17
4.6.2 Κλίμακες χαρακτηρισμού των περιβαλλοντικών συνθηκών	19
4.6.3 Μεθοδολογία αξιολόγησης1	19
4.7 Ανάπτυξη "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων1	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	23
5.1 Παράματροι παραγκολούθησης	~~
5. Γ Παραμετροι Παρακολουθήσης	23
5.2 Τοπικά κλιματολογικά δεδομένα1	23 24
5.2 Τοπικά κλιματολογικά δεδομένα	23 24 24
5.2 Τοπικά κλιματολογικά δεδομένα	23 24 24 24 28
5.2 Τοπικά κλιματολογικά δεδομένα	23 24 24 28 33
 5.1 Παραμετροί Παρακολουθήσης	 23 24 24 28 33 43
 5.1 Παραμετροί Παρακολουθησής 5.2 Τοπικά κλιματολογικά δεδομένα 1 5.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία περιβάλλοντος, Ταχύτητα ανέμου 1 5.3 Ενεργειακή ανάλυση του φωτοβολταϊκού συστήματος 1 5.4 Αποτελέσματα διερεύνησης της σχέσεως απόδοσης -θερμοκρασίας 1 5.4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας 	 23 24 24 28 33 43 47
 5.1 Παραμετροί Παρακολουθησής 5.2 Τοπικά κλιματολογικά δεδομένα 1 5.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία περιβάλλοντος, Ταχύτητα ανέμου 1 5.3 Ενεργειακή ανάλυση του φωτοβολταϊκού συστήματος 1 5.4 Αποτελέσματα διερεύνησης της σχέσεως απόδοσης -θερμοκρασίας 1 5.4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας 1 	 23 24 24 28 33 43 47 53
 5.1 Παραμετροί Παρακολουθησης 5.2 Τοπικά κλιματολογικά δεδομένα 1 5.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία περιβάλλοντος, Ταχύτητα ανέμου 1 5.3 Ενεργειακή ανάλυση του φωτοβολταϊκού συστήματος 1 5.4 Αποτελέσματα διερεύνησης της σχέσεως απόδοσης -θερμοκρασίας 1 5.4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας 1 5.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης 1 	 23 24 24 28 33 43 47 53 53
5.1 Παραμετροί Παρακολουσησης 1 5.2 Τοπικά κλιματολογικά δεδομένα 1 5.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία 1 περιβάλλοντος, Ταχύτητα ανέμου 1 5.3 Ενεργειακή ανάλυση του φωτοβολταϊκού συστήματος 1 5.4 Αποτελέσματα διερεύνησης της σχέσεως απόδοσης -θερμοκρασίας 1 5.4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της 1 5.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης 1 5.5.1 Προσομοίωση (PVGIS) 1 5.5.2 Προσομοίωση (Sunny Design) 1	 23 24 24 28 33 43 47 53 53 57
5.1 Παραμετροι Παρακολουσησης 1 5.2 Τοπικά κλιματολογικά δεδομένα 1 5.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία 1 5.3 Ενεργειακή ανάλυση του φωτοβολταϊκού συστήματος 1 5.4 Αποτελέσματα διερεύνησης της σχέσεως απόδοσης -θερμοκρασίας 1 5.4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της 1 5.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης 1 5.5.1 Προσομοίωση (PVGIS) 1 5.5.2 Προσομοίωση (RETScreen) 1 5.5.3 Προσομοίωση (RETScreen) 1	 23 24 24 28 33 43 47 53 53 57 60
5.1 Παραμειροι Παρακολουσησης 1 5.2 Τοπικά κλιματολογικά δεδομένα 1 5.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία 1 5.3 Ενεργειακή ανάλυση του φωτοβολταϊκού συστήματος 1 5.4 Αποτελέσματα διερεύνησης της σχέσεως απόδοσης -θερμοκρασίας 1 5.4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της 1 φωτοβολταϊκής συστοιχίας 1 5.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης 1 5.5.2 Προσομοίωση (PVGIS) 1 5.5.3 Προσομοίωση (RETScreen) 1 5.6 Αποτελέσματα αξιολόγησης εμπειρικών μοντέλων άμεσου προσδιορισμου 1 5.6 Αποτελέσματα αξιολόγησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων 1	 23 24 24 28 33 43 47 53 53 57 60 <i>ύ</i> 66
5.1 Παραρετροί παρακολουθησης 1 5.2 Τοπικά κλιματολογικά δεδομένα 1 5.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστήματος 1 5.3 Ενεργειακή ανάλυση του φωτοβολταϊκού συστήματος 1 5.4 Αποτελέσματα διερεύνησης της σχέσεως απόδοσης -θερμοκρασίας 1 5.4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της 1 5.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης 1 5.5.1 Προσομοίωση (PVGIS) 1 5.5.2 Προσομοίωση (RETScreen) 1 5.6 Αποτελέσματα αξιολόγησης εμπειρικών μοντέλων άμεσου προσδιορισμοι 1 5.6.1 Καλοκαίρι 1	 23 24 24 28 33 43 47 53 53 57 60 <i>ψ</i> 66 67
5.1 Παραμετροί παρακολουσησης 1 5.2 Τοπικά κλιματολογικά δεδομένα 1 5.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία 1 5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστήματος 1 5.3 Ενεργειακή ανάλυση του φωτοβολταϊκού συστήματος 1 5.4 Αποτελέσματα διερεύνησης της σχέσεως απόδοσης -θερμοκρασίας 1 5.4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της 1 5.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης 1 5.5.1 Προσομοίωση (PVGIS) 1 5.5.2 Προσομοίωση (Sunny Design) 1 5.5.3 Προσομοίωση (RETScreen) 1 5.6 Αποτελέσματα αξιολόγησης εμπειρικών μοντέλων άμεσου προσδιορισμου 1 5.6.1 Καλοκαίρι 1 5.6.2 Φθινόπωρο 1	 23 24 24 28 33 43 47 53 53 57 60 <i>ψ</i> 66 67 79

"Αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς πρότυπης Φωτοβολταϊκής 2014 εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης"

5.7 Αποτελέσματα ανάπτυξης "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της 6.3 Αξιολόγηση των λειτουργικών παραμέτρων της εξεταζόμενης 6.4 Αξιολόγηση των λογισμικών προσομοίωσης PVGIS, SMA Sunny design, 6.4 Αξιολόγηση των μεθόδων προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των 6.5 Αξιολόγηση του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας Στατιστική μέθοδος αξιολόγησης της απόδοσης μοντέλων πρόβλεψης 250 Μοντελοποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων-

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες ολόκληρη η ανθρωπότητα δοκιμάζεται από τις συνέπειες των σαρωτικών αλλαγών που παρατηρούνται στο κλιματολογικό τοπίο του πλανήτη. Ταυτόχρονα, οι ανάγκες της επιχειρηματικής ανταγωνιστικότητας, της προστασίας του περιβάλλοντος και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού, αποτελούν τους βασικούς άξονες για τη διαμόρφωση της σύγχρονης ενεργειακής πολιτικής των Ευρωπαϊκών – και όχι μόνο – χωρών. Τα γεγονότα αυτά καθιστούν επιτακτική τη χρησιμοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, διερευνήθηκε η εφαρμογή των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων, τα οποία μέσω των κατάλληλων διατάξεων αξιοποιούν την ανανεώσιμη ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ειδικότερα, αντικείμενο μελέτης αποτέλεσαν οι κρίσιμοι παράγοντες που σχετίζονται με το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών πάρκων και συστημάτων. Μελετήθηκε η περίπτωση ενός πρότυπου φωτοβολταϊκού συστήματος 2,18 kWp εγκατεστημένου στο Πολυτεχνείο Κρήτης, κατά την πρώτη φάση λειτουργιάς του, και διερευνήθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα και την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επίδραση των συνθηκών υψηλών θερμοκρασιών, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για την ανάπτυξη της αγοράς των φωτοβολταϊκών στην ευρύτερη περιοχή.

Τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν, δύνανται να παρέχουν ασφαλείς πληροφορίες σχετικά με τις βελτιώσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη δημιουργία μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεων στις χώρες της Μεσογείου, στη Βόρεια Αφρική και τη Μέση Ανατολή.

ABSTRACT

In the late decades, the whole of humanity is affected from the sweeping changes that occur to the climate landscape of the planet. Additionally, the needs for business competition, environmental protection and security in energy supply are the main pillars of the modern energy policy in European and other countries. These facts imply the necessity of the use of Renewable Energy Sources (RES).

This master thesis is focused on photovoltaic systems application. These systems capture solar energy and convert it directly into electricity, with appropriate devices.

In particular, the main subject of this study are the essential factors related to the design, construction and operation of photovoltaic parks and systems.

The case of a pilot photovoltaic system, which is installed in the campus of the Technical University of Crete, is studied during the first phase of its operation. The factors affecting the quality and efficiency of photovoltaic systems are also investigated. Emphasis is given on the influence of high temperature conditions, which are particularly important for the development of the PV market in the region.

The exported results can provide reliable information about the improvements that need to be taken into consideration to create large-scale installations in the Mediterranean, North Africa and the Middle East countries.

Σύμβολο	Μονάδες	Ερμηνεία
G _{sc}	W/m ²	Ηλιακή σταθερά
Gon	W/m ²	Ηλιακή ακτινοβολία εκτός γήινης ατμόσφαιρας σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ηλίου
G _{STC}	W/m ²	Ηλιακή ακτινοβολία στις πρότυπες συνθήκες αναφοράς
G	W/m ²	Στιγμιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
G _T	W/m ²	Στιγμιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
Gb	W/m ²	Στιγμιαία άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
G _{b,T}	W/m ²	Στιγμιαία άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
Io	Wh/m ²	Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία εκτός γήινης ατμόσφαιρας στο οριζόντιο επίπεδο
I	Wh/m ²	Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
Ī	Wh/m ²	Μέση ωριαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
Id	Wh/m ²	Ωριαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
\overline{I}_d	Wh/m ²	Μέση ωριαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
Ib	Wh/m ²	Ωριαία άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
\overline{I}_b	Wh/m ²	Μέση ωριαία άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
	Wh/m ²	Ωριαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
\overline{I}_T	Wh/m ²	Μέση ωριαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
Id, T	Wh/m ²	Ωριαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
$\overline{I}_{d.T}$	Wh/m ²	Μέση ωριαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
$I_{b,T}$	Wh/m ²	Ωριαία άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
\overline{I}_{hT}	Wh/m ²	Μέση ωριαία άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
Ir.T	Wh/m ²	Ωριαία ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
$\overline{I}_{r,T}$	Wh/m ²	Μέση ωριαία ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
H _o	kWh/m²/d	Ημερήσια ηλιακή ενέργεια εκτός γήινης ατμόσφαιρας στο οριζόντιο επίπεδο
\overline{H}_{o}	kWh/m²/d	Μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ενέργεια εκτός γήινης ατμόσφαιρας στο οριζόντιο επίπεδο
H	kWh/m²/d	Μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
Ħ	kWh/m²/d	Μηνιαία μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
H_d	kWh/m²/d	Μέση ημερήσια διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
\overline{H}_d	kWh/m²/d	Μηνιαία μέση ημερήσια διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
	kWh/m²/d	Μέση ημερήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
\overline{H}_{b}	kWh/m²/d	Μηνιαία μέση ημερήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο
	kWh/m²/d	Μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
\overline{H}_T	kWh/m²/d	Μηνιαία μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
H _{d,T}	kWh/m²/d	Μέση ημερήσια διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
$\overline{H}_{d,T}$	kWh/m²/d	Μηνιαία μέση ημερήσια διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
H _{b,T}	kWh/m²/d	Μέση ημερήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
$\overline{H}_{b,T}$	kWh/m²/d	Μηνιαία μέση ημερήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
H _{r,T}	kWh/m²/d	Μέση ημερήσια ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
$\overline{H}_{r,T}$	kWh/m²/d	Μηνιαία μέση ημερήσια ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
	-	Ωριαίος- ημερήσιος δείκτης αιθριότητας

Πίνακας Συντομογραφιών

13

$\overline{K_T}$	-	Μηνιαίος μέσος ημερήσιος δείκτης αιθριότητας
R_b	-	Γεωμετρικός παράγοντας
\overline{R}_{b}	-	Μέσος μηνιαίας γεωμετρικός παράγοντας
AM		Αέριος μάζα
AST	h	Ηλιακός χρόνος
LST	h	Τοπικός χρόνος
LL	0	Γεωγραφικό μήκος της θέσης μελέτης
SL	0	Ζώνη ώρας της θέσης μελέτης
δ	0	Ηλιακή απόκλιση
ω	0	Ωριαία γωνία
ω _{sr}	0	Ωριαία γωνία ανατολής ηλίου
$\omega_{ss} \dot{\eta} \omega_s$	0	Ωριαία γωνία δύσης ηλίου
γ	0	Αζιμούθια γωνία επιφάνειας
β	0	Κλίση κεκλιμένης επιφάνειας
θ	0	Γωνία πρόσπτωσης
θz	0	Ζενιθιακή γωνία
α_s	0	Γωνία ανύψωσης του ηλίου
γ_s	0	Αζιμούθια γωνία του ηλίου
φ	0	Γεωγραφικό πλάτος
ρ		Δείκτης ανάκλασης
Tc	°C	Θερμοκρασία λειτουργίας του-ων φωτοβολταϊκού-ών στοιχείου-ων
Тт	°C	Θερμοκρασία λειτουργίας του-ων φωτοβολταϊκού-ών πλαισίου-ων
7	° 0	Μέση ημερήσια θερμοκρασία λειτουργίας του-ων φωτοβολταϊκού-
<i>I M</i> , <i>d</i>	C	ών πλαισίου-ων
Tm	ഀ൨	Μέση μηνιαία θερμοκρασία λειτουργίας του-ων φωτοβολταϊκού-ών
1 111 ,m	U	πλαισίου-ων
Тт	Э°	Μέση ετήσια θερμοκρασία λειτουργίας του-ων φωτοβολταϊκού-ών
	00	πλαισίου-ων
$T\alpha$	<u> </u>	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
$T\alpha_{,d}$	3 <u>0</u>	Μέση ημερησία θερμοκρασία περιβαλλοντος
$I\alpha_{,m}$	С °С	Μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβαλλοντος
$I\alpha_y$		Μεσή ετήσια θερμοκρασία περιβαλλοντος
VW V	m/s	Ταχυτητά ανεμού
VW,d	m/s	Μέση μεγισία ταχύτητα ανέμου
VW,m	m/s	
	m ²	ινιεοτη επησία τημερησία ταχυτητά ανεμου
	m	
	-	Εναλλασούμενο ρεύμα
	-	Ζυνεχες ρευμα
	KVVII	Γιαραγωγή ενεργείας του φωτορολταίκου συο πματος
E_{AC}	kWh/kWp	αωτοβολταϊκό σύστημα
		Ημερήσια συνολική παραγωνή ενέρνειας του φωτοβολταϊκού
$E_{AC,d}$	kWh	συστήματος
Г		Μηνιαία συνολική παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού
E _{AC,m}	KVVII	συστήματος
Fre	k\//b	Ετήσια συνολική παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού
		συστήματος
E_{ACd} ava	kWh	Μέση ημερήσια συνολική παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού
		συστηματος
	KVVN	ι ιαραγωγη ενεργειας της φωτοβολταικης συστοιχίας
E_{DC}	kWh/kWp	κανονικοποιημενη τιμη της παραγομενης ενεργειας απο το φωτοβολταϊκή συστοιχία
Enca	kWh	Ημερήσια συνολική παραγωγή ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή
		συστοιχία

14

E _{DC,m}	kWh	Μηνιαία συνολική παραγωγή ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία
$E_{DC,y}$	kWh	Ετήσια συνολική παραγωγή ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία
$E_{DC,d,avg}$	kWh	Μέση ημερήσια συνολική παραγωγή ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία
Y_R	kWh/kWp ή h	Ενεργειακή απόδοση αναφοράς
$Y_{R,d}$	h/d	Ημερήσια Ενεργειακή απόδοση αναφοράς
$Y_{R,m}$	h/d	Μηνιαία μέση ημερήσια ενεργειακή απόδοση αναφοράς
$Y_{R,y}$	h/d	Ετήσια μέση ημερήσια ενεργειακή απόδοση αναφοράς
Y_T	kWh/kWp ή h	Διορθωμένη ενεργειακή απόδοση αναφοράς
$Y_{T,d}$	h/d	Ημερήσια Διορθωμένη ενεργειακή απόδοση αναφοράς
Y _{T,m}	h/d	Μηνιαία μέση ημερήσια διορθωμένη ενεργειακή απόδοση αναφοράς
$Y_{T,v}$	h/d	Ετήσια μέση ημερήσια διορθωμένη ενεργειακή απόδοση αναφοράς
<i>n_{temp}</i>	%	Διορθωτικός συντελεστής θερμοκρασιακών απωλειών
0	0/ /°C	Συντελεστής θερμοκρασίας-απόδοσης των φωτοβολταϊκών
рмр	%/ C	πλαισίων
Y_A	kWh/kWp ή h	Ενεργειακή απόδοση συστοιχίας
$Y_{A,d}$	h/d	Ημερήσια Ενεργειακή απόδοση αναφοράς
Y _{A,m}	h/d	Μηνιαία μέση ημερήσια ενεργειακή απόδοση αναφοράς
$Y_{A,y}$	h/d	Ετήσια μέση ημερήσια ενεργειακή απόδοση αναφοράς
Y_F	kWh/kWp ή h	Τελική ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος
$Y_{F,d}$	h/d	Ημερήσια τελική ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος
Y _{F,m}	h/d	Μηνιαία μέση ημερήσια τελική ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος
$Y_{F,y}$	h/d	Ετήσια μέση ημερήσια τελική ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος
PR	%	Λόγος απόδοσης
PR , m	%	Μηνιαίος μέσος λόγος απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος
$PR_{,y}$	%	Ετήσιος μέσος λόγος απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος
Lc	h/d	Απώλειες σύλληψης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας
L _{C,m}	h/d	Μηνιαία μέση ημερήσια τιμή των απωλειών σύλληψης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας
L _{C,y}	h/d	Ετήσια μέση ημερήσια τιμή των απωλειών σύλληψης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας
L _{CT}	h/d	Απώλειες λόγω αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων πάνω από τους 25°C
L _{CT,m}	h/d	Μηνιαία μέση ημερήσια τιμή των απωλειών λόγω αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων πάνω από τους 25°C
L _{CT,y}	h/d	Ετήσια μέση ημερήσια τιμή των απωλειών λόγω αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων πάνω από τους 25°C
L _{CM}	h/d	Απώλειες διαφοροποίησης συστοιχίας
<i>Lсм,т</i>	h/d	Μηνιαία μέση ημερήσια τιμή των απωλειών διαφοροποίησης συστοιχίας
L _{CM,y}	h/d	Ετήσια μέση ημερήσια τιμή των απωλειών διαφοροποίησης συστοιχίας
Ls	h/d	Απώλειες συστήματος
L _{S,m}	h/d	Μηνιαία μέση ημερήσια τιμή των απωλειών συστήματος
$L_{S,y}$	h/d	Ετήσια μέση ημερήσια τιμή των απωλειών συστήματος

15

n _c	%	Αποδοτικότητα της φωτοβολταϊκού στοιχείου
n_m	%	Αποδοτικότητα της φωτοβολταϊκού πλαισίου
n _{inv}	%	Αποδοτικότητα αντιστροφέα
n inv,m	%	Μηνιαία μέση αποδοτικότητα αντιστροφέα
n _{inv,y}	%	Ετήσια μέση αποδοτικότητα αντιστροφέα
n_{pv}	%	Αποδοτικότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας
n _{pv,m}	%	Μηνιαία μέση αποδοτικότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας
$n_{pv,y}$	%	Ετήσια μέση αποδοτικότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας
n _{syst}	%	Αποδοτικότητα συστήματος
n _{syst,m}	%	Μηνιαία μέση αποδοτικότητα συστήματος
n _{syst,y}	%	Ετήσια μέση αποδοτικότητα συστήματος
Pnom	Wp	Ονομαστική ισχύς φωτοβολταϊκού πλαισίου
P _{pv,rated}	kWp	Συνολική εγκατεστημένη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος
P _{DC}	W	Ηλεκτρική ισχύς στη έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας
DC voltage	V	Τάση του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας
DC _{current}	А	Ρεύμα του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας
k	°C*m²/W	Συντελεστής Ross
MBE	-	Μέσο σφάλμα μεροληψίας
MAE	-	Μέσο απόλυτο σφάλμα
RMSE	-	Μέσο τετραγωνικό σφάλμα
R	-	Συντελεστής συσχέτισης
R ²	-	Συντελεστής προσδιορισμού
R^{2}_{adj}	-	Προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού
Δεί	κτες	
	h	Ωριαίος-α
	d	Ημερήσια
	m	Μηνιαίος-α
	У	Ετήσιος-α
а	vq	Μέσος-η όρος-τιμή

<u>Κατάλογος Πινάκων</u>

Πίνακας 1.1:	Εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς στην Ελλάδα ως και τον Σεπτέμβριο του 2013.	34
Πίνακας 2.1:	Ενδεικτικές αποδόσεις των εμπορικά διαθέσιμων φωτοβολταϊκών κύτταρων/πλαισίων.	41
Πίνακας 2.2:	Στοιχεία στατικού ελέγχου των εξεταζόμενων μοντέλων πρόβλεψης.	59
Πίνακας 2.3:	Στοιχεία στατικού ελέγχου των εξεταζόμενων μοντέλων πρόβλεψης.	60
Πίνακας 2.4:	Προτεινόμενες τιμές για τον συντελεστή k	62
Πίνακας 3.1:	Κλιματολογικά στοιχεία θεομοκοασίας περιβάλλοντος (Τa) για την	68
	περιοχή των Χανίων (χρονική περίοδος μετρήσεων: 1958 - 1997).	
Πίνακας 3.2:	Κλιματολογικά στοιχεία μνοασίας για την περιοχή των Χανίων (χρονική	69
	περίοδος μετοήσεων 1958 - 1997)	00
Πίνακας 3.3.	Κλιματολογικά στοιχεία βοοχόπτωσης για την περιοχή των Χανίων	69
	(νορνικά περίοδος μετράσεων 1958 - 1997)	00
Πίνακας 3.4.	$(\chi \mu \sigma r)$ (χ ματολογικά στοιχεία ταχύτητας ($\chi \mu \sigma$) και διεύθυνσης ανέμων για την	70
Πνακάς 3.4.	περιοχά των Χανίων	70
Πίνακας 3.5.	περιοχή των Λανίων. Κλιματολογικά στοιχεία μέσρε μονισίας ολιακός ακτινοβολίας σε	71
Πνακάς 5.5.	κλιματολογικά στοιχεία μεστις μηνιαίας ηλιακής ακτινορολίας σε	11
	υριζυντιές, και κεκλιμένες επιφάνειες με νότιο και τύχαιο	
Πίνακας 2.6	Προσανατολισμο για την περιοχή των λανιων.	75
Πνακάς 5.0.	$\Gamma_{121/(C5)}$	75
Πίνακας 2.7	ΓΙΖΙ(ΟΟ). Ενδεικτικά απόδοση ανάλουα με τον ποοσανατολισμό και την κλίση.	70
Πνακάς 3.7.	ενοεικτική αποσοσή αναλογά με τον προσανατολισμο και την κλισή	10
Πίνακας 4.4	Ο ΠΙΥ ΕΛΛάθα. Κατημοριοποίηση του δείκτη αυάκλασης (s)	02
	$R_{\text{constraint}}$ (μ) $R_{\text{constraint}}$ (μ) $R_{\text{constraint}}$ (μ) $R_{\text{constraint}}$ (μ) $R_{\text{constraint}}$	92
Πνακάς 4.2:	Παρουσιαση των εξεταξομένων μοντελών προσοιορισμου της	110
	λεπουργικής θερμοκρασίας πλαισίων για τη σεοσμενή φωτορολταική	
Πίνανας 4.2.		440
Πίνακας 4.3.	Διαχωρισμος του ετους σε εποχες.	119
Πίνακας 4.4:	Χαρακτηριομός ημεράς βάσει του σεικτή αιθριοτήτας.	119
Πίνακας 4.5:		119
ΠΙνακας 5.1:	Οι κυριστερες παραμετροι παρακολουθησης της εξεταζομενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.	123
Πίνακας 5.2:	Στοιχεία υπολογισμού της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ηλιακής	125
	ακτινοβολίας στην κεκλιμένη επιφάνεια (κλίση:30°,αζιμούθιο:-50°) της	
	φωτοβολταϊκής συστοιχίας (\overline{H}_T) κατά την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου	
	2012.	
Πίνακας 5.3:	Μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος (<i>Τα, _m</i>), μέση μηνιαία	129
	θερμοκρασίας λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i> , _m), μέση	
	μηνιαία ταχύτητα ανέμου (<i>Vw,_m</i>) κατά τις ώρες λειτουργίας του	
	φωτοβολταϊκού συστήματος για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.	
Πίνακας 5.4:	Εύρος διακύμανσης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Τα), της	131
	θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm) και της ταχύτητας	
	ανέμου (Vw) κατά τις ώρες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος	
	για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2011.	
Πίνακας 5.5:	Εύρος διακύμανσης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Τα), της	132
	θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm) και της ταχύτητας	
	ανέμου (Vw) κατά τις ώρες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος	
	για την περίοδο Ιουνίου 2011 - Μαΐου 2012.	
Πίνακας 5.6:	Συγκεντρωτικός πίνακας των στοιχείων για την συνολική παραγωγή	134
	ηλεκτρικής ενέργειας από το εξεταζόμενο φωτοβολταϊκό σύστημα κατά	
	την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.	

"Αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς πρότυπης Φωτοβολταϊκής εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης"

Πίνακας 5.7:	Συγκεντρωτικός πίνακας των μηνιαίων μέσων ημερήσιων τιμών των παραμέτρων: απόδοση αναφοράς $(Y_{R,m})$, διορθωμένη απόδοση αναφοράς $(Y_{T,m})$, απόδοση συστοιχίας $(Y_{A,m})$, τελική απόδοση $(Y_{F,m})$, θερμικές απώλειες $(L_{CT,m})$, απώλειες διαφοροποίησης συστοιχίας $(L_{CM,m})$, απώλειες σύλληψης συστοιχίας $(L_{C,m})$, απώλειες συστήματος $(L_{S,m})$ και των μηνιαίων μέσων τιμών του λόγου απόδοσης (PR,m) για την περίρδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.	136
Πίνακας 5.8:	Συγκεντρωτικός πίνακας των παραμέτρων: μηνιαία μέση αποδοτικότητα συστοιχίας (<i>n_{pv,m}</i>), μηνιαία μέση αποδοτικότητα αντιστροφέα (<i>n_{inv,m}</i>), μηνιαία μέση αποδοτικότητα φωτοβολταϊκού συστήματος (<i>n_{syst,m}</i>) για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.	137
Πίνακας 5.9:	Μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο (\overline{H}) και στο κεκλιμένο (\overline{H}_{τ}) επίπεδο, μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος ($Ta_{,m}$) κατά τις ώρες ηλιοφάνειας, σύμφωνα με το λογισμικό PVGIS.	154
Πίνακας 5.10:	Συγκεντρωτικός πίνακας των παραμέτρων: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος (E_{AC}), απόδοση αναφοράς ($Y_{R,m}$), τελική απόδοση ($Y_{F,m}$), συνολικές ενεργειακές απώλειες (L_{total}), λόγος απόδοσης (PR), αποδοτικότητα φωτοβολταϊκού συστήματος ($n_{syst,m}$), σύμφωνα με το λογισμικό PVGIS.	156
Πίνακας 5.11:	Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων του λογισμικού Sunny Design.	159
Πίνακας 5.12:	Κλιματολογικά δεδομένα για την ευρύτερη περιοχή των Χανίων μέσω του λογισμικού RETScreen.	161
Πίνακας 5.13:	Ενεργειακό μοντέλο του λογισμικού RETScreen για την εξεταζόμενη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.	162
Πίνακας 5.14:	Μοντέλο ανάλυσης εκπομπών του λογισμικού RETScreen για την εξεταζόμενη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.	163
Πίνακας 5.15:	Μοντέλο οικονομικής ανάλυσης του λογισμικού RETScreen για την εξεταζόμενη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.	164
Πίνακας 5.16:	Κατηγοριοποίηση των υπό διερεύνηση συνθηκών.	166
Πίνακας 5.17:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (18/6/2010).	167
Πίνακας 5.18:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (19/6/2011).	169
Πίνακας 5.19:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με σχεδόν μέτριο άνεμο (26/7/2010).	172
Πίνακας 5.20:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια καλοκαιρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (4/6/2011).	174
Πίνακας 5.21:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια καλοκαιρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (23/8/2010).	177
Πίνακας 5.22:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας φθινοπωρινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (22/10/2010).	179
Πίνακας 5.23:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας φθινοπωρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (4/9/2011).	182
Πίνακας 5.24:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (3/10/2011).	184
Πίνακας 5.25:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (4/11/2010).	187

Πίνακας 5.26:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας χειμερινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (4/12/2010).	189
Πίνακας 5.27:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας χειμερινής ημέρας με ασθενή άνεμο (8/12/2010).	192
Πίνακας 5.28:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (12/1/2011).	194
Πίνακας 5.29:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (7/12/2010).	196
Πίνακας 5.30:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (5/12/2010).	199
Πίνακας 5.31:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (23/4/2011).	201
Πίνακας 5.32:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με ασθενή άνεμο (7/5/2011).	204
Πίνακας 5.33:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με σχεδόν μέτριο άνεμο (9/4/2011).	206
Πίνακας 5.34:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (26/5/2010).	208
Πίνακας 5.35:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (16/4/2010).	211
Πίνακας 5.36:	Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011).	214
Πίνακας 5.37:	Στατιστικός έλεγχος προσαρμογής του γραμμικού μοντέλου πολλαπλής παλινδρόμησης για τις συνθήκες <i>Κ</i> ₇ ≥0,5 και <i>V</i> _w <4,5m/s.	217
Πίνακας 5.38:	Στατιστικός έλεγχος προσαρμογής του γραμμικού μοντέλου πολλαπλής παλινδρόμησης για τις συνθήκες <i>K</i> ₇ ≥0,5 και <i>V</i> _w >4,5m/s.	220
Πινάκας 6.1:	Συγκριτικός πίνακας διακύμανσης των παραμέτρων: μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (\overline{H}), μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος ($Ta_{,m}$) κατά τις ώρες ηλιοφάνειας, μέσος μηνιαίος δείκτης αιθριότητας (\overline{K}_{τ}).	227
Πίνακας 6.2:	Εποχική διακύμανση τιμών για τις παραμέτρους: απόδοση αναφοράς (Y _R), διορθωμένη απόδοση αναφοράς (Y _T), απόδοση συστοιχίας (Y _A), τελική απόδοση (Y _F), θερμικές απώλειες (L _{CT}), απώλειες διαφοροποίησης συστοιχίας (L _{CM}), απώλειες σύλληψης συστοιχίας (L _C), απώλειες συστήματος (L _S), λόγος απόδοσης (PR), Θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.	230
Πίνακας 6.3:	Επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων στα ηλεκτρικά γαρακτηριστικά της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής συστοιχίας.	230
Πίνακας 6.4:	Αντίστοιχες μελέτες που απαντώνται στη διεθνή επιστημονική βιβλιονοαφία	231
Πίνακας 6.5:	Πίνακας συγκριτικής αξιολόγησης πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων	233
Πίνακας 6.6:	Συμπεράσματα από την σύγκριση των εμπειρικών μοντέλων των King et al. (2004), Risser-Fuentes (1983), Chenni et al. (2007), Servant (1985), King (1997) υπό τις δεδομένες συνθήκες των δεκαοκτώ (18) πρώτων μηνών λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος.	235

- Πίνακας 6.7: Συμπεράσματα από την σύγκριση των εμπειρικών μοντέλων των Ross 236 Smockler (1986), Ross (1976) - Nordmann et al. (2003), Tselepis -Tripanagnostopoulos (2001), Mondol et al. (2007) και Schott (1985) υπό τις δεδομένες συνθήκες των δεκαοκτώ (18) πρώτων μηνών λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος.
- Πινάκας 6.1: Συγκριτικός πίνακας διακύμανσης των παραμέτρων: μηνιαία μέση 227 ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (*H*), μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος (*Ta*,*m*) κατά τις ώρες ηλιοφάνειας, μέσος μηνιαίος δείκτης αιθριότητας (*K*_T).

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1:	Η προβλεπόμενη εξέλιξη της κατανάλωσης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο κατά την περίοδο 2010 - 2040.	29
Διάγραμμα 1.2:	Διαχρονική εξέλιξη της απόδοσης για διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων.	30
Διάγραμμα 1.3:	Διαχρονική εξέλιξη της συνολικής εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος (MWp) κατά την περίοδο 2000 - 2012.	33
Διάγραμμα 1.4:	Εγκατεστημένη ισχύς ανά τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση κατά το 2012 (MW).	34
Διάγραμμα 1.5:	Η εξέλιξη της ελληνικής αγοράς φωτοβολταϊκών συστημάτων (αυτόνομα και συνδεδεμένα) κατά τη διάρκεια της περιόδου 2007 - 2013.	35
Διάγραμμα 1.6:	Κατανομή των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων ανά ισχύ στην Ελλάδα ως και τον Σεπτέμβριο του 2013.	35
Διάγραμμα 2.1:	Διακύμανση των τιμών του συντελεστή θερμοκρασίας-απόδοσης πλαισίων (β _{MP}) των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών τεχνολογιών.	56
Διάγραμμα 2.2:	Γραφική απεικόνιση της παραγόμενης ισχύος (<i>P</i> _{DC}) σε σχέση με την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) στην περιοχή Phitsanulok (Ταϋλάνδης) για την περίοδο Ιανουαρίου 2008 - Δεκεμβρίου 2009.	57
Διάγραμμα 2.3:	Ιστόγραμμα τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας πλαισίου και της διαφοράς θερμοκρασίας πλαισίου - περιβάλλοντος σύμφωνα με τα εξεταζόμενα θεωρητικά μοντέλα στην περιοχή δοκιμής (Ισραήλ).	58
Διάγραμμα 2.4:	Η μηνιαία διακύμανση των θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i> , <i>m</i>) για την περιοχή Kuching, Μαλαισία.	61
Διάγραμμα 3.1:	Κλιματολογικό διάγραμμα θερμοκρασίας για την περιοχή των Χανίων.	68
Διάγραμμα 3.2:	Κλιματολογικό διάγραμμα βροχόπτωσης για την περιοχή των Χανίων (χρονική περίοδος μετρήσεων 1958-1997).	69
Διάγραμμα 4.1:	Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική καμπύλη ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.	112
Διάγραμμα 4.2:	Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας περιπτώσεων ενεργειακών υπολογισμών για φωτοβολταϊκά συστήματα σε περιβάλλον RETScreen.	117
Διάγραμμα 5.1:	Μηνιαία μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο (\overline{H}) και στο κεκλιμένο (\overline{H}_T) επίπεδο (κλίση: 30°, αζιμούθιο: -50°), δείκτης αιθριότητας (\overline{K}_T), για την περίοδο παρακολούθησης Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.	126
Διάγραμμα 5.2:	Συχνότητας εμφάνισης συνθηκών αιθριότητας κατά την περίοδο παρακολούθησης Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.	127
Διάγραμμα 5.3:	Μεταβολή της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο (<i>H</i>) και στο κεκλιμένο (<i>H_T</i>) επίπεδο για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.	128

Διάγραμμα 5.4: Διακύμανση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασία περιβάλλοντος (<i>Tα</i> , <i>m</i>), της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i> , <i>m</i>) και της μέσης μηνιαίας ταχύτητας ανέμου (<i>Vw</i> , <i>m</i>) κατά τις ώρες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.						
Διάγραμμα 5.5:	Μηνιαία μέση ημερήσια παραγωγή ενέργειας (kWh/kWp/d) και οι απώλειες μετατροπής (%) του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο μέσω του αντιστροφέα για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.	135				
Διάγραμμα 5.6:	Διακύμανση των μηνιαίων μέσων ημερήσιων τιμών για την απόδοση αναφοράς (<i>Y</i> _{<i>R,m</i>}), την απόδοση συστοιχίας (<i>Y</i> _{<i>A,m</i>}) και την τελική απόδοση (<i>Y</i> _{<i>F,m</i>}) κατά την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.	137				
Διάγραμμα 5.7:	Μηνιαία διακύμανση του λόγου απόδοσης (<i>PR</i> , _m) για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012	138				
Διάγραμμα 5.8:	Θερμικές απώλειες (<i>L</i> _{CT,m}), απώλειες διαφοροποίησης συστοιχίας (<i>L</i> _{CM,m}), απώλειες συστήματος (<i>L</i> _{S,m}) για την περίοδο louvíou 2010 - Μαΐου 2012.	139				
Διάγραμμα 5.9:	Συσχέτιση της απόδοσης συστοιχίας (<i>Y</i> _{A,m}) και της τελικής απόδοσης (<i>Y</i> _{F,m}), με την απόδοση αναφοράς (<i>Y</i> _{R,m}) για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.	140				
Διάγραμμα 5.10:	Μηνιαία διακύμανση των μέσων τιμών της αποδοτικότητας συστοιχίας (<i>n_{pv,m}</i>), της αποδοτικότητας αντιστροφέα (<i>n_{inv,m}</i>), της αποδοτικότητας αυστοιχίας (<i>n_{pv,m}</i>), της αποδοτικότητας συστήματος (<i>n_{syst,m}</i>), της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm_{,m}</i>) και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (<i>Ta_{,m}</i>) κατά την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.	142				
Διάγραμμα 5.11:	Διακύμανση της αποδοτικότητας συστοιχίας (<i>n_{pv}</i>) και της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) κατά τη διάρκεια αντιπροσωπευτικής ημέρας του Ιουνίου 2010.	144				
Διάγραμμα 5.12:	Διακύμανση της αποδοτικότητας συστοιχίας (<i>n_{pv}</i>) και της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) κατά τη διάρκεια αντιπροσωπευτικής ημέρας του Ιουνίου 2011.	144				
Διάγραμμα 5.13:	Διακύμανση της αποδοτικότητας συστοιχίας (<i>n_{pv}</i>) και της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) κατά τη διάρκεια αντιπροσωπευτικής ημέρας του Ιουλίου 2010.	145				
Διάγραμμα 5.14:	Διακύμανση της αποδοτικότητας συστοιχίας (<i>n_{pv}</i>) και της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) κατά τη διάρκεια αντιπροσωπευτικής ημέρας του Ιουλίου 2011.	145				
Διάγραμμα 5.15:	Διακύμανση της αποδοτικότητας συστοιχίας (<i>n_{pv}</i>) και της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) κατά τη διάρκεια αντιπροσωπευτικής ημέρας του Αυγούστου 2010.	146				
Διάγραμμα 5.16:	Διακύμανση της αποδοτικότητας συστοιχίας (<i>n_{pv}</i>) και της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) κατά τη διάρκεια αντιπροσωπευτικής ημέρας του Αυγούστου 2011.	146				
Διάγραμμα 5.15:	Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της αποδοτικότητας συστοιχίας (<i>n_{pv}</i>) από τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>). περίοδος Ιουνίου 2010 - Αυνούστου 2010	147				
Διάγραμμα 5.16:	Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της τάσης του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (<i>DC voltage</i>) από τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>), περίοδος Ιουνίου 2010 - Αυγούστου 2010.	148				
Διάγραμμα 5.17:	Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης του ρεύματος του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (<i>DC current</i>) από τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>), περίοδος Ιουνίου 2010 - Αυγούστου 2010.	148				

Διάγραμμα 5.18:	Διαγραμμα 5.18: Ι ραφική απεικόνιση της εξάρτησης της μέγιστης ισχύος (<i>P_{DC}</i>) στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>), περίοδος Ιουνίου 2010 - Αυγούστου 2010.						
Διάγραμμα 5.19:	Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της αποδοτικότητας συστοιχίας (n _{pv}) από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm), περίοδος Ιουνίου 2011 - Αυγούστου 2011.						
Διάγραμμα 5.20:	α 5.20: Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της τάσης του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (<i>DC voltage</i>) από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων						
Διάγραμμα 5.21:	Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης του ρεύματος του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (<i>DC current</i>) από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>), περίοδος Ιουνίου 2011 - Αυγούστου 2011.	151					
Διάγραμμα 5.22:	Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της μέγιστης ισχύος (<i>P_{DC}</i>) στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>), περίοδος Ιουνίου 2011 - Αυγούστου 2011.	151					
Διάγραμμα 5.23:	Μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία στην κεκλιμένη επιφάνεια της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (<i>H</i> _{T,m}), σύμφωνα με το λογισμικό PVGIS.	155					
Διάγραμμα 5.24:	Μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος (<i>Ta</i> , <i>m</i>) κατά τις ώρες ηλιοφάνειας στην υπό μελέτη περιοχή, σύμφωνα με το λογισμικό PVGIS.	155					
Διάγραμμα 5.25:	Ολική μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της υπό μελέτη φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, σύμφωνα με το λογισμικό PVGIS.	157					
Διάγραμμα 5.26:	Αποδοτικότητα κεφαλαίου επένδυσης συναρτήσει του χρόνου.	165					
Διάγραμμα 5.27:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta, G_T, Vw</i>) κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με πολύ ασθενή άγεμο (18/6/2010).	167					
Διάγραμμα 5.28:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (18/6/2010)	168					
Διάγραμμα 5.29:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και πολύ ασθενούς ανέμου (18/6/2010).	168					
Διάγραμμα 5.30:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta, G_T, Vw</i>) κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (19/6/2011).	170					
Διάγραμμα 5.31:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (19/6/2011).	170					
Διάγραμμα 5.32:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και ασθενούς ανέμου (19/6/2011).	171					
Διάγραμμα 5.33:	μμα 5.33: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Τα, G_T, Vw</i>) κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (26/7/2010)						
Διάγραμμα 5.34:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (26/7/2010).	173					

Διάγραμμα 5.35:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και ασθενούς ανέμου (26/7/2010)	173
Διάγραμμα 5.36:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T , <i>Vw</i>) κατά τη διάρκεια καλοκαιρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (4/6/2011).	175
Διάγραμμα 5.37:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια καλοκαιρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άγεμο (4/6/2011).	175
Διάγραμμα 5.38:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με πολύ ασθενή άνεμο (4/6/2011).	176
Διάγραμμα 5.39:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T , <i>Vw</i>) κατά τη διάρκεια καλοκαιρινής ημέρας με αραιή συνχεφιά και ασθενή άχευο (23/8/2010).	177
Διάγραμμα 5.40:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T ,) κατά τη διάρκεια καλοκαιρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (23/8/2010).	178
Διάγραμμα 5.41:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με ασθενή άνεμο (23/8/2010).	178
Διάγραμμα 5.42:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T , <i>Vw</i>) κατά τη διάρκεια αίθριας φθινοπωρινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (22/10/2010).	180
Διάγραμμα 5.43:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T ,) κατά τη διάρκεια αίθριας φθινοπωρινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (22/10/2010).	180
Διάγραμμα 5.44:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας με πολύ ασθενή άνεμο (22/10/2011).	181
Διάγραμμα 5.45:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T , <i>Vw</i>) κατά τη διάρκεια αίθριας φθινοπωρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (4/9/2011).	182
Διάγραμμα 5.46:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια αίθριας φθινοπωρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (4/9/2011).	183
Διάγραμμα 5.47:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και ασθενούς ανέμου (4/9/2011).	183
Διάγραμμα 5.48:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T , <i>Vw</i>) κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (3/10/2011).	185
Διάγραμμα 5.49:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής ημέρας με αραιή συγγεφιά και πολύ ασθενή άγεμο (3/10/2011)	185
Διάγραμμα 5.50:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με πολύ ασθενή άνεμο (3/10/2011).	186

Διάγραμμα 5.51:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta, G_T, Vw</i>) κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (4/11/2010).	187
Διάγραμμα 5.52:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής ημέρας με αραιή συνχεφιά και ασθενή άχεμο (4/11/2010)	188
Διάγραμμα 5.53:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με ασθενή άγεμο (4/11/2010).	188
Διάγραμμα 5.54:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T , <i>Vw</i>) κατά τη διάρκεια αίθριας χειμερινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (4/12/2010).	190
Διάγραμμα 5.55:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια αίθριας χειμερινής ημέρας με πολύ ασθενή άγεμο (4/12/2010).	190
Διάγραμμα 5.56:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και πολύ ασθενούς ανέμου (4/12/2010).	191
Διάγραμμα 5.57:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T , <i>Vw</i>) κατά τη διάρκεια αίθριας χειμερινής ημέρας με ασθενή άνεμο (8/12/2010).	192
Διάγραμμα 5.58:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια αίθριας χειμερινής ημέρας με ασθενή άνεμο (8/12/2010).	193
Διάγραμμα 5.59:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και ασθενούς ανέμου (8/12/2010).	193
Διάγραμμα 5.60:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T , <i>Vw</i>) κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (12/1/2011).	195
Διάγραμμα 5.61:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με πολύ ασθενή άνεμο (12/1/2011).	195
Διάγραμμα 5.62:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T , <i>Vw</i>) κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (7/12/2010).	197
Διάγραμμα 5.63:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (7/12/2010).	197
Διάγραμμα 5.64:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς και ασθενούς ανέμου (7/12/2010).	198
Διάγραμμα 5.65:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta, G_T, Vw</i>) κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (5/12/2010).	199

Διάγραμμα 5.66:	 Διαγραμμα 5.66: Συγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i>, <i>G</i>_T) κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (5/12/2010). 							
Διάγραμμα 5.67:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς και σχεδόν μέτριου ανέμου (5/12/2010).	200						
Διάγραμμα 5.68:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta, G_T, Vw</i>) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (23/4/2011).	202						
Διάγραμμα 5.69:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (23/4/2011).	202						
Διάγραμμα 5.70:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και πολύ ασθενούς ανέμου (23/4/2011).	203						
Διάγραμμα 5.71:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta, G</i> _T , <i>Vw</i>) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με ασθενή άγεμο (7/5/2011).	204						
Διάγραμμα 5.72:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με ασθενή άνεμο (7/5/2011).	205						
Διάγραμμα 5.73:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και πολύ ασθενούς ανέμου (7/5/2011)	205						
Διάγραμμα 5.74:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta, G_T, Vw</i>) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με σχεδόν μέτοιο (9/4/2011).	207						
Διάγραμμα 5.75:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με σχεδόν μέτοιο άνεμο (9/4/2011).	207						
Διάγραμμα 5.76:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και σχεδόν μέτριο άνεμο (9/4/2011).	208						
Διάγραμμα 5.77:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T , <i>Vw</i>) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (26/5/2011).	209						
Διάγραμμα 5.78:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άγεμο (26/5/2011).	209						
Διάγραμμα 5.79:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με πολύ ασθενή άνεμο (26/5/2011).	210						
Διάγραμμα 5.80:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta, G_T, Vw</i>) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (16/4/2011).	212						

2014

 Διάγραμμα 5.81: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i>, <i>G</i>₇) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενόή άνεμο (16/4/2011). Διάγραμμα 5.82: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς και ασθενούς ανέμου (16/4/2011). Διάγραμμα 5.83: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας 214 λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i>, <i>G</i>₇, <i>W</i>) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμου (2/5/2011). Διάγραμμα 5.84: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας μεταβλητές: <i>Ta</i>, <i>G</i>₇) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμου (2/5/2011). Διάγραμμα 5.85: Αποτελέσματα στατιστικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας μεταξόμτιες μεταβλητές: <i>Ta</i>, <i>G</i>₇) κατά τη διάρκεια αιθριας ανοιξιάτικης ημέρας με σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011). Διάγραμμα 5.85: Αποτελέσματα στατιστικών ελέγχου προσαρμογής των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011). Διάγραμμα 5.86: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>₇≥0,5 και <i>V</i>_w<4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο του λογισμικού Αnalyse-it. Διάγραμμα 5.88: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.88: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο που λογισμικού Αnalyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απε			
 Διάγραμμα 5.82: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς και ασθενούς ανέμου (16/4/2011). Διάγραμμα 5.83: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta, Gτ, Vw</i>) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011). Διάγραμμα 5.84: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta, Gτ, Vw</i>) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011). Διάγραμμα 5.84: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta, Gτ</i>, Cr) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011). Διάγραμμα 5.85: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011). Διάγραμμα 5.86: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>Kτ</i>≥0,5 και <i>V_w</i>>4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>Kτ</i>≥0,5 και <i>V_w</i>>4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>Kτ</i>≥0,5 και <i>V_w</i>>4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τ	Διάγραμμα 5.81:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (16/4/2011).	212
 Διάγραμμα 5.83: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας μεταβλητές: <i>Ta, Gτ, Vw</i>) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011). Διάγραμμα 5.84: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta, Gτ</i>, <i>Vw</i>) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011). Διάγραμμα 5.84: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011). Διάγραμμα 5.85: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011). Διάγραμμα 5.86: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>Kτ</i>₇≥0,5 και <i>Vw</i> Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>Kτ</i>₇≥0,5 και <i>Vw</i> Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο του λογισμικού Αnalyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο του λογισμικού Αnalyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>Kτ</i>₇≥0,5 και <i>Vw</i> Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού του λογισμικού Analyse-it. 	Διάγραμμα 5.82:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς και ασθενούς ανέμου (16/4/2011).	213
 Διάγραμμα 5.84: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i>, <i>G</i>_T) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011). Διάγραμμα 5.85: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011). Διάγραμμα 5.86: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>₇≥0,5 και <i>V_W</i><4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>₇≥0,5 και <i>V_W</i><4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>₇≥0,5 και <i>V_W</i><4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική αναίλυση υπολοίπων για το "νέο" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>₇≥0,5 και <i>V_W</i><4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. 	Διάγραμμα 5.83:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T , <i>Vw</i>) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011).	214
 Διάγραμμα 5.85: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011). Διάγραμμα 5.86 Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>₇≥0,5 και <i>V</i>_W<4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>₇≥0,5 και <i>V</i>_W<4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.88: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>₇≥0,5 και <i>V</i>_W>4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απαικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο του λογισμικού Αnalyse-it. Διάγραμμα 5.88: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>₇≥0,5 και <i>V</i>_W>4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. 	Διάγραμμα 5.84:	Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Ta</i> , <i>G</i> _T) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011).	215
 Διάγραμμα 5.86 Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>₇≥0,5 και <i>V_W</i><4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική ανάλυση υπολοίπων για το "νέο" εμπειρικού μοντέλο 219 πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>₇≥0,5 και <i>V_W</i><4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.88: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλο μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>₇≥0,5 και <i>V_W</i>>4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική ανάλυση υπολοίπων για το "νέο" εμπειρικού μοντέλο μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>₇≥0,5 και <i>V_W</i>>4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. 	Διάγραμμα 5.85:	Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011).	215
 Διάγραμμα 5.87: Γραφική ανάλυση υπολοίπων για το "νέο" εμπειρικού μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>_T≥0,5 και <i>V</i>_W<4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.88: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού 221 μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>_T≥0,5 και <i>V</i>_W<4,5m/s, μέσω του λογισμικού Αnalyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική ανάλυση υπολοίπων για το "νέο" εμπειρικού μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>_T≥0,5 και <i>V</i>_W>4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. 	Διάγραμμα 5.86	Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i> _T ≥0,5 και <i>V</i> _W <4.5m/s, μέσω του λονισμικού Analyse-it.	218
 Διάγραμμα 5.88: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού 221 μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>_T≥0,5 και <i>V_W</i>>4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. Διάγραμμα 5.87: Γραφική ανάλυση υπολοίπων για το "νέο" εμπειρικού μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i>_T≥0,5 και <i>V_W</i>>4,5 m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it. 	Διάγραμμα 5.87:	Γραφική ανάλυση υπολοίπων για το "νέο" εμπειρικού μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i> ₇ ≥0,5 και V _w <4,5m/s, μέσω του λονισμικού Analyse-it.	219
Διάγραμμα 5.87: Γραφική ανάλυση υπολοίπων για το "νέο" εμπειρικού μοντέλο 222 πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i> _T ≥0,5 και <i>V_W</i> >4,5 m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it.	Διάγραμμα 5.88:	Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i> ₇ ≥0,5 και <i>V</i> _w >4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it.	221
	Διάγραμμα 5.87:	Γραφική ανάλυση υπολοίπων για το "νέο" εμπειρικού μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (<i>Tm</i>) υπό τους περιορισμούς <i>K</i> _T ≥0,5 και <i>V</i> _W >4,5 m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it.	222

<u>Κατάλογος Εικόνων</u>

Εικόνα 1.1:	Εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς (MWp) στην Ευρωπαϊκή Ένωση κατά το έτος 2012.	33
Εικόνα 2.1:	Δομή τυπικού φωτοβολταϊκού στοιχείου	39
Εικόνα 2.2:	Κατηγοριοποίηση των διαθέσιμων φωτοβολταϊκών στοιχείων	40
Εικόνα 2.3:	Γραφική απεικόνιση της δομής του υδρογονωμένου άμορφου πυριτίου (a-Si:H)	43
Εικόνα 2.4:	Γραφική απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης του φαινομένου Staebler- Wronski, σε δείγματα διαφορετικού τύπου φωτοβολταϊκών στοιχείων.	44
Εικόνα 2.5:	α)Σχηματική απεικόνιση της δομής ενός μικρόαμορφου (a-Si/μc-Si) φωτοβολταϊκού στοιχείου,(β) Η κβαντική απόδοση μικρόαμορφου (a- Si/μc-Si) φωτοβολταϊκού στοιχείου ως προς τα μήκη κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας (κίτρινη διακεκομμένη) και οι κβαντικές αποδόσεις των επιμέρους στρώσεων (μπλε για το άμορφο και κόκκινο για το μικροκρυσταλλικό).	45
Εικόνα 2.6:	Στάδια παραγωγής φωτοβολταϊκών πλαισίων λεπτών υμενίων με βάση το άμορφο πυρίτιο.	46
Εικόνα 2.7: Εικόνα 3.1:	Εγκαταστάσεις δοκιμών του Ινστιτούτου Fraunhofer. Η εξεταζόμενη πρότυπη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ονομαστικής ισχύος 2,18 kWp.	58 65

"Αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς πρότυπης Φωτοβολταϊκής 2014 εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης"

 Εικόνα 3.2: Δορυφορική Απεικόνιση της ευρύτερης τοποθεσίας εγκατάστασης. Εικόνα 3.3: Δορυφορική Απεικόνιση της τοποθεσίας εγκατάστασης. Εικόνα 3.4: Χάρτης ηλιακού δυναμικού της Ελλάδας. Εικόνα 3.5: Σχηματική απεικόνιση διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος. Εικόνα 3.6: Τεχνικό σχέδιο φωτοβολταϊκού πλαισίου SHARP NA-F121(G5). Εικόνα 3.7: Καμπύλες μεταβολής των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών φωτοβολταϊκού πλαισίου SHARP NA-F121(G5). Εικόνα 3.8: Αντιστροφέας SB2500. 						
Εικόνα 3.10:	Σχηματική απεικόνιση του τρόπου υπολογισμού της ελάχιστης απόσταση μεταξύ συστοιχιών για αποφυγή σκιάσεων βάσει εμπειρικού	79				
F	Ruvovu (u r 2, sii).					
Εικόνα 3.11: Μέρη της DC καλωδίωσης του φωτοβολταϊκού συστήματος.						
Εικόνα 3.12:	Ι ραφική απεικόνιση της διάταξης των αισθητήρων θερμοκρασίας στα φωτοβολταϊκά πλαίσια.	84				
Εικόνα 3.13:	Παράδεινμα ενκατεστημένου αισθητήρα θερμοκρασίας.	84				
Εικόνα 4.1:	Γεωμετοική σχέση Ηλίου-Γής.	87				
Εικόνα 4.2:	Γωνίες προσδιορισμού θέσης επιπέδου και ήλιου.	90				
Εικόνα 4.3:	Σινιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας	96				
Εικόνα 4.4:	Μεταβαλλόμενοι και μη μεταβαλλόμενοι παράγοντες που καθορίζουν την μέγιστη απόδοση στα φωτοβολταϊκά συστήματα.	104				
Εικόνα 4.5:	Γραφική απεικόνιση της ροής ενέργειας στα φωτοβολταϊκά συστήματα	105				
Εικόνα 4.6:	Αρχική σελίδα του PVGIS.	114				
Εικόνα 4.7:	Αρχική σελίδα του λονισμικού Sunny Desian.	115				
Εικόνα 4.8:	Αλγόριθμος λειτουργίας του λογισμικού RETScreen.	116				
Εικόνα 5.1:	Κοντινή άποιμη της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής αματοινίας	124				
Εικόνα 5.2	Βασικά στοιχεία ποοσομοίωσης με το λογισμικό PVGIS	153				
Εικόνα 5.3.	Δεδομένα προσομοίωσης με το λογισμικό Γυρου	159				
Εικόνα 5.4:	ικόνα 5.4: Φύλλο εκκίνησης του λογισμικού RETScreen 1					

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

1.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια, επικρατεί σε διεθνές επίπεδο, έντονος προβληματισμός για τις δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εκτεταμένη χρήση συμβατικών ορυκτών καυσίμων (γαιάνθρακες, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.λπ.), στο πλαίσιο της "εξέλιξης" των σύγχρονων κοινωνιών. Ταυτόχρονα, οι προβλέψεις για σημαντική αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού έως το 2040 (~9 δις) και οι σχετικά υψηλοί ρυθμοί οικονομικής - βιομηχανικής ανάπτυξης, ιδιαίτερα των χωρών της Ασίας (Κίνα, Ινδία), ορίζουν μια συνέχεια των αυξητικών τάσεων της καταναλισκόμενης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο (Διάγραμμα 1.1) και προκαλούν ανησυχία για την επάρκεια των ενεργειακών αποθεμάτων. Κατά συνέπεια, σήμερα, περισσότερο από ποτέ, προβάλλει ως επιτακτική η ανάγκη εφαρμογής ενός βιώσιμου ενεργειακού μοντέλου σε παγκόσμιο επίπεδο, υιοθετώντας νέες πολιτικές και οικονομικές στρατηγικές σύμφωνα με τις αρχές της αειφόρου ανάπτυξης.



Διάγραμμα 1.1: Η προβλεπόμενη εξέλιξη της κατανάλωσης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο κατά την περίοδο 2010 - 2040. [ΕΙΑ, 2013]

Ως εκ τούτου, η ενθάρρυνση της χρήσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), η εξοικονόμηση ενέργειας και η διαχείριση της ενεργειακής ζήτησης πρέπει να αποτελούν τους κεντρικούς άξονες μιας ολοκληρωμένης περιβαλλοντικής πολιτικής προς την κατεύθυνση της ενεργειακής ασφάλειας και αυτονομίας. Ιδιαίτερα, η ορθολογική αξιοποίηση των ΑΠΕ συνεπάγεται σημαντικά οικονομικά και κοινωνικά οφέλη, που εξασφαλίζονται μέσω της προστασίας του περιβάλλοντος και κατ' επέκταση της δημόσιας υγείας.

Μια από τις πλέον ενδιαφέρουσες επιλογές, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό, θεωρείται η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή της "ευγενούς" ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των κατάλληλων φωτοβολταϊκών διατάξεων. Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών είναι σχετικά νέα, καθώς εμφανίστηκε στα τέλη της δεκαετία του 1950, κυρίως ως τμήμα διαστημικών εφαρμογών, και τελευταία χρόνια καταγράφει ραγδαία ανάπτυξη διεθνώς. [Τσούτσος, 2008]

Στις μέρες μας, πραγματοποιείται σημαντική ερευνητική δραστηριότητα, η οποία εστιάζεται στη διερεύνηση ικανών τεχνικών αύξησης της αποδοτικότητας (διάγραμμα 1.2) με τη ταυτόχρονή μείωση του κόστους παραγωγής. Στα πλαίσια επίτευξης του στόχου αυτού, αναπτύσσονται νέοι τύποι ημιαγώγιμων υλικών, και εφαρμόζονται λιγότερο ενεργοβόρες διεργασίες κατά τη μαζική παραγωγή των φωτοβολταϊκών στοιχείων.



Διάγραμμα 1.2: Διαχρονική εξέλιξη της απόδοσης για διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων. [NREL, 2013]

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν συμβατικές ή άλλες ανανεώσιμες πηγές ενεργείας, τα βασικά από τα οποία είναι τα ακόλουθα :

- Χαρακτηρίζονται φιλικά προς το περιβάλλον. Με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας, που αποτελεί μια καθαρή, ελεύθερα διαθέσιμη και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού αντί της χρήσης συμβατικών καυσίμων, μειώνονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και άλλων βλαβερών ρύπων που απειλούν τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον.
- Προβλέπονται διαδικασίες ανακύκλωσης για φωτοβολταϊκά тα συστήματα μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους.
- Εμφανίζουν αθόρυβη, απλή και ασφαλή λειτουργία.
- Αποτελούν αξιόπιστη τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρισμού και έχουν σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής (πέραν των 25 χρόνων).
- Απαιτούν ελάχιστη συντήρηση, καθώς ο περιοδικός έλεγχος των καλωδίων και ο καθαρισμός των επιφανειών τους επαρκούν, ώστε να διασφαλιστεί η αποδοτική λειτουργική κατάσταση για πολλά χρόνια.
- Μπορεί να γίνει εύκολα η αποκατάσταση της λειτουργίας τους σε περίπτωση βλάβης, λόγω της σπονδυλωτής μορφής του συστήματος, όπως επίσης και επέκταση του συστήματος (με την προσθήκη νέων πλαισίων).
- Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε κτιριακές εφαρμογές, αξιοποιώντας τις ενεργειακά διαθέσιμες ελεύθερες επιφάνειες ή αντικαθιστώντας άλλα δομικά υλικά όπως πέργκολές, συστήματα σκίασης κ.λπ. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση το κόστος εγκατάστασης του συστήματος μπορεί να αυξηθεί με ταυτόχρονη μείωση της απόδοσής του, λόγω πιθανών περιορισμών της τοποθέτησης των πλαισίων με κλίση (π.χ. σε προσόψεις) που μειώνουν την απόδοση του συστήματος.
- Εμφανίζουν αντοχή σε ακραίες καιρικές συνθήκες.
- Συνδυάζονται εύκολα με άλλα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (υβριδικά συστήματα), ώστε να αναβαθμιστεί η διαθεσιμότητα των ΑΠΕ.
- Η παραγωγή ηλεκτρισμού ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ακολουθεί την εποχική ζήτηση, καθώς η παραγόμενη ενέργεια καταγράφεται μέγιστη την περίοδο κατά την οποία υπάρχει μεγάλη ζήτηση (κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες), συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στην εξομάλυνση των αιχμών φορτίου και στην αποφυγή τυχών διακοπών του ηλεκτρικού ρεύματος (black-out).
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μικρών τοπικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγονται οι απώλειες ενέργειας από τη μεταφορά και διανομή του ηλεκτρισμού και μειώνεται το κόστος για τη δημιουργία νέων γραμμών μεταφοράς

ηλεκτρικού ρεύματος σε περιοχές που δεν καλύπτονται από το υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρισμού.

- Η μέθοδος κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων θεωρείται σχετικά απλή, ενώ παράλληλα στη φύση εμφανίζεται αφθονία κατάλληλων πρώτων υλών.
- Παρέχουν την δυνατότητα αποδέσμευσης από τα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής (αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα).
- Εμφανίζουν μεγάλο εύρος εφαρμογών με ισχύ από μερικά Wp μέχρι μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εκατοντάδων MWp.

[Τσούτσος, 2008, Φραγιαδάκης, 2006 και ΜΠΕ φωτοβολταϊκού πάρκου, 2012]

1.2 Η παγκόσμια αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων

1.2.1 Η φωτοβολταϊκή ενέργεια σε διεθνές επίπεδο

Τελευταία, έχει παρατηρηθεί σε διεθνές επίπεδο, μια μεγάλη στροφή προς την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ως μέτρο αντιμετώπισης των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής. Σε αυτό το γενικότερο πλαίσιο ισορροπημένης ανάπτυξης, μια από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογικές επιλογές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελούν τα φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς συνδυάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα με ανταγωνιστικό κόστος εγκατάστασης (σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες ΑΠΕ) και συνεχόμενη τεχνολογική εξέλιξη προς την κατεύθυνση της περαιτέρω βελτιστοποίησης τούς. Η αξία και οι προοπτικές της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας έχουν αναγνωριστεί τόσο σε επίπεδο κυβερνήσεων, υιοθετώντας μέτρα, πολιτικές στήριξης και χρηματοδοτικούς μηχανισμούς, όσο και σε επίπεδο επενδυτικού κοινού, γεγονός που επικυρώνεται από τον αλματώδη ρυθμό ανάπτυξής της στην παγκόσμια αγορά.

Ειδικότερα, η αξιοποίηση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας έχει αυξηθεί σημαντικά κατά την τελευταία δεκαετία, παρά τις δύσκολες οικονομικές συνθήκες που επικρατούν, ενώ αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στο ενεργειακό μίγμα του μέλλοντος. Σύμφωνα με πρόσφατα στοιχεία από την ΕΡΙΑ, η παγκοσμίως εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων αυξήθηκε από 1.400,0 MWp το έτος 2000, σε 102.156,0 MWp στο τέλος του 2012 (διάγραμμα 1.3). Απ' αυτά, περίπου 70 GWp αφορούν σε εγκατεστημένη ισχύ στην Ευρώπη,~8,3 GWp στην Κίνα, ~7,8 GWp στις Η.Π.Α.,~6,9 GWp στην Ιαπωνία. Τέλος, η μεγαλύτερη αύξηση που σημειώθηκε το 2012, οφείλεται κυρίως στην ανάπτυξη της αγοράς της Γερμανίας και της Κίνας, και σε δεύτερο βαθμό των αγορών της Ιταλίας, των ΗΠΑ και της Ιαπωνίας. [ΕΡΙΑ, 2013].



ROW: Rest of the World. MEA: Middle East and Africa. APAC: Asia Pacific.

Διάγραμμα 1.3: Διαχρονική εξέλιξη της συνολικής εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος (MWp) κατά την περίοδο 2000 - 2012. [EPIA, 2013]



Εικόνα 1.1: Εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς (MWp) στην Ευρωπαϊκή Ένωση κατά το έτος 2012. [Eurobserver, 2013]



Source: EPIA, ESTELA, EWEA, Platts

Διάγραμμα 1.4: Εγκατεστημένη ισχύς ανά τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση κατά το 2012 (MW). [ΕΡΙΑ, 2013]

1.2.2 Η φωτοβολταϊκή ενέργεια στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων, σύμφωνα με τα νεότερα στοιχεία του 2013 (Σεπτέμβριος 2013), προσπέρασε το φράγμα των 2.500,0 MWp, με την νέα εγκατεστημένη ισχύ των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών, την περίοδο Ιανουαρίου - Σεπτεμβρίου 2013, να προσεγγίζει τα 1.000,0 MWp. Το παραπάνω γεγονός, θεωρείται αξιοσημείωτο, δεδομένης της δυσκολίας χρηματοδότησης τη συγκεκριμένη περίοδο και των περιοριστικών συνθηκών που επικρατούν εν μέσω κρίσης, ωστόσο οφείλεται κυρίως σε νομοθετικές ρυθμίσεις απλοποίησης των διαδικασιών εγκατάστασης ήδη αδειοδοτημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων/πάρκων. [ΕΡΙΑ, 2013]

Διασυνδεδεμένα συστήματα	MWp
Νέα εγκατεστημένη ισχύς διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών την περίοδο Ιαν-Σεπ	2013 987,2
Συνολική εγκατεστη μένη ισχύς φωτοβολταϊκών ως και τον Σεπτέμβριο του 2013	2.523,5

Διασυνδεδεμένα συστήματα ανά κατηγορία	Στέγες <10 kWp	<20 kWp	20-150 kWp	150 kWp-2 MWp	>2 MWp
Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (MWp)	366,8	65	916,3	839,9	335,5

Πίνακας 1.1: Εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς στην Ελλάδα ως και τον Σεπτέμβριο του 2013. [Helapco, 2013]



Διάγραμμα 1.5 : Η εξέλιξη της ελληνικής αγοράς φωτοβολταϊκών συστημάτων (αυτόνομα και συνδεδεμένα) κατά τη διάρκεια της περιόδου 2007 - 2013. [Helapco, 2013]



Διάγραμμα 1.6: Κατανομή των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων ανά ισχύ στην Ελλάδα ως και τον Σεπτέμβριο του 2013. [Helapco, 2013]

1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Οι δύο κυριότερες παράμετροι που επηρεάζουν την παραγόμενη ενέργεια από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο/πλαίσιο/σύστημα/πάρκο είναι η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία. Ειδικότερα, καθώς η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει σχεδόν ανάλογη επίδραση στο ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, η τάση ανοιχτού κυκλώματος αυξάνεται ελαφρά με την αύξηση της ακτινοβολίας. Αποτέλεσμα των παραπάνω, είναι η σχεδόν αναλογική σχέση ανάμεσα στην ισχύ του στοιχείου και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, υπό σταθερές θερμοκρασίες. Αντιθέτως, η θερμοκρασία επιδρά κυρίως στην τάση του. Πιο συγκεκριμένα, με μείωση της θερμοκρασίας, αυξάνεται σημαντικά η τάση ανοιχτού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται ελαφρά. Συνολικά, η ισχύς ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος.

Άλλοι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι οι εξής:

- Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου: Σχετίζονται άμεσα με τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών. Οι μεγαλύτερες ταχύτητες συνεπάγονται χαμηλότερες θερμοκρασίες, οι βόρειοι άνεμοι επίσης συνεπάγονται χαμηλότερες θερμοκρασίες, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με τους νότιους.
- Ρύπανση: Επηρεάζει την απόδοση των φωτοβολταϊκών λόγω της επικάθισης διαφόρων ακαθαρσιών (σκόνη, φύλλα, κλπ.) στις επιφάνειες των πάνελ. Για αυτόν τον λόγο απαιτείται περιοδικός καθαρισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Σκίαση: Η σκίαση δημιουργείται συνήθως από την παρουσία φυσικών εμποδίων (δένδρα, στύλοι, κλπ.), από παροδικά (και μάλλον στοχαστικού χαρακτήρα) φαινόμενα (π.χ. σύννεφα) ή από περιορισμένη έκταση εγκατάστασης. Οι επιπτώσεις της σκίασης μπορεί να είναι σημαντικές, για τον λόγο αυτόν είναι αναγκαίος ο λεπτομερής προσδιορισμός των απωλειών που προκαλούν.
- Γήρανση: Αναμένεται ότι με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται φθορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων ενός φωτοβολταϊκών συστήματος, η οποία οδηγεί σε μια πτώση της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος που υπολογίζεται σε περίπου 1% ετησίως.
- Ηλεκτρικές απώλειες του φωτοβολταϊκών συστήματος: Είναι οι ηλεκτρικές απώλειες στους αγωγούς των διαφόρων συνδέσεων, καθώς και οι συνδέσεις με άλλα μέρη του συστήματος. Οι απώλειες αυτές μπορεί να φθάσουν σε ποσοστό περίπου 30% ή και περισσότερο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Απώλειες ανομοιομορφίας φωτοβολταϊκών στοιχείων: Όταν πλαίσια με διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά συνδεθούν μεταξύ τους σε σειρά υπάρχουν απώλειες ανομοιομορφίας. Αντίθετα, στη παράλληλη σύνδεση των πλαισίων, οι απώλειες είναι περιορισμένες. Επίσης, έρευνες έχουν δείξει ότι οι απώλειες ανομοιομορφίας αυξάνονται όσο μειώνεται η ένταση της ακτινοβολίας.
- Απώλειες, λόγω της γωνίας πρόσπτωσης: Πρόκειται για οπτικές απώλειες οι οποίες είναι απόρροια των νόμων Fresnel που καθορίζουν τις σχέσεις μεταξύ των γωνιών πρόσπτωσης, ανάκλασης και διάθλασης μεταξύ διαφορετικών μέσων. Στα φωτοβολταϊκά πλαίσια οι νόμοι αυτοί αφορούν στη μετάδοση και την ανάκλαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο προστατευτικό στρώμα και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

[Φραγκιαδάκης, 2006 και Κεκάτος, 2012]

1.4 Αντικείμενο-Σκοπός της μελέτης

Η ευρωπαϊκή αγορά φωτοβολταϊκών γνωρίζει αλματώδη ανάπτυξη, και σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του κλάδου, αναμένεται να συνεχίσει να αναπτύσσεται με υψηλούς ρυθμούς. Η τάση αυτή ενισχύεται τόσο από την γενικότερη ευρωπαϊκή πολιτική, όσο και από το θετικό νομοθετικό πλαίσιο που έχουν ενσωματώσει στο εθνικό τους δίκαιο τα περισσότερα Κράτη - Μέλη. Ειδικότερα, στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου (Ελλάδα, Ιταλία, Κύπρος, κλπ.), η οποία διαθέτει ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό, παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, αυξημένη ένταση στη δημιουργία νέων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, παρά τις συνθήκες οικονομικής κρίσης που επικρατούν. Ωστόσο, απαραίτητη προϋπόθεση, για να θωρακιστεί το ευνοϊκό περιβάλλον ανάπτυξης της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας στην περιοχή, είναι η διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ποιότητας στα βασικά στάδια του κύκλου ζωής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ή πάρκου (σχεδίαση - εγκατάσταση - λειτουργία ανακύκλωση), μέσω κατάλληλων διαδικασιών επίβλεψης. Συγκεκριμένα, σημαντική, για τον εντοπισμό πιθανών αστοχιών, και κατ' επέκταση, τη σταθερή ενεργειακή απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ή πάρκου, θεωρείται η παρακολούθηση κατά τη φάση λειτουργίας του. Ενώ, καθίσταται σαφές ότι οι διαδικασίες επιτήρησης δύνανται να παρέχουν σημαντικά στοιχεία για τη θετική εξελεγκτική πορεία του τομέα, καθώς συμβάλλουν καθοριστικά στην διαμόρφωση σημείων αναφοράς.

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, μελετήθηκε η περίπτωση ενός πρότυπου φωτοβολταϊκού συστήματος 2,18 kWp, εγκατεστημένου στους χώρους του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ειδικότερα, διερευνήθηκαν οι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα και την απόδοση του συστήματος κατά την πρώτη φάση λειτουργιάς του, όπως ορίζονται από τα διεθνή πρότυπα και πρακτικές. Έμφαση δόθηκε στην επίδραση των συνθηκών υψηλής

θερμοκρασίας που εμφανίζονται κυρίως τους θερινούς μήνες, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό, για την περαιτέρω ανάπτυξη της αγοράς των φωτοβολταϊκών στην ευρύτερη περιοχή. Συνοπτικά, τα κύρια ζητήματα που αποτέλεσαν αντικείμενο διερεύνησης, ήταν:

- Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες με τυχαίο προσανατολισμό (γ≠0).
- Η ενεργειακή ανάλυση και η ανάλυση αποδοτικότητας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.
- Η κατανόηση του μηχανισμού των ενεργειακών απωλειών.
- Ο προσδιορισμός του βαθμού και του τρόπου επίδρασης των υψηλών τιμών θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.
- Ο έλεγχος της ακρίβειας των προβλέψεων από διαθέσιμα λογισμικά πακέτα προσομοίωσης.
- Η αξιολόγηση της εμπειρικών μοντέλων υπολογισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων του συστήματος.
- Η κατανόηση των μεταβολών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, σε συνθήκες πεδίου.
- Η ανάπτυξη "νέου" εμπειρικού μοντέλου ειδικής προσαρμογής για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν, δύνανται να παρέχουν, ασφαλείς πληροφορίες για τις βελτιώσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη δημιουργία μικρής και μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεων στις χώρες της Μεσογείου, στη Βόρεια Αφρική και τη Μέση Ανατολή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

2.1 Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία

2.1.1 Αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αποτελεί τη βασική φυσική διαδικασία μέσω της οποίας τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (ή ηλιακά κύτταρα ή κυψέλες) μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα ηλιακά κύτταρα είναι δίοδοι ημιαγωγού με ένωση τύπου p-n, οι οποίες έχουν επίπεδη μορφή και δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια, τα οποία περικλείουν διαφορετικά ποσά ενέργειας, ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος. Όταν τα φωτόνια προσπίπτουν στη επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορεί να ανακλαστούν, να απορροφηθούν ή απλά να διαπεράσουν το στοιχείο αυτό. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο.



Εικόνα 2.1: Δομή τυπικού φωτοβολταϊκού στοιχείου. [Φραγκιαδάκης, 2006]

Έτσι, κατά το διάστημα ακτινοβόλησης, δημιουργείται μία περίσσεια από ζεύγη φορέων ελεύθερων ηλεκτρονίων-οπών, πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς διαχέονται στο στερεό και, εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντιθέτου πρόσημου, μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της επαφής p-n, οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού της πεδίου. Εξαιτίας αυτού, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η εμφάνιση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην

πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. [Τσοτσολή και Μυλωνάς, 2011]

2.1.2 Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το Πυρίτιο (Si) θεωρείται ένα από τα πιο διαδεδομένα στοιχεία στη φύση, καθώς αποτελεί περίπου το 28% του στερεού φλοιού της Γής, με τη μορφή διαφόρων ενώσεων του. Λογική συνέπεια της υψηλής διαθεσιμότητας του, αποτελεί η ευρύτατη χρησιμοποίηση του στην βιομηχανία παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων. Άλλα βασικά υλικά για την δημιουργία ηλιακών κυττάρων είναι ο Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CIS),το Τελουριούχο κάδμιο (CdTe), το Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs) κ.α.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες, τα φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου (crystalline silicon) και τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων (Thin film). Οι παραπάνω κατηγοριοποιήσεις γίνονται με βάση το υλικό και τον τρόπο παρασκευής τους, καθώς επίσης και τη δομή του βασικού υλικού. Επίσης, υπάρχει και ακόμη μία κατηγορία στην οποία ανήκουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που αποτελούνται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών και ονομάζονται πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά (HIT, Heterojunction with intrinsic thin-layer). [Φραγκιαδακης, 2006]



Εικόνα 2.2: Κατηγοριοποίηση των διαθέσιμων φωτοβολταϊκών στοιχείων [prizmasolar, 2013]

τίου Κρήτης"	201

	Αποδοτικότητα Αποδοτικότητα φωτοβολταϊκού φωτοβολταϊκού στοιχείου (n _c) πλαισίου (n _m)		Υψηλότερη επιτευχθείσα αποδοτικότητα (εργαστηριακά)	Επιφάνεια/kW	Χρόνος ζωής
		%		m²/kW	yr
Crystalline Silicon					
Mono-c-Si	16-22	13-19	22 (24,7)	7	25
Multi-c-Si	14-18	11-15	20,3	8	25
Thin Film					
a-Si	4-8	5	7,1(10,4)	15	25
a-Si/µc-Si	7-9		10(10,4)	15	25
CdTe	10-1	1	11,2(16,5)	10	25
CI(G)S	7-12	2	12,1(20,3)	10	25
Org.Dyes	2-4	ŀ	4(6-12)	10(15)	-
Concentrating Photovoltaics	-	20-25	>40	-	-

Πίνακας 2.1: Ενδεικτικές αποδόσεις των εμπορικά διαθέσιμων φωτοβολταϊκών κύτταρων/πλαισίων. [IRENA, 2013]

2.1.2.1 Η Τεχνολογία Λεπτών Υμενίων (Thin Film)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τεχνολογίας λεπτών υμενίων δημιουργούνται όταν τα ημιαγώγιμα υλικά ενσωματώνονται σαν λεπτή μεμβράνη πάνω σε ένα χαμηλού κόστους υπόστρωμα (γυαλί, πλαστικό ή αλουμίνιο). Στην διεθνή βιβλιογραφία απαντώνται δεκάδες τεχνικές διεργασίες για την επίτευξη της προαναφερθείσας ενσωμάτωσης, οι οποίες βασίζονται κυρίως σε φυσικοχημικές μεθόδους. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες εξ αυτών, όπως είναι η χημική εναπόθεση ατμών, εξάτμιση υπό κενό, διεργασίες ψεκασμού, τεχνικές εναπόθεσης (Krishna,2003). ενισχυμένες Jμ πλάσμα κλπ. Тα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα ημιαγώγιμα υλικά είναι το άμορφο πυρίτιο (a-Si), o δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CIS) και το τελουριούχο κάδμιο (CdTe). Σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των υλικών είναι η υψηλή απορροφητικότητα που παρουσιάζουν ακόμη και σε στρωματική διαμόρφωση πάχους μικρότερου του ενός μικρομέτρου (≤1 μm), με αποτέλεσμα την ικανοποιητική μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας. Τέλος, η χαμηλότερη κατανάλωση πρώτης ύλης και ενέργειας, σε συνδυασμό με την ικανότητα αυτοματοποιημένης παραγωγής καθιστούν την τεχνολογία λεπτών υμενίων συμφέρουσα από άποψη κόστους σε σχέση με τη συμβατική τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου. [DGS, 2008 και IRENA, 2013]

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό διαφοροποίησης των φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτών υμενίων από τα κρυσταλλικά αποτελεί ο τρόπος διασύνδεσης τους. Ενώ τα κρυσταλλικά συνδέονται ανά κύτταρο με εξωτερικούς ακροδέκτες, η ηλεκτρική σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτών υμενίων είναι αναπόσπαστο κομμάτι της κατασκευής τους, και γίνεται μονολιθικά κατά την εναπόθεση τους στο υπόστρωμα. Τα κύτταρα κόβονται σε λωρίδες πλάτους 0,5 cm έως 2 cm και μεγάλου μήκους, που μπορεί να ξεπερνά το 1 m, με ταυτόχρονο ηλεκτρικό διαχωρισμό από τις λεπτές αυλακώσεις που δημιουργούνται μεταξύ των κυττάρων. Το πλάτος των αυλακώσεων καθορίζει την απόδοση και συνάμα το βαθμό διαφάνειας του πλαισίου, και προσδιορίζεται ανάλογα την εφαρμογή. [Γεωργούλας,2013]

Η ηλεκτρική επαφή του στοιχείου επιτυγχάνεται στο πίσω μέρος με ένα αδιαφανές επίστρωμα μετάλλων. Στην εμπρόσθια πλευρά, όπου προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία, τοποθετείται ένα ιδιαίτερα διαφανές αγώγιμο στρώμα οξειδίων (transparent conductive oxide, TCO). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο αγώγιμο στρώμα οξειδίων είναι το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO), οξείδιο του κασσιτέρου (SnO₂) και το οξείδιο του κασσιτέρου-ινδίου (ITO). Το τελικό προϊόν προστατεύεται από τους ατμοσφαιρικούς παράγοντες (σκόνη, ρύποι, νερό) μέσω της ενθυλάκωσης των στοιχείων με τη χρήση πολυμερούς υλικού τύπου EVA πάνω στο οποίο τοποθετείται τμήμα γυαλιού. [IRENA,2013]

Στην τεχνολογία λεπτών υμενίων ο όρος στοιχείο και πλαίσιο πρέπει να συμπληρωθεί από τον όρο, στοιχειοσειρά (cell string). Τα στοιχεία συνίστανται ουσιαστικά σε λωρίδες ημιαγώγιμου υλικού στην επιφάνεια υποστρώματος. Με το όρο στοιχειοσειρά περιγράφουμε τα επικαλυμμένα στρώματα γυαλιού (ή αλουμινίου ή πλαστικού) από τις πολλαπλές λωρίδες συνδεδεμένων σε σειρά στοιχείων.

Τέλος, τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τεχνολογίας λεπτών υμενίων σε σχέση με άλλες τεχνολογίες είναι:

- Η ικανότητα αξιοποίησης της διάχυτης ακτινοβολίας
- Η δυνατότητα τους να λειτουργούν αποδοτικά σε υψηλές θερμοκρασίες, λόγω της χαμηλής τιμής θερμοκρασιακού συντελεστή, τον οποίο εμφανίζουν.
- Η μικρή ευαισθησία που παρουσιάζουν σε συνθήκες σκίασης λόγω της μορφής κυττάρων τους (στοιχειοσειρές)

[Γεωργούλας, 2013]

2.1.2.2 Άμορφο υδρογονωμένο πυρίτιο (a-Si:Η)

Το άμορφο υδρογονωμένο πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός η δομή του οποίου παρουσιάζει υψηλή αταξία. Οι οπτοηλεκτρονικές του ιδιότητες εξαρτώνται από το μεγάλο αριθμό ατελειών της δομής του. Οι ομοιοπολικοί δεσμοί μεταξύ των ατόμων του πυριτίου είναι παρόμοιοι με τους δεσμούς του κρυσταλλικού πυριτίου. Τα άτομα του πυριτίου έχουν τον ίδιο αριθμό γειτονικών ατόμων και κατά μέσο όρο το ίδιο μήκος και γωνία δεσμού. Συγκεκριμένα τα άτομα Si είναι τοποθετημένα στις κορυφές ενός τετράεδρου και το μέσο μήκος δεσμού Si-Si είναι 2,35 Å ενώ οι γωνίες δεσμών αποκλίνουν από την τιμή των 109,5°, για την τετραεδρική δομή. Εξαιτίας της τάξης μικρής εμβέλειας που παρουσιάζει (<3nm), οι ιδιότητες του είναι παρόμοιες με αυτές του κρυσταλλικού πυριτίου.



Εικόνα 2.3: Γραφική απεικόνιση της δομής του υδρογονωμένου άμορφου πυριτίου (a-Si:H). [Παπαδάκης, 2010]

Στο a-Si:Η η κυριότερη ατέλεια στο πλέγμα είναι τα άτομα του πυριτίου που είναι ενωμένα με τρία αντί για τέσσερα άτομα. Έτσι στο άτομο του πυριτίου παραμένει ένα αδέσμευτο ηλεκτρόνιο σε ένα αντιδεσμικό τροχιακό, υπάρχει δηλαδή ένας αιωρούμενος δεσμός στο πλέγμα (dangling bond). Το καθαρό άμορφο πυρίτιο έχει πυκνότητα ατελειών της τάξης του 10²⁰ cm⁻³ (ένας ελεύθερος δεσμός για κάθε ~500 άτομα πυριτίου). Με την προσθήκη του υδρογόνου αδρανοποιούνται οι ελεύθεροι δεσμοί, καθώς τα άτομα υδρογόνου συνδέονται με αυτούς. Λεπτά υμένια a-Si:Η τα οποία περιέχουν ~10% υδρογόνου στο πλέγμα παρουσιάζουν μια πυκνότητα ατελειών ελαττωμένη κατά τέσσερις ή πέντε τάξεις μεγέθους.

Το άμορφο πυρίτιο εμφανίσθηκε πρώτη φορά στα μέσα της δεκαετίας του 70 και αποτέλεσε την υλική βάση για το πρώτο φωτοβολταϊκό κελί λεπτών υμενίων που παρασκευάσθηκε σε μεγάλη κλίμακα. Απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία 40 φορές πιο αποτελεσματικά απ' ότι ένας μονοκρύσταλλος πυριτίου στην περιοχή του ορατού φάσματος και συνεπώς απαιτείται πολύ μικρότερο πάχος υλικού (~1μm) για την παρασκευή ενός φωτοβολταϊκού κελιού. Αυτός είναι ένας από τους κυριότερους λόγους για την ανάπτυξη της βιομηχανίας των λεπτών υμενίων τις τελευταίες δεκαετίες, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Τα κυριότερα μειονεκτήματά του είναι, ο χαμηλός βαθμός αποδοτικότητας που κυμαίνεται μεταξύ 6-9% για στοιχεία του εμπορικής κλίμακας και η βαθμιαία μείωση του (έως και 30%) κατά την έκθεση τους στο φώς (φαινόμενο Staebler-Wronski). [Κατσιά, 2006]

2.1.2.3 Το Φαινόμενο Staebler-Wronski

Το φαινόμενο Staebler-Wronski αναφέρεται στις μετασταθείς μεταβολές των ιδιοτήτων του άμορφου υδρογονωμένου πυριτίου (a-Si:H) που προκαλούνται, λόγω ακτινοβολίας. Ειδικότερα, η πυκνότητα των ατελειών του άμορφου υδρογονωμένου πυριτίου (a-Si:H) αυξάνεται, διότι η ακτινοβολία παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για την απομάκρυνση του υδρογόνου από τους δεσμούς. Άμεση συνέπεια είναι η αύξηση του ρεύματος επανασύνδεσης που οδηγεί σε μείωση της απόδοσης των κυττάρων άμορφου πυριτίου.[Wikipedia,2013]

Το 1977, οι μελετητές Staebler και Wronski παρατήρησαν ότι η αγωγιμότητα σκότους (dark conductivity) και η φωτοαγωγιμότητα (photoconductivity) του άμορφου υδρογονωμένου πυριτίου (a-Si:H), μειώνονταν σημαντικά, έπειτα από παρατεταμένη έκθεση στο φώς. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι η θέρμανση των ελεγχόμενων δειγμάτων σε υψηλές θερμοκρασίες (≥150°C), αναστέλλει την επίδραση του φαινομένου. [Kolodziej, 2004]

Πρακτικά, η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου άμορφου πυριτίου (a-Si), μειώνεται σημαντικά μετά τους πρώτους μήνες λειτουργίας του, πριν σταθεροποιηθεί στην τελική τιμή της. Συγκεκριμένα, κατά τις πρώτες 1000 ώρες ακτινοβόλησης, ένα στοιχείο a-Si μιας επίστρωσης (single-junction) χάνει περίπου το 30% της αρχικής του απόδοσης, ενώ ένα στοιχείο τριών επιστρώσεων διαφορετικών υλικών (triple-junction), το 15%. Μια ακόμη ιδιαιτερότητα που εμφανίζουν τα στοιχεία αυτής της τεχνολογίας είναι η μειωμένη απόδοση στη διάρκεια του χειμώνα, η οποία όμως επανέρχεται θερινούς μήνες λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως θερμική αναγέννηση. [Γεωργούλας, 2013]



Εικόνα 2.4: Γραφική απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης του φαινομένου Staebler-Wronski, σε δείγματα διαφορετικού τύπου φωτοβολταϊκών στοιχείων. [Γεωργούλας, 2013]

Η κατανόηση του φαινομένου Staebler–Wronki θα μπορούσε να οδηγήσει σε πλήρη εξάλειψή του, η οποία ωστόσο δεν έχει καταστεί ακόμη δυνατή. Μια από τις κυριότερες τεχνικές μετριασμού της εμφάνισης του φαινομένου, αποτελεί η εναπόθεση των στοιχείων άμορφου πυριτίου (a-Si) σε πολλαπλές δομές p-i-n (στρωματική διαμόρφωση), σχηματίζοντας έτσι πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά

κύτταρα. Τα tandem κύτταρα αποτελούνται από δύο τέτοιες επιστρώσεις και τα triple-junction από τρεις. Η εν λόγω δομή επιτρέπει να επιτυγχάνονται υψηλότερες αποδόσεις, δεδομένου ότι κάθε υποστοιχείο μπορεί να αντιστοιχηθεί ένα συγκεκριμένο εύρος σε TOU ηλιακού φάσματος χρησιμοποιώντας στοιχεία διαφορετικού ενεργειακού διακένου, ενώ η παρατηρούμενη υποβάθμιση λόγω ακτινοβολίας (Staebler-Wronski) είναι αισθητά μικρότερη. [Γεωργούλας, 2013]

2.1.2.4 Φωτοβολταϊκά στοιχεία μικροκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου (a-Si/μc-Si)

Η δημιουργία των μικροκρυσταλλικών και άμορφων φωτοβολταϊκών στοιχείων πραγματοποιείται κατά τρόπο αντίστοιχο με την τεχνολογία λεπτών υμενίων. Η εναπόθεση γίνεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 200°C και 600°C και παράγονται λεπτές μεμβράνες άμορφου πυριτίου με μικροκρυσταλλικές δομές. Οι χαμηλές θερμοκρασίες επιτρέπουν τη χρήση φθηνών υποστρωμάτων κατασκευασμένα από γυαλί, μέταλλο ή πλαστικό. Προκειμένου να δημιουργηθούν στρώματα κρυσταλλικού πυριτίου πάχους μικρότερου των 10nm, που παρά τη χαμηλή ικανότητα απορρόφησής τους να είναι αποδοτικά, η επιφάνεια του διαφανούς αγώγιμου υλικού (Transparent Conductive Oxide, TCO) διαμορφώνεται ανάγλυφα, ώστε να βελτιστοποιηθεί η δέσμευση της προσπίπτουσας με τα κρυσταλλικά και οι αποδόσεις τους ξεπερνούν το 8,5%.



Εικόνα 2.5: α)Σχηματική απεικόνιση της δομής ενός μικρόαμορφου (a-Si/μc-Si) φωτοβολταϊκού στοιχείου,β) Η κβαντική απόδοση μικρόαμορφου (a-Si/μc-Si) φωτοβολταϊκού στοιχείου ως προς τα μήκη κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας (κίτρινη διακεκομμένη) και οι κβαντικές αποδόσεις των επιμέρους στρώσεων (μπλε για το άμορφο και κόκκινο για το μικροκρυσταλλικό). [α) Minemoto et al., 2007, β) Kroll, 2009].

Καλύτερα αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν με συνδυασμό άμορφου πυριτίου σε κύτταρα δύο στρωμάτων (tandem). Αυτά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ονομάζονται μικροάμορφα, όρος προερχόμενος από λέξεις τiς μικροκρυσταλλικό και άμορφο. Όταν συνδυάζονται, αξιοποιούν αποδοτικότερα το ηλιακό φάσμα από ότι μπορούν ως μεμονωμένα στοιχεία, καθώς απορροφούν ακτινοβολία ευρύτερου ηλιακού φάσματος, ενώ παράλληλα ηπιότερη υποβάθμιση (φαινόμενο Staebler-Wronski) υφίστανται από ακτινοβόληση, σε αντίθεση με τα καθαρά άμορφα στοιχεία. Η απόδοση εμπορικών πλαισίων αγγίζει το 9%, ενώ η μέγιστη απόδοση που έχει επιτευχθεί είναι 12%. [DGS,2008 και Γεωργούλας, 2013]



Εικόνα 2.6: Στάδια παραγωγής φωτοβολταϊκών πλαισίων λεπτών υμενίων με βάση το άμορφο πυρίτιο. [Renewable energy world, 2013]

2.2 Ανάλυση της απόδοσης των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Τα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία ελέγχονται σε ένα εργαστηριακά κατασκευασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο καθώς επίσης και στο τελικά διατιθέμενο προϊόν (φωτοβολταϊκό πλαίσιο) είναι η ενεργειακή απόδοση, ο παράγων πλήρωσης, το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτού κυκλώματος σε συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού (πυκνότητα ισχύος και φάσμα προσπίπτουσας ακτινοβολίας) και θερμοκρασίας του στοιχείου. Η γνώση των χαρακτηριστικών αυτών μεγεθών επιτρέπει τον έλεγχο της αποδοτικότητας του φωτοβολταϊκού στοιχείου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες καταστάσεις εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Για το σκοπό αυτό, έχουν θεσπιστεί πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πλαισίου (Standard Test Conditions, STC).

Οι πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC) είναι:

- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πυκνότητας ισχύος 1 kW/m² και ηλιακού φάσματος AM1,5.
- Θερμοκρασία φωτοβολταϊκού στοιχείου 25±2°C.

[Φραγκιαδάκης, 2006]

Στη πράξη, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία/ πλαίσια/ συστήματα σπάνια λειτουργούν υπό πρότυπες συνθήκες. Κατά συνέπεια, τα χαρακτηριστικά μεγέθη για την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος που αναφέρονται στα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών, δεν επαρκούν για την πρόβλεψη και την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας του. Ως εκ τούτου, οι διαδικασίες παρακολούθησης και ανάλυσης των κατάλληλων παραμέτρων απόδοσης κρίνονται απαραίτητες για την ρεαλιστική αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός φωτοβολταϊκού συστήματος και την διαμόρφωση των ανάλογων σημείων αναφοράς. [Makrides et al., 2012]

Η παρακολούθηση της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος δύναται να παρέχει σημαντικά στοιχεία για:

- την απόδοση των επί μέρους συνιστωσών του συστήματος.
- την ενεργειακή συμπεριφορά του.
- την αξιοπιστία και τις αιτίες των αποτυχιών του συστήματος.
- την εγκυρότητα των θεωρητικών μοντέλων που χρησιμοποιούν δεδομένα πειραματικών μετρήσεων.
- την τάση της ενεργειακής απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος, μακροπρόθεσμα.

[Tripathy et al.,1993]

Η επιστημονική κοινότητα και οι εμπλεκόμενοι φορείς της παγκόσμιας αγοράς φωτοβολταϊκών, αντιλαμβανόμενοι τη σημασία της παρακολούθησης των συστημάτων στις συνθήκες λειτουργίας του πεδίου εφαρμογής των, ξεκίνησαν να αναπτύσσουν σχετικά ερευνητικά προγράμματα και να διεξάγουν αντίστοιχες μελέτες ώστε οι πληροφορίες που προκύπτουν να συμβάλλουν στην θετική πορεία της παραγωγικής διαδικασίας των φωτοβολταϊκών εξελικτική εφαρμογών. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί το πρόγραμμα PVPS της διεθνούς επιτροπής ενέργειας (International Energy Agency, IEA), στο οποίο έχει οριστεί ειδική ενότητα (task 13) για την απόδοση, την αξιοπιστία και την ανάλυση της γενικής συμπεριφοράς των φωτοβολταϊκών συστημάτων υπό πραγματικές συνθήκες στις συμμετέχουσες χώρες. Επιπλέον, βασική δραστηριότητα του προγράμματος είναι η διάδοση των πληροφοριών που προκύπτουν από τις αναλύσεις των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων. [IEA, 2012]

Επίσης, στο διεθνές πρότυπο IEC 61724 έχουν καθοριστεί οι κατευθυντήριες γραμμές για την παρακολούθηση και τη ανάλυση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ειδικότερα, οι κύριες εξεταζόμενες παράμετροι είναι:

- περιβαλλοντικές παράμετροι
 (θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου)
- τελική ενεργειακή απόδοση-final yield (Y_F)
- ενεργειακή απόδοση αναφοράς-reference yield (Y_R)
- ενεργειακή απόδοση συστοιχίας-array yield (Y_A)
- λόγος απόδοσης-performance ratio (PR)
- απώλειες σύλληψης συστοιχίας-Array capture losses (L_C)
- απώλειες συστήματος-system losses (Ls)
- αποδοτικότητα συστήματος-system efficiency (*n_{syst}*)
 [IEC 61724,1998]

Στο πλαίσιο της διαδικασίας διερεύνησης του βασικού αντικειμένου της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, παρουσιάζεται ένας σημαντικός αριθμός συναφών μελετών που εμφανίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Η περιοχή της Κρήτης διαθέτει ιδιαίτερα ευνοϊκές συνθήκες για την δημιουργία φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων (Fantidis et al., 2013), σύμφωνα με τα στοιχεία που προκύπτουν από μελέτη αξιολόγησης της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πάρκου στην περιοχή. Το συγκεκριμένο πάρκο, μέγιστης ισχύος 171,36 kWp, βρίσκεται στην περιοχή της Σητείας και έχει τεθεί σε λειτουργία από το 2002. Έπειτα από την παρακολούθησή του για χρονικό διάστημα ενός έτους, με καταγεγραμμένες μετρήσεις ανά 10 min, υπολογίστηκαν οι παράμετροι που αφορούν την απόδοση και τις απώλειες. Συγκεκριμένα, το φωτοβολταϊκό πάρκο τροφοδότησε το δίκτυο με 229,0 MWh κατά τη διάρκεια του έτους 2007, με τη μηνιαία μέση ημερήσια παραγωγή ενέργειας να κυμαίνεται από 335,48 kWh

έως 869,68 kWh, ενώ η ετήσια συνολική παραγωγή ενέργειας ($E_{AG,y}$) υπολογίστηκε ίση 1.336,4 kWh/kWp. Η μηνιαία μέση ημερήσια τελική απόδοση ($Y_{F,m}$) κυμαίνονταν από 1,96 h/d τον Δεκέμβριο έως 5,07 h/d τον Ιούλιο ενώ ο αντίστοιχος λόγος απόδοσης (*PR*) από 58% έως 73%, δίνοντας μέση ετήσια τιμή της τάξεως του 67,36%. [Kymakis et al., 2009]

Οι Cardona και López, ανέλυσαν την απόδοση ενός μικρότερου (2 kWp) διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος, που βρίσκεται εγκατεστημένο στο Πανεπιστήμιο της Μάλαγα (Ισπανία), για το χρονικό διάστημα μεταξύ του Ιανουαρίου και Δεκεμβρίου 1997. Η ετήσια συνολική παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού συστήματος ($E_{AC,y}$) ήταν 2.678,0 kWh, με μέση ημερήσια τιμή 7,4 kWh. Η ανάλογη κανονικοποιημένη τιμή της συνολικής ετήσιας παραγωγής ενέργειας ($E_{AC,y}$) ήταν 1.361,0 kWh/kWp, ενώ η ετήσια μέση ημερήσια τελική απόδοση του συστήματος ($Y_{F,y}$) σημειώθηκε 3,7 h/d. Η ετήσια μέση τιμή του λόγου απόδοσης (PR_{y}) ορίστηκε σε ποσοστό 64,5% και η μηνιαία μέση αποδοτικότητα του συστήματος (n_{system}) παρουσιάστηκε μεταξύ 6,1-8,0%. [Cardona και López, 1999]

Για περίπου τέσσερα χρόνια, οι ερευνητές του Πανεπιστημίου του Jaen (Ισπανία), στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος Univer Project, μελέτησαν τη λειτουργική απόδοση ενός ενσωματωμένου στις κτιριακές εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκού συστήματος (BIPV). Το σύστημα έχει συνολική ισχύ 200 kWp και αποτελείται από τέσσερα (4) μικρότερα υποσυστήματα. Από τα αποτελέσματα που σημειώθηκαν, διαφάνηκε ότι τα υποσυστήματα 1(70kWp) και 3 (20kWp) εμφάνισαν καλή συμπεριφορά (PR_y = 65%), ενώ στα υποσυστήματα 2 (70kWp) και 4 (40kWp), αναφέρθηκαν προβλήματα που οδήγησαν σε μειωμένους λόγους απόδοσης (PR_y), της τάξεως του 58% και 49 %, αντίστοιχα. [Drif et al., 2007]

Αντίστοιχες έρευνες έχουν υλοποιηθεί και από Πανεπιστήμια της Ιταλίας, ώστε να προκύψουν αξιοποιήσιμα στοιχεία για την ανάπτυξη τεχνικών οδηγιών, την πειραματική αξιολόγηση υφιστάμενων και την δημιουργία νέων μοντέλων πρόβλεψης της απόδοσης στα φωτοβολταϊκά συστήματα για τις κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου. Το φωτοβολταϊκό σύστημα (2,7 kWp), που έχει τοποθετηθεί στους χώρους του Πανεπιστημίου της Καλαβρίας, παρείχε στο δίκτυο, ετήσια μέση ημερήσια ενέργεια 9,1 kWh ή 3,37 h/d από την αρχή της λειτουργίας του έως τον Ιανουάριο του 2005. Στη συγκεκριμένη μελέτη, τα πειραματικά αποτελέσματα που εξήχθησαν, μαρτυρούν την επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στην αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκής συστοιχίας. [Cucumo et al., 2006]

αποτελέσματα παρουσιάστηκαν Σε νεότερη έρευνα, тα από тην παρακολούθηση φωτοβολταϊκής εγκατάστασης στο πανεπιστήμιο του Salento (για την περίοδο Μαρτίου - Οκτωβρίου 2012). Η αναφερόμενη εγκατάσταση έχει ονομαστική ισχύ 960 kWp και διαιρείται σε δύο (2) επιμέρους υποσυστήματα με διαφορετικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά. Στο πλαίσιο της έρευνας καταγράφηκαν και αναλύθηκαν τα δεδομένα που αφορούν την παραγόμενη ενέργεια, την τελική απόδοση (Y_F), την απόδοση αναφοράς (Y_R), την αποδοτικότητα του συστήματος (n_{syst}), το λόγο απόδοσης (PR) και τις θερμοκρασιακές απώλειες (L_T), ενώ σε δεύτερο βαθμό έγιναν οι κατάλληλες συσχετίσεις με τα κλιματικά χαρακτηριστικά του πεδίου, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και ο άνεμος. Η μηνιαία μέση ημερήσια τελική απόδοση ($Y_{F,m}$) ήταν 3,2 h/d τον Οκτώβριο και 6,2 h/d τον Ιούνιο και τον Ιούλιο, ενώ παράλληλα, η αποδοτικότητα του συστήματος παρουσιάζεται υψηλότερη την περίοδο της άνοιξης (17%) και χαμηλότερη το καλοκαίρι (15%). Ο μηνιαίος μέσος λόγος απόδοσης (PR_m) προσεγγίζει το μέγιστο σημείο του κατά το μήνα Μάρτιο (86,5%) και την ελάχιστη τιμή του τον Ιούνιο (79%). Όσον αφορά στην αξιολόγηση των απωλειών λόγω αύξησης της θερμοκρασίας ($L_{CT,m}$), η ελάχιστη ποσοστιαία τιμή παρατηρήθηκε τον Οκτώβριο (-3,5%), ενώ η απόλυτη μέγιστη τον Ιούνιο (8%). Εν κατακλείδι, για την περίοδο διερεύνησης, στο σύστημα καταγράφεται υψηλός μηνιαίος μέσος όρος του λόγου απόδοσης ($PR_{m,avg}$ =80%). [Congedo et al., 2013]

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων (Thin film) είναι η επάρκεια που παρουσιάζουν σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Σε μελέτη αξιολόγησης της λειτουργικής φάσης ενός 3,6 kWp φωτοβολταϊκού συστήματος, τεχνολογίας λεπτών υμενίων, στο Κάιρο της Αιγύπτου, παρουσιάστηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα: η ετήσια μέση ημερήσια τελική απόδοση συστήματος ($Y_{F,y}$) ίση με 4,35 h/d, η ετήσια μέση αποδοτικότητα συστοιχίας ($n_{pv,y}$), συστήματος ($n_{syst,y}$), αντιστροφέα ($n_{inv,y}$) καταγράφηκαν ίσες με 4,22%, 4,02%, 94,5%, αντίστοιχα. Επιπλέον, η ετήσια μέση τιμή του λόγου απόδοσης ($PR_{,y}$) προσέγγιζε το 77,3% και ο ανάλογος συντελεστής της παραγωγικής ικανότητας (CF) ήταν 18,12%. Τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψαν έπειτα από την επιτήρηση του συστήματος κατά τη διάρκεια του έτους 2010. [Elhodeiby et al., 2011]

Στην περιοχή Mugla (Τουρκία), οι Eke και Demircan παρακολούθησαν σύστημα ονομαστικής ισχύος 2,73 kWp για την χρονική περίοδο Ιανουάριου - Δεκεμβρίου 2008. Or παράμετροι απόδοσης TOU φωτοβολταϊκού συστήματος αξιολογήθηκαν σε μηνιαία, εποχική και ετήσια βάση. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της επιτήρησης, υπέδειξαν ότι η ετήσια συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα (ΕΑC.V) και η ετήσια μέση αποδοτικότητα (nsyst,y) ήταν 3.856,9 kWh και 7,3%, αντίστοιχα. Η κανονικοποιημένη τιμής της ετήσια συνολικής παραγωγής ενέργειας (Ε_{ΑCν}) προσδιορίστηκε ίση με 1.412,8 kWh/kWp, ενώ ο αντίστοιχός όρος για το λόγο απόδοσης (PR,v) έλαβε την τιμή 72%. Τέλος, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα χαμηλά επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του χειμώνα οδήγησαν σε χαμηλή τελική απόδοση, ενώ επισημαίνεται ότι οι συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας επηρέασαν σε σημαντικό βαθμό. [Eke και Demircan,2013]

Οι Mondol et al. πραγματοποίησαν εκτεταμένη έρευνα τριών (3) ετών σχετικά με την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στις κλιματικές συνθήκες της

Βορείου Ιρλανδίας, αξιοποιώντας για το σκοπό αυτό ένα φωτοβολταϊκό σύστημα 13 kWp που έχει τοποθετηθεί στην οροφή του περιβαλλοντικού κέντρου ECOS Centre,στην πόλη Ballymena. Ανέλυσαν τα δεδομένα μετρήσεων κατά τρόπο κατάλληλο, ώστε να μελετηθούν οι σχετιζόμενες με την απόδοση και την αποδοτικότητα του φωτοβολταϊκού συστήματος παράμετροι. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι η μηνιαία μέση αποδοτικότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ($n_{pv,m}$), του συστήματος ($n_{syst,y}$) και του αντιστροφέα ($n_{inv,m}$) κυμάνθηκαν από 4,5% έως 9,2%, 3,6% έως 7,8% και 50% έως 87% αντίστοιχα, με την ετήσια μέση τιμή αποδοτικότητας για τη συστοιχία ($n_{pv,y}$), το σύστημα ($n_{syst,y}$) και τον αντιστροφέα ($n_{inv,y}$) να καταγράφονται 7,6%, 6,4% και 75%, αντίστοιχα. Επίσης, κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης, η ετήσια μέση ημερήσια τελική απόδοση του συστήματος (Y_{Fy}) και η ετήσια μέση τιμή του λόγου απόδοσης (PR_{yy}) ήταν 1,7 h/d, 60% (έτος 2001), 61% (έτος 2002) και 62% (έτος 2003), αντίστοιχα. [Mondol et al., 2006]

Προκειμένου να διερευνηθούν οι μακροπρόθεσμες προοπτικές, τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη την εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων στον κτιριακό τομέα της Ιρλανδίας, ενσωματώθηκε σε οροφή κτιρίου στο Δουβλίνο, πρότυπο φωτοβολταϊκό σύστημα 1,72 kWp και συμβατό καταγραφικό σύστημα. Τα στοιχεία από την εποπτεία του συστήματος για το χρονικό διάστημα Νοέμβριου 2008 έως Οκτώβριου 2009, συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές του διεθνούς προτύπου IEC 61724. Η μηνιαία συνολική ενέργεια που παρήγαγε το σύστημα (EAGm), κυμάνθηκε μεταξύ 35,6 kWh/kWp το Δεκέμβριο και 111,7 kWh/kWp τον Ιούνιο, με την αντίστοιχη ετήσια τιμή (EAGIV) να ορίζεται σε 885,1 kWh/kWp. Η μηνιαία μέση ημερήσια τελική απόδοση (Y_{F,m}), απόδοση αναφοράς (Y_{R,m}) και συστοιχίας (Y_{A,m}) κυμάνθηκαν μεταξύ 1,2 h/d και 3,7 h/d, 1,1 h/d και 4,6 h/d, 1,3 h/d και 4,0 h/d για τους μήνες Δεκέμβριο και Ιούνιο, αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, προσδιορίστηκαν σε ετήσια βάση, η μέση ημερήσια τελική απόδοση (Y_{Ev}) και ο λόγος απόδοσης (PR_v) σε 2,41 h/d και 81,5%, αντιστοίχως. Εν κατακλείδι, οι μελετητές ανέφεραν ότι παρά τα χαμηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας, κυρίως κατά τη διάρκεια του χειμώνα, οι ταχύτητες του αέρα και η χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος αποτελούν δυνητικά πλεονεκτήματα για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εφαρμογών στην περιοχή. [Ayompe et al., 2011]

Οι Leloux et al. παρουσίασαν σε πρόσφατες εργασίες τους, στοιχεία από την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης οικιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων στη Γαλλία και στο Βέλγιο. Στην περίπτωση της Γαλλίας απαιτήθηκε η επεξεργασία των λειτουργικών δεδομένων που μεταδόθηκαν από 6.868 φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις κατά το έτος 2010. Οι ερευνητές ανέφεραν ότι ο μέσος όρος της ετήσιας συνολική παραγωγή ενεργείας (*E*_{AG,y,avg}) καθορίστηκε σε 1.163,0 kWh/kWp, ενώ ταυτόχρονα, η ετήσια μέση τιμή του λόγου απόδοσης (*PR*,*y*,*avg*) βρέθηκε 76% (Leloux et al., 2012a). Τα αποτελέσματα για τις 993 εγκαταστάσεις που διερευνήθηκαν, διαφοροποιήθηκαν ελαφρώς σε σχέση με την Γαλλία. Συγκεκριμένα για το Βέλγιο, ο ετήσιος μέσος λόγος απόδοσης

(*PR_{y,avg}*) προσδιορίστηκε 78%, ενώ η αντίστοιχή μέση συνολική τιμή παραγωγή ενέργειας (*E_{AGy,avg}*) για το έτος βάσης ήταν 892,0 kWh/kWp.[Leloux et al., 2012b] Η Γερμανία είναι μια από τις πρωτοπόρες χώρες στην εγκατάσταση, επένδυση και παραγωγή φωτοβολταϊκών συστημάτων, με συνεχώς αυξανόμενη πορεία [Eurobserver, 2013]. Κρίσιμος παράγοντας για την ανάπτυξη του κλάδου των φωτοβολταϊκών αποτελεί η υψηλή τεχνογνωσία και η μακροχρόνια εμπειρία. Το παραπάνω συμπέρασμα προκύπτει αν μελετηθεί προσεκτικά η ιστορία των φωτοβολταϊκών συστημάτων στη Γερμανία, καθώς από τις αρχές του 1990, οπότε η Γερμανία ανέπτυξε πρόγραμμα επιδότησης για την κατασκευή ολοκληρωμένων εγκαταστάσεων, διεξάγονται ολιστικές μελέτες για το σύνολο των λειτουργικών παραμέτρων τους σε πραγματικές συνθήκες.

Παράδειγμα της προαναφερθείσας ερευνητικής διαδικασίας αποτελεί η μελέτη των Decker και Jahn σχετικά με την ανάλυση της απόδοσης των 170 διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στη Βόρεια Γερμανία. Η ετήσια τελική ενεργειακή παραγωγή (E_{AGy}) των εγκαταστάσεων αυτών κυμάνθηκε μεταξύ 430 και 875,0 kWh/kWp, με μέση τιμή 680,0 kWh/kWp. Επίσης, ο ετήσιος λόγος απόδοσης (PR_{y}) προσδιορίστηκε εντός του εύρους τιμών 47,5-81%, λαμβάνοντας μέση τιμή 66,5%.[Decker και Jahn,1997]

αποδόσεων Από νεότερη αξιολόγηση των 235 διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων στη Γερμανία, παρουσιάστηκε μια σαφής τάση για βελτιωμένη απόδοση στις νέες εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών, ως άμεσο αποτέλεσμα της ρεαλιστικής αξιολόγησης και βελτίωσης των προβλημάτων που ανέδειξε η προγενέστερη έρευνα. Παρά τους βελτιωμένους δείκτες απόδοσης και αποδοτικότητας που επιτεύχθηκαν, ο επισταμένος έλεγχος της λειτουργικής απόκρισης των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει εντοπίσει περαιτέρω δυνατότητες βελτιστοποίησης. Ειδικότερα, για την περίοδο παρακολούθησης (1991 - 2002) καταγράφηκαν, μέση ετήσια τελική παραγωγή ενέργειας (*E*_{AG,v,avg}) ίση με 730 kWh/kWp, με διακύμανση από 400-1030 kWh/kWp στα επιμέρους συστήματα, ενώ η αντίστοιχη τιμή του λόγου απόδοσης (PR,v,ava) ελήφθη ίση με 0,67 ή 67% στο εύρος διακύμανσης τιμών 0,38-0,88.[Jahn και Nasse,2004]

Στην αρχή της προηγούμενης δεκαετίας, ένα πλήρες φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος 1 kWp ενσωματώθηκε σε οροφή σχολικού συγκροτήματος στην πόλη Warsaw με σκοπό να συμβάλλει στην εξοικείωση της κοινωνίας με την φωτοβολταϊκή τεχνολογία και την ανάπτυξη τεχνογνωσίας, ως προς το σχεδιασμό, την εγκατάσταση και τη λειτουργία τέτοιων συστημάτων. Το σύστημα αποτελεί μια από τις πρώτες εγκαταστάσεις στην Πολωνία και τέθηκε σε λειτουργία το Δεκέμβριο του 2000. Στα πλαίσια υλοποίησης των ερευνητικών στόχων που ανέκυπταν από τον χαρακτήρα του έργου, εφαρμόστηκαν οι κατάλληλες πρακτικές ελέγχου σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC 61724. Διερευνήθηκαν οι παράμετροι απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος και οι μελετητές ανέφεραν ότι η ετήσια συνολική ενεργειακή παραγωγή (*E*_{AC,y}) του για το πρώτο έτος λειτουργίας του ήταν περίπου 830 kWh/kWp, με τον μηνιαίο μέσο λόγο απόδοσης (*PR*_m) να κυμαίνεται από 0,6 έως 0,8 και την αντίστοιχη αποδοτικότητα του συστήματος (*n*_{syst,m}) να βρίσκεται εντός του εύρους ποσοστιαίων τιμών 4-5%.[Pietruszko και Gradzki, 2003]

Οι Chokmaviroj et al. παρέθεσαν τα αποτελέσματα για τους πρώτους οκτώ μήνες επόπτευσης ενός πιλοτικού φωτοβολταϊκού σταθμού (500 kWp) στην επαρχία Mae Hong Son της Ταϊλάνδης. Στο χρονικό διάστημα λειτουργίας του, το σύστημα απέδωσε συνολική ενέργεια 383.274,0 kWh, με την μηνιαία μέση αποδοτικότητα του ($n_{syst,m}$) να κυμαίνεται μεταξύ 9-12%. Η μηνιαία μέση ημερήσια τελική απόδοση ($Y_{E,m}$) κυμάνθηκε από 2,91 h/d έως 3,98 h/d, ενώ ο μηνιαίος μέσος λόγος απόδοσης (PR_m) βρέθηκε εντός του εύρους των τιμών 0,7 και 0,9. [Chokmaviroj et al., 2006]

Το 2003 αποτέλεσε έτος-σταθμό για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ινδία, καθώς εγκαταστάθηκε στο χωρίο Khatkar-Kalan το μεγαλύτερο μέχρι τότε φωτοβολταϊκό πάρκο (190 kWp). Συνεπακόλουθη συνέπεια/ανάγκη της πρωτοποριακής φύσης του έργου, αποτέλεσε η επισταμένη διερεύνηση των λειτουργικών παραμέτρων του, με σκοπό να καταστεί σημείο αναφοράς για τις μελλοντικές εγκαταστάσεις στην Ινδία. Σε πρόσφατη επιστημονική εργασία παρατίθενται τα αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση του προαναφερθέντος φωτοβολταϊκού πάρκου για το έτος 2011. Συγκεκριμένα, οι ερευνητές παρατήρησαν ότι η τελική απόδοση (Y_{F,m}), απόδοση αναφοράς (Y_{Rm}) και λόγος απόδοσης (PR_m) λάμβαναν τιμές από 1,45-2,84 h/d, 2,29-3,53 h/d και 55-83%,αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, οι ετήσιες μέσες τιμές για το λόγο απόδοσης (PR,y) και την αποδοτικότητα του συστήματος (nsvst.v) αναφέρθηκαν 74% και 8,3%, αντίστοιχα. Επιπλέον, η κανονικοποιημένη τιμή της ολικής ετήσιας ενεργειακή παραγωγής του πάρκου (ΕΑC,ν) ήταν 812,76 kWh/kWp, $\varepsilon v \omega$ καταγράφηκαν συνολικές απώλειες του συστήματος (L_c και L_s) της τάξεως του 31,7%. Τέλος, επισημάνθηκε η ανάγκη βελτιστοποίησης της κλίσης των φωτοβολταϊκών πάνελ για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. [Sharma και Chandel, 2013]

Ο σχεδιασμός του πρώτου μηδενικής κατανάλωσης κτιρίου στη Σιγκαπούρη συμπεριελάμβανε την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκού συστήματος 142,5 kWp στην οροφή του. Οι Wittkopf et al. εκπόνησαν αρχική μελέτη αξιολόγησης των επιδόσεων του συστήματος για του πρώτους δεκαοκτώ (18) μήνες λειτουργίας του (Οκτώβριος 2009 - Μάρτιος 2011). Σύμφωνα με τα στοιχεία της μελέτης, το σύστημα εμφάνιζε μέσο λόγο απόδοσης (PR,m,avg) της τάξης του 81% και μέση μηνιαία τελική απόδοση (Y_{F.m.avg}) ίση με 3,12 h/d. Ακόμη, το φωτοβολταϊκό σύστημα τροφοδότησε το κτίριο με 217,6 MWh, με τη γενική μηνιαία μέση να αναφέρεται 11,2%. αποδοτικότητα TOU $(n_{syst,m,avg})$ Επιπρόσθετα. καταγράφηκαν απώλειες σύλληψης (L_{C,m,avg}) ίσες με 0,58 h/d, οι οποίες συνδέονται άμεσα με τις υψηλές θερμοκρασίες που παρατηρήθηκαν στα φωτοβολταϊκά πλαίσια (55-60°C). [Wittkopf et al., 2012]

2.3 Η έννοια της θερμοκρασίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα

Σε μακροσκοπικό επίπεδο, ο όρος θερμοκρασία αναφέρεται, στην θερμική κατάσταση ενός σώματος (θερμό ή ψυχρό), η οποία χαρακτηρίζεται από την ένταση του θερμικού αισθήματος που προκαλείται στο ανάλογο αισθητήριο κατά την επαφή του με την ύλη. Μικροσκοπικά, η θερμοκρασία εκφράζει το πόσο γρήγορα ή αργά κινούνται τα μόρια ενός σώματος ή είναι το μέτρο της μέσης κινητικής ενέργειας των μορίων ενός σώματος. Στο δυαδικό φυσικό σχήμα αιτία - αποτέλεσμα, την θέση του αποτελέσματος κατέχει ή θερμοκρασία, ενώ η αιτία είναι η θερμότητα. [Εγκυκλοπαίδεια Γιοβάνη, 1982]

Τα κυριότερα ζητήματα που ανακύπτουν από τη σύνδεση της έννοιας θερμοκρασία με τα επιμέρους στοιχεία που συνθέτουν ένα φωτοβολταϊκό έργο, είναι τόσο η κατανόηση του μηχανισμού ανάπτυξης της, όσο και η ποσοτική προσέγγιση του τρόπου που επιδρά στην ηλεκτρική απόδοση του έργου αυτού.

2.3.1 Η επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης και της θερμικής συμπεριφοράς των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Εξαρτάται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, τις θερμοφυσικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών όπου ενθυλακώνονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα είδη των στοιχείων, τη διαμόρφωση της εγκατάστασης και τις τοπικές κλιματικές συνθήκες (θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου, κλπ.). [Alonso Garcia et al., 2004]

Έχει παρατηρηθεί, ότι η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (*Ta*) επηρεάζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων και επιφέρει απώλειες στην παραγωγή ενέργειας. Η κατάσταση αυτή, εντείνεται όταν τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν σε περιοχές με θερμότερα κλίματα. Ενδεικτικά αναφέρουμε, ότι οι δοκιμές έκθεσης φωτοβολταϊκών στοιχειών κρυσταλλικού πυριτίου στις συνθήκες του θερμού τροπικού κλίματος της Νοτιοανατολικής Ασίας, που διεξήχθησαν από τους Malik et al., υπέδειξαν την ισχυρή εξάρτηση της αποδοτικότητας των στοιχείων (*n*_c) από τη θερμοκρασία λειτουργίας τους (*Tc*). Συγκεκριμένα, οι ερευνητές παρατήρησαν μείωση στην αποδοτικότητα της τάξεως του 69% σε σχέση με την τιμή στις πρότυπες συνθήκες (STC), όταν η θερμοκρασία λειτουργίας (*Tc*) έφτασε τους 64°C. [Malik et al., 2003]

Η μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου/πλαισίου σε σχέση με τη θερμοκρασία λειτουργίας του (*Tm*), περιγράφεται ποσοτικά από τους θερμοκρασιακούς συντελεστές. Μια εξίσου σημαντική θερμική παράμετρος, είναι η τυπική θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου/πλαισίου (NOCT), η οποία παρέχεται από τους κατασκευαστές ως

ένδειξη της εξάρτησης της θερμοκρασίας του στοιχείου/πλαισίου από την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τις θερμικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών. [Makrides et al.,2012]

Ως επί το πλείστον, ο προσδιορισμός των θερμοκρασιακών συντελεστών των πραγματοποιείται φωτοβολταϊκών στοιχείων/πλαισίων σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον, μέσω κατάλληλων τεχνικών. Σε πραγματικές συνθήκες, οι τιμές αυτές αποκλίνουν σημαντικά από τις καταγεγραμμένες σε εργαστηριακό επίπεδο. Η παραπάνω διαπίστευση, αποτέλεσε τη γενεσιουργό αιτία διεξαγωγής αρκετών μελετών ελέγχου των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και προσδιορισμού των θερμοκρασιακών συντελεστών σε ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας. Στο σύνολο των βιβλιογραφικών αναφορών που εντοπίστηκαν, ο προαναφερθείς έλεγχος της εξαρτημένης σχέσης ηλεκτρικών χαρακτηριστικώνθερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm), βασίζεται στην μεθοδολογία γραμμικής συσχέτισης των παραμέτρων αυτών σε σταθερή έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (*G*_T).

Σε χώρες, με υψηλό ηλιακό δυναμικό και θερμό κλίμα, η αποδοτικότητα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (n_{syst}) επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό, λόγω των θερμοκρασιών λειτουργίας (Tm) που σημειώνονται υψηλότερων στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Ωστόσο, μέσω στοχευμένης επιλογής της εφαρμοζόμενης φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, καθίσταται εφικτός ο μετριασμός των θερμικών απωλειών. Σε τέτοιες περιπτώσεις, κρίσιμος παράγοντας θεωρείται ο θερμοκρασιακός συντελεστής απόδοσης (β_{MP}). Οι Makrides et al., αξιολόγησαν την επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας (Tm) στην ονομαστική ισχύ (Pnom) διαφόρων τύπων φωτοβολταϊκών πλαισίων, σε εργαστηριακό επίπεδο και στις συνθήκες του περιβάλλοντος της Κύπρου (παρακολούθηση ενός έτους). Οι περιορισμοί που τέθηκαν για τις μετρήσεις πεδίου ήταν: σταθερή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (G₁=σταθερή), χαμηλή ένταση ανέμων (*Vw*<2m/s), ώρες κοντά στο ηλιακό μεσημέρι. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, παρατηρήθηκε σημαντική διαφοροποίηση των τιμών πεδίου σε σχέση με τις αναφερόμενες στα αντίστοιχα τεχνικά εγχειρίδια. Εξαίρεση αποτέλεσαν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου (a-Si), για τα οποία καταγράφεται σχεδόν πλήρης ταύτιση. [Makrides et al., 2012]



Διάγραμμα 2.1: Διακύμανση των τιμών του συντελεστή θερμοκρασίαςαπόδοσης πλαισίων (*β_{MP}*) των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών τεχνολογιών [Makrides et al., 2012]

Οι Kamkird et al., διερεύνησαν την επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών συστημάτων υπό συνθήκες λειτουργίας, αξιολογώντας πραγματικές τους ανάλογους θερμοκρασιακούς συντελεστές. Ειδικότερα, στο πλαίσιο υλοποίησης των ερευνητικών στόχων της μελέτης, αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα καταγραφής φωτοβολταϊκού σταθμού (περίοδος Ιανουαρίου 2008 - Δεκεμβρίου 2009) εγκατεστημένου στην περιοχή Phitsanulok, Ταϋλάνδη. Ο εξεταζόμενος φωτοβολταϊκός σταθμός αποτελείται από τρία (3) διαφορετικής τεχνολογίας υποσυστήματα· το πρώτο υποσύστημα (3,67 kWp) περιλαμβάνει εξήντα οκτώ (68) φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου (a-Si), το δεύτερο υποσύστημα (3,60 kWp) περιλαμβάνει σαράντα πέντε (45) φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου (p-Si) και το τρίτο υποσύστημα δέκα έξι (16) φωτοβολταϊκά πλαίσια υβριδικής τεχνολογίας. Τα δεδομένα παρακολούθησης αναλύονται μέσω γραμμικής παλινδρόμησης υπό σταθερές τιμές ακτινοβολίας 660 W/m² για το έτος 2008 και 640 W/m² για το έτος 2009, ώστε να υπολογιστεί η σχέση εξάρτησης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών (ρεύμα, τάση, ισχύς, αποδοτικότητα) των εξεταζόμενων υποσυστημάτων από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm). Λαμβάνοντας υπόψη τα ευρήματα των δοκιμών πεδίου, διαπιστώθηκε διαφοροποίηση σε σχέση με τις των θερμοκρασιακών συντελεστών που ορίζονταν τιμές από του κατασκευαστές, ενώ παρατηρήθηκαν αποκλίσεις και στις τιμές μεταξύ των δύο (2) ετών παρακολούθησης του σταθμού. [Kamkird et al.,2012]



Διάγραμμα 2.2: Γραφική απεικόνιση της παραγόμενης ισχύος (*P*_{DC}) σε σχέση με την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) στην περιοχή Phitsanulok (Ταϋλάνδης) για την περίοδο Ιανουαρίου 2008 - Δεκεμβρίου 2009. [Kamkird et al.,2012]

2.3.2 Μοντελοποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων/πλαισίων

Η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων(Tc)/πλαισίων(Tm) επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την συνολική απόδοση ενός συστήματος (n_{syst}). Η παραπάνω διαπίστευση, έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και έδωσε το έναυσμα για την ανάπτυξη διαφόρων μοντέλων που δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της (Trinuruk et al.,Skoplaki et al.,2009). Παράλληλα, έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες, ώστε να τεκμηριωθούν και να βελτιωθούν οι ικανότητες πρόβλεψης των μοντέλων αυτών. Στην παράγραφο αυτή, γίνεται αναφορά σε κάποια είδη εργασιών συναφών με τις μεθόδους προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων (Tc)/πλαισίων (Tm).

Το 2009, οι Skoplaki και Palyvos παρουσίασαν μια διευρυμένη βιβλιογραφική επισκόπηση των άμεσων και έμμεσων συσχετίσεων προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων (*Tc*)/ πλαισίων (*Tm*). Οι σχέσεις αυτές, λαμβάνουν υπόψη τις βασικές περιβαλλοντικές μεταβλητές, καθώς και ειδικές παράμετροι, εξαρτώμενες από το είδος και την τεχνολογία φωτοβολταϊκού συστήματος. Κατά συνέπεια, οι μελετητές καλούνται να διερευνούν τη συμβατότητα του εκάστοτε μοντέλου με την εξεταζόμενη περίπτωση και τους πιθανούς περιοριστικούς παράγοντες. Τέλος, επισημαίνεται

ότι οι μαθηματικές εκφράσεις-μοντέλα παρέχουν τη δυνατότητα να εκτίμησης, ωστόσο δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι αποτελούν εμπειρικές σχέσεις και σε καμία περίπτωση δεν υποκαθιστούν τις ρεαλιστικές μετρήσεις στις συνθήκες του πεδίου εφαρμογής των φωτοβολταϊκών συστημάτων. [Skoplaki και Palyvos,2009]

Οι Koehl et al., διερεύνησαν την εφαρμοσιμότητα ενός βασισμένου στην ανάλυση κυρίων συνιστωσών στατιστικού μοντέλου και ενός αναλυτικού μοντέλου για την εκτίμηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm). Για τους σκοπούς τις μελέτης, πειραματικές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σε διάφορες περιοχές εξοπλίστηκαν με συστήματα παρακολούθησης των κλιματικών συνθηκών τα οποία κατέγραφαν μετρήσεις ανά 5 min. Το πρώτο εξεταζόμενο μοντέλο, παρουσιάστηκε από τον David King το 2004 και έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε πλαίσια τοποθετημένα με ελεύθερη την πίσω όψη, σε επίπεδα πλαίσια με μονωμένη την οπίσθια επιφάνεια προσομοιώνοντας περιπτώσεις των ενσωματωμένων σε κτίρια φωτοβολταϊκών πλαισίων, καθώς και σε συγκεντρωτικά πλαίσια. Ενώ το δεύτερο, μοντέλο David Faiman, προήλθε από το ισοζύγιο ενέργειας το οποίο εφαρμόζεται στους ηλιοθερμικούς συλλέκτες. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της συγκριτικής αξιολόγησης καταγεγραμμένων μετρήσεων και προβλεφθέντων τιμών, οι οποίες προέκυψαν από τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα, αναφέρθηκε καλή ακρίβεια στην εκτίμηση της αναμενόμενης θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm) και μικρής κλίμακας αβεβαιότητες, μετά τις απαιτούμενες διορθώσεις.



Εικόνα 2.7: Εγκαταστάσεις δοκιμών του Ινστιτούτου Fraunhofer. [Koehl et al.,2011]



Διάγραμμα 2.3: Ιστόγραμμα τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας πλαισίου και της διαφοράς θερμοκρασίας πλαισίου–περιβάλλοντος σύμφωνα με τα εξεταζόμενα θεωρητικά μοντέλα στην περιοχή δοκιμής (Ισραήλ). [Koehl et al.,2011]

Προκειμένου να αναδειχτεί μια αξιόπιστη μέθοδος εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των ενσωματωμένων σε κτιριακές εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) για τις κλιματικές συνθήκες της Ταϋλάνδης, οι Trinuruk et al., διερεύνησαν την καταλληλότητα δύο (2) εκ των συχνότερα χρησιμοποιούμενων μοντέλων πρόβλεψης. Ειδικότερα, στα πλαίσια της μελέτης εφαρμόστηκαν η εξίσωση των Ross και Smockler (1986) και η εξίσωση του King (2004), οι οποίες είναι ευρέως γνωστές ως μοντέλο NOCT και μοντέλο της Sandia, αντίστοιχα. Η απόδοση των δύο μοντέλων ελέγχθηκε στατιστικά με τον υπολογισμό του μέσου σφάλματος μεροληψίας (*MBE*) και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (*RMSE*). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα (πίνακας 2.2), οι υπολογιζόμενες τιμές του μοντέλου της Sandia προσεγγίζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τις τιμές των καταγεγραμμένων μετρήσεων, χωρίς ωστόσο να παραβλέπεται το γεγονός της συστηματικής υπερεκτίμησης και από τα δύο (2) μοντέλα. [Trinuruk et al., 2009]

	Horizontal		15°		Vertical	
	NOCT	SNL	NOCT	SNL	NOCT	SNL
No. of observations	979		449		863	
Averaged value of T _m (°C)	38.27		38.19		34.61	
MBE (°C)	+7.91	+3.90	+5.09	+2.11	+4.38	+2.14
RMSE (°C)	± 9.36	± 4.60	±6.13	± 2.86	± 5.04	± 2.53
% MBE of averaged T _m (%)	+20.68	+10.20	+13.32	+5.54	+12.66	+6.19
% RMSE of averaged T _m (%)	±23.87	± 11.76	± 16.05	± 7.49	± 14.55	± 7.30

Πίνακας 2.2: Στοιχεία στατικού ελέγχου των εξεταζόμενων μοντέλων πρόβλεψης [Trinuruk et al., 2009]

Οι Quesada et al., παρακολούθησαν για παραπάνω από δύο χρόνια μια πρότυπη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ισχύος 7,2 kWp, η οποία έχει εγκατασταθεί στους χώρους του Πολυτεχνείου της Βαλένθια (Ισπανία) από το 1998. Στα πλαίσια της μελέτης, λαμβάνει χώρα συγκριτική αξιολόγηση των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων που σχετίζονται με τις κύριες λειτουργικές παραμέτρους του φωτοβολταϊκού συστήματος. Στο τελευταίο μέρος της εργασίας, οι ερευνητές αναφέρονται στην ακρίβεια των προβλέψεων πέντε διαφορετικών μοντέλων προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων. Τα τέσσερα πρώτα μοντέλα (Risser και Fuentes, Chenni et al., Sandia, Servant) θεωρούνται μοντέλα άμεσου προσδιορισμού, ενώ το πέμπτο από αυτά (TRNSYS) βασίζεται σε έμμεση μέθοδο. Τα δεδομένα για τον στατιστικό έλεγχο των προαναφερθέντων μοντέλων, στηρίζονται σε μετρήσεις καταγεγραμμένες από το σύστημα παρακολούθησης της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, για την περίοδο Ιανουαρίου 2001 - Μαρτίου 2003. Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σχετικής διερεύνησης, κατά τα όποια η μικρότερη απόκλιση από τις πραγματικές τιμές απαντάται στις προβλέψεις των μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης. [Quesada et al., 2011]

"Αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς πρότυπης Φωτοβολταϊκής 2014 εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης"

Correlation	% MBE	% RMSE
Linear regression 1 [30] $T_{\rm c} = 0.899 \cdot T_{\rm a} + 0.025 \cdot G_{\rm T} - 1.3 \cdot V_{\rm v} + 3.12$	-0.48	9.20
Linear regression 2 [30] $T_{\rm c} = 0.943 \cdot T_{\rm a} + 0.023 \cdot G_{\rm T} - 1.528 \cdot V_{\rm v} + 4.3$	- 0.7 1	9.66
Sandia [29] $T_{\rm c} = T_{\rm a} + \frac{G_{\rm T}}{G^{\rm r}} [19.6 {\rm e}^{-0.223 \cdot V_{\nu} + 14.6}]$	1.58	9.21
Servant [30] $T_{\rm c} = T_{\rm a} + 0.0138 \cdot G_{\rm T} (1 + 0.031 \cdot T_{\rm a}) (1 - 0.042 \cdot V_{\rm v})$	-5.31	11.83
TRNSYS [16] $T_{\rm C} = T_{\rm A} + \frac{T_{\rm NOCT} - T_{\rm A, NOCT}}{G_{\rm T, NOCT}} G_T \left(1 - \frac{\eta_c}{\tau_\alpha}\right) \frac{9.5}{5.7 + 3.8 * V_{\rm V}}$	-4.17	14.60

Πίνακας 2.3: Στοιχεία στατικού ελέγχου των εξεταζόμενων μοντέλων πρόβλεψης [Quesada et al., 2011]

Στη εργασία τους, οι Jakhrani et al., αξιολόγησαν ένα μεγάλο αριθμό εμπειρικών σχέσεων προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm). Δεδομένα εισόδου για τα εξεταζόμενα μοντέλα, αποτέλεσαν καταγεγραμμένες μετρήσεις κλιματολογικών στοιχείων από το μετεωρολογικό σταθμό της περιοχής Kuching (01°33'N και 110°25'E, Μαλαισία), για την περίοδο 2000 - 2009. Στα αποτελέσματα που εξήχθησαν, διαπιστώθηκε αντίστοιχη τάση διακύμανσης (διάγραμμα 2.4) για το σύνολο των ελεγχόμενων μοντέλων, χωρίς ωστόσο να παραβλέπονται οι σημαντικές διαφοροποιήσεις που παρατηρήθηκαν. Ειδικότερα, η γραμμική συσχέτιση των Risser και Fuentes (1983), εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων, με τον ετήσιο μέσο όρο να σημειώνεται 56,1°C, ενώ οι χαμηλότερες τιμές εκτιμήθηκαν από τις σχέσεις των Lasnier και Ang (1990) και Ross (1976), με μέσες ετήσιες τιμές 38,9°C και 40,7°C, αντίστοιχα. Εν τέλει, οι ερευνητές καταλήγουν ότι οι διαφορές μεταξύ των θεωρητικών τιμών που προκύπτουν, οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στις ανεξάρτητες μεταβλητές (π.χ. συντελεστής k), στις τοπικές κλιματικές συνθήκες, στη διαμόρφωση της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης και του τρόπου προσέγγισης από τον εκάστοτε ερευνητή.[Jakhrani et al.,2011]



Διάγραμμα 2.4: Η μηνιαία διακύμανση των θεωρητικών τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*,_m) για την περιοχή Kuching, Μαλαισία. [Jakhrani et al.,2011]

Η απλούστερη και ευρέως εφαρμοζόμενη σχέση άμεσου προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών, που εμφανίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία είναι της μορφής:

$$T_m = T\alpha + k * G_T \quad [2.1]$$

Όπου,

Tm:η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου, (°C).

Τα:η θερμοκρασία περιβάλλοντος,(°C).

k:ο συντελεστής Ross,(°C*m²/W).

G_T:η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο,(W/m²).

Σε αυτήν την γραμμική έκφραση, ο συντελεστής k, εκφράζει την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων πάνω από την αντίστοιχη θερμοκρασία περιβάλλοντος με την αντίστοιχη αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το κυριότερο ζήτημα που ανακύπτει για την αναφερόμενη συσχέτιση, σχετίζεται με την τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής k, η οποία μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί όταν είναι διαθέσιμα τα κατάλληλα στοιχεία για μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Αντίθετα, η εκ των προτέρων ακριβής εκτίμηση του συντελεστή k, ειδικά όταν παρατηρούνται σημαντικά επίπεδα έντασης του ανέμου, θεωρείται εξαιρετικά δύσκολή. [Skoplaki et al.,2009, Ye et al.,2013, Kurnik et al.,2011] Αρκετοί μελετητές, έπειτα από μεγάλα διαστήματα διερεύνησης, έχουν καθορίσει αποδέκτες τιμές για τον συντελεστή Ross. Ειδικότερα, σύμφωνα με τον Buresch, ο συντελεστής k λαμβάνει τιμές εντός του εύρους 0,02–0,04 °C*m²/W, με k=0,025 °C*m²/W να αποτελεί την πιο αποδεκτή επιλογή (Ye et al., 2013). Οι Mondol et al., χρησιμοποιώντας τα δεδομένα πειραματικών μετρήσεων των κατάλληλων παραμέτρων (:θερμοκρασία λειτουργίας πλαισίων, θερμοκρασία περιβάλλοντος και ηλιακή ακτινοβολία), που διεξήχθησαν κατά τους θερινούς μήνες του έτους 2002 στην πόλη Ballymena (Βόρεια Ιρλανδία), προσδιόρισαν μέσω γραμμικής παλινδρόμησης τον συντελεστή k ίσο με 0,031 ^oC*m²/W (Mondol et al., 2005). Ενώ, οι Ayompe et al., εφαρμόζοντας αντίστοιχη μεθοδολογία για τα κλιματικά δεδομένα του Δουβλίνου (Ιρλανδία), καθόρισαν τον δείκτη k=0,018 °C*m²/W (Ayompe et al., 2010). Σε αντίστοιχη μελέτη της IEA (International Energy Agency), προτεινόμενο то **ΣΟQÙ3** τιμών κατηγοριοποιήθηκε βάσει του τρόπου έδρασης της συστοιχίας και του αερισμού των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στον πίνακα 2.4 παρατίθενται οι προτεινόμενες τιμές για το συντελεστή k. [Skoplaki et al., 2009]

PV array type	k (Km²/W)
Well cooled	0.02
Free standing	0.0208
Flat on roof	0.026
Not so well cooled	0.0342
Transparent PV	0.0455
Façade integrated	0.0538
On sloped roof	0.0563

Πίνακας 2.4: Προτεινόμενες τιμές για τον συντελεστή k. [Nordmann et al.,2003]

Οι Tamizhmani et al., περιγράφουν μια μέθοδο εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων με τη χρήση νευρωνικών δικτύων. Αρχικά, προβλέπονται οι μελλοντικές τιμές των περιβαλλοντικών παραμέτρων (θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου κλπ) για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, ενώ στη συνέχεια μέσω πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης προκύπτει κατάλληλο μοντέλο υπολογισμού:

$$Tm = 4,3 + 0,028 * G_T + 0,943 * Ta - 1,528 * Vw$$
[2.2]

Όπου,

Tm:η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου, (°C).

Τα:η θερμοκρασία περιβάλλοντος, (°C).

Vw:η ταχύτητα ανέμου,(m/s).

G_T:η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο,(W/m²).

Η παραπάνω εξίσωση [2.2], λόγω της απόδοσης σχετικά ακριβών αποτελεσμάτων (*R*²=0,96) εντός του πεδίου εφαρμογής της, προτείνεται για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας λειτουργίας στην αναλυτική μέθοδο μοντελοποίησης φωτοβολταϊκών στοιχείων των Chenni et al..[Tamizhmani et al., 2003, Chenni et al., 2007]

To 2010, οι Ayompe et al., υλοποιώντας κατ' αντίστοιχο τρόπο ανάλυση πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης καταγεγραμμένων μετρήσεων ενός (1) έτους (περίοδος Απριλίου 2009 - Μαρτίου 2010), οι οποίες προέρχονται από το σύστημα παρακολούθησης πρότυπης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης στην Ιρλανδία, δημοσίευσαν μια τροποποιημένη εκδοχή της σχέσης (: $Tm = -1,99 + 0,02 * G_T + 1,102 * Ta - 0,097 * Vw$). Η νέα συσχέτιση ελέγχθηκε στατιστικά μέσω του ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος (MAE,%) και υπολογίστηκε ίσο με 7,3%. [Ayompe et al., 2010]

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°:ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

3.1 Περιγραφή της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκού συστήματος

3.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία



Εικόνα 3.1: Η εξεταζόμενη πρότυπη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ονομαστικής ισχύος 2,18 kWp.

Έργο: Πρότυπο Φωτοβολταϊκό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ονομαστικής ισχύος 2,18 kWp.

Θέση Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών συστημάτων του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

3.1.2 Σκοπός του φωτοβολταϊκού συστήματος

Κύριος σκοπός του φωτοβολταϊκού συστήματος, το οποίο λειτουργεί από τον Μάιο του 2010, είναι η εξοικείωση των μελών της Πολυτεχνικής κοινότητας με τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας και ειδικότερα με τα φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς επίσης και η εργαστηριακή εξάσκηση των φοιτητών σε τεχνικά θέματα των φωτοβολταϊκών. Επιπλέον, το σύστημα συμβάλλει στην ανάπτυξη ερευνητικής δραστηριότητας και τεχνογνωσίας στον τομέα φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Επίσης, στόχος του έργου, είναι η αξιοποίηση της ανανεώσιμης ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο ηλεκτροδότησης.

3.1.3 Γεωγραφική θέση του φωτοβολταϊκού συστήματος

Το φωτοβολταϊκό σύστημα έχει τοποθετηθεί στην οροφή προκατασκευασμένου οικίσκου (ISOBOX) που εξυπηρετεί τις ανάγκες του εργαστηρίου Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων, του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος. Το κτίσμα καλύπτει επιφάνεια 60 m² και βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα του χωρικού πεδίου των εγκαταστάσεων του Πολυτεχνείου Κρήτης, στην περιοχή Ακρωτήρι του Δήμου Χανίων. Η θέση του φωτοβολταϊκού συστήματος απέχει περίπου 2-3 km (σε ευθεία γραμμή) από τις πλησιέστερες ακτές της περιοχής, ενώ η υψομετρική διαφορά του από την επιφάνεια της θάλασσας προσδιορίζεται σε 130-135 m.

Οι ακριβείς συντεταγμένες του χώρου της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι:

- Γεωγραφικό πλάτος (latitude): 35°31'N
- Γεωγραφικό μήκος (altitude): 24°04'E



Εικόνα 3.2: Δορυφορική Απεικόνιση της ευρύτερης τοποθεσίας εγκατάστασης. [Google Earth, 2013]



Εικόνα 3.3: Δορυφορική Απεικόνιση της τοποθεσίας εγκατάστασης. [Google Earth, 2013]

3.2 Κατάσταση Περιβάλλοντος

3.2.1 Κλιματολογικά στοιχεία

Η μορφολογία του εδάφους και η θέση της Κρήτης στο κέντρο της Μεσογείου έχουν άμεση επίδραση στο κλίμα, το οποίο χαρακτηρίζεται σαν μεταβατικό ενδιάμεσο μεταξύ του χερσαίου Μεσογειακού και του ερημοειδούς Μεσογειακού, στο οποίο υπάγεται κυρίως η Κρήτη. Η περιοχή της Κρήτης υπάγεται κατά το μεγαλύτερο μέρος της στον ημίξηρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή θερμό. Οι ημιορεινές περιοχές ανήκουν στον ύφυγρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ψυχρό, ενώ οι ορεινές περιοχές ανήκουν στον υγρό βιοκλιματικό όροφο και έχουν επίσης ψυχρό χειμώνα.

Σύμφωνα με στοιχεία της EMY για το μετεωρολογικό σταθμό των Χανίων, οι πιο ψυχροί μήνες είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος με τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (*Tα*,*m*) να λαμβάνουν τις τιμές 11,6°C και 11,8°C, αντίστοιχα, ενώ πιο θερμοί είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος με 26,5°C και 26,1°C, αντίστοιχα. Οι πιο βροχεροί μήνες είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος με μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις 99,9 mm. Οι άνεμοι που πνέουν στην περιοχή είναι συνήθως βορειοδυτικής διευθύνσεως ενώ οι υψηλότερες μέσες μηνιαίες της ταχύτητας ανέμου (*Vw*,*m*) παρατηρούνται τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο. Ακολουθούν οι σχετικοί πίνακες θερμοκρασίας,

υγρασίας, βροχόπτωσης και ταχύτητας ανέμου της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, από τον κύριο σταθμό των Χανίων (γ. μήκος: 24°7'0", γ. πλάτος: 35°29'0", ύψος:150m,περίοδος δεδομένων: 1958 - 1997). [EMY, 2013]



Διάγραμμα 3.1: Κλιματολογικό διάγραμμα θερμοκρασίας για την περιοχή των Χανίων. [ΕΜΥ, 2013]

1° Εξάμηνο		IAN	ΦΕΒ	MAP	ΑΠΡ	MAI	IOYN
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία (<i>Ta_{.m.min}</i>)		9,2	9,2	10,1	12,2	15,2	18,9
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία(<i>Ta_{,m}</i>)	°C	11,6	11,8	13,2	16,3	20,1	24,5
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία(<i>Ta_{.m.max}</i>)		15,8	16,5	17,9	21,0	24,7	28,7
2° Εξάμηνο		ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	OKT	NOE	ΔΕΚ
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία (<i>Ta_{.m.min}</i>)		20,8	20,8	18,7	15,6	13,1	10,8
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία(<i>Ta_{.m}</i>)	°C	26,5	26,1	23,3	19,4	16,1	13,1
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία(<i>Ta_{.m.max}</i>)		30,3	30,0	27,7	23,7	20,9	17,8

Πίνακας 3.1: Κλιματολογικά στοιχεία θερμοκρασίας περιβάλλοντος (*Ta*) για την περιοχή των Χανίων (χρονική περίοδος μετρήσεων: 1958 - 1997). [EMY, 2013]

68

"Αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς πρότυπης Φωτοβολταϊκής εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης"

1° Εξάμηνο		IAN	ΦΕΒ	MAP	ΑΠΡ	MAI	IOYN
Μέση Μηνιαία Υγρασία	%	71,7	69,3	68,4	65,4	62,2	55,8
2° Εξάμηνο		ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	OKT	NOE	ΔΕΚ
Μέση Μηνιαία Υγρασία	%	55,3	57,7	63,9	70,4	72,2	72,1

Πίνακας 3.2: Κλιματολογικά στοιχεία υγρασίας για την περιοχή των Χανίων (χρονική περίοδος μετρήσεων 1958 - 1997). [ΕΜΥ, 2013]



Διάγραμμα 3.2: Κλιματολογικό διάγραμμα βροχόπτωσης για την περιοχή των Χανίων (χρονική περίοδος μετρήσεων 1958 - 1997). [ΕΜΥ, 2013]

1° Εξάμηνο		IAN	ΦΕΒ	MAP	ΑΠΡ	MAI	IOYN
Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση	mm	99,9	99,9	71,9	31,9	13,9	6,6
Συνολικές Μέρες Βροχής		15,0	13,7	11,0	6,7	3,5	1,2
2° Εξάμηνο		ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ОКТ	NOE	ΔΕΚ
Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση	mm	0,5	2,7	18,2	82,1	70,9	91,3
Συνολικές Μέρες Βροχής		0,2	0,3	2,3	8,0	9,5	13,5

Πίνακας 3.3: Κλιματολογικά στοιχεία βροχόπτωσης για την περιοχή των Χανίων (χρονική περίοδος μετρήσεων 1958 - 1997). [ΕΜΥ, 2013]

69

1° Εξάμηνο		IAN	ΦΕΒ	MAP	ΑΠΡ	MAI	IOYN
Μέση Μηνιαία Διεύθυνση Ανέμων		Ν	Ν	ВΔ	ВΔ	ВΔ	ВΔ
Μέση Μηνιαία ταχύτητα ανέμου (<i>Vw,m</i>)	m/s	3,1	3,1	3,1	2,8	2,5	2,6
2° Εξάμηνο		ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	OKT	NOE	ΔΕΚ
Μέση Μηνιαία Διεύθυνση Ανέμων		ВΔ	ВΔ	ВΔ	ВΔ	Ν	Ν
Μέση Μηνιαία ταχύτητα ανέμου (<i>Vw,m</i>)	m/s	2,2	2,0	2,2	2,1	2,3	2,9

Πίνακας 3.4: Κλιματολογικά στοιχεία ταχύτητας (*Vw*) και διεύθυνσης ανέμων για την περιοχή των Χανίων. [TOTEE, 2010]

Η Ελλάδα παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό, περίπου 1.400,0 -1.800,0 kWh/m² ετησίως σε οριζόντιο επίπεδο, ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος (φ) και το ανάγλυφο της περιοχής. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια μορφή ενέργειας με σχεδόν σταθερή και προβλέψιμη ένταση (W/m²) στην διάρκεια του χρόνου και της ημέρας. Η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει τη μέγιστη ένταση της κατά την διάρκεια του μεσημεριού (μέγιστο ηλιακό ύψος), τόσο κατά τη θερινή όσο και κατά τη χειμερινή περίοδο. Η ηλιακή ενέργεια είναι μεγαλύτερη κατά τη θερινή περίοδο, λόγω την θέσης του ήλιου, αλλά και λόγω της αύξησης των ωρών ηλιοφάνειας (μείωση των νεφώσεων). Για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε κεκλιμένη ή/και περιστρεφόμενη επιφάνεια (GT), είναι απαραίτητη η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (G). Στην Ελλάδα η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY) καταγράφει εδώ και πολλά χρόνια τις ώρες ηλιοφάνειας ανά ημέρα (h/d), αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις την ολική ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m²) για διάφορες περιοχές της χώρας μας. Ειδικότερα, η ετήσια μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή της Κρήτης ανέρχεται στις 1.800,0 kWh/m², γεγονός που αναδεικνύει την υψηλή ικανότητα της για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. [ΤΟΤΕΕ, 2010]

2014

ΧΑΝΙΑ: Μέση Ακτινοβολία (kWh/m²)												
			Για κλίση επιφάνειας 90°					0° Για κλίση επιφάνειας 45°				
Μήνες	Οριζόντιο επίπεδο	в	ΒΑ/ΒΔ	Α/Δ	NA/NΔ	N	в	ΒΑ/ΒΔ	Α/Δ	NA/NΔ	Ν	
IAN	62	20	22	40	66	83	25	32	56	82	94	
ΦΕΒ	80	25	28	48	69	82	31	45	69	93	104	
MAP	124	39	50	74	90	95	58	80	108	130	139	
ΑΠΡ	167	51	70	93	98	91	103	117	142	156	160	
MAI	212	73	100	120	110	88	157	165	182	186	182	
IOYN	220	80	105	122	106	81	173	176	188	186	179	
ΙΟΥΛ	225	79	107	126	112	87	172	178	193	193	187	
ΑΥΓ	205	64	93	120	117	98	137	152	178	189	188	
ΣΕΠΤ	161	45	64	94	110	110	80	105	139	164	172	
OKT	111	32	41	71	97	110	39	64	99	129	142	
NOE	78	22	26	51	84	105	27	38	71	104	120	
ΔΕΚ	59	18	20	40	70	89	23	28	54	83	97	

Πίνακας 3.5: Κλιματολογικά στοιχεία μέσης μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιες, και κεκλιμένες επιφάνειες με νότιο και τυχαίο προσανατολισμό για την περιοχή των Χανίων. [TOTEE, 2010]



Global irradiation and solar electricity potential Optimally-inclined photovoltaic modules

GREECE / ΕΛΛΑΔΑ



Εικόνα 3.4: Χάρτης ηλιακού δυναμικού της Ελλάδας. [PVGIS, 2013]
3.3 Περιγραφή κύριου εξοπλισμού του φωτοβολταϊκού συστήματος

3.3.1 Γενικά στοιχεία

Το φωτοβολταϊκό σύστημα που εξετάζεται στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, είναι ονομαστικής ισχύος 2,18 kW και έχει διαμορφωθεί με τη χρήση δεκαοκτώ φωτοβολταϊκών πλαισίων, τεχνολογίας λεπτών υμενίων διπλής (18) επίστρωσης (tandem, μικροκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου), 121 Wp έκαστο, κατασκευασμένα από την εταιρία SHARP. Τα χρησιμοποιούμενα φωτοβολταϊκά πλαίσια, εδράζονται πάνω σε σταθερές μεταλλικές βάσεις στην οροφή προκατασκευασμένου οικίσκου (εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων). Η διάταξη των πλαισίων εμφανίζεται ως δύο (2) παράλληλες στοιχειοσειρές (strings) με εννέα (9) συνδεδεμένα εν σειρά πλαίσια. Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος που παράγουν τα πλαίσια σε, κατάλληλο για έγχυση στο δίκτυο χαμηλής τάσης της ΔΕΗ, εναλλασσόμενο ρεύμα γίνεται με την βοήθεια του αντιστροφέα ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος 2,3 kW, SB 2500 της SMA. Επιπλέον η εγκατάσταση περιλαμβάνει όλο το απαιτούμενο ηλεκτρολογικό υλικό (καλωδίωση, αναλώσιμα υλικά εγκατάστασης, πίνακες και γειώσεις).



Εικόνα 3.5: Σχηματική απεικόνιση διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος. [Eltawil και Zhao, 2010]

3.3.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια



Στην εξεταζόμενη πρότυπη εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκαν φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτών διπλής τεχνολογίας υμενίων επίστρωσης (a-Si/μc-Si), τύπου SHARP NA-F121(G5) με ονομαστική ισχύ 121 Wp. Τα πλαίσια έχουν βάρος 19 kg και είναι διαστάσεων 1409 mm x 1009 mm x 46 mm, ενώ στην επιφάνεια τους έχουν ενθυλακωθεί 180 κυψελίδες (4x45 σε παράλληλη διάταξη). Η κατασκευή τους, από διαφανές γυαλί, συνθετικό υλικό EVA και φύλλο προστασίας κατά των καιρικών συνθηκών καθώς και το

πλαίσιο ανοδιωμένου αλουμινίου εξασφαλίζει αξιόπιστη και διαρκή προστασία από τις περιβαλλοντικές επιρροές και τις θερμικές διαστολές.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι πιστοποιημένα κατά IEC/EN 61646, IEC/EN 61730, Classe II (VDE: 40023069) και η χρήση τους, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, ενδείκνυται για διασυνδεδεμένες φωτοβολταϊκές συστοιχίες στέγης. Η επιλογή των φωτοβολταϊκών πλαισίων έγινε με γνώμονα την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω αύξησης της θερμοκρασίας, καθώς η χαμηλότερη, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στις "κλασικές" τεχνολογίες κρυσταλλικού πυριτίου, τιμή -0,24%/°C του θερμοκρασιακού συντελεστής (*β*_{MP}) συμβάλλει προς αυτήν την κατεύθυνση.



Εικόνα 3.6: Τεχνικό σχέδιο φωτοβολταϊκού πλαισίου SHARP NA-F121(G5). [Sharp NA series, 2010]

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά SHARP NA-F121(G5)		
Ονομαστική Ισχύς	121 Wp	
Τάση ανοικτού κυκλώματος - V _{oc}	59,2 V	
Ρεύμα βραχυκυκλώσεως - I _{sc}	3,34 A	
Τάση σε μέγιστη ισχύ - Vpm	45 V	
Ρεύμα σε μέγιστη ισχύ - Ι _{ΡΜ}	2,69 A	
Απόδοση μονάδας-η _m	8,5 %	
NOCT	44	
Συντελεστής θερμοκρασίας-τάσης ανοικτού κυκλώματος – αV _{oc}	-0,30%/ ⁰ C	
Συντελεστής θερμοκρασίας-ρεύματος βραχυκυκλώσεως -al _{sc}	+0,07%/ ⁰ C	
Συντελεστής θερμοκρασίας-ισχύος-β _{ΜΡ}	-0,24%/ºC	
Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ισχύουν σε πρότυπες συνθήκες δοκιμασίας (STC):Ακτινοβολία		

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ισχύουν σε πρότυπες συνθήκες δοκιμασίας (STC):Ακτινοβολία 1000 W/m² με φάσμα φωτός AM 1,5 με θερμοκρασία κυψέλης 25 ⁰C.Η ωφέλιμη ισχύς υπόκειται σε μία ανοχή διαδικασίας ύψους -5%.Προυποθέσεις NOCT: Ακτινοβολία 800 W/m², θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 ⁰C και ταχύτητα ανέμου 1m/s

Πίνακας 3.6: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου SHARP NA-F121(G5). [Sharp NA series, 2010]



Εικόνα 3.7: Καμπύλες μεταβολής των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών φωτοβολταϊκού πλαισίου SHARP NA-F121(G5). [Sharp NA series, 2010]

3.3.3 Αντιστροφέας DC/AC (Inverter)

Οι αντιστροφείς (inverters) είναι συσκευές που έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν τα DC ηλεκτρικά μεγέθη (τάση και ρεύμα) σε ΑC. Αυτή η μετατροπή είναι απαραίτητη στις εγκαταστάσεις καθότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παράγουν μέσω της ακτινοβολίας, DC μεγέθη. Επομένως για να συνδεθούμε στο δίκτυο χαμηλής τάσης της ΔΕΗ που περιέχει ΑC μεγέθη, θα πρέπει να γίνει η παραπάνω μετατροπή, γεγονός που καθιστά τον αντιστροφέα αναπόσπαστο και βασικό τμήμα της εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, στο φωτοβολταϊκό σύστημα που μελετάται, τοποθετήθηκε 0 μονοφασικός αντιστροφέας τύπου SB 2500 της αναγνωρισμένης διεθνώς γερμανικής εταιρείας SMA.



Εικόνα 3.8: Αντιστροφέας SB2500.[SMA,2013]

Τεχνικά χαρακτηριστικά SMA SB 2500			
Είσοδος (DC)			
Μέγ. Ισχύς DC	2700 W		
Μέγ. Τάση DC	600 V		
Περιοχή φωτοβολταϊκής τάσης, σημείου μέγιστης ισχύος (μέσω ανιχνευτή MPP)	224 V – 480 V		
Μέγ. Ρεύμα εισόδου	12 A		
Αριθμός των ανιχνευτών σημείου μέγιστης ισχύος	1		
Μέγ. Αριθμός στοιχειοσειρών (παράλληλη σύνδεση)	3		
Έξοδος (ΑC)			
Ονομαστική ισχύς ΑC	2300 W		
Μέγ. Ισχύς ΑC	2500 W		
Μέγ. Ρεύμα εξόδου	12,5 A		
Ονομαστική τάση / Περιοχή τάσεων ΑC	220 V – 240 V / 180 V – 260 V		
Συχνότητα δικτύου ΑC (αυτορυθμιζόμενη) / Περιοχή	50 Hz / 60 Hz / ± 4,5 Hz		
Συντελεστής ισχύος (cos φ)	1		
Σύνδεση ΑC	μονοφασική		
Βαθμός α	πόδοσης		
Μέγ. Βαθμός απόδοσης	94,1 %		
Γενικά	στοιχεία		
Διαστάσεις (Πλάτος / Ύψος / Βάθος) σε mm	434 / 295 / 214		
Βάρος	30 kg		
Περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας	−25 °C +60 °C		
Ίδια κατανάλωση: Λειτουργία (Αναμονής) / νυχτερινή	< 7 W / 0,25 W		
Τοπολογικά στοιχεία	Μετασχηματιστής NF (χαμηλής συχνότητας)		
Τρόπος ψύξης	Μεταφορά θερμότητας		
Χώρος τοποθέτησης: εσωτερικά / εξωτερικά (Προστασία IP65)	Ναι/Ναι		

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων

76

3.3.4 Χωροθέτηση του φωτοβολταϊκού συστήματος

Ο κύριος σκοπός της μελέτης χωροθέτησης σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις είναι να αποτυπωθούν οι ακριβείς θέσεις των βάσεων και των πλαισίων προκειμένου να μπορεί να γίνει βελτιστοποίηση και απόλυτη μείωση των αναπόφευκτων απωλειών που έχουμε σε κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα και προέρχονται τόσο από σκιάσεις πιθανών φυσικών εμποδίων, όσο και από σκιάσεις της ίδιας εγκατάστασης λόγω σφαλμάτων σχεδιασμού. [TEE/TKM, 2011]

Ως εκ τούτου, κρίθηκε αναγκαία η αξιολόγηση των παραμέτρων που σχετίζονται άμεσα με την διάταξη του υφιστάμενου συστήματος, και κατ' επέκταση με την ενεργειακή του απόδοση. Οι βασικές παράμετροι που ερευνώνται σε αυτήν την υποενότητα είναι:

- Ο προσανατολισμός και η κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- Η σκίαση
- Η στήριξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων



Εικόνα 3.9: Πλάγια όψη της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

3.3.4.1 Προσανατολισμός και κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Ο προσανατολισμός της επιφάνειας που γίνεται δέκτης της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την κατεύθυνση της, είναι ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα κατά τη σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Ο κατάλληλος προσανατολισμός και η βέλτιστη εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας συμβάλλουν στη μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής. Στη πλειονότητα των κτηριακών φωτοβολταϊκών συστημάτων επιλέγεται ο σταθερός προσανατολισμός των πλαισίων, ώστε να επιτυγχάνεται μέση ετήσια γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας όσο το δυνατό πιο κοντά στις 90°. Η επίτευξη αυτού του στόχου έγκειται στην σωστή επιλογή της κλίσης και της αζιμούθιας γωνίας του φωτοβολταϊκού συστήματος. Στην Ελλάδα η μεγιστοποίηση της συνολικής ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επιφάνεια σταθερής κλίσης, επιτυγχάνεται για Νότιο προσανατολισμό και κλίση περί των 30°. [ΚΑΠΕ, 2009]

Ενδεικτική απόδοση ανάλογα με τον προσανατολισμό και την κλίση				
Κλίση ως προς	Προσανατολισμός			
το οριζόντιο επίπεδο	Νότιος	Νοτιοανατολικός Νοτιοδυτικός	Ανατολικός Δυτικός	
0 °	90%	90%	90%	
15 °	98%	95%	88%	
30 °	100%	95%	85%	
90 °	60%	60%	50%	

Πίνακας 3.7: Ενδεικτική απόδοση ανάλογα με τον προσανατολισμό και την κλίση στην Ελλάδα. [ΚΑΠΕ, 2009]

Δεδομένου ότι στην περίπτωση των κτιριακών φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων οι βέλτιστες τιμές κλίσης και προσανατολισμού της συστοιχίας μπορεί να είναι ανέφικτες (λόγω των περιορισμών που προκύπτουν από τις διαθέσιμες επιφάνειες του κτιρίου), συνίσταται η εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί η φωτοβολταϊκή συστοιχία. [ΚΑΠΕ, 2009]

Στην προκειμένη περίπτωση, η τοποθέτηση του φωτοβολταϊκού συστήματος καθορίζεται ως εξής:

- Γεωγραφικό πλάτος (latitude): 35°31'N
- Γεωγραφικό μήκος (altitude): **24°04'E**
- Βέλτιστη κλίση: **30°**
- Γωνία αζιμουθίου: -50°(Νοτιοανατολικός προσανατολισμός)

3.3.4.2 Έλεγχος πιθανής σκίασης

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας ο οποίος επιδρά καθοριστικά στην ενεργειακή αποδοτικότητα ενός κτιριακού φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η ύπαρξη σκίασης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο τόσο τα στοιχεία (ή μέρος αυτών) όσο και τα πλαίσια μιας στοιχειοσειράς συνδέονται μεταξύ τους εν σειρά, γίνεται κατανοητό ότι ακόμα κι ο σκίασης ενός μέρους της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση της παραγόμενης ισχύος συγκριτικά με την αναμενόμενη τιμή αυτής. Η επιλογή της θέσης έδρασης της ζητούμενης φωτοβολταϊκής συστοιχίας καθί ότι δεν θα υπάρξουν σκιάσεις καθ' όλο το έτος και ειδικά τις ώρες υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας. [ΤΕΕ/ΤΚΜ, 2011]



Εικόνα 3.10: Σχηματική απεικόνιση του τρόπου υπολογισμού της ελάχιστης απόσταση μεταξύ συστοιχιών για αποφυγή σκιάσεων βάσει εμπειρικού κανόνα (d1>2,3h). [ΣΕΦ, 2011]

Στην εξεταζόμενη περίπτωση φωτοβολταϊκού συστήματος, δεν απαντώνται προβλήματα σκίασης καθώς η θέση έδρασης του (d1=2,5m>2,3*h), του διασφαλίζει ελεύθερο πεδίο χωρίς ανεπιθύμητα εμπόδια και καλύπτει τις απαιτήσεις του περιορισμού ελάχιστης απόστασης μεταξύ συστοιχιών για την αποφυγή σκιάσεων αλληλοεπικάλυψης.

3.3.4.3 Βάσεις στήριξης

Η έδραση των φωτοβολταϊκών πλαισίων επί της οροφής του οικίσκου έχει υλοποιηθεί μέσω της τοποθέτησης ενδεδειγμένων σταθερών βάσεων αλουμινίου πάνω σε πρόσθετη μεταλλική κατασκευή. Οι παραπάνω μέθοδοι στήριξης επιλέγηκαν αφενός για να μην υπάρξουν παρεμβάσεις στην υφιστάμενη κατασκευή (τρυπήματα, αποκαταστάσεις οπών στα πάνελ οροφής κλπ.) και αφετέρου για την ελαχιστοποίηση των επιπλέον φορτίσεων της φέρουσας κατασκευής με τη χρησιμοποίηση ελαφρών υλικών όπως το αλουμίνιο.

ΚΑΤΟΨΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ





3.3.5 Καλωδίωση

3.3.5.1 Καλώδια DC

Για τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων με τον αντιστροφέα χρησιμοποιήθηκαν 48m καλώδιο τύπου THERMOFLEX Solar XPE 1x4mm² της γερμανικής εταιρίας LÜTZE. Πρόκειται για εύκαμπτα καλώδια με μόνωση και μανδύα από ελαστικό υψηλής αντοχής, πιστοποιημένα από τα εργαστήρια ελέγχου VDE και TÜV. Ενδείκνυνται για χρήση σε ξηρούς, υγρούς ή βρεγμένους χώρους στο ύπαιθρο.



Εικόνα 3.11: Μέρη της DC ηκαλωδίωσης του φωτοβολταϊκού συστήματος. [LÜTZE, 2010]

Στα άκρα της κάθε στοιχειοσειράς υπάρχουν απολήξεις τύπου LC04 M-9947 κατάλληλες για εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων. Οι προδιαγραφές του καλωδίου είναι οι εξής:

- Εύρος θερμοκρασίας από -40°C ως 90°C.
- Επιτρεπτή τάση λειτουργίας 1,5 kV DC. Τάση δοκιμής 10kV.
- Αναμενόμενη διάρκεια ζωής >25 έτη.
- Ανθεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV protection).
- Δυνατότητα Εγκατάστασης τόσο σε εξωτερικούς χώρους όσο και εντός σωλήνων ή καναλιών.
- Άριστη συμπεριφορά κατά την καύση όσον αφορά μετάδοση και διασπορά της φλόγας, χαμηλές εκπομπές καπνού, μη έκλυση διαβρωτικών αερίων και χαμηλή τοξικότητα.
- Μανδύας και μόνωση από μείγμα ελεύθερων αλογόνων με εξαιρετική αντοχή στη θερμοκρασία.
- Οικολογικά αβλαβή όσον αφορά την ανακύκλωση, την απόθεση και την οικονομία ενεργειακών πόρων στη διαδικασία παραγωγής.

[LÜTZE, 2010]

3.3.5.2 Καλώδια ΑC

Αναφορικά με το καλώδιο εναλλασσομένου ρεύματος (AC) χρησιμοποιείται συμβατικού τύπου καλώδιο 6 mm² (π.χ. NYY, NYM, NYCWY), συμφώνα με τις συνήθεις πρακτικές της ηλεκτροτεχνίας για τον υπολογισμό της διατομής τους, τον τρόπο τοποθέτησης και την προστασία τους.

3.3.5.3 Καλώδια βοηθητικής εγκατάστασης

Για τα ασθενή ρεύματα και την επικοινωνία του inverter έχει χρησιμοποιηθεί καλώδιο Li2YCY 2x2x0.22 mm² της εταιρίας UNITRONIC. Τα καλώδια αυτά είναι κατάλληλα για μεταφορά δεδομένων, σε υπολογιστές και συστήματα ελέγχου, όπου απαιτείται η προστασία του μεταφερόμενου σήματος από παρεμβολές. Η προστασία αυτή εξασφαλίζεται από την ηλεκτροστατική τους θωράκιση, που τα προστατεύει από εξωτερικές παρεμβολές. Συνιστώνται για μέτριες μηχανικές καταπονήσεις. Η μόνωση των αγωγών είναι από βραδύκαυστο PVC, όπως και ο εξωτερικός μανδύας. Το PVC του εξωτερικού μανδύα είναι χρώματος γκρι κατά RAL 7032. Οι αγωγοί είναι πολύκλωνοι από συνεστρεμμένα χάλκινα σύρματα, σύμφωνα με το πρότυπο DIN 47100. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι +80°C, ενώ η ελάχιστη θερμοκρασία είναι γιωγού.

3.4 Περιγραφή συστήματος επίβλεψης

Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις μπορούν να περιλαμβάνουν κατάλληλα επιλεγμένους αισθητήρες μέτρησης μετεωρολογικών παραμέτρων και δεδομένων της λειτουργίας τους, δηλαδή αισθητήρες έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, αισθητήρες εξωτερικής θερμοκρασίας και θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πάνελ, μετρητές στιγμιαίας ισχύος και ενέργειας στην έξοδο του αντιστροφέα κλπ. Το σύστημα αδιάλειπτης καταγραφής των παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος πρέπει να είναι συμβατό με την τεχνολογία του αντιστροφέα. Επίσης, το σύστημα επιτήρησης να καταγράφει και να αποθηκεύει τα δεδομένα, έτσι ώστε να επιτρέπει τη συνεχή ανάλυση της απόδοσης του εκάστοτε εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος.

Ειδικότερα, στην εξεταζόμενη περίπτωση, το σύστημα συλλογής δεδομένων αποτελείται από ενσωματωμένη κατάλληλη διάταξη του αντιστροφέα Sunny Boy SB 2500, αισθητήρα ηλιακής ακτινοβολίας Vantage Pro2 ™ της εταιρίας Davis Instruments, και τον μετεωρολογικό σταθμός WXT 250 της εταιρίας Vaisala. Στον μετατροπέα Sunny Boy SB 2500 καταγράφονται τα ηλεκτρικά στοιχεία της εγκατάστασης για κάθε 1min. Ο αισθητήρας ηλιακής ακτινοβολίας Vantage Pro 2 ™ χρησιμοποιείται για τη μέτρηση ολικής ηλιακή ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Η ανάλυση του αισθητήρα είναι σε W/m² και η ακρίβεια του κυμαίνεται ως ± 5% (της πλήρους κλίμακας) ενώ, τα στοιχεία μέτρησης καταγράφονται ανά χρονικά διαστήματα των 10 min. Επίσης, για την καταγραφή των κρίσιμων για τη λειτουργία του συστήματος μετεωρολογικών παραμέτρων χρησιμοποιείται ο μετεωρολογικός σταθμός WXT 250. Σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή, ο αισθητήρας θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού έχει ακρίβεια ± 0,3% στους 20°C και οι τιμές του αποθηκεύονται ανά 1min. Για τη μέτρηση των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, έχουν τοποθετηθεί στο πίσω μέρος τους (σε διαφορετικά σημεία) πέντε (5) αισθητήρες θερμοκρασίας. Και σε αυτήν τη περίπτωση τα στοιχεία καταγράφονται κάθε 1min.

Το σύστημα επιτήρησης μας παρέχει την δυνατότητα παρακολούθησης της απόδοσης και της ενεργειακής παραγωγής του φωτοβολταϊκού συστήματος, όπως επίσης και όλων των παραμέτρων μέτρησης, οποιαδήποτε στιγμή και από οπουδήποτε, διασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο την εύκολη ανίχνευση τυχόν προβλημάτων.



Εικόνα 3.12: Γραφική απεικόνιση της διάταξης των αισθητήρων θερμοκρασίας στα φωτοβολταϊκά πλαίσια.



Εικόνα 3.13: Παράδειγμα εγκατεστημένου αισθητήρα θερμοκρασίας. [Homepower, 2013]

84

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Ο στόχος του κεφαλαίου είναι η ανάλυση των διακριτών φάσεων και των υπολογιστικών τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια υλοποίησης των ερευνητικών στόχων της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Ειδικότερα, γίνεται εκτενής αναφορά, στο θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτήθηκε ώστε να κατασταθεί εφικτή η αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς της πρότυπης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης και να απαντηθούν οι συσχετισμοί που ανακύπτουν από τις δεδομένες συνθήκες λειτουργίας της. Συνοπτικά, τα ζητήματα που αποτέλεσαν αντικείμενο διερεύνησης, ήταν:

- Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες με τυχαίο προσανατολισμό (γ≠0).
- Η ενεργειακή ανάλυση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.
- Ο προσδιορισμός του βαθμού και του τρόπου επίδρασης των υψηλών τιμών θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.
- Ο έλεγχος της ακρίβειας των προβλέψεων από διαθέσιμα λογισμικά πακέτα προσομοίωσης.
- Η αξιολόγηση εμπειρικών μοντέλων υπολογισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων του συστήματος.
- Η κατανόηση των μεταβολών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε συνθήκες πεδίου.
- Η ανάπτυξη "νέου" εμπειρικού μοντέλου ειδικής προσαρμογής για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων

4.2 Μεθοδολογία υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο

Στις παραπάνω ενότητες, τεκμηριώνεται με σαφήνεια ότι η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένες επιφάνειες αποτελεί κομβικό και βαρύνουσας σημασίας αντικείμενο της παρούσας μελέτης. Συγκεκριμένα, η απουσία κατάλληλης διάταξης για την άμεση καταγραφή της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών μονάδων του συστήματος, κατέστησε επιτακτική την ανάγκη ανάπτυξης συμβατής και αξιόπιστης μεθοδολογίας για τον ακριβή προσδιορισμό της. Η μεθοδολογία αυτή συνδυάζει τις πραγματικές καταγεγραμμένες μετρήσεις ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο με τα κατάλληλα, όπως προκύπτει από την διεθνή βιβλιογραφία, εμπειρικά μοντέλα. Στις παρακάτω υποενότητες, περιγράφονται αναλυτικά οι βασικές αρχές ηλιακής γεωμετρίας και τα κύρια βήματα υλοποίησης της εφαρμοσθείσας μεθοδολογίας.

4.2.1 Ο Ήλιος

Ο ήλιος είναι μια σφαίρα έντονα θερμής αέριας ύλης με διάμετρο 1.39×10⁹ m και απέχει, κατά μέσο όρο, 1,5×10¹¹ m από τη γη. Όπως φαίνεται από τη γη, ο ήλιος περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του μία φορά κάθε τέσσερις βδομάδες. Ωστόσο, εξαιτίας της μη ομοιόμορφης πυκνότητάς του, δεν περιστρέφεται σαν συμπαγές σώμα: η διάρκεια περιστροφής του ισημερινού είναι 27 ημέρες και των πολικών περιοχών 30 ημέρες. Ο ήλιος μπορεί να θεωρηθεί ένας συνεχής αντιδραστήρας σύντηξης του οποίου τα τοιχώματα αποτελούνται από θερμά αέρια που συγκρατούνται από βαρυτικές δυνάμεις. Η θερμοκρασία στον πυρήνα του ήλιου εκτιμάται από 8×10⁶ έως 40×10⁶ Κ και η πυκνότητά του 80 με 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή του νερού. Η ενέργεια που παράγεται στο εσωτερικό της ηλιακής σφαίρας σε θερμοκρασίες εκατομμυρίων βαθμών °C μεταφέρεται στην επιφάνεια και έπειτα ακτινοβολείται στο διάστημα. Ξεκινώντας ως ακτίνες Χ και γ στον πυρήνα, ακτινοβολούσες και μεταφορικές διαδικασίες μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε μεγαλύτερα μήκη κύματος στην επιφάνεια μέσω εκπομπής απορρόφησης και επανακτινοβολίας. Εκτιμάται ότι το 90% της ενέργειας παράγεται στην περιοχή από 0 έως 0,23R (όπου R είναι η ακτίνα του ήλιου) η οποία περιλαμβάνει το 40% της μάζας του ήλιου. Σε απόσταση 0,7R από το κέντρο, η θερμοκρασία πέφτει στους 130000 Κ περίπου και η πυκνότητα στα 70 kg/m³: στην περιοχή αυτή οι μεταφορικές διαδικασίες αρχίζουν να γίνονται σημαντικές και η ζώνη από 0,7R έως 1,0R είναι γνωστή ως μεταφορική. Κατά μήκος αυτής της ζώνης η θερμοκρασία πέφτει περίπου στους 5000 Κ και η πυκνότητα στα 10-5kg/m³. Η ανώτερη επιφάνεια της μεταφορικής ζώνης, η φωτόσφαιρα, αποτελεί την πηγή ολόκληρης σχεδόν της ηλιακής ακτινοβολίας. Πάνω από τη φωτόσφαιρα υπάρχει η επιφάνεια αναστροφής, ακολουθούμενη από τη χρωμόσφαιρα σε ύψος 10000 km και τέλος το ηλιακό στέμμα, μια περιοχή πολύ χαμηλής πυκνότητας και πολύ υψηλής (10⁶K) θερμοκρασίας. [Duffie και Beckman,1991]

4.2.2 Ηλιακή σταθερά

Η απόσταση μεταξύ ήλιου και γης μεταβάλλεται κατά 1,7% και επίσης ο ήλιος υποτείνεται σε γωνία 32° στη μέση απόσταση ήλιου-γης, πού είναι της τάξεως των 1,495·10¹¹m (μία αστρονομική μονάδα). Η ακτινοβολία που εκλύεται από τον ήλιο και η χωρική του σχέση με τη γη έχουν σαν αποτέλεσμα μια σχεδόν σταθερή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα της γης. Η ηλιακή σταθερά (G_{sc}), είναι η ενέργεια του ήλιου ανά μονάδα χρόνου που λαμβάνεται από μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας στη μέση απόσταση ήλιου-γης έξω από την ατμόσφαιρα. Το Παγκόσμιο Κέντρο Ακτινοβολίας (World Radiation Center-WRC) έχει υιοθετήσει την τιμή 1367 W/m² με αβεβαιότητα της τάξης του 1%. Αυτή η τιμή για την ηλιακή σταθερά (G_{sc}) χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία. [Duffie και Beckman,1991]





4.2.3 Μεταβολές ακτινοβολίας εκτός Ατμόσφαιρας

Όπως είναι γνωστό η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται κατά τα διάρκεια του 24-ώρου, λόγω περιστροφής της γης περί τον άξονά της, και κατά την διάρκεια του έτους, λόγω περιστροφής της γης στο επίπεδο της εκλειπτικής. Η μεταβολή της απόστασης της γης από τον ήλιο έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας. Αν *G*on είναι η ένταση της ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας, που εκφράζει και την ακτινική ακτινοβολία (Direct or Beam radiation), εφόσον εκτός της ατμόσφαιρας δεν υπάρχουν οι υπόλοιπες συνιστώσες της ακτινοβολίας, σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ήλιου και *G*_{SC} η μέση τιμή της ηλιακής σταθεράς, θα είναι:

$$G_{on} = G_{sc} * \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) [4.1]$$

Όπου, *n*=1 (1η Ιανουαρίου) έως 365 (31η Δεκεμβρίου) :η ημέρα του έτους. [Duffie και Beckman,1991]

4.2.4 Ορισμοί

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

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

$$m = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad [4.2]$$

- <u>Ακτινική ή άμεση Ακτινοβολία</u> (Beam Radiation). Η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον ήλιο χωρίς να έχει υποστεί διάχυση από την ατμόσφαιρα. (Η ακτινική συνιστώσα αναφέρεται συχνά και ως άμεση συνιστώσα)
- Διάχυτη Ακτινοβολία (Diffuse Radiation). Η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον ήλιο αφού η κατεύθυνσή της έχει αλλάξει από τη διάχυση στην ατμόσφαιρα.
- Ολική Ηλιακή Ακτινοβολία (Total Solar Radiation). Το άθροισμα ακτινικής και διάχυτης ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια. (Οι πιο συνηθισμένες μετρήσεις ακτινοβολίας αναφέρονται σε ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο).
- <u>Ένταση Ακτινοβολίας</u> (Irradiance), W/m². Η τιμή της ακτινοβολούμενης ενέργειας που προσπίπτει σε μοναδιαία επιφάνεια προς την επιφάνεια αυτή. Το σύμβολο *G* χρησιμοποιείται για την περιγραφή της έντασης της ακτινοβολίας με αντίστοιχους δείκτες για την ακτινική και τη διάχυτη.
- <u>Ακτινοβολία ή Ηλιακή Έκθεση</u> (Irradiation or Radiant Exposure), J/m². Η προσπίπτουσα ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας που προκύπτει από την ολοκλήρωση της έντασης ακτινοβολίας σε καθορισμένο χρονικό διάστημα, συνήθως μιας ώρας ή μέρας. Το σύμβολο *Ι* χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ακτινοβολίας σε διάστημα μιας ώρας.

 <u>Ηλιακός Χρόνος</u> (Solar Time). Ο χρόνος βασισμένος στη φαινόμενη κίνηση του ήλιου στον ουρανό με το ηλιακό μεσημέρι να είναι η χρονική στιγμή που ο ήλιος περνά από το μεσημβρινό του παρατηρητή. Η σχέση μεταξύ ηλιακού και τοπικού χρόνου είναι:

 \succ Για την χειμερινή ώρα: AST = LST + E - 4 * (SL - LL) [4.3a]

 \blacktriangleright Για την θερινή ώρα: AST = LST + E - 4 * (SL - LL) - 1h [4.3b]

Όπου, *AST*: ο ηλιακός χρόνος,(h).

LST: ο τοπικός χρόνος σε ώρες,(h). SL: η ζώνη ώρας της θέσης μελέτης (για την Ελλάδα 30°). LL:το γεωγραφικό μήκος της θέσης μελέτης,(°). E: μια εξίσωση χρόνου,(h).

E = 229,2 * (0,000075 + 0,001868 * cosB - 0,032077 * sinB - 0,014615 * cos2B - 0,04089 * sin2B[4.4a]

όπου *B* = (*n* − 1) * $\frac{360}{365}$ [4.4b] και *n*: η η-οστή ημέρα του έτους,1 ≤ η ≤ 365.

Η εξίσωση του χρόνου *E* 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.[Duffie και Beckman,1991 και Eicker, 2003]

4.2.5 Κατεύθυνση ακτινικής συνιστώσας ακτινοβολίας

Οι γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ ενός επιπέδου αυθαίρετου προσανατολισμού ως προς τη γη οποιαδήποτε χρονική στιγμή (ανεξαρτήτως αν το επίπεδο είναι σταθερό ή κινείται σε σχέση με τη γη) και της προσπίπτουσας άμεσης ακτινοβολίας, που ισοδυναμεί με τη θέση του ήλιου σχετικά με τη θέση του επιπέδου, μπορεί να περιγραφεί μέσω κατάλληλων γωνιών. [Duffie και Beckman,1991]



Εικόνα 4.2: Γωνίες προσδιορισμού θέσης επιπέδου και ήλιου. [Duffie και Beckman,1991]

Οι γωνίες αυτές ορίζονται ως εξής:

- <u>γεωγραφικό πλάτος</u> (φ), η γωνιακή θέση της τοποθεσίας βόρεια ή νότια από τον ισημερινό, θετικό στο βόρειο ημισφαίριο και αρνητικό στο νότιο (− 90°≤ φ ≤ 90°)
- <u>ηλιακή απόκλιση (</u>δ), η γωνιακή θέση του ήλιου το ηλιακό μεσημέρι (δηλ. όταν ο ήλιος είναι στον τοπικό μεσημβρινό) σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού, θετική στο βόρειο ημισφαίριο και αρνητική στο νότιο (-23,45° ≤ δ ≤ 23,45°). Η τιμή της ηλιακής απόκλισης μπορεί να εκτιμηθεί από την εξίσωση:

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 * \frac{284 + n}{365}\right) [4.5]$$

όπου *n*: η n-οστή ημέρα του έτους,1 ≤ n ≤ 365.

- κλίση (β), η γωνία μεταξύ του επιπέδου της υπό εξέταση επιφάνειας και του ορίζοντα, 0°≤β≤180° (β > 90°) σημαίνει ότι το επίπεδο της επιφάνειας είναι στραμμένο προς τα κάτω)
- <u>αζιμούθια γωνία επιφάνειας</u> (γ), η γωνιακή απόκλιση της προβολής της καθέτου της επιφάνειας στο οριζόντιο επίπεδο από τον τοπικό μεσημβρινό, με μηδενική τιμή στο νότο, αρνητικές τιμές στην ανατολή και θετικές στη δύση (–180°≤ γ ≤180°)
- <u>ωριαία γωνία</u> (ω), η γωνιακή απόκλιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά από τον τοπικό μεσημβρινό που οφείλεται στην περιστροφή της γης γύρω από τον άξονα της κατά 15° την ώρα, πρωί αρνητική, απόγευμα θετική. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega = (AST - 12) * 15 [4.6]$$

όπου *AST*:ο ηλιακός χρόνος,(h).

 <u>γωνία πρόσπτωσης</u> (θ), η γωνία μεταξύ της ακτινικής συνιστώσας της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια και της καθέτου στην επιφάνεια αυτή.

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

- ζενιθιακή γωνία (θz), η γωνία μεταξύ της κατακόρυφου και της ευθείας με τον ήλιο, ή η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια
- <u>γωνία ανύψωσης ήλιου</u> (α_s), η γωνία μεταξύ του ορίζοντα και της ευθείας με τον ήλιο, συμπληρωματική της ζενιθιακής γωνίας.
- <u>αζιμούθια γωνία ήλιου</u> (γ_s), η γωνιακή απόκλιση από το νότο της προβολής της ακτινικής συνιστώσας στο οριζόντιο επίπεδο. Αποκλίσεις ανατολικά του νότου είναι αρνητικές και δυτικά του νότου θετικές.

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

 $cos\theta = sin\delta * sin\varphi * cos\beta - sin\delta * cos\varphi * sin\beta * cos\gamma + cos\delta * cos\varphi * cos\beta * cos\omega + cos\delta * sin\varphi * sin\beta * cos\gamma * cos\omega + cos\delta * sin\beta * sin\gamma * sin\omega$ [4.7]

και $cos\theta = cos\theta_z * cos\beta + sin\theta_z * sin\beta * cos(\gamma_s - \gamma)$ [4.8]

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

- Για κεκλιμένες επιφάνειες στραμμένες προς το νότο ή το βορρά, οπότε η αζιμούθια γωνία (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 * cos\varphi * cos\gamma + cos\delta * sin\varphi * sin\beta * cos\gamma * cos\omega 
+ cos\delta * sin\gamma * sin\omega [4.9]
```

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 * cos\delta * cos\omega + sin\varphi * sin\delta  [4.10]
```

Η ωριαία γωνία δύσης του ήλιου (ω_s) προκύπτει θέτοντας θ_z= 90°:

 $cos\omega_s = -\frac{sin\varphi * sin\delta}{cos\varphi * cos\delta} = -tan\varphi * tan\delta$ [4.11]

Συνεπώς, ο ήλιος ανατέλλει σε γωνία (-ω_s) και δύει σε (+ω_s). Ο αριθμός των ωρών που διαρκεί η κάθε ημέρα, δηλαδή ο χρόνος από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, θα είναι:

$$N = \frac{2}{15}\cos^{-1}(-\tan\varphi * \tan\delta)$$
 [4.12]

[Duffie και Beckman,1991]

4.2.6 Η επίδραση της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας

Τα παραπάνω ισχύουν για τη συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που έρχεται σαν δέσμη από τον ήλιο. Για τις υπόλοιπες μορφές της ολικής 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.

Η ποσότητα της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που καλύπτει την επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία. Η ικανότητα της ανάκλασης, εκφράζεται από ένα συντελεστή (albedo) που κυμαίνεται από 0 για πλήρη απορρόφηση της ακτινοβολίας, μέχρι 1 για πλήρη ανάκλαση. Στον πίνακα 4.1, δίνονται οι ενδεικτικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης (ρ) για ορισμένα από τα είδη επιφανειών που συμβαίνει να έχει το περιβάλλον στην περιοχή μελέτης. [Φραγκιαδακης,2006]

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

Πίνακα 4.1: Κατηγοριοποίηση του δείκτη ανάκλασης (ρ). [Φραγκιαδακης,2006]

4.2.7 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη

Δεδομένου ότι οι μετρήσεις της εντάσεως της ηλιακής ακτινοβολίας γίνονται συνήθως στο οριζόντιο επίπεδο (*G*/*I*/*H*), ιδιαίτερα ενδιαφέρον ζήτημα είναι η συσχέτιση μεταξύ της μετρούμενης εντάσεως της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο (*G*/*I*/*H*) και εκείνης που προσπίπτει στο συλλέκτη (*G*_T/*I*_T/*H*_T).

4.2.7.1 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας

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

$$G_{on} = G_{sc} * \left[\left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \right] * \cos \theta_z$$
[4.13]

Όπου, *G*_{on} :η ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας μετρημένη σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ήλιου την *n*-οστή ημέρα του έτους.

[Duffie και Beckman,1991]

Για την αποφυγή σύγχυσης, είναι σκόπιμο να αποσαφηνιστούν οι συμβολισμοί που χρησιμοποιούνται. Γενικότερα, η ηλιακή ακτινοβολία θα συμβολίζεται με (G) όταν γίνεται αναφορά στην στιγμιαία τιμή της, με (I) όταν πρόκειται για την ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια μίας δεδομένης ώρας και με (H) όταν αφορά την ηλιακή ακτινοβολία στην διάρκεια μιας ημέρας.

Η ολοκλήρωση της εξίσωσης 4.1 για το χρονικό διάστημα μιας ώρας, η οποία καθορίζεται μέσω της ηλιακής ώρας από τις ωριαίες γωνίες (ω₁) και (ω₂) (ω₁<ω₂),δίνει την ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας, η οποία προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια στη διάρκεια αυτής της ώρας:

$$I_o = \frac{12}{\pi} * G_{sc} * \left(1 + 0.033\cos\frac{360n}{365}\right) * \left[\cos\varphi * \sin\delta * (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \frac{\pi * (\omega_2 - \omega_1)}{180} * \sin\varphi * \sin\delta\right]$$
 [4.14]

Για τον υπολογισμό της ημερήσιας ενέργειας *H*_o (kWh/m²/d) εκτός ατμόσφαιρας σε οριζόντια επιφάνεια, η παραπάνω σχέση (4.14) ολοκληρώνεται για το χρονικό διάστημα μεταξύ ανατολής και δύσης του ηλίου, δηλαδή ω₁=-ω_s και ω₂=+ω_s.

$$H_{o} = \frac{24}{\pi} * G_{sc} * \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] * \left[\cos\varphi * \cos\delta * \sin\omega_{s} + \frac{2\pi * \omega_{s}}{360} * \sin\varphi * \sin\delta \right]$$
 [4.15]

Η ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια ενός συλλέκτη είναι ένας συνδυασμός της άμεσης ακτινοβολίας που διέρχεται μέσω της ατμόσφαιρας, της διάχυτης ακτινοβολίας που διασκορπίζεται από τα μόρια και τα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα, και της ανακλώμενης ακτινοβολίας που προκύπτει λόγω αντανακλάσεων της άμεσης στο έδαφος ή σε άλλη επιφάνεια μπροστά από το συλλέκτη.

4.2.7.2 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. Έτσι από τις μετρήσεις της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στην τοποθεσία της εγκατάστασης, μπορεί να υπολογισθεί ο δείκτης αιθριότητας (clearness index) της ατμόσφαιρας:

 <u>Ωριαίος δείκτης αιθριότητας, (KT</u>): αναπαριστά το λόγο ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο προς την ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας την συγκεκριμένη ώρα:

$$K_T = \frac{I}{I_0} [4.16]$$

 Ημερήσιος δείκτης αιθριότητας, (Κ_T): αναπαριστά το λόγο της μέσης ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο προς την ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας την ίδια ημέρα:

$$K_T = \frac{H}{H_o} [4.17]$$

<u>Μηνιαίος δείκτης αιθριότητας, (K_T)</u>: αναπαριστά το λόγο της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο προς την αντίστοιχη τιμή της ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας:

$$\overline{K}_T = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_o} \left[4.18 \right]$$

Ο συντελεστής αιθριότητας αποτελεί χαρακτηριστικό του τόπου εγκατάστασης και συχνά δίδεται σε πίνακες ως μέση μηνιαία τιμή (\overline{K}_T). Έχει αποδειχθεί ότι ανεξάρτητα από το γεωγραφικό πλάτος (φ), 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). Θεωρείται δε βέβαιο, ότι όσο πιο αίθρια είναι η ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της ακτινοβολίας και μικρότερο το ποσοστό της διάχυτης επί της ολικής.

2014

Βάσει της τιμής του δείκτη αιθριότητας (*K*_T), διακρίνονται τέσσερις (4) τύποι ημέρας:

- Αίθρια ημέρα: *K_T* ≥0,65
- Συνθήκες με αραιής-παροδικής συννεφιάς:0,5≤ K_T <0,65
- Νεφελώδης ημέρα:0,35≤ K_T <0,5
- Βροχερή ήμερα: *K_T* <0,35

Στη διεθνή βιβλιογραφία, παρουσιάζεται μεγάλος αριθμός εμπειρικών σχέσεων για τη συσχέτιση της διάχυτης και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι οι περισσότεροι ερευνητές, προσεγγίζουν το λόγο της διάχυτης ακτινοβολίας προς την ολική, ως συνάρτηση του συντελεστή καθαρότητας (*K*_T). Η πιο διαδεδομένη σχέση είναι αυτήν των Liu και Jordan, η όποια παρουσιάστηκε το έτος 1962:

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 1,39 - 4,027 * \overline{K}_T + 5,531 * \overline{K}_T^2 - 3,108 * \overline{K}_T^3$$
 [4.19]

[Klein,1977]

Οι Synodinou et al., σε μελέτη συγκριτικής αξιολόγησης της συσχέτισης των Liu και Jordan με παρόμοιες σχέσεις, επισημαίνει την καταλληλότητα της σχέσης για της εφαρμογή της στην Ελλάδα και σε περιοχές με αντίστοιχες κλιματικές συνθήκες (Synodinou et al., 2007). Σύμφωνα με τα παραπάνω, μέσω της εξίσωσης [3.19] είναι δυνατός ο υπολογισμός της άμεση ακτινοβολίας που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο αφαιρώντας τη διάχυτη από την ολική, δηλαδή:

$$\overline{H}_b = \overline{H} - \overline{H}_d \tag{4.20}$$

Όπου,

 \overline{H}_b :η μηνιαία μέση ημερήσια της άμεσης ηλιακής ακτινοβολία,(kWh/m²/d). \overline{H} : η μηνιαία μέση ημερήσια τιμή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, (kWh/m²/d). \overline{H}_d : η μηνιαία μέση ημερήσια τιμή της διάχυτης ακτινοβολίας, (kWh/m²/d).

4.2.7.3 Υπολογισμός της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο 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, την ακτινική που προέρχεται απευθείας από τον Ήλιο, τη διάχυτη που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο και την ανακλώμενη που προέρχεται από το έδαφος της γύρω περιοχής.



Εικόνα 4.3: Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας [Thevenard και Haddad,2006]

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 έχει οπτική επαφή με το επίπεδο. Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη για κάθε μία από τις συνιστώσες και ένας συντελεστής διόρθωσης.

Ο γεωμετρικός παράγοντας, (R_b): ο λόγος της ακτινικής συνιστώσας σε κεκλιμένη επιφάνεια προς την ακτινική συνιστώσα σε οριζόντια επιφάνεια οποιαδήποτε χρονική στιγμή, προκύπτει με τη βοήθεια της σχέσης:

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n} * \cos \theta}{G_{b,n} * \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \qquad [4.21]$$

Όπου, θ : η γωνία πρόσπτωσης,(°).

 $θ_z$: η ζενιθιακή γωνία, (°).

Συνεπώς, η ακτινική ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο είναι:

$$\overline{H}_{b,T} = R_b * \overline{H}_b$$
[4.22]

Αντίστοιχα, η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, ενσωματώνοντας το συντελεστή διόρθωσης, υπολογίζεται ως:

$$\overline{H}_{r,T} = \overline{H} * \rho * \frac{(1 - \cos \beta)}{2}$$
[4.23]

Όπου, *β*: η κλίση του συλλέκτη,(°).

ρ: ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους (albedo).

 \overline{H} : η μηνιαία μέση ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο,(kWh/m²/d).

Επίσης, η αναγωγή της μηνιαίας μέσης ημερήσιας διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας προκύπτει από τη σχέση:

$$\overline{H}_{d,T} = \overline{H}_d * \frac{(1+\cos\beta)}{2}$$
 [4.24]

Όπου, β : η κλίση του συλλέκτη, (°).

 \overline{H}_{d} : η μηνιαία μέση ημερήσια τιμή της διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο,(kWh/m²/d).

Εν κατακλείδι, η ολική μέση μηνιαία ημερήσια ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας του κεκλιμένου επιπέδου προκύπτει από τη σχέση:

$$\overline{H}_T = \overline{H}_{b,T} + \overline{H}_{d,T} + \overline{H}_{r,T}$$
[4.25]

4.2.7.4 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες με νότιο προσανατολισμό

Η μηνιαία μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο με νότιο υπολογισμό, υπολογίζεται βάση του ισοτροπικού μοντέλου των Liu, Jordan και Klein από την ακόλουθες σχέσεις:

$$\overline{H}_T = \overline{R} * \overline{H} = \overline{R} * \overline{K}_T * \overline{H}_o$$
[4.26]

Όπου,

$$\bar{R} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) * \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} * \frac{(1 + \cos\beta)}{2} + \rho * \frac{(1 - \cos\beta)}{2} \quad [4.27]$$

και,

 ρ : η ανακλαστικότητα του εδάφους albedo.

 β : η κλίσης της επιφάνειας,(°).

 \overline{H} : η μηνιαία μέση ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδογια την υπό μελέτη περιοχή,(kWh/m²/d).

 \overline{H}_{d} : η μηνιαία μέση ημερήσια τιμή της διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο για την υπό μελέτη περιοχή,(kWh/m²/d).

*H*_o: η μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας στο οριζόντιο επίπεδο για την υπό μελέτη περιοχή, (kWh/m²/d).

 \bar{R}_b : ο μέσος μηνιαίος γεωμετρικός παράγοντας για νότιο προσανατολισμό.

Ο μέσος μηνιαίος γεωμετρικός παράγοντας (\bar{R}_{b}), που είναι ο λόγος της άμεσης ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο προς την άμεση ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\bar{R}_{b} = \frac{\left[\cos(\varphi - \beta) * \cos \delta * \sin \omega_{ss} + \frac{\pi}{180} * \omega_{ss} * \sin(\varphi - \beta) * \sin \delta\right]}{\left[\cos \varphi * \cos \delta * \sin \omega_{ss} + \frac{\pi}{180} * \omega_{ss} * \sin \varphi \sin \delta\right]} [4.28]$$

όπου,

ω_{ss}: η ωριαία γωνία δύσης της κεκλιμένης επιφάνειας ([°]) για τη μέση αντιπροσωπευτική ημέρα του μήνα στην υπό μελέτη περιοχή και υπολογίζεται από την σχέση:

 $\omega_{ss} = \min \left[\omega_s, \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) * tan\delta) \right] \quad [4.29]$

και,

φ: το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής,(°).
 δ: ηλιακή απόκλιση την μέση αντιπροσωπευτική μέρα του μήνα,(°).
 β:η κλίση της επιφάνειας,(°).

Με την εφαρμογή των πιο πάνω σχέσεων υπολογίζεται η μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο (\overline{H}_T) με νότιο προσανατολισμό (γ =0), για διάφορες κλίσεις επιφανειών (β). Οι τιμές αυτές αναφέρονται σε καθαρό ορίζοντα χωρίς εμπόδια. Σε περίπτωση που στο νότο υπάρχουν φυσικά ή τεχνητά εμπόδια η προσπίπτουσα ακτινοβολία μειώνεται. [Klein,1977]

4.2.7.5 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες με τυχαίο προσανατολισμό

Για κεκλιμένες επιφάνειες με τυχαίο προσανατολισμό (αζιμούθια γωνία, $\gamma \neq 0$), η προσπίπτουσα μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία (\overline{H}_T) υπολογίζεται σύμφωνα με τις εξισώσεις 3.26 και 3.27 του Klein, όπου ο μέσος μηνιαίος γεωμετρικός παράγοντας (\overline{R}_b), είναι ο λόγος της άμεσης ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο με τυχαίο προσανατολισμό προς την άμεση ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\{ \left[(\cos\beta * \sin\delta * \sin\varphi) * (\omega_{ss} - \omega_{sr}) * \left(\frac{\pi}{180}\right) \right] - \left[(\sin\delta * \cos\varphi * \sin\beta * \cos\gamma) * (\omega_{ss} - \omega_{sr}) * \left(\frac{\pi}{180}\right) \right] \\ + \left[(\cos\varphi * \cos\delta * \cos\beta) * (\sin\omega_{ss} - \sin\omega_{sr}) \right] + \left[(\cos\delta * \cos\gamma * \sin\varphi * \sin\beta) * (\sin\omega_{ss} - \sin\omega_{sr}) \right] \\ \overline{R}_{b} = \frac{-\left[(\cos\delta * \sin\beta * \sin\gamma) * (\cos\omega_{ss} - \cos\omega_{sr}) \right] \right\} \\ \left\{ 2 * \left[(\cos\varphi * \cos\delta * \sin\omega_{s}) + (\omega_{s} * \sin\varphi * \sin\delta) * \left(\frac{\pi}{180}\right) \right] \right\}$$

[4.30]

Όπου,

ω_{sr}: η ωριαία γωνία ανατολής της κεκλιμένης επιφάνειας με τυχαίο προσανατολισμό, (°).

ωss: η ωριαία γωνία δύσης της κεκλιμένης επιφάνειας με τυχαίο προσανατολισμό, (°).

και υπολογίζονται από τις σχέσεις:

<u>για επιφάνειες με δυτικό προσανατολισμό(γ>0):</u>

•
$$\omega_{sr} = -\min \{\omega_s, \cos^{-1}[\frac{(A*B+\sqrt{A^2-B^2+1})}{(A^2+1)}]\}$$

• $\omega_{ss} = \min \{\omega_s, \cos^{-1}[\frac{(A*B-\sqrt{A^2-B^2+1})}{(A^2+1)}]\}$

[4.31]

για επιφάνειες με ανατολικό προσανατολισμό(γ<0):

•
$$\omega_{sr} = -\min\left\{\omega_s, \cos^{-1}\left[\frac{(A*B-\sqrt{A^2-B^2+1})}{(A^2+1)}\right]\right\}$$
[4.32]

•
$$\omega_{ss} = -\min \{\omega_s, \cos^{-1}[\frac{(A*B+\sqrt{A^2-B^2+1})}{(A^2+1)}]\}$$

όπου,

$$A = \frac{\cos\varphi}{\sin\gamma \star \tan\beta} + \frac{\sin\varphi}{\tan\gamma}$$
[4.33]

$$B = \tan \delta * \left[\frac{\cos \varphi}{\tan \gamma} - \frac{\sin \varphi}{\sin \gamma \cdot \tan \beta}\right]$$
[4.34]

[Klein,1977 και Andersen,1980]

4.2.7.6 Υπολογισμός ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες με τυχαίο προσανατολισμό

Για την εκτίμηση της μέσης ωριαίας ενέργειας ή της ισχύος που αποδίδει ένα ηλιακό σύστημα, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της μέσης ημερήσιας διακύμανσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην διάρκεια μιας τυπικής ημέρας του κάθε μήνα.

Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας του μήνα μπορεί να υπολογιστεί από τα αντίστοιχα εμπειρικά μοντέλα υπολογισμών των Collares-Pereira & Rabl, αλλά και το ισοτροπικό μοντέλο. Τα μοντέλα αυτά υπολογίζουν της ωριαίες τιμές της ολικής, άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας τόσο σε οριζόντιο όσο και σε κεκλιμένο επίπεδο. Η ωριαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (1) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση όταν είναι γνωστή η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (Η).

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} * (a + b * \cos\omega) * \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \left(\frac{\pi * \omega_s}{180}\right) * \cos\omega_s}$$
[4.35]

Όπου,

ω :η ωριαία γωνία για δεδομένη ώρα της ημέρας, (°). $ω_s$:η ωριαία γωνία δύσης του ηλίου, (°). *a* και *b* γεωμετρικοί παράμετροι που υπολογίζονται από τους παρακάτω εμπειρικούς τύπους:

$$a = 0,409 + 0,5016 * \sin(\omega_s - 60)$$
[4.36a]

$$b = 0,6609 - 0,4767 * \sin(\omega_s - 60)$$
 [4.36b]

Αντίστοιχα, η ωριαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο (*I*_d) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση όταν είναι γνωστή η μέση ημερήσια διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (*H*_d).

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} * \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \left(\frac{\pi * \omega_s}{180}\right) * \cos\omega_s}$$
[4.37]

Η ωριαία ηλιακή ενέργεια (*I_T*) που προσπίπτει σε κεκλιμένο επίπεδο με τυχαίο προσανατολισμό υπολογίζεται από την σχέση:

$$I_T = (H * r_t - H_d * r_d) * R_b + H_d * r_d * \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + H * \rho * r_t * \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)$$
[4.38]

όπου,

*r*_t:ο λόγος της ωριαίας προς την μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο.

r_d:ο λόγος της ωριαίας προς την μέση ημερήσια διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο.

ρ : η ανακλαστικότητα του εδάφους albedo.

 β : η κλίσης της επιφάνειας,(°).

Η: η μέση ημερήσια ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο για την υπό μελέτη περιοχή, (kWh/m²/d).

H_a: η μέση ημερήσια τιμή της διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο για την υπό μελέτη περιοχή,(kWh/m²/d).

*R*_b: είναι ο γεωμετρικός παράγοντας που εκφράζει τον λόγο της άμεσης ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο προς την αντίστοιχη στο οριζόντιο επίπεδο και δίνεται από την σχέση:

$$R_{b} = \frac{\frac{\sin\delta * \sin\varphi * \cos\beta - \sin\delta * \cos\varphi * \sin\beta * \cos\gamma + \cos\delta * \cos\varphi * \cos\beta * \cos\omega}{+\cos\delta * \sin\rho * \sin\beta * \cos\gamma * \cos\omega + \cos\delta * \sin\beta * \sin\gamma * \sin\omega}}{\cos\varphi * \cos\delta * \cos\omega + \sin\varphi * \sin\delta}$$
[4.39]

όπου,

γ: η αζιμουθιακή γωνία (°) της επιφάνειας και ισούται με (γ=0) για νότιο προσανατολισμό της επιφάνειας, (γ=90°) για δυτικό και (γ=-90°) για ανατολικό. ω: η ωριαία γωνία για δεδομένη ώρα της ημέρας,(°).

δ: η ηλιακή απόκλιση,(°).

φ: το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής,(°). [Duffie και Beckmann,1991]

4.2.7.7 Ο Αλγόριθμος αναγωγής των πειραματικών τιμών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, από το οριζόντιο στο κεκλιμένο επίπεδο

Στο μοντέλο αυτό αναφερόμαστε στις μηνιαίες μέσες ημερήσιες τιμές της απολαβής ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (\overline{H}) και στις ωριαίες τιμές (I) μίας δεδομένης χρονικής στιγμής κατά τη διάρκεια μιας ημέρας. Συγκεκριμένα, διαθέτοντας τις τιμές της ημερήσιας ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, ανά μονάδα επιφάνειας, που έχουν προκύψει από την κατάλληλη επεξεργασία (σε Microsoft Excel) πειραματικών δεδομένων πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια τοποθετημένο αισθητήρα, σε ορισμένο τόπο πλησίον της υπό μελέτη φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, για την εξεταζόμενη χρονική περίοδο, προκύπτει η μηνιαία μέση ημερήσια ενεργειακή απολαβή ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (\overline{H}). Ο αλγόριθμος οδηγεί στην αντίστοιχη τιμή της μηνιαίας απολαβής ηλιακής ενέργειας στην κεκλιμένη επιφάνεια του φωτοβολταϊκού συστήματος με νοτιανατολικό προσανατολισμό (\overline{H}_T). Σε δεύτερο στάδιο, προσαρμόζοντας κατάλληλα την μεθοδολογίας (I_T) για την κάθε στιγμή στην διάρκεια οποιασδήποτε τυπικής ημέρας.

Διαδοχικά βήματα υπολογισμού με βάση τον αλγόριθμο:

- 1. <u>Δεδομένα</u>
 - Γεωγραφικό πλάτος του τόπου, (φ).
 - Γωνιά κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων,(β).
 - Αζιμούθια γωνία της επιφανείας των φωτοβολταϊκών πλαισίων,(γ).
 - Πειραματικές μετρήσεις πυκνότητας ισχύος ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο (G) από το μετεωρολογικό σταθμό του εργαστήριου αιωρούμενων ατμοσφαιρικών σωματιδίων, του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, του Πολυτεχνείου Κρήτης.
 - Συντελεστής ανάκλασης (ρ) για το βραχώδες περιβάλλον της υπό μελέτη περιοχής, λαμβάνεται η τιμή 0,2 από τον πίνακα 4.1.
- 2. <u>Υπολογισμοί (1[°] στάδιο)</u>
 - Επεξεργασία των καταγεγραμμένων μετρήσεων
 Οι πειραματικές τιμές που συλλέγονται από τον μετεωρολογικό σταθμό αφορούν πραγματικές μετρήσεις ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (W/m²) στο οριζόντιο επίπεδο ανά 10min. Με κατάλληλη επεξεργασία των μετρήσεων στο λογισμικό Microsoft

Excel, υπολογίζεται η ημερήσια ενεργειακή απολαβή ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (Η), στο οριζόντιο επίπεδο (kWh/m²/d), στην εξεταζόμενη χρονική περίοδο. Σε περιπτώσεις απώλειας των πειραματικών μετρήσεων λόγω διακοπής λειτουργιάς - βλάβη του μετεωρολογικού σταθμό, έγινε αντικατάσταση τους με τις τιμές για τις αντίστοιχες ημέρες από το προηγούμενο ή το επόμενο έτος, ανάλογα.

- Υπολογισμός της ηλιακής απόκλισης,(δ). • Η τιμή της ηλιακής απόκλισης υπολογίστηκε από την εξίσωση [4.5] για κάθε ημέρα (*n*) της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου.
- Υπολογισμός ωριαία γωνία δύσης του ήλιου (ω_s) μέσω της εξίσωσης [4.11]
- Υπολογισμό της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (H_o)_n (kWh/m²) εκτός ατμόσφαιρας σε οριζόντια επιφάνεια μέσω της σχέσης [4.15] για κάθε ημέρα (n) της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου. Επισημαίνεται ότι η μηναία μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας (\overline{H}_{o}) μπορεί να προσδιοριστεί, επιλέγοντας για κάθε μήνα την ημέρα του έτους όπου η ημερήσια τιμή της προσεγγίζει τον μέσο όρο του μήνα, και χαρακτηρίζεται ως η αντιπροσωπευτική ημέρα του μήνα. [Klein,1977]
- Με βάση τις τιμές (\overline{H}_{o}) και (\overline{H}) για τον κάθε μήνα του χρονικού • διαστήματος μελέτης, προσδιορίζεται ο μέσος μηνιαίος δείκτης αιθριότητας $\overline{K_T}$ σύμφωνα με τη σχέση [4.18].
- Ο Υπολογισμός της μηνιαίας μέσης ημερήσιας διάχυτης ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο (Hd) υλοποιείται από την σχέση [4.19].
- Υπολογισμός της μηνιαίας μέσης ημερήσιας άμεσης ακτινοβολίας • που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο (\overline{H}_b) μέσω της εξίσωσης [4.20].
- εφαρμόζοντας τη διαδικασία που περιγράφεται στην υποενότητα 4.2.7.5 για ανατολικό προσανατολισμό (γ<0)
- Τελικά, η μηνιαία μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας του κεκλιμένου επιπέδου που ορίζει το φωτοβολταϊκό σύστημα (\overline{H}_T) προκύπτει από τους υπολογισμούς των σχέσεων [4.27] και [4.26]

3. <u>Υπολογισμοί (2[°] στάδιο)</u>

- Επιπλέον προαπαιτούμενα δεδομένα για τον υπολογισμό μιας στιγμιαίας μέσης τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της μεθοδολογίας που περιγράφεται στην υποενότητα 4.2.7.6, είναι:
 - a) ο αληθής ηλιακός χρόνος (AST) για την δεδομένη χρονική στιγμή, όπως προσδιορίζεται από τις σχέσεις [3.4b],[3.4a] και
 [4.3a] ή [4.3b] κατά σειρά εφαρμογής.
 - b) η ωριαία γωνία την δεδομένη χρονική στιγμή η οποία βασίζεται στο αληθή ηλιακό χρόνο [4.5].
 - c) Οι τιμές της ηλιακής απόκλισης (δ), της μέσης ημερήσιας ολικής (Η) και διάχυτης (Ha) ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, της ωριαίας γωνίας δύσης του ηλίου (ωs) για την δεδομένη ημέρα στην υπό μελέτη περιοχή, όπως προσδιορίζονται μέσω της πρώτης φάσης υπολογισμών.
- Ο λόγος (r_t) της ωριαίας προς την μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο υπολογίζεται για το χρονικό διάστημα λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος, εφαρμόζοντας τις σχέσεις [4.36a], [4.36b] και [4.35].
- Χρησιμοποιώντας την σχέση [4.37] προσδιορίζεται ο λόγος (r_d) της ωριαίας προς την μέση ημερήσια διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για τη διάρκεια της δεδομένης ημέρας.
- Υπολογίζεται, ο ωριαίος γεωμετρικός παράγοντας (*R_b*) για την ακριβή θέση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας συμφώνα με την σχέση [4.39].
- Εν κατακλείδι, η ωριαία ολική ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας του κεκλιμένου επιπέδου (*I_T*) προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης [4.38].

4.3 Μεθοδολογία ανάλυσης της ενεργειακής συμπεριφοράς φωτοβολταϊκών συστημάτων

4.3.1 Εισαγωγή

Η θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ή συστήματος δεν λαμβάνει υπόψη μία σειρά από παράγοντες οι οποίοι συχνά συνεπάγονται το σημαντικό περιορισμό της. Η ισχύς που παράγεται εξαρτάται από ένα σύνολο παραμέτρων που πρέπει να μελετώνται κυρίως κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός συστήματος. Η προσδιοριζόμενη ετήσια ενεργειακή απόδοση, αποτελεί την πιο κατάλληλη παράμετρο στο σχεδιασμό φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς επίσης και το καλύτερο μέτρο αξιολόγησης της μακροχρόνιας συμπεριφοράς των.



Εικόνα 4.4: Μεταβαλλόμενοι και μη μεταβαλλόμενοι παράγοντες που καθορίζουν την μέγιστη απόδοση στα φωτοβολταϊκά συστήματα. [Mani και Pillai, 2010]

4.3.2 Ενεργειακή ανάλυση φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η ενεργειακή απόδοση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα και κεντρίζει το ενδιαφέρον για τους τελικούς χρήστες του. Ειδικότερα, το βασικό ζητούμενο των επενδυτών είναι η μέγιστη παράγωγη ενέργειας (kWh) ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος (kWp), η οποία οδηγεί στο μέγιστο δυνατό κέρδος από την λειτουργία του συστήματος.

Η ολική ημερήσια (*E*_{AC,d}), η ολική μηνιαία (*E*_{AC,m}) και η μηνιαία μέση ημερήσια (*E*_{AC,d,avg}) παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ορίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$E_{AC,d} = \sum_{t=1}^{t=24} E_{AC,t}$$
, $E_{AC,m} = \sum_{d=1}^{N} E_{AC,d}$ kai $E_{AC,m,avg} = \frac{1}{N} \sum_{d=1}^{N} E_{AC,d}$ [4.35a,b,c]

Όπου Ν:ο αριθμός των ημερών του αντίστοιχου μήνα.

Κατά αντίστοιχο τρόπο υπολογίζονται και η ολική ημερήσια (*E*_{DC,d}), η ολική μηνιαία (*E*_{DC,m}) και η μηνιαία μέση ημερήσια (*E*_{DC,m,avg}) παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος.[Ayompe, 2011]

Επίσης, σε αυτήν την υποενότητα περιγράφονται τα βασικά δευτερογενή μεγέθη, με τα οποία συμβάλλουν ώστε να γίνει αξιολόγηση της λειτουργίας του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος. Με τον όρο δευτερογενή, γίνεται αναφορά σε εκείνα τα μεγέθη, τα οποία προκύπτουν μέσω της υπολογιστικής επεξεργασίας των μετρούμενων από τους αισθητήρες δεδομένων. Η χρησιμότητα τους έγκειται στο γεγονός πως αναφέρονται στην άμεση παραγωγή ενέργειας, συγκρίνοντάς την κάθε φορά, με διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά ή ακόμα και με μετεωρολογικά δεδομένα.



Εικόνα 4.5: Γραφική απεικόνιση της ροής ενέργειας στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Τα δευτερογενή μεγέθη για την ενεργειακή αξιολόγηση του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι:

Ενεργειακή απόδοση αναφοράς - Reference yield (Y_R) : Η ενεργειακή απόδοση αναφοράς εκφράζει τον λόγο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε σχέση με την ακτινοβολία αναφοράς (G_{STC}). Η G_{STC} είναι η ακτινοβολία για ιδανικές συνθήκες ηλιοφάνειας και ισούται με 1000 W/m². Ο δείκτης αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ωρών για τις οποίες το φωτοβολταϊκό σύστημα θα πρέπει να λειτουργήσει υπό πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC), ώστε να παράγει ισόποση ενέργεια με τη ενέργεια που μεταφέρεται μέσω απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας, στο εξεταζόμενο χρονικό διάστημα. Η ενεργειακή απόδοση αναφοράς προσδιορίζεται μέσω της σχέσης:

$$Y_R = \frac{H_T}{G_{STC}}$$
 [4.36]

όπου:

Υ_R :ο δείκτης απόδοσης αναφοράς,(h).

H_T: η ηλιακή ενέργεια ανά μονάδα της κεκλιμένης επιφάνειας, η οποία προσπίπτει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια,(kWh/m²). *G*_{STC} :η ακτινοβολία αναφοράς STC,(1kW/m²).

Η μηναία μέση ημερήσια (Y_{R,m}) τιμή του δείκτη ενεργειακής απόδοσης αναφοράς προκύπτει μέσω της σχέσης:

$$Y_{R,m} = \frac{1}{N} \sum_{d=1}^{N} Y_{R,d}$$
 [4.37]

Όπου *Ν*:ο αριθμός των ημερών του αντίστοιχου μήνα. [Eltawil et al.,2010]

Ενεργειακή απόδοση συστοιχίας - Array yield, (Y_A) : Η ενεργειακή απόδοση συστοιχίας, εκφράζει το ποσό παραγόμενης ηλεκτρικής εγκατεστημένο ενέργειας συνεχούς ρεύματος ανά kWp TOU φωτοβολταϊκού συστήματος την δεδομένη χρονική περίοδο. Παρέχοντας μία πιο κατανοητή ερμηνεία του μεγέθους, μπορούμε να πούμε πως αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ωρών, τον οποίο το σύστημα θα έπρεπε να λειτούργει στην ονομαστική του ισχύ για να παράγει το ίδιο ποσό ενέργειας (E_{DC}) με αυτό που μετρήθηκε. Η τιμή του δείκτη είναι σε ώρες και η εμφάνιση χαμηλής τιμής του συνεπάγεται κάποια αστοχία στον προσανατολισμό, την κλίση, πιθανή εμφάνιση σκίασης ή κάποιο πρόβλημα στην φωτοβολταϊκή συστοιχία (χαμηλή απόδοση).

Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Y_A = \frac{E_{DC}}{P_{PV.rated}}$$
[4.38]

Όπου,

Υ_A :ο δείκτης απόδοση συστοιχίας,(h).

*E*_{DC}: η παραγόμενη ενέργεια από την φωτοβολταϊκή συστοιχία, η οποία καταγράφεται στην είσοδο του αντιστροφέα-inverter, (kWh).

P_{pv,rated}:η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος,(kWp).

Η ημερήσια (Y_{A,d}) και η μηναία μέση ημερήσια (Y_{A,m}) τιμή του δείκτη ενεργειακής απόδοσης της συστοιχίας δίδονται ως εξής:

$$Y_{A,d} = \frac{E_{DC,d}}{P_{PV.rated}} \text{ Kal } Y_{A,m} = \frac{1}{N} \sum_{d=1}^{N} Y_{A,d} \text{ [4.39a,b]}$$

Όπου, *Ν*: ο αριθμός των ημερών του αντίστοιχου μήνα. [Ayompe et al., 2011]

Τελική ενεργειακή απόδοση - Final yield (Y_F): Ο δείκτης της τελικής ενεργειακής απόδοσης δείχνει το ποσό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος (δηλ. ρεύματος κατάλληλου για διάθεση στο ηλεκτρικό δίκτυο) ανά εγκατεστημένο kWp του φωτοβολταϊκού συστήματος την ορισμένη χρονική περίοδο. Ουσιαστικά, ο δείκτης εκφράζει τον αριθμό των ωρών που το σύστημα θα έπρεπε να λειτουργεί στην μέγιστη ισχύ του, ώστε να παραχθεί η ενέργεια (E_{AC}) που τροφοδοτείται στο δίκτυο ηλεκτρισμού. Γενικά ο δείκτης της τελικής ενεργειακής απόδοση θεωρείται ένα αξιόπιστο μέσο για την σύγκριση της παραγωγής ενέργειας σε φωτοβολταϊκό συστήματα διαφορετικών λειτουργικών χαρακτηριστικών (είδους, μεγέθους, τύπου, τοποθεσίας, προσανατολισμού κλπ.). Γενικά προσδιορίζεται από την σχέση:

$$Y_F = \frac{E_{AC}}{P_{PV:rated}}$$
[4.40]

Όπου,

Υ_F :ο δείκτης τελικής απόδοσης,(h).

*E*_{AC} :η παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα, που διατίθεται για χρήση στο ηλεκτρικό δίκτυο,(kWh).

P_{pv,rated}: η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος, (kWp).

Η ημερήσια (Y_{F,d}) και η μηναία μέση ημερήσια (Y_{F,m}) τιμή του δείκτη της τελικής ενεργειακής απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος υπολογίζονται ως εξής:

$$Y_{F,d} = \frac{E_{AC,d}}{P_{PV,rated}}$$
 kai $Y_{F,m} = \frac{1}{N} \sum_{d=1}^{N} Y_{F,d}$ [4.41a,b]

Όπου, N:ο αριθμός των ημερών του αντίστοιχου μήνα. [Ayompe et al., 2011]

Λόγος απόδοσης - Performance ratio (PR): Ο λόγος απόδοσης • (αδιάστατο μέγεθος) αποτελεί το πιο συνηθισμένο μέτρο αξιολόγησης φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς παρέχει μία σαφή εικόνα της λειτουργίας του συστήματος συναρτήσει της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και της ονομαστικής ισχύος TOU φωτοβολταϊκού συστήματος. Ουσιαστικά ο δείκτης περιγράφει τον τρόπο αξιοποίησης του ενεργειακού δυναμικού του συστήματος, το οποίο έχει καθοριστεί σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC). Η υψηλή τιμή του λόγου απόδοσης (PR) τεκμηριώνει την καλή λειτουργία του συστήματος και την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής χρησιμοποίησης του δυναμικό του. Αντιθέτως χαμηλή τιμή του, φανερώνει προβλήματα κατά την μετατροπή που οφείλονται σε τεχνικά ή σχεδιαστικά προβλήματα της εγκατάστασης. Πρακτικά 0 δείκτης TOU λόγου απόδοσης, επιτυγχάνει тην ποσοτικοποίηση των επιδράσεων από τις διάφορες απώλειες στην έξοδο του συστήματος. Οι απώλειες αυτές μπορεί να αφορούν την κακή απόδοση του αντιστροφέα, την αντίσταση των καλωδίων, τις διάφορες ασυμβατότητες κατά την μετατροπή ισχύος από DC σε AC, την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών πάνω στα πλαίσια, την μειωμένη χρήση της ακτινοβολίας λόγω ανακλάσεων στην γυάλινη επιφάνεια των πλαισίων ή ακάθαρτων τμημάτων σ' αυτά και γενικά για οποιαδήποτε άλλη αστοχία των επιμέρους υλικών και συσκευών. Η τιμή του (PR) τυπικά αναφέρεται σε μηνιαία (PR,m) ή ετήσια (PR,v) βάση, οπότε και μπορούν να βγουν πιο χρήσιμα συμπεράσματα για το εξεταζόμενο σύστημα. Η αναφορά του δείκτη αυτού σε εβδομαδιαία ή ημερήσια βάση πιθανόν να είναι χρήσιμη μόνο για την εξακρίβωση ύπαρξης προβλημάτων του εξοπλισμού. Τέλος και ο δείκτης του λόγου απόδοσης χρησιμοποιείται για την σύγκριση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η συχνότερα εμφανιζόμενη στην διεθνή βιβλιογραφία σχέση για τον υπολογισμό του δείκτη (PR) είναι:

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad [4.42]$$

Όπου,

 Y_F :ο δείκτης τελικής απόδοσης,(h ή h/d).

Υ_R :ο δείκτης απόδοσης αναφοράς,(h ή h/d).[IEC 61724,1998]
<u>Αποδοτικότητα συστοιχίας - PV array efficiency (n_{pv})</u>: Η αποδοτικότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας αποτελεί το μέτρο της ικανότητας της να παράγει ενέργεια, συναρτήσει της συνολικά κατειλημμένης επιφάνειας της καθώς επίσης και της ακτινοβολίας που δέχεται για δεδομένο χρονικό διάστημα (ημέρα, μήνας, έτος). Η σχέση υπολογισμού είναι:

$$n_{pv} = \left(\frac{E_{DC}}{H_T * A_a}\right) * 100\%$$
 [4.43]

Όπου,

*E*_{DC}: η παραγόμενη ενέργεια από την φωτοβολταϊκή συστοιχία, η οποία καταγράφεται στην είσοδο του αντιστροφέα-inverter,(kWh).

H_T: η συνολική ηλιακή ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, η οποία προσπίπτει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια,(kWh/m²).

A_a: η ενεργή επιφάνεια που καλύπτουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια,(m²).

[Mondol et al., 2007]

<u>Αποδοτικότητα συστήματος - PV system efficiency (n_{syst}):</u> Η αποδοτικότητα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ορίζεται ως η επάρκεια του, να μετατρέπει την προσπίπτουσα στην επιφάνεια του ηλιακή ακτινοβολία, προκειμένου να παράγει την ενέργεια που διατίθεται στο ηλεκτρικό δίκτυο την ορισμένη χρονική περίοδο (ημέρα, μήνας, έτος). Υπολογίζεται ως εξής:

$$n_{syst} = \left(\frac{E_{AC}}{H_T * A_a}\right) * 100\%$$
 [4.44]

Όπου,

*E*_{AC}: η παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα, που διατίθεται για χρήση στο ηλεκτρικό δίκτυο, (kWh).

H_T: η συνολική ηλιακή ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, η οποία προσπίπτει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια,(kWh/m²).

A_a: η ενεργή επιφάνεια που καλύπτουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, (m²).

[Mondol et al., 2007]

<u>Αποδοτικότητα αντιστροφέα – Inverter efficiency (n_{inv})</u>: Με την έννοια αποδοτικότητα αντιστροφέα ορίζεται ως βαθμός μετατροπής του συνεχούς ρεύματος (E_{DC}) που παράγεται στην φωτοβολταϊκή συστοιχία σε εναλλασσόμενο (E_{AC}) που τροφοδοτείται στο δίκτυο στο δεδομένο χρονικό διάστημα (ημέρα, μήνας, έτος). Μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$n_{inv} = \left(\frac{Y_F}{Y_A}\right) * 100\% = \left(\frac{E_{AC}}{E_{DC}}\right) * 100\%$$
 [4.45]

Όπου,

Υ_F :ο δείκτης τελικής απόδοσης,(h ή h/d).

Υ_A :ο δείκτης απόδοσης συστοιχίας,(h ή h/d).

E_{AC} : η παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα, που διατίθεται για χρήση στο ηλεκτρικό δίκτυο,(kWh).

*E*_{DC}:η παραγόμενη ενέργεια από την φωτοβολταϊκή συστοιχία, η οποία καταγράφεται στην είσοδο του αντιστροφέα-inverter,(kWh). [Mondol et al., 2007]

<u>Απώλειες Συστήματος - Systems Losses (Ls)</u>: Μέσω του δείκτη (Ls) γίνεται αναφορά κυρίως στις απώλειες από την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος (E_{DC}) σε εναλλασσόμενο (E_{AC}) μέσω του αντιστροφέα. Ουσιαστικά, ο δείκτης αποτιμά των αριθμό των ωρών που το φωτοβολταϊκό σύστημα θα έπρεπε να λειτουργεί στην ονομαστική του ισχύ για να καλύψει τις απώλειες από την συντελούμενη μετατροπή. Η σχέση προσδιορισμού είναι:

$$L_{s}=\gamma_{A}-\gamma_{F}$$
 [4.46]

Όπου,

Υ_F :ο δείκτης τελικής απόδοσης,(h ή h/d).

 Y_A :ο δείκτης απόδοσης συστοιχίας,(h ή h/d). [Chouder και Silvestre,2010]

 <u>Απώλειες σύλληψης συστοιχίας – Array capture losses (Lc)</u>: Αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των ωρών λειτουργίας του συστήματος σε διαφορετικές από τις (STC) συνθήκες, ποσοτικοποιώντας με αυτόν τον τρόπο τις απώλειες σε πραγματικές συνθήκες εφαρμογής και προκαλούνται λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας των κυττάρων σε τιμή μεγαλύτερη των 25 °C, σκίασης, ρύπανσης, καλωδίωσης, συμβατότητας των φωτοβολταϊκών συστοιχιών κλπ. Με άλλα λόγια, είναι ένα μέτρο αξιολόγησης του βαθμού εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας από τους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες. Προσδιορίζονται από τη σχέση:

$$L_C = Y_R - Y_A \qquad [4.47]$$

Όπου,

Υ_R :ο δείκτης απόδοσης αναφοράς,(h ή h/d).

Υ_A :ο δείκτης απόδοσης συστοιχίας,(h ή h/d).

[Chouder και Silvestre,2010]

<u>Απώλειες θερμοκρασίας-Cell temperature losses (L_{CT})</u>: Κατά γενικό κανόνα, η ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων μειώνεται από 0,2-0,4% για κάθε 1°C αύξησης της θερμοκρασίας των ηλιακών στοιχείων πάνω από τους 25 °C. Οι Ueda et al., πρότειναν τη απομόνωση των θερμικών απωλειών από το ευρύτερο σύνολο των απωλειών σύλληψης συστοιχίας και καθόρισαν ειδικό δείκτη αξιολόγησης τους. Ο δείκτης των θερμικών υπολογίζεται παρακάτω:

$$L_{CT} = Y_R - Y_T$$
 [4.48]

Όπου,

 $Y_T = Y_R * n_{temp}$:ο διορθωμένος δείκτης απόδοσης αναφοράς,(h ή h/d).

Υ_R:ο δείκτης απόδοσης αναφοράς,(h ή h/d).

 $n_{temp} = 1 - \beta_{MP}(T_m - 25)$: ο διορθωτικός συντελεστής απωλειών λόγω αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων πάνω από την πρότυπη θερμοκρασία 25 °C,(%).

β_{MP}: ο συντελεστής θερμοκρασίας-απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, (%/°C).

T_m: η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων,(°C).

[Ayompe., 2011]

 <u>Απώλειες διαφοροποίησης συστοιχίας – Array Miscellaneous losses</u> (<u>L_{CM}</u>): Αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των ωρών λειτουργίας του συστήματος σε διαφορετικές από τις (STC) συνθήκες, ποσοτικοποιώντας με αυτόν τον τρόπο τις απώλειες σε πραγματικές συνθήκες εφαρμογής και προκαλούνται λόγω σκίασης, ρύπανσης, ανομοιογένειας της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, καλωδίωσης, συμβατότητας των φωτοβολταϊκών συστοιχιών κλπ. Προσδιορίζονται από τη σχέση:

 $L_{CM} = Y_T - Y_A$ [4.49]

Όπου,

*Υ*_T: ο διορθωμένος δείκτης απόδοσης αναφοράς,(h ή h/d).*Υ*_A :ο δείκτης απόδοσης συστοιχίας,(h ή h/d).

[Haeberlin και Beutler,1995]

4.4 Διερεύνηση της σχέσης βαθμού απόδοσης-θερμοκρασίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα

Οι δύο κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την παραγόμενη ενέργεια από ένα ηλιακό κελί είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει σχεδόν ανάλογη επίδραση στο ρεύμα βραχυκύκλωσης του κελιού, ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος αυξάνεται ελαφρά με την αύξηση της έντασης. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η σχεδόν αναλογική σχέση ανάμεσα στην ισχύ του κελιού και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, για σταθερές θερμοκρασίες κελιού.

Η θερμοκρασία επιδρά κυρίως στην τάση του ηλιακού κελιού. Πιο συγκεκριμένα, με μείωση της θερμοκρασίας, αυξάνεται σημαντικά η τάση ανοιχτού κυκλώματος, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται ελαφρά. Συνολικά, η ισχύς του ηλιακού κελιού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. [ΤΕΕ/ΤΚΜ, 2011]



Διάγραμμα 4.1: Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική καμπύλη ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. [Meral και Dinçer, 2011]

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων στην λειτουργία του εξεταζόμενου συστήματος, ένα σύνολο κατάλληλων μετρήσεων, για τους θερινούς μήνες της περιόδου παρακολούθησης, απομονώθηκε από το σύστημα καταγραφής. Αρχικά διερευνήθηκαν η ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και της αποδοτικότητας, ώστε να προσδιοριστεί χρονικά η αύξηση της έντασης του φαινομένου επιρροής της. Σε δεύτερη φάση, για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων, υπό σταθερή ακτινοβολία μελετήθηκαν όλα τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας, μέσω γραμμικής συσχέτισης.

4.5 Θεωρητική προσέγγιση του φωτοβολταϊκού συστήματος - Λογισμικά προσομοίωσης

Η προσομοίωση (simulation) ως τεχνική μίμησης της συμπεριφοράς ενός συστήματος από ένα άλλο σύστημα, καταλαμβάνει περίοπτη θέση στα πλαίσια των ερευνητικών και σχεδιαστικών εφαρμογών. Μπορούμε να ορίσουμε την προσομοίωση ως μια μέθοδο μελέτης ενός συστήματος (ενός αντικειμένου, ενός φαινομένου, μιας δραστηριότητας, μιας διαδικασίας) με τη βοήθεια ενός άλλου συστήματος. Η προσομοίωση δηλαδή είναι μία αναπαράσταση ή ένα μοντέλο που έχει κατασκευαστεί για να αναπαραστήσει και να επιτρέψει την κατανόηση της λειτουργίας ενός συστήματος. Βασικά πλεονεκτήματα της προσομοίωσης ενός συστήματος είναι η ταχύτητα διενέργειας υπολογισμών, η οικονομία από πλευράς εξοπλισμού, η μικρή επικινδυνότητα και η σχετικά

Όσον αφορά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα, ειδικά προγράμματα προσομοίωσης, τα οποία εξελίσσονται συνεχώς, παρέχουν την δυνατότητας υπολογισμού της συνολικής παραγωγής ενέργειας ενός σταθμού. Επιπλέον, τα προγράμματα αυτά αποτελούν αναγνωρισμένα εργαλεία στην παγκόσμια αγορά, και χρησιμοποιούνται σε ευρεία κλίμακα από μελετητές για τον αξιόπιστο σχεδιασμό και υπολογισμό των αποδόσεων αυτόνομων ή διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

Στην παρούσα μελέτη, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος, κάνοντας χρήση των ειδικών λογισμικών PVGIS, SMA Sunny Design και RETScreen, στα πλαίσια υλοποίησης αμφίδρομου ελέγχου της εγκυρότητας των ρεαλιστικών (μέσω επεξεργασίας πραγματικών μετρήσεων) και των θεωρητικών αποτελεσμάτων. Τα προαναφερθέντα λογισμικά ικανοποιούν σε μεγάλο βαθμός τις απαιτήσεις διαμόρφωσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σύμφωνα με τα ειδικά χαρακτηριστικά του. Ειδικότερα, λαμβάνονται υπόψη, η ακριβή θέση εγκατάστασης του συστήματος, τα μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής έδρασης του, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των χρησιμοποιουμένων συσκευών και το μικροκλίμα της περιοχής. Επιπλέον, τα επιλεγέντα λογισμικά είναι ευρέως διαδεδομένα για εργασίες σχεδιασμού, διαστασιολόγησης και αξιολόγησης φωτοβολταϊκών συστημάτων. Άλλα πλεονεκτήματα των λογισμικών αυτών είναι:

- Το φιλικό προς τους χρήστες περιβάλλον
- Η απλή εισαγωγή δεδομένων
- Οι ενσωματωμένες βιβλιοθήκες
- Εύκολη εκμάθηση
- Σχετικά υψηλή αξιοπιστία
- Δωρεάν διάθεση

4.5.1 Περιγραφή του λογισμικού PVGIS

Το λογισμικό PVGIS αποτελεί μια βάση δεδομένων που συνδυάζει γεωγραφικά, μετεωρολογικά και δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας σύμφωνα με τα οποία εκτιμάται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ευρώπη, την Αφρική, και τη Νοτιοδυτική Ασία. Παρέχει χωρική διακριτική ικανότητα 100 m, γεγονός που οδηγεί σε ακριβέστερες εκτιμήσεις της έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία, ειδικά σε ορεινές περιοχές όπου ο ακριβής υπολογισμός των σκιάσεων έχει μείζονα σημασία. Αφού εντοπίσουμε μέσω των δορυφορικών φωτογραφιών του Google Earth την περιοχή που μας ενδιαφέρει, καταγράφουμε τη θέση της (γεωγραφικό μήκος και πλάτος). Τα στοιχεία αυτά εισάγονται στο PVGIS, προκειμένου να υπολογιστεί η απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Κύριος λόγος επιλογής του συγκεκριμένου λογισμικού είναι ο υψηλός βαθμός αξιοπιστίας του (είναι επίσημο εργαστήριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης και ανήκει στο Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Ενέργειας).



Εικόνα 4.6: Αρχική σελίδα του PVGIS. [JRC,2013]

Η Ευρωπαϊκή αυτή βάση δεδομένων περιλαμβάνει:

- γεωγραφικά δεδομένα: ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο, τα διοικητικά όρια και παγκόσμια κάλυψη γης, των πόλεων, κ.λπ.
- κλιματολογικά δεδομένα που αντιπροσωπεύουν μηνιαίες και ετήσιες μέσες τιμές: του ημερήσιου ποσού της ολικής ακτινοβολίας για το οριζόντιο επίπεδο, της ατμοσφαιρικής θολότητας, της διάχυτης ακτινοβολίας και της βέλτιστης γωνίας κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων για τη μεγιστοποίηση απόδοσης της ενέργειας.
- μέσες τιμές για τις κατοικημένες περιοχές: του ετήσιου συνόλου της ολικής ακτινοβολίας (σε οριζόντιο, κάθετο και σε κεκλιμένο επίπεδο, του ετήσιου εκτιμώμενου ποσού παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (σε οριζόντιο, κάθετο και σε κεκλιμένο επίπεδο) και της βέλτιστης γωνίας κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. [PVGIS,2013]

4.5.2 Περιγραφή του λογισμικού Sunny Design (SMA)

То Sunny Design είναι ένα λογισμικό σχεδιασμού φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, το οποίο διατίθεται δωρεάν από την εταιρία SMA solar technology. Κύριος στόχος του προγράμματος είναι να υποστηρίξει μηχανικούς εγκαταστάτες στη διαδικασία σχεδιασμού και και διαστασιολόγησης, παρέχοντας τους τη δυνατότητα λήψης ασφαλών αποφάσεων ως προς την διαμόρφωση μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Ειδικότερα, καθορίζοντας τη συνολική ισχύ του συστήματος, τον τύπο φωτοβολταϊκών πλαισίων και αντιστροφέων, το Sunny Design έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει με αυτόματο τρόπο τον αριθμό των πλαισίων και των συστοιχιών ανά αντιστροφέα καθώς και τον συνολικό αριθμό αντιστροφέων που πιθανώς να απαιτούνται. Επιπλέον, βασική λειτουργία αυτού του λογισμικού είναι ο τεχνικός έλεγχος συμβατότητας των συστοιχιών με τους αντιστροφείς, και η σύνθεση στοχευόμενων οδηγιών βελτιστοποίησης την συνολικής εγκατάστασης.

😼 Sunny Design - New project						
File Project Tools Help						
🗅 💳 📕 🎊 🔣 🍕			🏮 🖩 🗶 🧿			
Project: New project	Project data Overview of results Cable dimensioning					
Location: Change	 Project data 					
$\mathcal{F} \square \square$	Project name:* New project	Customer:	*			
Project overview Project 1	Project number:		*			
PV-array 1	- Location	- Grid connection				
Project Data" tab	Region* Country:* City:* City:* Create own location	Grid voltage:* Grid voltage:* Three-phase feed-in Unbalanced load limit: The set grid voltage affects the range of inv	0,00 ÷ kVA			
In order to be able to configure PV arrays	· Temperatures	· Comment				
and inverters, first establish the necessary project data:	Cell temperature		*			
Enter the desired project names in the Project Name* field In the "Location" rare select the desired location or establish own location via [Own Location] A suitable grid voltage will be automatically recommended upon entry of the location data. To adjust the grid voltage, see "Optional	Record Low Temperature: -10 mm² C Average High Temperature: 50 mm² C Record High Temperature: 70 mm² C		×			
Settings". 3. Enter temperature settings in the	* Mandatory fields		Configure PV plant			
#Project overview						
:: Performance						
ii Help						

Εικόνα 4.7: Αρχική σελίδα του λογισμικού Sunny Design.

Συνοπτικά, οι σημαντικότερες λειτουργίες του λογισμικού είναι:

- Δημιουργία διαφόρων σεναρίων σχεδιασμού με όλους τους μετατροπείς SMA, υπό τη μορφή εργασιών:
 - Απλές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, π.χ. με ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια με παρόμοια διαμόρφωση.
 - Σύνθετες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, π.χ. με διάφορα φωτοβολταϊκές συστοιχίες με διαφορετική διαμόρφωση.
 - Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις με τριφασική τροφοδοσία, σε συνάρτηση με ένα όριο για το μη αντισταθμισμένο φορτίο που καθορίζεται από το χρήστη.

- Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις με βάση τις προδιαγραφές της χώρας εγκατάστασης, π.χ. σχετικά με τους τύπους των μετατροπέων ή την τάση δικτύου.
- 2. Δημιουργία προτύπων εργασίας με τυπικές ρυθμίσεις για τις εργασίες
- Αυτόματος έλεγχος των δεδομένων λειτουργίας της σχεδιασθείσας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.
- 4. Διαστασιολόγηση αγωγών-καλωδίων.
- Λήψη και εκτέλεση ενημερώσεων online για αναβάθμιση των βάσεων δεδομένων του Sunny Design και των οδηγιών χρήσης για το Sunny Design. [SMA Sunny Design, 2013]

4.5.3 Περιγραφή του λογισμικού RETScreen

Το υπολογιστικό πακέτο RETScreen αποτελεί ένα πρωτοπόρο παγκοσμίως λογισμικό υποστήριξης αποφάσεων σχετικά με την καθαρή ενέργεια. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο και αξιόπιστο λογισμικό οικονομοτεχνικής ανάλυσης έργων που σχετίζονται με τις ανανεώσιμες μορφές, την εξοικονόμηση και τη συμπαραγωγή ενέργειας, το οποίο σχεδιάστηκε από το Εργαστήριο Φυσικών Πόρων του Καναδά και κάτω από την εποπτεία της Κυβέρνησης του Καναδά.

Γενικά, το RETScreen επιτρέπει σε μηχανικούς, αρχιτέκτονες και υπεύθυνους οικονομικού σχεδιασμού να μοντελοποιούν και να αναλύουν οποιοδήποτε έργο καθαρής ενέργειας, εφαρμόζοντας μία πρότυπη μεθοδολογία πέντε βημάτων, η οποία περιλαμβάνει ενεργειακή ανάλυση, ανάλυση κόστους, ανάλυση εκπομπών, οικονομική ανάλυση, και ανάλυση ευαισθησίας/κινδύνου.

	RETScreen [®] International
	Clean Energy Project Analysis Software
Five Step Standard Analysis	
Start Settings & Site Conditions	Sensitivity & Se
Integrated Features	Ready to make a decision
Climate Data	e Distance Learning Course • Distance Learning Course • Training Material • Engineering Textbook • Case Studies • Marketplace & Maps
☉ Minister of Natural Resources Canada 1997-2008.	RETScreen® International

Εικόνα 4.8: Αλγόριθμος λειτουργίας του λογισμικού RETScreen. [Retscreen, 2013]

Ειδικότερα, οι χρήστες του λογισμικού για την ανάλυση φωτοβολταϊκών έργων έχουν τη δυνατότητα, αφού εισαγάγουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία (κλιματικά, τεχνικά, μέγεθος της εγκατάστασης, κλπ.) της εγκατάστασης στα ειδικά διαμορφωμένα φύλλα εργασίας του λογισμικού, να υλοποιήσουν κατάλληλους ενεργειακούς υπολογισμούς.



Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας περιπτώσεων ενεργειακών υπολογισμών για φωτοβολταϊκά συστήματα σε περιβάλλον RETScreen. [Retscreen, 2013]

4.6 Αξιολόγηση εμπειρικών μοντέλων προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων

4.6.1 Επιλογή Μοντέλων

Στη βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε εντοπίστηκε ένας μεγάλος αριθμός επιστημονικών εργασιών, οι οποίες σχετίζονται με τις διάφορες μεθόδους προσδιορισμού της λειτουργικής θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στις μεθόδους αυτές, λαμβάνονται υπόψη περιβαλλοντικές μεταβλητές καθώς και ειδικές παράμετροι, εξαρτώμενες από το είδος και την τεχνολογία φωτοβολταϊκού συστήματος. Ωστόσο, δε πρέπει να παραβλέπεται ότι, οι σχέσεις αυτές, αποτελούν τη μαθηματική έκφραση της εμπειρίας που προκύπτει από την ανάλυση τοπικών κλιματικών δεδομένων, και ως εκ τούτου

η συμβατότητα του εκάστοτε μοντέλου με την εξεταζόμενη περίπτωση φωτοβολταϊκού στοιχείου/πλαισίου/συστήματος, πρέπει να ελέγχεται.

Στο πλαίσιο των ερευνητικών στόχων της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, αναπτύσσεται κατάλληλη μεθοδολογία αξιολόγησης της προβλεπτικής ικανότητας δέκα (10) διαφορετικών μοντέλων άμεσου προσδιορισμού της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, για τις δεδομένες συνθήκες (χαρακτηριστικές ημέρες) των δεκαοκτώ (18) πρώτων μηνών λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος. Τα κυριότερα κριτήρια για την επιλογή των ελεγχόμενων μοντέλων ήταν:

- Η αμεσότητα της μεθόδου προσδιορισμού.
- Η αναγνώριση από την διεθνή επιστημονική κοινότητα.
- Η εμπειρία από την εφαρμογή, σε διαφορετικές από τις συνθήκες του αρχικού προσδιορισμού.
- Η τεχνολογία του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος.
- Ο τρόπος έδρασης του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος.
- Οι τοπικές κλιματικές συνθήκες.

Ερευνητές	Εμπειρική σχέση
	Ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Τα,Gτ,Vw</i>
King et al., 2004	$Tm = Ta + G_T * \{e^{(\alpha + bVw)}\}$, όπου α=-3,56, b=-0,075
Risser and Fuentes, 1983	$Tm = 3,81 + 0,0282 * G_T + 1,31 * Ta - 1,65 * Vw$
Chenni et al., 2007	$Tm = 4, 3 + 0, 028 * G_T + 0, 943 * Ta - 1, 528 * Vw$
Servant, 1985	$Tm = Ta + 0,0138 * G_T * (1 + 0,031 * Ta) * (1 - 0,042 * Vw)$
King, 1997	$Tm = Ta + \frac{G_T}{G_{T,REF}} [0,0712 * Vw^2 - 2,411 * Vw + 32,96]$
	Ανεξάρτητες μεταβλητές: <i>Τα,Gτ</i>
Ross and Smockler, 1986	$Tm = Ta + \left(\frac{NOCT - 20}{800}\right) * G_T$
Ross, 1976 and Nordmann et al., 2003	$Tm = Ta + k * G_T$,ó π ou k=0,0208
Tselepis and Tripanagnostopoulos, 2001	$Tm = 30 * 0,0175(G_T - 150) + 1,14 * (Ta - 25)$
Mondol et al., 2007	$Tm = Ta + 0,031 * G_T - 0,058$
Schott, 1985	$Tm = Ta + 0,028 * G_T - 1$

Πίνακας 4.2: Παρουσίαση των εξεταζόμενων μοντέλων προσδιορισμού της λειτουργικής θερμοκρασίας πλαισίων για την δεδομένη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.

4.6.2 Κλίμακες χαρακτηρισμού των περιβαλλοντικών συνθηκών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παραπάνω ενότητα (4.6.1), η αξιολόγηση των θεωρητικών μοντέλων γίνεται σε σχέση με τις δεδομένες κλιματολογικές συνθήκες των επιλεχθέντων χαρακτηριστικών ημερών, της περιόδου louvíou 2010 - Οκτωβρίου 2011. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο, να αναφερθούν οι κλίμακες χαρακτηρισμού των επικρατούντων συνθηκών μια ημέρας, βάσει των μέσων ημερήσιων τιμών των αντίστοιχών κλιματικών παραμέτρων (δείκτης αιθριότητας, ένταση ανέμου) και του διαχωρισμού του έτους σε εποχές.

Περίοδος έτους
1 Δεκεμβρίου - 28 Φεβρουαρίου
1 Μαρτίου - 31 Μαΐου
1 Ιουνίου - 31 Αυγούστου
1 Σεπτεμβρίου-30 Νοεμβρίου

Πίνακας 4.3: Διαχωρισμός του έτους σε εποχές.

Χαρακτηρισμός ημέρας	Кт
Αίθρια	≥0,65
Συνθήκες αραιής συννεφιάς	0,5-0,65
Νεφελώδης ημέρα	0,35-0,5
Βροχερή ήμερα	<0,35
_, ,,,, ,, ,, , ,	A /

Πίνακας 4.4: Χαρακτηρισμός ημέρας βάσει του δείκτη αιθριότητας.

KAIMAKA BEAUFORT	Χαρακτηρισμός	Ταχύτητα ανέμου			
В		m/s	km/h	κόμβοι	
0	Άπνοια	0-0,2	< 1	< 1	
1	Σχεδόν άπνοια	0,3-1,5	1-5	< 1	
2	Πολύ ασθενής	1,6-3,3	6-11	4-6	
3	Ασθενής	3,4-5,4	12-19	7-10	
4	Σχεδόν μέτριος	5,5-7,9	20-28	11-16	
5	Μέτριος	8,0-10,7	29-38	17-21	
6	Ισχυρός	10,8-13,8	39-49	22-27	
7	Πολύ ισχυρός	13,9-17,1	50-61	28-33	
8	Θυελλώδης	17,2-20,7	62-74	34-40	
9	Πολύ θυελλώδης	20,8-24,4	75-88	41-47	
10	Θύελλα	24,5-28,4	89-102	48-55	
11	Ισχυρή θύελλα	28,5-32,6	103-117	56-63	
12	Τυφώνας	≥ 32.7	≥ 118	≥ 64	

Πίνακας 4.5: Διαχωρισμός της έντασης του ανέμου βάσει της κλίμακας Beaufort. [Γενική γραμματεία πολιτικής προστασίας, 2013]

4.6.3 Μεθοδολογία αξιολόγησης

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, οι προβλέψεις περιέχουν σφάλματα και συνεπώς δεν μπορούν να είναι ακριβείς. Όμως, ανάλογα με την εφαρμογή, η ευαισθησία στα σφάλματα διαφέρει σημαντικά. Η εκτίμηση της αβεβαιότητας αποτελεί ιδιαίτερης σημασίας μέρος της διαδικασίας της πρόβλεψης, όχι μόνο για την ανάπτυξη μιας καίριας άποψης της λειτουργίας της επιλεγμένης προσέγγισης, αλλά επίσης και για την απόκτηση μιας βαθύτερης διορατικότητας του τι χαρακτηρίζει την αβεβαιότητα της πρόβλεψης.

Αρχικά, είναι απαραίτητο να δοθεί η ερμηνεία της «καλής» και της «κακής» πρόβλεψης και επίσης να οριστεί τι είναι αυτό που καθιστά μια πρόβλεψη καλύτερη από μια άλλη. Γενικά, μπορούμε να προσδιορίσουμε τρία διαφορετικά είδη «καλών» εφαρμογών για τα μοντέλα πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Πρώτον, οι προβλέψεις θα πρέπει να συμπίπτουν με τη γενική θεώρηση των ερευνητών που δημιούργησαν τα μοντέλα αυτά - αυτό είναι το είδος της συνέπειας (consistency). Δεύτερον, το είδος της ποιότητας (quality) που δηλώνει τη συμφωνία των προβλεπόμενων και των μετρούμενων τιμών. Τέλος, είναι το τρίτο είδος, αυτό της αξίας (value), το οποίο συνδέεται άμεσα με την εφαρμογή της πρόβλεψης σε διαδικασίες λήψης αποφάσεων.

Η αποτίμηση των προβλέψεων σημείου μπορεί να φαίνεται ως κάτι τετριμμένο, καθώς μπορούν να συγκριθούν άμεσα με τις μετρήσεις. Όμως, μια πληθώρα κριτηρίων αποτίμησης είναι διαθέσιμα, τα οποία, πρέπει να εφαρμοστούν και να σχεδιαστούν με το σωστό τρόπο, ώστε να προκύψουν ασφαλή σχετικά συμπεράσματα. Στην προκειμένη περίπτωση, η μεθοδολογία αξιολόγησης της ακρίβειας των προβλέψεων εξελίσσεται σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο, αποτελέσματα πρόβλεψης της λειτουργικής θερμοκρασίας тα των φωτοβολταϊκών πλαισίων που προέκυψαν μέσω των επιλεγέντων συσχετίσεων (εμπειρικών μοντέλων) για τις δεδομένες συνθήκες συγκρίνονται γραφικά με τις καταγεγραμμένες τιμές από το σύστημα παρακολούθησης, βασιζόμενοι στην αρχή του Tukey (1977), η οποία αναφέρει ότι η μεγαλύτερη αξία των γραφημάτων είναι όταν μας αναγκάζουν να προσέξουμε κάτι που δεν αναμέναμε να δούμε. Ενώ, στο δεύτερο στάδιο, η ποσοτική εκτίμηση της απόδοσης των εξεταζόμενων μοντέλων, προκύπτει από την εφαρμογή κατάλληλών στατιστικών κριτηρίων, γνωστά ως δείκτες καλής προσαρμογής. Στην προκειμένη περίπτωση, οι δείκτες που καλούνται να υπολογίσουν την επάρκεια των προβλέψεων είναι το μέσο σφάλμα μεροληψίας (MBE), το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE). Η αναλυτική περιγραφή των προαναφερθέντων δεικτών γίνεται στο παράρτημα.

4.7 Ανάπτυξη "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Κατά την αξιολόγηση των διαφόρων μεθόδων (μοντέλων) πρόβλεψης, κάποιες φορές δεν καθίσταται απολύτως σαφές το ποια είναι η πιο ενδεδειγμένη, καθώς μια μέθοδος (μοντέλο) μπορεί να προσαρμόζεται καλύτερα με κάποιο κριτήριοσυνθήκη, αλλά να μην εμφανίζει την ίδια επάρκεια ως προς κάποιο άλλο.

Συνήθης πρακτική, προκειμένου να υπερκεραστούν οι όποιες αβεβαιότητες, αποτελεί η διαμόρφωση ενός "νέου" μοντέλου, βάσει του κριτηρίου που ορίζεται ως βελτίωση με σεβασμό (improvement with respect), ως προς το μοντέλο αναφοράς, και συνεπάγεται την σημαντική μείωση των σφαλμάτων. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, για τις δεδομένες συνθήκες χαρακτηριστικών ημερών που αντιπροσωπεύουν το 70% του συνόλου (*K*₇≥0,5), διαμορφώνονται κατάλληλα γραμμικά μοντέλα σύμφωνα με τις βασικές αρχές της στατιστικής ανάλυσης (βλ. παράρτημα). Για την επεξεργασία δεδομένων χρησιμοποιούνται οι δυνατότητες του λογισμικού υπολογιστικών φύλλων Microsoft Excel, καθώς επίσης και η ελεύθερη έκδοση του λογισμικού Analyse-it. Συνοπτικά, τα βήματα για τη μοντελοποίηση (πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση) της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι:

- Επιλογή ανεξάρτητών μεταβλητών και μεθόδου ανάλυσης.
- Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση.
- Έλεγχος προσαρμογής του μοντέλου.
- Έλεγχος σημαντικότητας του μοντέλου Ανάλυση διακύμανσης του μοντέλου (πίνακας ANOVA).
- Έλεγχος των συντελεστών μερικής παλινδρόμησης.
- Ερμήνευση του μοντέλου.
- Γραφική ανάλυση.

122 Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων

2014

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Παράμετροι παρακολούθησης

Η παρακολούθηση, η διαδικασία συλλογής δεδομένων και η ανάλυση των επιδόσεων της υπό μελέτη πρότυπης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης υλοποιήθηκαν σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές του διεθνούς προτύπου IEC 61724. Οι καταγεγραμμένες μετρήσεις από το σύστημα παρακολούθησης, συλλέχθηκαν υπό τη μορφή δεδομένων ανά 1 min, ωστόσο για λόγους συμβατότητας με τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, ομαδοποιήθηκαν σε κατάλληλα διαστήματα 10 min. Το εξεταζόμενο πρότυπο φωτοβολταϊκό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εγκαταστάθηκε στους χώρους του Πολυτεχνείου Κρήτης τον Μάιο του 2010 και συνδέθηκε για πρώτη φορά στο δίκτυο στις 27/5/2010. Εκ τότε παρακολουθούνται οι κυριότερες παράμετροι που σχετίζονται άμεσα με την λειτουργία του (πίνακας 5.1).

	Παράμετροι Παρακολούθησης	Μονάδα
Αισθητήρα ηλιακής ακτινοβολίας Vantage Pro2 ™	Ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (<i>G</i>)	W/m ²
Μετεωρολογικός	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ta)	Oo
σταθμός WXT 250	Ταχύτητα ανέμου (<i>Vw</i>)	m/s
	DC voltage	V
	DC current	А
Αντιστροφέας	DC power (P _{DC})	W
Sunny Boy SB2500	AC voltage	V
	AC current	А
	AC power(<i>P</i> _{AC})	W
Αισθητήρες θερμοκρασίας	Θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου (<i>Tm</i>)	О°

Πίνακας 5.1: Οι κυριότερες παράμετροι παρακολούθησης της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

5.2 Τοπικά κλιματολογικά δεδομένα

5.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Η απόδοση ενός κεκλιμένου συλλέκτη (π.χ. φωτοβολταϊκή συστοιχία) καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη. Όταν δεν καθίσταται εφικτή η άμεση καταγραφή της στην επιφάνεια του συλλέκτη, συνήθη πρακτική προσδιορισμού αποτελεί η εφαρμογή αξιόπιστου μαθηματικού μοντέλου αναγωγής των τιμών πυκνότητας ισχύος και ενεργειακής απολαβής ηλιακής ακτινοβολίας από το οριζόντιο επίπεδο στο κεκλιμένο.

Στην εξεταζόμενη περίπτωση, οι καταγεγραμμένες, ανά δέκα 10 λεπτά της ώρας, τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο (G), αποτελέσαν τα αρχικά δεδομένα ηλιακού δυναμικού στη περιοχή έδρασης του, για την περίοδο παρακολούθησης. Έπειτα από την εφαρμογή ενδεδειγμένης υπολογιστικής διαδικασίας, δημιουργήθηκε κατάλληλη βάση δευτερογενών δεδομένων (δευτερογενή δεδομένα: λογίζονται τα στοιχεία τα οποία έχουν υποστεί αλγεβρική επεξεργασία). Στον πίνακα 5.2, συνοψίζονται τα «νέα» δεδομένα, δηλαδή, ο μηνιαίος μέσος όρος των τιμών ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο (\overline{H}) και στο κεκλιμένο (\overline{H}_T) επίπεδο για την περίοδο παρακολούθηση 2012.



Εικόνα 5.1 : Κοντινή άποψη της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

"Αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς πρότυπης Φωτοβολταϊκής εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης"

ής 2014

Έī	ος	Μήνας	Ħ	Ħo	\overline{K}_T	$\frac{\overline{H}d}{\overline{H}}$	\overline{R}_b	$\frac{\overline{H}\tau}{\overline{H}}$	\overline{H}_T	$\overline{H}_{d,T}$	$\overline{H}_{b,T}$	$\overline{H}_{r,T}$
			kWh	/m²/d						kWh	/m²/d	
		Ιούνιος	7,35	11,55	0,64	0,28	0,91	0,93	6,80	1,93	4,77	0,10
		Ιούλιος	7,56	11,30	0,67	0,24	0,93	0,94	7,12	1,72	5,30	0,10
~	Š	Αύγουστος	6,72	10,36	0,65	0,27	1,00	1,00	6,69	1,67	4,93	0,09
010	Jai	Σεπτέμβριος	5,37	8,79	0,61	0,31	1,12	1,10	5,91	1,55	4,28	0,07
~	úθι	Οκτώβριος	3,26	6,91	0,47	0,47	1,29	1,14	3,70	1,42	2,24	0,04
	ογο	Νοέμβριος	2,97	5,19	0,57	0,35	1,48	1,30	3,86	0,98	2,84	0,04
	QK	Δεκέμβριος	2,09	4,59	0,46	0,49	1,58	1,29	2,70	0,95	1,72	0,03
	παρ											
	ΓS	Ιανουάριος	2,21	4,99	0,44	0,50	1,52	1,24	2,74	1,03	1,68	0,03
	ÊT	Φεβρουάριος	2,53	6,40	0,40	0,55	1,35	1,14	2,88	1,31	1,54	0,03
	~	Μάρτιος	3,62	8,17	0,44	0,50	1,18	1,10	3,98	1,69	2,25	0,05
		Απρίλιος	5,06	9,93	0,51	0,42	1,04	1,01	5,11	2,00	3,04	0,07
		Μάιος	6,39	11,10	0,58	0,35	0,95	0,96	6,11	2,08	3,94	0,09
+		Μέσος όρος	4,59	8,27	0,54				4,80	1,53	3,21	0,06
01		Ιούνιος	7,20	11,55	0,62	0,30	0,91	0,93	6,69	1,99	4,61	0,10
~		Ιούλιος	7,53	11,30	0,67	0,25	0,93	0,94	7,09	1,74	5,25	0,10
	Š	Αύγουστος	6,72	10,36	0,65	0,27	1,00	0,99	6,68	1,67	4,92	0,09
	Jor	Σεπτέμβριος	5,32	8,79	0,61	0,32	1,12	1,08	5,75	1,57	4,11	0,07
	Ú0I	Οκτώβριος	3,37	6,91	0,49	0,45	1,29	1,14	3,84	1,41	2,39	0,05
	ογο	Νοέμβριος	2,01	5,19	0,39	0,56	1,47	1,20	2,41	1,05	1,33	0,03
	ΩK	Δεκέμβριος	2,18	4,59	0,48	0,46	1,58	1,30	2,83	0,94	1,86	0,03
	Цαр											
	50	Ιανουάριος	1,94	4,99	0,39	0,56	1,52	1,20	2,33	1,01	1,29	0,03
01	ÊT	Φεβρουάριος	2,64	6,40	0,41	0,53	1,35	1,14	3,01	1,32	1,66	0,04
012	ñ	Μάρτιος	4,52	8,17	0,55	0,37	1,18	1,10	4,98	1,58	3,34	0,06
2		Απρίλιος	6,16	9,93	0,62	0,30	1,04	1,02	6,29	1,72	4,49	0,08
		Μάιος	7,10	11,10	0,64	0,28	0,95	0,96	6,79	1,84	4,86	0,10
		Μέσος όρος	4,72	8,27	0,54				4,89	1,49	3,34	0,06
		Γενικός μέσος όρος	4,66	8,27	0,54				4,84	1,51	3,27	0,06

Πίνακας 5.2: Στοιχεία υπολογισμού της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στην κεκλιμένη επιφάνεια (κλίση:30°,αζιμούθιο:-50°) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (\overline{H}_T) κατά την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.

Η ετήσια μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο ($\overline{H}_{,y}$) για την πρώτη και τη δεύτερη φάση επιτήρησης, ήταν 4,59 kWh/m²/d και 4,72 kWh/m²/d, αντίστοιχα. Οι αναλογούσες τιμές που εκτιμήθηκαν για το κεκλιμένο επίπεδο ($\overline{H}_{T,y}$), ήταν 4,80 kWh/m²/d και 4,89 kWh/m²/d αντίστοιχα.

Στο διάγραμμα 5.1 απεικονίζεται η μεταβολή του δείκτη αιθριότητας (\overline{K}_T) , της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο (\overline{H}) και στο κεκλιμένο επίπεδο (\overline{H}_T) κατά τη διάρκεια της περιόδου Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012, στην περιοχή μελέτης. Η μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία της

κεκλιμένης επιφάνειας (\overline{H}_T) κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 2,33 kWh/m²/d (Ιανουάριος 2012) και 7,12 kWh/m²/d (Ιούλιος 2010). Γενικά, κατά τους θερινούς μήνες της περιόδου επιτήρησης, η τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (\overline{H}_T) κυμαίνονταν από 6,68 kWh/m²/d έως 7,12 kWh/m²/d, κατά του χειμερινούς από 2,33 kWh/m²/d έως 3,01 kWh/m²/d, τους φθινοπωρινούς από 2,41 kWh/m²/d έως 5,91 kWh/m²/d και τους ανοιξιάτικους από 3,98 kWh/m²/d έως 6,79 kWh/m²/d.



Διάγραμμα 5.1: Μηνιαία μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο (\overline{H}) και στο κεκλιμένο (\overline{H}_T) επίπεδο (κλίση: 30°, αζιμούθιο: -50°), δείκτης αιθριότητας (\overline{K}_T) , για την περίοδο παρακολούθησης Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.

Το αυξημένο εύρος διακύμανσης των τιμών της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (\overline{H}_T), που σημειώθηκε κυρίως κατά τους ανοιξιάτικους και τους φθινοπωρινούς μήνες κρίνεται ως λογικό γεγονός, καθώς τόσο η άνοιξη όσο και το φθινόπωρο αποτελούν μεταβατικές εποχές. Η προαναφερθείσα παρατήρηση τεκμηριώνεται και από τη διακύμανση του δείκτη αιθριότητας (\overline{K}_T) κατά την περίοδο louvíou 2010 - Μαΐου 2012.



Διάγραμμα 5.2: Συχνότητα εμφάνισης συνθηκών αιθριότητας κατά την περίοδο παρακολούθησης Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.

Ο δείκτης αιθριότητας εκφράζει την επίδραση της ατμόσφαιρας στη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας και εξαρτάται από την κατάσταση της, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και την εποχή του έτους. Ως εκ τούτου, η τιμή του δείκτη αιθριότητας (*K*_T) δύναται να φανερώνει σημαντικές πληροφορίες για το ηλιακό δυναμικό της διερευνηθείσας περιοχής.

Στο διάγραμμα 5.2, παρουσιάζεται συχνότητα εμφάνισης αίθριων ($K_T \ge 0,65$), σχεδόν αίθριων ($0,5 \le K_T < 0,65$), νεφελωδών ($0,35 \le K_T < 0,5$) ή βροχερών συνθηκών ($K_T < 0,35$), ως ο αριθμός των ημερών εντός προκαθορισμένου εύρους τιμών του δείκτη αιθριότητας για τη περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012. Ειδικότερα, στην περιοχή μελέτης καταγράφηκαν αίθριες συνθήκες για 295 d από τις 730 d της εξεταζόμενης περιόδου, τιμή που αντιστοιχεί σε ποσοστό 40,4% επί του συνόλου. Ακόμη, παρατηρήθηκαν συνθήκες αραιής-παροδικής συννεφιάς για 205 d, νεφελώδης συνθήκες για 101 d, βροχερές συνθήκες για 129 d, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά επί του συνολικού αριθμού των ημερών παρακολούθησης ήταν 28,1%, 13,8% και 17,7%.

Στο διάγραμμα 5.3, παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με τον χρόνο. Η διακύμανση των τιμών της μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας, τόσο στο οριζόντιο (*H*) όσο και στο κεκλιμένο (*H*_T) επίπεδο, εμφανιζόταν αυξημένη κυρίως κατά τις φθινοπωρινές και χειμερινές περιόδους, ενώ από τα μέσα Μαΐου έως τα τέλη Σεπτέμβριου παρατηρήθηκε σχετική σταθερότητα.



Διάγραμμα 5.3: Μεταβολή της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο (*H*) και στο κεκλιμένο (*H*_T) επίπεδο για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.

5.2.2 Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, Θερμοκρασία περιβάλλοντος, Ταχύτητα ανέμου

Η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm) αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την τελική απόδοση κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος (Y_F) και εξαρτάται άμεσα με τις τοπικές κλιματικές συνθήκες (ταχύτητα ανέμου, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ηλιακή ακτινοβολία). Συγκεκριμένα με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας ενός πλαισίου παρατηρείται γραμμική μείωση στην απόδοση του. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, ο εγκατεστημένος μετεωρολογικός σταθμός και κατάλληλοι αισθητήρες θερμοκρασίας (θερμοζεύγη), τοποθετημένοι στην πίσω επιφάνεια των φωτοβολταϊκών απαραίτητες πλαισίων, παρείχαν τις πληροφορίες σχετικά Jμ τις περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος κατά την περίοδο παρακολούθησης του.

Στον πίνακα 5.3 συνοψίζονται οι μηνιαίες τιμές για τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος (*Ta*,*m*), τη μέση θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*,*m*) και τη μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου (*Vw*,*m*), κατά τις ώρες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος, για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012. Οι όποιες απώλειες στοιχείων εμφανίζονται στον πίνακα, οφείλονται σε ελλείψεις μετρήσεων λόγω τεχνικών βλαβών, ενώ ενδεχόμενη συμπλήρωση με δεδομένα εικοσιτετραώρου από κοντινό μετεωρολογικό σταθμό θα επέφερε σημαντική αλλοίωση στα τελικά αποτελέσματα της παρούσας μελέτης.

Κατά την πρώτη φάση παρακολούθησης του συστήματος (περίοδος Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2011) η μέση ετήσια τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (*Ta*,_y) ήταν 20,5 °C, ενώ η αντίστοιχη για τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*,_y) ήταν 28,2 °C. Η μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος (*Ta*,_{m,max}) σημειώθηκε τον Αύγουστο του 2010 λαμβάνοντας τιμή 29,3 °C, ενώ η ελάχιστη (*Ta*,_{m,min}) τον Φεβρουάριο του 2011, λαμβάνοντας τιμή 13,5 °C. Κατά τους ίδιους μήνες καταγράφηκαν η μέγιστη (*Tm*,_{m,max}) και η ελάχιστη (*Tm*,_{m,min}) τιμή θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, οι οποίες ήταν 39,3 °C και 18,5 °C αντίστοιχα.

Κατά την περίοδο Ιουνίου 2011 - Μαΐου 2012, η μέση μηνιαία τιμή για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ($Ta_{,m}$) κυμάνθηκε μεταξύ 11 °C, τον Ιανουάριο του 2012, και 28,1 °C, τον Ιούλιο του 2011. Τους ίδιους μήνες παρατηρήθηκαν τόσο η ελάχιστη (16,4 °C) όσο και η μέγιστη (38,3 °C) τιμής της μέσης μηνιαίας θερμοκρασία λειτουργιάς των πλαισίων ($Tm_{,m}$).

Έτος			Ώρες λειτουργίας του	Та	Тт	Vw
		Μήνας φωτοβολταϊκού συστήματος		°C	°C	m/s
		Ιούνιος	6:00-19:30	25,9	34,6	4,4
	Š	Ιούλιος	6:15-19:00	28,2	38,1	3,0
0	ما	Αύγουστος	6:30-18:45	29,3	39,3	3,0
01	θη	Σεπτέμβριος	6:45-18:15	26,1	35,4	3,1
R	0Ú	Οκτώβριος	7:00-17:30	22,1	28,2	3,2
	No.	Νοέμβριος	6:30-16:30	20,4	27,9	2,5
	αK	Δεκέμβριος	7:00-16:00	16,8	23,2	-
	dp.					
	E I	Ιανουάριος	7:30-16:30	13,9	19,8	-
	έτος	Φεβρουάριος	7:15-17:00	13,5	18,5	-
		Μάρτιος	6:45-17:30	14,4	20,8	-
	-	Απρίλιος	6:30-18:30	15,9	23,2	3,1
		Μάιος	6:00-19:00	20,1	28,9	3,0
1		Μέσος όρος		20,5	28,2	3,2
01		Ιούνιος	6:00-19:30	25,1	34,6	3,1
R	$\overline{\mathbf{v}}$	Ιούλιος	6:15-19:00	28,1	38,3	3,0
	al	Αύγουστος	6:30-18:45	27,1	37,4	2,8
	ի	Σεπτέμβριος	6:45-18:15	25,9	35,0	2,8
	οÚ	Οκτώβριος	7:00-17:30	19,3	26,4	2,6
	γo	Νοέμβριος	6:30-16:30	14,4	20,3*	2,5
	αK	Δεκέμβριος	7:00-16:00	14,6	21,1*	2,6
	db.					
	F	Ιανουάριος	7:30-16:30	11,0	16,4*	3,3
N	ĕ	Φεβρουάριος	7:15-17:00	11,8	16,9*	3,4
01:	ω, o	Μάρτιος	6:45-17:30	15,1	23,5*	3,0
Ñ	N	Απρίλιος	6:30-18:30	19,0	29,2*	2,9
		Μάιος	6:00-19:00	21,7	30,3*	3,2
		Μέσος όρος		19.4	27.4	2.9

Πίνακας 5.3: Μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος (*Tα,m*), μέση μηνιαία θερμοκρασίας λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm,m*), μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (*Vw,m*) κατά τις ώρες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012. (με * σημειώνονται οι τιμές μέσω υπολογισμών)

Στο διάγραμμα 5.4 απεικονίζεται η μεταβολή των μηνιαίων μέσων τιμών της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (*Tα*,*m*), της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*,*m*) και της ταχύτητας ανέμου (*Vw*,*m*), οι οποίες κατεγράφησαν για τις ώρες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος, κατά την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.

Γενικά, τους θερινούς μήνες της περιόδου επιτήρησης, το εύρος διακύμανσης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*,*m*) ήταν 34,6-39,3 °C για τις θερμοκρασιακές συνθήκες περιβάλλοντος (*Tα*,*m*) 25,1-29,3 °C, ενώ τους χειμερινούς ήταν 16,4-23,2 °C για τις συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος 11,0-16,8 °C. Η σύγκριση ανάμεσα στην μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος (*Tα*,*m*) και τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (10,3 °C) τον Αύγουστο του 2011 και ελάχιστη (5,0 °C) τον Φεβρουάριο του 2011. Επιπλέον, παρατηρήθηκε η μηνιαία μέση ταχύτητα του ανέμου (*Vw*,*m*) μεταξύ 2,5-3,5 m/s,με μοναδική εξαίρεση την τιμή 4,4 m/s, η οποία σημειώθηκε κατά τον Ιούνιο του 2010.



Διάγραμμα 5.4: Διακύμανση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασία περιβάλλοντος (*Tα*,*m*), της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*,*m*) και της μέσης μηνιαίας ταχύτητας ανέμου (*Vw*,*m*) κατά τις ώρες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.

Στους πίνακες 5.4 και 5.5 παρατίθενται τα μηνιαία διαστήματα διακύμανσης των στιγμιαίων τιμών της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (*Ta*), της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) και της ταχύτητα του ανέμου (*Vw*) για την πρώτη και τη δεύτερη φάση παρακολούθησης. Κατά τη περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2011, η ελάχιστη τιμή της θερμοκρασία περιβάλλοντος (*Ta*,*min*) μετρήθηκε 3,5 °C, τον Μάρτιο του 2011 (9 Μαρτίου 2011, 08:30 π.μ.) ενώ η μέγιστη τιμή της (*Ta*,*max*) παρατηρήθηκε 37,3 °C τον Ιούνιο του 2010 (17 Ιουνίου 2010, 02:40 μ.μ.). Η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) και του ανέμου 2010, 02:40 μ.μ.). Η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) κυμάνθηκε μεταξύ 3,8 °C, τον Μάρτιο του 2011 (9 Μαρτίου 2011, 8:30 π.μ.). Η ταχύτητα του ανέμου (*Vw*) σημειώθηκε από 0,2 m/s έως 12,8 m/s τον Ιούνιο του 2010 (2010, 06:00 μ.μ.).

Κατά την περίοδο Ιουνίου 2011 - Μαΐου 2012, η θερμοκρασίας περιβάλλοντος $(T\alpha)$ κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 3,3 °C, για τον Ιανουάριο του 2012 (31 Ιανουαρίου 2012, 11:30 π.μ.) και 36,4 °C, τον Ιούλιο του 2011 (20 Ιουλίου 2011, 02:50 μ.μ.). Η ταχύτητα του ανέμου (Vw) καταγράφηκε από 0,2 m/s έως 12,5 m/s τον Φεβρουάριο του 2012 (6 Φεβρουαρίου 2012, 12:50 μ.μ.). Επίσης, κατά τη χρονική περίοδο Ιουνίου 2011 - Οκτωβρίου 2011, οπότε υπήρξαν οι τελευταίες καταγραφές για τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, λαμβάνοντας ως μέγιστη $(Tm,_{max})$ την τιμή 59,9 °C κατά τον Σεπτέμβριο του 2011 (20 Σεπτεμβρίου 2010,11:00 π.μ.).

	1 ^η Περίοδος παρακολούθησης (Ιούνιος 2010 - Μάιος 2011)								
		Ta	7		Vw				
Μήνας		°C	o	°C		m/s			
	Min	Max	Min	Max	Min	Max			
Ιούνιος	19,4	37,3	14,0	62,2	0,5	12,8			
Ιούλιος	20,9	33,1	17,1	54,9	0,2	10,3			
Αύγουστος	23,4	35,4	19,8	57,0	0,3	7,7			
Σεπτέμβριος	19,7	31,8	16,8	58,5	0,2	8,8			
Οκτώβριος	13,4	32,6	11,8	53,1	0,4	9,7			
Νοέμβριος	13,3	28,3	10,7	52,0	0,2	9,8			
Δεκέμβριος	3,8	28,9	8,7	49,4	-	-			
Ιανουάριος	7,9	20,8	5,3	43,6	-	-			
Φεβρουάριος	8	20,2	6,6	47,1	-	-			
Μάρτιος	3,5	22,5	3,8	53,6	-	-			
Απρίλιος	9,5	21,4	6,9	48,9	0,2	9,8			
Μάιος	11,9	30,2	10,2	53,8	0,3	10,7			

Πίνακας 5.4: Εύρος διακύμανση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (*Tα*), της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) και της ταχύτητας ανέμου (*Vw*) κατά τις ώρες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαίου 2011.

	2 ^η Περίοδος παρακολούθησης (Ιούνιος 2011 - Μάιος 2012)								
		Ta	7	m	Vw				
Μήνας	(°C	U	С	m/s				
	Min	Max	Min	Max	Min	Max			
Ιούνιος	18	36	16	55,4	0,3	8,0			
Ιούλιος	20,2	36,4	19,3	57,5	0,2	9,5			
Αύγουστος	20,5	31,5	19,3	51,8	0,2	6,2			
Σεπτέμβριος	18,7	31,9	17	59,9	0,3	8,5			
Οκτώβριος	11,7	27,9	8,7	52,2	0,3	7,6			
Νοέμβριος	9,1	20	-	-	0,3	8,1			
Δεκέμβριος	6,8	20,5	-	-	0,2	9,5			
Ιανουάριος	3,3	18,1	-	-	0,2	10,4			
Φεβρουάριος	3,5	19	-	-	0,3	12,5			
Μάρτιος	5,1	21,3	-	-	0,3	10,3			
Απρίλιος	9	28,4	-	-	0,2	9,4			
Μάιος	13,1	27,7	-	-	0,4	8,6			

Πίνακας 5.5: Εύρος διακύμανσης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (*Tα*), της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) και της ταχύτητας ανέμου (*Vw*) κατά τις ώρες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος για την περίοδο Ιουνίου 2011 - Μαΐου 2012.

5.3 Ενεργειακή ανάλυση του φωτοβολταϊκού συστήματος

Η απόδοση ενός ενεργειακού συστήματος προσδιορίζει το ποσοστό της διαθέσιμης ενέργειας που μετατρέπεται από το σύστημα, σε αξιοποιήσιμη μορφή. Το πρακτικό, όμως, αποτέλεσμα, που αποτελεί και το ζητούμενο κατά την αξιοποίηση κάθε ενεργειακής πηγής είναι η σχέση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, προς αυτή που θα μπορούσε να αποδοθεί υπό ιδανική λειτουργία του συστήματος, μέσα σε μια ολοκληρωμένη χρονική μονάδα ,όπως είναι η ημέρα, ο μήνας ή το έτος. Η σχέση αυτή προσδιορίζεται από τον λόγο απόδοσης του συστήματος.

Στα πλαίσια της ενεργειακής ανάλυσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός συγκεκριμένων παραμέτρων αξιολόγησης για τις δεδομένες συνθήκες λειτουργίας του, σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC 61724. Συγκεκριμένα, στις εξεταζόμενες παραμέτρους περιλαμβάνονται η ενεργειακή απόδοση συστοιχίας (Y_A), η τελική απόδοση (Y_F), η απόδοση αναφοράς (Y_R), ο λόγος απόδοσης (PR), η αποδοτικότητα μετατροπής της συστοιχίας (n_{pv}), η αποδοτικότητα του συστήματος (n_{syst}), οι απώλειες του συστοιχίας (L_c).

Στον πίνακα 5.6 παρουσιάζονται τα στοιχεία για την συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που κατεγράφησαν και αφορούν στην εξεταζόμενη περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012. Ειδικότερα, κατά την πρώτη φάση λειτουργίας του (περίοδος Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2011), το φωτοβολταϊκό σύστημα παρήγαγε συνολικά 3.540,97 kWh ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος ($E_{DC,y}$), και τροφοδότησε με 3.360,25 kWh ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος ($E_{AC,y}$) το ηλεκτρικό δίκτυο του Πολυτεχνείου Κρήτης (ετήσιες απώλειες μετατροπής 5,2%). Κατά τη δεύτερη φάση λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος (περίοδος Ιουνίου 2011 - Μαΐου 2012) η παράγωγη ενέργειας συνεχούς ($E_{DC,y}$) και εναλλασσόμενου ($E_{AC,y}$) ρεύματος καταγράφηκαν μειωμένες κατά 1,6% (3.484,35 kWh) και 1,7% (3.305,27 kWh), αντίστοιχα.

Η μηνιαία συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος ($E_{DC,m}$) κυμάνθηκε μεταξύ 149,94 kWh τον Δεκέμβριο του 2010 και 464,73 kWh τον Ιούλιο 2010 (περίοδος Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2011), και από 124,32 kWh το Νοέμβριο 2011 έως 451,92 kWh τον Ιούλιο του 2011 (περίοδος Ιουνίου 2011 - Μαΐου 2012). Αντίστοιχα, η ολική μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος παρουσίαζε την ελάχιστη τιμή ($E_{AC,m,min}$) της, 141,48 kWh, τον Δεκέμβριο του 2010 και την μέγιστη τιμή ($E_{AC,m,max}$) της, 442,03 kWh, τον Ιούλιο 2010 (περίοδος Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2011), ενώ κατά την δεύτερη περίοδο παρατήρησης του συστήματος (περίοδος Ιουνίου 2011 - Μαΐου 2011) η ελάχιστη τιμή ($E_{AC,m,max}$) ήταν 429,86 kWh τον Ιούλιο του 2011.

Έτος		Μήνας	E _{DC}	E _{AC}	E _{DC}	E _{AC}	Ποσοστιαία απώλεια μετατροπής
			kWh	kWh	kWh/kWp	kWh/kWp	%
2010		Ιούνιος	446,35	423,92	204,94	194,64	5,0
	αρακολούθησης	Ιούλιος	464,73	442,03	213,37	202,95	4,9
		Αύγουστος	435,26	414,63	199,84	190,37	4,7
		Σεπτέμβριος	368,78	350,78	169,32	161,06	4,9
		Οκτώβριος	228,00	215,56	104,68	98,97	5,5
		Νοέμβριος	220,40	209,29	101,19	96,09	5,0
		Δεκέμβριος	149,94	141,48	68,84	64,96	5,6
	μ	Ιανουάριος	162,15	152,99	74,45	70,24	5,6
	1° έτο	Φεβρουάριος	155,50	146,45	71,40	67,24	5,8
		Μάρτιος	221,77	209,67	101,82	96,27	5,5
		Απρίλιος	302,71	287,62	138,99	132,06	5,0
		Μάιος	385,38	365,83	176,94	167,97	5,1
		Σύνολο	3.540,97	3.360,25	1.625,79	1.542,81	
11		Μέσος όρος	295,08	280,02	135,48	128,58	5,2
20		Ιούνιος	412,34	391,88	189,32	179,93	5,0
	ολούθησης	Ιούλιος	451,92	429,86	207,49	197,36	4,9
		Αύγουστος	424,88	404,07	195,08	185,52	4,9
		Σεπτέμβριος	342,42	325,55	157,22	149,47	4,9
		Οκτώβριος	236,93	224,01	108,78	102,85	5,5
		Νοέμβριος	124,32	116,98	57,08	53,71	5,9
	αK	Δεκέμβριος	153,47	144,92	70,46	66,54	5,6
	ταρ						
	Š	Ιανουάριος	131,22	123,27	60,25	56,60	6,1
N	2° έτο	Φεβρουάριος	166,36	156,94	76,38	72,06	5,7
01:		Μάρτιος	290,00	275,17	133,15	126,34	5,1
2		Απρίλιος	343,81	325,87	157,86	149,62	5,2
		Μάιος	406,68	386,75	186,72	177,57	4,9
		Σύνολο	3.484,35	3.305,27	1.599,79	1.517,57	
	Μέσος όρος Μέση ετήσια συνολική παραγωγή ενέργειας		290,36	275,44	133,32	124,46	5,3
			3.512,66	3.332,76			
					1.612,79	1.530,19	5,25
	Μέσι	η μηνιαία	292,72	077.70	134,4	126,49	
	παρ	νειας		277,73			

Πίνακας 5.6: Συγκεντρωτικός πίνακας των στοιχείων για την συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το εξεταζόμενο φωτοβολταϊκό σύστημα κατά την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.



Διάγραμμα 5.5 : Μηνιαία μέση ημερήσια παραγωγή ενέργειας (kWh/kWp/d) και οι απώλειες μετατροπής (%) του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο μέσω του αντιστροφέα για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.

Στο διάγραμμα 5.5 απεικονίζεται η μεταβολή των καταγεγραμμένων μηνιαίων τιμών της μέσης ημερήσιας παραγωγής ενέργειας συνεχούς ($E_{DC,m,avg}$) και εναλλασσόμενου ($E_{AC,m,avg}$) ρεύματος από το φωτοβολταϊκό σύστημα, καθώς επίσης και των απωλειών μετατροπής. Κατά τους θερινούς μήνες της περιόδου louvíou 2010 - Μαΐου 2012, η μηνιαία μέση ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας κυμάνθηκε από 6,29-6,88 kWh/kWp/d, ενώ οι αντίστοιχες τιμές στην έξοδο του αντιστροφέα βρέθηκαν μεταξύ 5,98-6,55 kWh/kWp/d. Τους χειμερινούς μήνες, τα διαστήματα των τιμών διακύμανσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην είσοδο και την έξοδο του αντιστροφέα ήταν 1,94-2,64 kWh/kWp/d και 1,83-2,48 kWh/kWp/d, αντίστοιχα.

Έτος		Μήνας	Y _R	Υ _T	YΔ	Y _F	LCT	LCM	Lc	Ls	PR
		, ,	n		71	h	/d	Cill			%
2010		Ιούνιος	6,80	6,65	6,83	6,49	0,15	-0,18	-0,03	0,34	95,4
		Ιούλιος	7,12	6,90	6,88	6,55	0,22	0,02	0,24	0,34	91,9
	յրօղչ	Αύγουστος	6,69	6,46	6,45	6,13	0,23	0,01	0,24	0,31	91,7
		Σεπτέμβριος	5,91	5,76	5,65	5,37	0,15	0,11	0,26	0,28	90,9
	0Ú€	Οκτώβριος	3,70	3,68	3,38	3,19	0,03	0,30	0,33	0,19	86,2
	Ň	Νοέμβριος	3,86	3,83	3,37	3,20	0,03	0,46	0,49	0,17	83,0
	αŘ	Δεκέμβριος	2,70	2,70	2,29	2,17	0,00	0,40	0,40	0,13	80,4
	ğ										
	1° έτος π	Ιανουάριος	2,74	2,74	2,40	2,27	0,00	0,34	0,34	0,13	82,8
		Φεβρουάριος	2,88	2,88	2,55	2,40	0,00	0,34	0,34	0,15	83,3
		Μάρτιος	3,98	3,98	3,39	3,21	0,00	0,59	0,59	0,18	80,6
		Απρίλιος	5,11	5,11	4,63	4,40	0,00	0,48	0,48	0,23	86,1
		Μάιος	6,11	6,05	5,71	5,42	0,06	0,34	0,40	0,29	88,7
		Μέσος όρος	4,80	4,73	4,46	4,23	0,07	0,27	0,34	0,23	86,7
2011											
		Ιούνιος	6,69	6,54	6,31	6,00	0,15	0,23	0,38	0,31	89,6
	6	Ιούλιος	7,09	6,86	6,69	6,37	0,23	0,17	0,40	0,33	89,8
	Ъ	Αύγουστος	6,68	6,48	6,29	5,98	0,20	0,19	0,39	0,31	89,5
	ακολούθηα	Σεπτέμβριος	5,75	5,61	5,24	4,98	0,14	0,37	0,51	0,26	86,6
		Οκτώβριος	3,84	3,83	3,51	3,32	0,01	0,32	0,33	0,19	86,4
		Νοέμβριος	2,41	2,41	1,90	1,79	0,00	0,51	0,51	0,11	74,3
		Δεκέμβριος	2,83	2,83	2,27	2,15	0,00	0,56	0,56	0,13	75,9
	αp										
2012	тоς п	Ιανουάριος	2,33	2,33	1,94	1,83	0,00	0,39	0,39	0,11	78,3
		Φεβρουάριος	3,01	3,01	2,64	2,49	0,00	0,38	0,38	0,15	82,6
	έ	Μάρτιος	4,98	4,98	4,29	4,08	0,00	0,68	0,68	0,22	81,9
	2	Απρίλιος	6,29	6,23	5,45	5,16	0,06	0,78	0,84	0,28	82,1
		Μάιος	6,79	6,70	6,02	5,73	0,09	0,68	0,77	0,29	84,4
		Μέσος όρος	4,89	4,82	4,38	4,16	0,07	0,44	0,51	0,22	83,5
		Γενικός μέσος	A OF	A 70	1 12	4.2	0.07	0.26	0.42	0.22	OF 1

Πίνακας 5.7: Συγκεντρωτικός πίνακας των μηνιαίων μέσων ημερήσιων τιμών των παραμέτρων: απόδοση αναφοράς ($Y_{R,m}$), διορθωμένη απόδοση αναφοράς ($Y_{T,m}$), απόδοση συστοιχίας ($Y_{A,m}$), τελική απόδοση ($Y_{E,m}$), θερμικές απώλειες ($L_{CT,m}$), απώλειες διαφοροποίησης συστοιχίας ($L_{CM,m}$), απώλειες σύλληψης συστοιχίας ($L_{C,m}$), απώλειες συστήματος ($L_{S,m}$) και των μηνιαίων μέσων τιμών του λόγου απόδοσης ($PR_{,m}$) για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.

4,42

4,85 4,78

όρος

4,2

0,07

0,36

0,43

0,23

85,1

Σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 5.7, κατά την πρώτη περίοδο παρακολούθησης η μηνιαία μέση ημερήσια απόδοση συστοιχίας (*Y*_{A,m}) κυμάνθηκε από 2,29 h/d, τον Δεκέμβριο του 2010, έως 6,88 h/d τον Ιούλιο του 2010, ενώ κατά του ίδιου μήνες η τελική απόδοση (*Y*_{E,m}) ήταν 2,17 h/d και 6,55 h/d. Τέλος, ο μέσος μηνιαίος λόγος απόδοσης (*PR*,m) κατανεμήθηκε ανάμεσα στο εύρος των ποσοστιαίων τιμών 80,4 - 95,4%.

Κατά την δεύτερη περίοδο, η μηνιαία μέση ημερήσια απόδοση συστοιχίας ($Y_{A,m}$) κυμάνθηκε από 1,9 h/d, τον Νοέμβριο του 2011, έως 6,69 h/d τον Ιούλιο του 2011, ενώ κατά του ίδιου μήνες η τελική απόδοση ($Y_{F,m}$) καταγράφηκε 1,79 h/d και 6,37 h/d, αντίστοιχα. Ο μέσος μηνιαίος λόγος απόδοσης (PR,m) βρέθηκε εντός του εύρους τιμών 74,3 - 89,8%.



Διάγραμμα 5.6: Διακύμανση των μηνιαίων μέσων ημερήσιων τιμών για την απόδοση αναφοράς (*Y*_{*R,m*}), την απόδοση συστοιχίας (*Y*_{*A,m*}) και την τελική απόδοση (*Y*_{*F,m*}) κατά την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.

Η ετήσια μέση ημερήσια απόδοση αναφοράς ($Y_{R,y}$) αυξήθηκε από 4,8 h/d για το πρώτο έτος της περιόδου παρακολούθησης σε 4,89 h/d για το δεύτερο έτος, δηλαδή η παρατηρούμενη ποσοστιαία αύξηση ήταν 1,8 %. Αντίθετα, η ετήσια μέση ημερήσια τελική απόδοση ($Y_{F,y}$) μειώθηκε από 4,23 h/d το πρώτο έτος της περιόδου παρακολούθησης σε 4,16 h/d το δεύτερο έτος (μείωση 2,1%). Ανάλογη τάση παρουσιάστηκε, στην απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ($Y_{A,y}$), η οποία μειώθηκε από την τιμή 4,46 h/d του πρώτου έτους της περιόδου παρακολούθησης σε 1,8%). Ο ετήσιος μέσος δείκτης απόδοσης ($PR_{,y}$) μειώθηκε από την τιμή 86,7% που έλαβε για το πρώτο έτος της περιόδου παρακολούθησης σε 3,5% το δεύτερο έτος, με την παρατηρούμενη μεταβολή να είναι της τάξης του 3,2%.



Διάγραμμα 5.7: Μηνιαία διακύμανση του λόγου απόδοσης (*PR,m*) για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.

Στο διάγραμμα 5.7 αποτυπώνεται σχηματικά η διακύμανση των μηνιαίων μέσων τιμών του λόγου απόδοσης (*PR*,*m*) κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης. Η μέγιστη τιμή, 95,5%, του λόγου απόδοσης (*PR*,*m*,*max*) σημειώθηκε τον πρώτο μήνα λειτουργίας του συστήματος, ενώ γενικά οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται κατά του θερινούς μήνες. Το γεγονός αυτό έγκειται στα ειδικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων (φαινόμενο Staebler-Wronski) του συστήματος.



Διάγραμμα 5.8: Θερμικές απώλειες (*L*_{CT,m}), απώλειες διαφοροποίησης συστοιχίας (*L*_{CM,m}), απώλειες συστήματος (*L*_{S,m}) για την περίοδο louvíou 2010 - Μαΐου 2012.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν, οι απώλειες σύλληψης συστοιχίας ($L_{C,y}$) αυξήθηκαν από 0,34 h/d το πρώτο έτος της περιόδου παρακολούθησης σε 0,51 h/d το δεύτερο έτος και η σημειωθείσα ποσοστιαία μεταβολή ήταν της τάξεως του 50 %. Ανάλογη αυξητική τάση, της τάξεως του 63%, παρατηρήθηκε για τις απώλειες διαφοροποίησης συστοιχίας ($L_{CM,y}$), οι οποίες ήταν 0,27 h/d και 0,44 h/d για το πρώτο και το δεύτερο έτος παρακολούθησης, αντίστοιχα. Σε ετήσια βάση, δεν σημειώθηκε κάποια διαφοροποίηση όσον αφορά τις θερμικές απώλειες ($L_{CT,1}=L_{CT,2}=0,07$ h/d).

Οι απώλειες του Συστήματος (*L*_{S,y}) παρέμειναν σχεδόν σταθερές το πρώτο και το δεύτερο έτος (0,23 h/d και 0,22 h/d, αντίστοιχα). Η παρατηρούμενη μείωση ποσοστό 4,3 % είναι εντός των ορίων του σφάλματος των υπολογισμών.

Κατά την πρώτη φάση λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος, οι απώλειες σύλληψης συστοιχίας (L_{Gm}) εντοπίζονταν σχετικά χαμηλές (-0,03-0,26 h/d), ενώ η μεγίστη τιμή 0,59 h/d σημειώθηκε τον Μάρτιο του 2011. Αντιθέτως, οι μηνιαίες μέσες ημερήσιες τιμές των απωλειών του συστήματος ($L_{S,m}$) εμφανίζονταν υψηλές κατά τους πρώτους μήνες λειτουργίας του συστήματος (0,34 h/d για τους μήνες Ιούνιο/Ιούλιο 2010), ενώ χαμηλότερες τιμές επισημαίνονται για τους μήνες Δεικέμβριο 2010/Ιανουάριο 2011).

Για τη δεύτερη περίοδο λειτουργίας του συστήματος σημειώθηκαν απώλειες σύλληψης συστοιχίας ($L_{G,m}$) από 0,33 h/d τον Οκτώβριο του 2011 έως 0,84 h/d τον Απρίλιο του 2012, ενώ οι απώλειες συστήματος ($L_{S,m}$) υπολογίστηκαν από 0,11 h/d για τον Νοέμβριο 2011/Ιανουάριο 2012 έως 0,33 h/d τον Ιούλιο του 2011. Τέλος, οι τιμές των απωλειών λόγω αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων πάνω από του 25 °C ($L_{CT,m}$), κατεγράφησαν από 0,01 h/d τον Οκτώβριο του 2011 μέχρι 0,23 h/d τον Ιούλιο του 2010, και γενικά οι σχετικές τιμές εμφανίζονταν υψηλότερες κατά τους θερινούς μήνες.



Διάγραμμα 5.9: Συσχέτιση της απόδοσης συστοιχίας (*Y*_{A,m}) και της τελικής απόδοσης (*Y*_{E,m}), με την απόδοση αναφοράς (*Y*_{R,m}) για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.

Στο διάγραμμα 5.9 καταγράφεται η ισχυρή γραμμική σχέση που υπάρχει μεταξύ της μηνιαίων μέσων ημερήσιων τιμών της απόδοσης συστοιχίας ($Y_{A,m}$) και της τελικής απόδοσης ($Y_{F,m}$) με την απόδοση αναφοράς ($Y_{R,m}$), καθώς οι σχετικοί συντελεστές προσδιορισμού (R^2) προσεγγίζουν την ποσοστιαία τιμή 99%. Οι υψηλές τιμές των συντελεστών προσδιορισμού δείχνουν ότι τόσο η απόδοση συστοιχίας όσο και η τελική απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος μπορούν να εκτιμηθούν ανά πάσα στιγμή, όταν είναι γνωστή η μηνιαία μέση ημερησία τιμή της απόδοσης αναφοράς ($Y_{R,m}$), η οποία επί της ουσίας ταυτίζεται με την μηνιαία μέση ημερήσια τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας στην κεκλιμένη επιφάνεια ($\overline{H_T}$).

Έτος		Μήνας	n _{pv}	n _{inv}	n _{syst}
		willous		%	
		Ιούνιος	8,6	95,0	8,1
		Ιούλιος	8,2	95,1	7,8
0	Shi	Αύγουστος	8,2	95,2	7,8
201(ακολούθησ	Σεπτέμβριος	8,1	95,1	7,7
		Οκτώβριος	7,8	94,5	7,3
		Νοέμβριος	7,4	95,0	7,1
		Δεκέμβριος	7,2	94,4	6,8
	ďp				
	т Т	Ιανουάριος	7,5	94,5	7,0
	τo	Φεβρουάριος	7,5	94,2	7,1
	1 °	Μάρτιος	7,3	94,6	6,9
		Απρίλιος	7,7	95,0	7,3
		Μάιος	7,9	94,9	7,5
+		Μέσος όρος	7,8	94,8	7,4
01		Ιούνιος	8,0	95,1	7,6
3		Ιούλιος	8,0	95,1	7,6
	รม	Αύγουστος	8,0	95,0	7,6
	օկ	Σεπτέμβριος	7,8	95,1	7,4
	οÚ€	Οκτώβριος	7,8	94,6	7,4
	ογ	Νοέμβριος	6,7	94,2	6,3
	αK	Δεκέμβριος	6,8	94,4	6,5
	ταρ				
	с Т	Ιανουάριος	7,1	94,1	6,7
\sim	ξŢΟ	Φεβρουάριος	7,4	94,4	7,0
2012	л И	Μάρτιος	7,3	95,0	7,0
		Απρίλιος	7,4	94,8	7,0
		Μάιος	7,5	95,1	7,2
		Μέσος όρος	7,5	94,7	7,1

Πίνακας 5.8: Συγκεντρωτικός πίνακας των παραμέτρων: μηνιαία μέση αποδοτικότητα συστοιχίας (*n*_{pv,m}), μηνιαία μέση αποδοτικότητα αντιστροφέα (*n*_{inv,m}), μηνιαία μέση αποδοτικότητα φωτοβολταϊκού συστήματος (*n*_{syst,m}) για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.

Στον πίνακα 5.8 παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για την μηνιαία μέση αποδοτικότητα της συστοιχίας $(n_{pv,m})$, του αντιστροφέα $(n_{inv,m})$ και του συστήματος $(n_{syst,m})$ κατά τη διάρκεια της περιόδου louvíou 2010 - Μαΐου 2012. Ειδικότερα, η ετήσια μέση αποδοτικότητα συστοιχίας $(n_{pv,y})$ σημειώθηκε μειωμένη κατά 0,3% το δεύτερο έτος της περιόδου παρακολούθησης σε σχέση με τη τιμή 7,8% του πρώτου έτους. Παρόμοια ήταν τα αποτελέσματα για την ετήσια μέση αποδοτικότητα του συστήματος $(n_{syst,y})$, καθώς η ποσοστιαία τιμή 7,4% του πρώτου έτους μειώθηκε σε 7,1% το δεύτερο έτος παρακολούθησης, ενώ σε ότι αφορά τις αντίστοιχες τιμές για την αποδοτικότητα του αντιστροφέα $(n_{inv,y})$ τα ποσοστά που πρόεκυψαν για τα δυο (2) έτη της περιόδου παρακολούθησης, μεταβάλλονται ελάχιστα, με τη όποια διαφορά να σημειώνεται εντός των ορίων του σφάλματος υπολογισμού (0,1%).



Διάγραμμα 5.10: Μηνιαία διακύμανση των μέσων τιμών της αποδοτικότητας συστοιχίας (*n_{pv,m}*), της αποδοτικότητας αντιστροφέα (*n_{inv,m}*), της αποδοτικότητας συστήματος (*n_{syst,m}*), της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm_{,m}*) και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (*Ta_{,m}*) κατά την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.

Κατά την πρώτη περίοδο παρακολούθησης, η μηνιαία μέση αποδοτικότητα συστοιχίας $(n_{pv,m})$ (συστήματος $(n_{syst,m})$) κυμάνθηκε μεταξύ 7,2% (6,8%) τον Δεκέμβριο του 2010 και 8,6% (8,1%) τον Ιούνιο του 2010 (πρώτος μήνας λειτουργίας του συστήματος). Η μέγιστη μηνιαία μέση τιμή της αποδοτικότητας του αντιστροφέα $(n_{inv,m,max})$ ήταν 95,2% τον Αύγουστο του 2010, ενώ η ελάχιστη τιμή $(n_{inv,m,min}$ = 94,2%) προέκυψε για τον Φεβρουάριο του 2011.

Για την δεύτερη περίοδο παρακολούθησης, οι ελάχιστες τιμές αποδοτικότητας συστοιχίας (*n_{pv,m,min}*), συστήματος (*n_{syst,m,min}*) και αντιστροφέα (*n_{inv,m,min}*) ήταν 6,7%, 6,3% (για τον Νοέμβριο του 2011) και 94,1% (Ιανουάριο 2012), αντίστοιχα. Ανάλογα, οι μέγιστες τιμές για τις προαναφερθείσες παραμέτρους ήταν 8,0%, 7,6% τον Ιούνιο/Ιούλιο/Αύγουστο 2011 και 95,1% τον Ιούνιο/Ιούλιο/Σεπτέμβριο 2011, αντίστοιχα.

5.4 Αποτελέσματα διερεύνησης της σχέσεως απόδοσης θερμοκρασίας

Είναι γνωστό, ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν ιδανικά σε θερμοκρασία 25°C. Τις περισσότερες φορές όμως, η θερμοκρασία του συστήματος υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (*Tm*) διαφέρει σημαντικά κυρίως κατά την διάρκεια των θερινών μηνών, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαφοράς δυναμικού της ηλιακής κυψέλης με αποτέλεσμα, όταν ένα φορτίο συνδεθεί στα άκρα του, η διαφορά δυναμικού να είναι αισθητά μειωμένη. Με πιο απλά λόγια, η αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας πάνω από του 25°C, έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της παραγόμενης ενέργειας και κατ' επέκταση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Στο πλαίσιο διερεύνησης του μηχανισμού και του βαθμού επίδρασης της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων (*Tm*) στην αποδοτικότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (*n_{pv}*), ειδικά κατά τους θερινούς μήνες λειτουργίας, εξετάσθηκε ένας σημαντικός αριθμός δεδομένων που αφορούσαν τις περιόδους Ιουνίου - Αυγούστου 2010 και Ιουνίου - Αυγούστου 2011, και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν παρουσιάζονται παρακάτω.

Στα διαγράμματα (5.11-5.16) που ακολουθούν, η διακύμανση της αποδοτικότητας συστοιχίας (*n_{pv}*) με την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) για μια αντιπροσωπευτική ημέρα από κάθε ελεγχόμενο μήνα, αναπαρίσταται γραφικά σε σχέση με τον χρόνο.

Είναι εμφανές σε όλες τις περιπτώσεις ότι κατά τις πρωινές ώρες λειτουργίας η αποδοτικότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (n_{pv}) αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό, καθώς οι χαμηλές θερμοκρασίες (Ta) και η συνεχής αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (G_T) συμβάλλουν προς αυτή την κατεύθυνση, μέχρι το σημείο σταθεροποίησης της. Έπειτα, από το σημείο οπού επιτυγχάνεται η αρχική σταθεροποίηση της αποδοτικότητας και μέχρι του σημείου όπου τα επίπεδα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_T) άρχιζαν να φθίνουν, η όποια παρατηρηθείσα διαφοροποίηση της θερμοκρασίας λειτουργιάς των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm).







Διάγραμμα 5.12: Διακύμανση της αποδοτικότητας συστοιχίας (*n_{pv}*) και της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) κατά τη διάρκεια αντιπροσωπευτικής ημέρας του Ιουνίου 2011.

144 Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων


Διάγραμμα 5.13: Διακύμανση της αποδοτικότητας συστοιχίας (n_{pv}) και της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm) κατά τη διάρκεια αντιπροσωπευτικής ημέρας του Ιουλίου 2010.



Διάγραμμα 5.14: Διακύμανση της αποδοτικότητας συστοιχίας (*n_{pv}*) και της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) κατά τη διάρκεια αντιπροσωπευτικής ημέρας του Ιουλίου 2011.

145 Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων



Διάγραμμα 5.15: Διακύμανση της αποδοτικότητας συστοιχίας (n_{pv}) και της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm) κατά τη διάρκεια αντιπροσωπευτικής ημέρας του Αυγούστου 2010.



Διάγραμμα 5.16: Διακύμανση της αποδοτικότητας συστοιχίας (*n_{pv}*) και της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) κατά τη διάρκεια αντιπροσωπευτικής ημέρας του Αυγούστου 2011.

5.4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται υπό μορφή διαγραμμάτων (οι αντίστοιχοι πίνακες βρίσκονται στα παραρτήματα 1 και 2) τα αποτελέσματα ελέγχου για τον προσδιορισμό του βαθμού επίδρασης της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων (*Tm*) στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, υπό σταθερή ακτινοβολία. Τα αποτελέσματα προκύπτουν έπειτα επεξεργασία δείγματος καταγεγραμμένων τιμών από τις θερινές περιόδους του χρονικού διαστήματος παρακολούθησης. Ειδικότερα, μελετήθηκαν η μεταβολή της αποδοτικότητας (*n_{pv}*), της τάσης του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (*DC voltage*), του ρεύματος του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (*DC voltage*), του ρεύματος του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (*C current*) και της μέγιστης ισχύος (*P_{DC}*) στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (*Tm*), για υπολογισθείσες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (*Gτ* = 900±10 W/m²).



<u>1° έτος παρακολούθησης, περίοδος Ιουνίου 2010 - Αυγούστου 2010</u>

Διάγραμμα 5.15: Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της αποδοτικότητας συστοιχίας (*n_{pv}*) από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*), περίοδος Ιουνίου 2010 - Αυγούστου 2010.

"Αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς πρότυπης Φωτοβολταϊκής εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης"



Διάγραμμα 5.16: Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της τάσης του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (*DC voltage*) από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*), περίοδος Ιουνίου 2010 - Αυγούστου 2010.



Διάγραμμα 5.17: Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης του ρεύματος του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (*DC current*) από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*), περίοδος Ιουνίου 2010 - Αυγούστου 2010.

"Αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς πρότυπης Φωτοβολταϊκής 2014 εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης"



Διάγραμμα 5.18: Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της μέγιστης ισχύος (*P_{DC}*) στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*), περίοδος Ιουνίου 2010 - Αυγούστου 2010.

Όπως διακρίνεται από τα διαγράμματα 5.15 και 5.18, η παραγόμενη ισχύς και η αποδοτικότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, μειώνονταν με την αύξηση της θερμοκρασίας, όπως ήταν αναμενόμενο. Ειδικότερα σε θερμοκρασία λειτουργίας 37,7°C, η μεγίστη παραγόμενη ισχύς (P_{DC}) ήταν 2.093,0 W, ενώ σε υψηλότερη τιμή θερμοκρασίας (52,1°C) εμφανίζονταν μειωμένη στα 1.983,0 W. Αντίστοιχα, η αποδοτικότητα της συστοιχίας παρουσίαζε τάση μείωσης, με συντελεστή -0,0289%/ºC. Παρατηρούμε δε, ότι η συσχέτιση των δύο μεταβλητών είναι ιδιαίτερα ισχυρή, καθώς σύμφωνα με τον αντίστοιχο συντελεστή προσδιορισμού (R²) το 82,84% αυτής της μεταβολής οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm). Στο διάγραμμα 5.17 απεικονίζεται αυξητική τάση, στο ρεύμα του σημείου βέλτιστης λειτουργίας (DC current) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, δεδομένης της ισχυρής εξάρτησης του ρεύματος από την ηλιακή ακτινοβολία, δεν καθίσταται δυνατό να εξαχθούν απόλυτα συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας, ειδικά υπό καθεστώς μη σταθερών τιμών ακτινοβολίας.

Τέλος, στο διάγραμμα 5.16 αποτυπώνεται με ευκρίνεια, η καταγραφείσα μείωση της τάσης του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (*DC voltage*), λόγω αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων (*Tm*). Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι κάθε βαθμός αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων (*Tm*), επέφερε απώλεια τάσης -1,225 V, τιμή που αντιστοιχεί σε μεταβολή -0,32%/°C.



2° έτος παρακολούθησης, περίοδος Ιουνίου 2011 - Αυγούστου 2011

Διάγραμμα 5.19: Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της αποδοτικότητας συστοιχίας (*n_{pv}*) από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*), περίοδος Ιουνίου 2011 - Αυγούστου 2011.



Διάγραμμα 5.20: Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της τάσης του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (*DC voltage*) από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*), περίοδος Ιουνίου 2011 - Αυγούστου 2011.



Διάγραμμα 5.21: Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης του ρεύματος του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (*DC current*) από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*), περίοδος Ιουνίου 2011 - Αυγούστου 2011.



Διάγραμμα 5.22: Γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της μέγιστης ισχύος (*P_{DC}*) στην έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας από την θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*), περίοδος Ιουνίου 2011 - Αυγούστου 2011.

Αντίστοιχες ήταν οι τάσεις που καταγράφηκαν για την επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων (Tm) στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας κατά την περίοδο Ιουνίου 2011 - Αυγούστου 2011. Στα διαγράμματα 5.19 και 5.22, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την συσχέτιση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων με την αποδοτικότητα (n_{pv}) και την παραγόμενη ισχύ (P_{DC}) της συστοιχίας. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής μείωσης της παραγόμενης ισχύος ήταν περίπου -5,74 W/°C και ο αντίστοιχος συντελεστής για την αποδοτικότητα σημειώθηκε -0,0281%/°C. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ο υψηλός βαθμός εξάρτησης, τόσο της παραχθείσας ισχύος (P_{DC}), όσο και της αντίστοιχης αποδοτικότητας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (n_{pv}), σύμφωνα με τις ποσοστιαίες τιμές των συντελεστών προσδιορισμού (R²), οι οποίες ήταν 82,2% και 86,0%,αντίστοιχα. Στο διάγραμμα 5.20, παρουσιάζεται η εξαρτημένη σχέση της τάσης του σημείου βέλτιστης λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (DC voltage) με την θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων (Tm). Συγκεκριμένα, διαφάνηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας των πλαισίων (Tm), προκαλεί απώλεια τάσης -1,197 V/°C. Τέλος, στο διάγραμμα 5.21, στο ρεύμα του σημείου βέλτιστης λειτουργίας. (DC current) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας εμφανίζει αυξητική τάση, με την αύξηση της θερμοκρασίας, ωστόσο δεν κατέστη εφικτό, και σε αυτήν τη περίπτωση, να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα για την επίδραση της

θερμοκρασίας.

5.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης

5.5.1 Προσομοίωση (PVGIS)

Το PVGIS αποτελεί ηλεκτρονική πλατφόρμα ανεπτυγμένη σε περιβάλλον GIS, που δύναται να παρέχει σχετικά ασφαλής πληροφορίες για την ηλιακή ακτινοβολία, και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη τα ειδικά χαρακτηριστικά της έδρασης του (τοποθεσία, κλιματικά χαρακτηριστικά, διάταξη, κλπ.).



Εικόνα 5.2 :Βασικά στοιχεία προσομοίωσης με το λογισμικό PVGIS [JRC, 2013]

Το φωτοβολταϊκό σύστημα που μελετάται στην παρούσα εργασία, αποτελεί πρότυπη εγκατάσταση και δημιουργήθηκε για την εξυπηρέτηση των εκπαιδευτικών και ερευνητικών δραστηριοτήτων του εργαστηρίου Ανανεώσιμων και Βιώσιμών ενεργειακών συστημάτων, του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος. Συνοπτικά, τα κυριότερα δεδομένα που θεωρήθηκαν για την προσομοίωση στο PVGIS (εικόνα 5.) ήταν:

- Στοιχεία τοποθεσίας:
 - ✓ Γεωγραφικό πλάτος (latitude): 35°31'58"North
 - ✓ Γεωγραφικό μήκος (altitude): 24°4'14" East
- Είδος φωτοβολταϊκής τεχνολογίας εγκατάστασης: Thin Film
- Ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος: 2,18 kWp
- Εκτιμώμενες απώλειες (καλωδίωσης, αντιστροφέα, κλπ):12%
- Τύπος έδρασης: ελεύθερος

- Κλίση φωτοβολταϊκής διάταξης:30°
- Προσανατολισμός (αζιμούθιο) φωτοβολταϊκής διάταξης:-50°

Παρακάτω συνοψίζονται υπό μορφή πινάκων και διαγραμμάτων τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που σχετίζονται με την υπό μελέτη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Αρχικά, παρουσιάζονται τα κλιματικά στοιχεία και στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την παραγωγή ενέργειας.

	\overline{H}	\overline{H}_{T}	Ta (daytime)
Μηνας	kWh	/m²/d	°C
Ιανουάριος	2,36	3,10	11,80
Φεβρουάριος	3,06	3,69	11,80
Μάρτιος	4,53	5,07	13,30
Απρίλιος	6,05	6,22	16,30
Μάιος	7,32	7,04	21,10
Ιούνιος	8,37	7,78	25,50
Ιούλιος	8,30	7,82	27,90
Αύγουστος	7,55	7,54	27,70
Σεπτέμβριος	5,77	6,27	24,50
Οκτώβριος	3,93	4,66	20,70
Νοέμβριος	2,77	3,58	16,80
Δεκέμβριος	2,39	3,09	13,50
Μέσος όρος	5,21	5,50	19,20

<u>Κλιματικά στοιχεία</u>

Πίνακας 5.9: Μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο (\overline{H}) και στο κεκλιμένο (\overline{H}_T) επίπεδο, μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος ($Ta_{,m}$) κατά τις ώρες ηλιοφάνειας, σύμφωνα με το λογισμικό PVGIS.

Στον πίνακα 5.9 παρουσιάζονται τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής μελέτης, όπως προκύπτουν από την ενσωματωμένη βάση δεδομένων του λογισμικού PVGIS. Σύμφωνα με τα στοιχεία, η ετήσια μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο ($\overline{H}_{,y}$) και στο κεκλιμένο ($\overline{H}_{T,y}$) επίπεδο υπολογίζονται ως 5,21 kWh/m²/d και 5,50 kWh/m²/d, αντίστοιχα. Επιπλέον, η μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στην κεκλιμένη επιφάνεια (\overline{H}_T) κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 3,09 kWh/m²/d τον Δεκέμβριο και 7,82 kWh/m²/d τον Ιούλιο. Στο διάγραμμα 5.24, απεικονίζεται η διακύμανση των μέσων μηνιαίων τιμών της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ($Ta_{,m}$) κατά τις ώρες ηλιοφάνειας. Συγκεκριμένα, κατά τους θερινούς μήνες σημειώνονται υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας, με τη μέγιστη τιμή ($Ta_{,m,max}$ =27,9°C) να καταγράφεται τον μήνα Ιούλιο, ενώ κατά του χειμερινούς μήνες οι τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος ($Ta_{,m}$) παρουσιάζονται σημαντικά μειωμένες, με την ελάχιστη τιμή ($Ta_{,m,min}$) να προσδιορίζεται ίση με 11,8 °C τον Ιανουάριο/Φεβρουάριο.



Διάγραμμα 5.23: Μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία στην κεκλιμένη επιφάνεια της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (*H*_{T,m}), σύμφωνα με το λογισμικό PVGIS.



Διάγραμμα 5.24: Μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος (*Ta*,*m*) κατά τις ώρες ηλιοφάνειας στην υπό μελέτη περιοχή, σύμφωνα με το λογισμικό PVGIS.

Μήνας	E _{AC}	E _{AC}	Y _R	Y _F	L _{total}	PR	n _{syst}
willous	kWh	kWh/kWp		h/d		9	6
Ιανουάριος	162,00	74,38	3,10	2,40	0,70	77,4	6,5
Φεβρουάριος	175,00	80,35	3,69	2,87	0,82	77,8	6,6
Μάρτιος	267,00	122,59	5,07	3,95	1,12	77,9	6,6
Απρίλιος	317,00	145,55	6,22	4,87	1,35	78,3	6,6
Μάιος	371,00	170,34	7,04	5,51	1,53	78,3	6,6
Ιούνιος	397,00	182,28	7,78	6,06	1,72	77,9	6,7
Ιούλιος	412,00	189,16	7,82	6,11	1,71	78,1	6,6
Αύγουστος	398,00	182,74	7,54	5,88	1,66	78,0	6,7
Σεπτέμβριος	319,00	146,46	6,27	4,87	1,40	77,7	6,6
Οκτώβριος	245,00	112,49	4,66	3,62	1,04	77,7	6,6
Νοέμβριος	182,00	83,56	3,58	2,78	0,80	77,7	6,6
Δεκέμβριος	161,00	73,92	3,09	2,38	0,71	77,0	6,5
Μέσος όρος	284,00	130,32	5,50	4,28	1,22	77,8	6,6
Γενικό σύνολο	3.406,0	1.563,82					

Ενεργειακή ανάλυση

Πίνακας 5.10: Συγκεντρωτικός πίνακας των παραμέτρων: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος (E_{AC}), απόδοση αναφοράς ($Y_{R,m}$), τελική απόδοση ($Y_{F,m}$), συνολικές ενεργειακές απώλειες (L_{total}), λόγος απόδοσης (PR), αποδοτικότητα φωτοβολταϊκού συστήματος ($n_{syst,m}$), σύμφωνα με το λογισμικό PVGIS.

Στον πίνακα 5.10, παραθέτονται αναλυτικά τα βασικά στοιχεία που καθορίζουν την ενεργειακή συμπεριφορά του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος. Η μηνιαία συνολική ενέργεια που τροφοδοτείται στο δίκτυο από το σύστημα $(E_{AC,m})$, υπολογίζεται μεταξύ 73,92 kWh/kWp το Δεκέμβριο και 189,16 kWh/kWp τον Ιούλιο, ενώ η ετήσια συνολική παραγόμενη ενέργεια $(E_{AC,y})$ είναι 1.563,82 kWh/kWp. Η μηνιαία μέση ημερήσια τελική απόδοση $(Y_{F,m})$ και η απόδοση αναφοράς $(Y_{R,m})$ κυμαίνονται μεταξύ 2,38 h/d και 6,11 h/d, 3,09 h/d και 7,82 h/d για τους μήνες Δεκέμβριο και Ιούλιο, αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, οι συνολικές απώλειες (L_{total}) που προβλέπονται για το σύστημα από το λογισμικό PVGIS, όπως ήταν αναμενόμενο, σημειώνονται υψηλότερες κατά τους θερινούς μήνες (1,66-1,72 h/d), οπότε και καταγράφονται υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας. Τέλος, προσδιορίζονται οι ετήσιες μέσες τιμές για την ημερήσια τελική απόδοση $(Y_{F,y})$, για το λόγο απόδοσης $(PR_{,y})$ και την αποδοτικότητα του συστήματος $(n_{syst,y})$ ίσες με 4,28 h/d, 77,8% και 6,6%, αντιστοίχως.



Διάγραμμα 5.25: Ολική μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της υπό μελέτη φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, σύμφωνα με το λογισμικό PVGIS.

5.5.2 Προσομοίωση (Sunny Design)

Το Sunny Design θεωρείται σχεδιαστικό λογισμικό και παρέχει στους εγκαταστάτες και σχεδιαστές φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων μια εύχρηστη επιφάνεια διαμόρφωσης συστημάτων. Βασικό πλεονέκτημα του προγράμματος αποτελεί η ικανότητα του για ορθολογική διαμόρφωση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, που επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη τη συμβατότητα των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των συνεργαζόμενων μερών του συστήματος, σε συνθήκες λειτουργίας. Στην προκειμένη περίπτωση, το λογισμικό Sunny design χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του σχεδιασμού της υπό μελέτη φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, τον εντοπισμό πιθανών απωλειών ενέργειας λόγω της υφιστάμενης διασύνδεσης και τον προσδιορισμό της ετήσιας παραγωγής ενέργειας. Τα στοιχεία που εισήχθησαν (εικόνα 5.3) για την προσομοίωση στο λογισμικό Sunny Design ήταν:

- Στοιχεία τοποθεσίας: Κρήτη, Ελλάδα
- Αριθμός τύπος φωτοβολταϊκών πλαισίων: 18 Sharp NA-F121(G5)
- Αριθμός τύπος αντιστροφέα: 1 SMA SB 2500
- Τρόπος διασύνδεσης: δύο (2) παράλληλες στοιχειοσειρές αποτελούμενες από εννέα (9) φωτοβολταϊκά πλαίσια εν σειρά.
- Τύπος έδρασης: οροφή
- Κλίση φωτοβολταϊκής διάταξης: 30°
- Προσανατολισμός (αζιμούθιο) φωτοβολταϊκής διάταξης: -50°

"Αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς πρότυπης Φωτοβολταϊκής 2014 εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης"

Sunny Design - PV system 2,18 kW File Project Tools Help			-		
1 🖶 🖩 🖓 🗟 📢	A 🔒				🐚 🖩 🗶 (
Project: PV system 2,18 kW Location: Crete, Greece Change Constraints of the constraints	Name: Manufac re: PV- module: Cell temperature -10 70 °C Setpoint Orientation: Azimuth angle	PV-array 1 Sharp NA-F121 (G5) Number of PV modules PV Peak power 2, :-50 °; Inclination: 30 °	• Q • j 18 • KWp •	SB 2500 Inverter: SB 2500 Inverter: SB 2500 Inverter: Max. DC power: Max. DC power: Max. AC power: AC connection: Max. efficiency: Grid voltage:	8 2500 1 2.70 kW 2.50 kW Single-phase 94,1 % 230V (230V / 400V)
	Mounting type: Roof Overview of inverters	Change Desig	n suggestions		
Table surplus of DV/ used days 10		18/18	PV Peak power	Nominal power ratio	Energy usability factor
PV Peak power 2,18 kWp	✓ 1 x SB 2500	2 x 9 (A)	2,18 kWp	124,0 %	99,9 %
Number of inverters 1	 PV/Inverter conditionally 	compatible			
Nominal AC power 2,30 kW	Configuration				Input A
Annual energy yield (ca.)* 2727,40 kWh	Inverter:		SB 2500	PV-array:	PV-array 1
Energy usability factor 99,9 %	Independent inputs:		1	Number of PV modules (input):	18
Spec. energy yield (ca.)* 1252 kWb/kWp	Max. DC power:		2,70 kW	Peak power (input):	2,18 kWp
Line losses (in % of PV energy) 0,30 %	Min. DC voltage:		224 V	Typical PV voltage:	365 V 🔮
#Project overview	Max. DC voltage (Inverter):		600 V	Max. PV voltage:	589 V 🥹
;; Performance	Max. DC current:		12 A	Max. current of PV array:	5,4 A 🥝
:: Help					
Sunny Design - PV system 2,18 kW*		A DECISION OF THE OWNER OWNER OF THE OWNER OWNE OWNER OWNER			
File Project Tools Help	₼ №				🖡 🖩 🏏
Project: PV system 2,18 kW	Project data Overview of r	esults Cable dimensioning	3		
Location: Crete, Greece Change			DC	AC1 AC2	
\sim D D			= /		
 Project overview Part project 1 PV-array 1 1 x SB 2500 			= /	1~230 kWł	
	Project DC solder	Clashian AClashian	$\stackrel{l_{DC}}{\longleftrightarrow}$ \leftarrow	LAC 1 LAC 2	
Total number of DV modular	rioject DC cables Al	ALZ CADIES			
PV Peak power 2,18 kWp	Settings				
Number of inverters 1	Consider the line losses in	the yield calculation: 📝 D	C 🛛 AC		
Nominal AC power 2,30 kW	Total losses				
Annual energy yield (ca.)* 2727,40 kWh			DC	AC	Total
Energy usability factor 99,9 %	Total cable length:		48,00 m	10,00 m	58,00 m
Performance ratio (ca.)* 75,4 %	Cable cross sections:		4 mm ²	2,5 mm ²	2,5 mm ² 4 mm ²
Spec. energy yield (ca.)* 1252 kWh/kWp	Power loss at nominal ope	ration:	1,49 W	10,73 W	12,22 W
Line losses (in % of PV energy) 0,30 %	Rel. power loss at rated no	minal operation:	0,07 % 🛇	0,49 % 🕑	0,56 % 🛇
# Performance	Pay attention to all nationa	l and international standards (su	- uch as VDE, NEC etc.) with re	- spect to the cross-sections of the cables.	-
;; rerrormance	Fay accention to all riationa	i una international stanuards (st	action work, twee etc.) with re	apece to the cross-sections of the cables.	

Εικόνα 5.3: Δεδομένα προσομοίωσης με το λογισμικό Sunny Design.

Γενικά, πρέπει να τονιστεί ότι ή ονομαστική ισχύς εξόδου του αντιστροφέα δεν πρέπει να ταυτίζεται σε καμία περίπτωση με την ισχύ αιχμής των πλαισίων στην είσοδο του. Σύμφωνα με τις συστάσεις των κατασκευαστών αντιστροφέων, η τιμή αυτή θα πρέπει αυξημένη κατά 10-20%. Όπως προκύπτει από τον έλεγχο συμβατότητας μέσω του λογισμικού Sunny Design, ο αντιστροφέας στην εξεταζόμενη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση θεωρείται υπερδιαστασιολογημένος καθώς η ονομαστική αναλογία ισχύος που προκύπτει σημειώνεται μεγαλύτερη από 120%. Ωστόσο, δεν ανακύπτουν άλλες σχεδιαστικές ατέλειες.

	E _{AC}	E _{AC}	Απώλειες καλωδίωσης	PR
	kWh	kWh/kWp	%	%
Ετήσιο	2.727,4	1.252,0	0,56	75,4
		Αποτελέα	γματα τεχνικού ελέγχου	
Min. PV	voltage	333 V	1.4	
Typical P\	/ voltage	365 V	Imax	
Min. DC (Grid volta	voltage age:230V)	224 V		
Max. PV	voltage	589 V		
Max. DC (inve	voltage rter)	600 V		
Max current	of PV array	5,4 A		
Max. DC	current	12,0 A	VDC,min VMPP,Design VDC,	max V

Πίνακας 5.11: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων του λογισμικού Sunny Design.

Στον πίνακα 5.11 συνοψίζονται τα στοιχεία που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης και τη ενεργειακή απόδοση της. Συγκεκριμένα, η ετήσια συνολικά παραγόμενη ενέργεια (*E*_{AC,y}) υπολογίζεται 2.727,4 kWh, ενώ οι απώλειες ενέργειας προσεγγίζουν το 0,56%. Εν κατακλείδι, ο ετήσιος μέσος λόγος απόδοσης (*PR*,y) του μελετηθέντος φωτοβολταϊκού συστήματος προκύπτει ίσος με 75,4%.

5.5.3 Προσομοίωση (RETScreen)

Το Πακέτο λογισμικού RETScreen θεωρείται εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων σε ενεργειακά ζητήματα. Αναπτύχθηκε στον Καναδά με τη συμβολή εξειδικευμένου προσωπικού από τη βιομηχανία και τον ακαδημαϊκό χώρο και παρέχεται εντελώς δωρεάν. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως για να αποτιμηθεί η παραγωγή και εξοικονόμηση ενέργειας, τα κόστη, οι μειώσεις αερίων εκπομπών, η οικονομική βιωσιμότητα και η ανασφάλεια για διάφορα είδη τεχνολογιών εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών (RETs). Βασικό πλεονέκτημα του RETScreen αποτελεί η διευρυμένης κλίμακας ενσωματωμένη βάση δεδομένων του, η οποία περιλαμβάνει τα απαραίτητα στοιχεία προϊόντων, έργων, σημείων αναφοράς, υδρολογικών και κλιματολογικών παραμέτρων, και διευκολύνει σημαντικά τους χρήστες στην πλήρη ανάλυση του εκάστοτε έργου.

Εν προκειμένω, με βάση το λογισμικό RETScreen, θα γίνει εκτίμηση της παραγωγής ενέργειας και συνοπτική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών και οικονομικών παραμέτρων της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Τα κυριότερα δεδομένα που λαμβάνονται υπόψη για την προσομοίωση στο RETScreen είναι:

- Στοιχεία τοποθεσίας: Σούδα, Ελλάδα
- Ισχύς του φωτοβολταϊκής συστοιχίας: 2,18 kWp
- Τύπος φωτοβολταϊκού πλαισίου: Sharp NA-F121(G5)
- Λοιπές απώλειες συστοιχίας: 8,0%
- Ισχύς μετατροπέα (inverter): 2,30 kW
- Λοιπές απώλειες μετατροπέα (inverter): 5,0%
- Κλίση φωτοβολταϊκής διάταξης: 30°
- Προσανατολισμός (αζιμούθιο) φωτοβολταϊκής διάταξης: -50°
- Πληθωρισμός: 2,0% [ΥΠΕΚΑ,2013]
- Τιμή πωλούμενου ηλεκτρισμού: 550 €/kWp [ΥΠΕΚΑ, 2013]
- Αρχικό κόστος εγκατάστασης: 3.700,0 €/kWp [ΥΠΕΚΑ, 2013]
- Κόστος συντήρησης και λειτουργίας: 90 €/kWp/έτος [ΥΠΕΚΑ, 2013]

Στους πίνακες που ακολουθούν, παρουσιάζεται με αναλυτικό τρόπο η μεθοδολογία του λογισμικού RETScreen και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της για το εξεταζόμενο σενάριο φωτοβολταϊκού συστήματος. Στην εικόνα 5.4 συνοψίζονται τα εισαγωγικά στοιχεία (τύπος έργου, τεχνολογία, μέθοδος ανάλυσης κλπ), όπως καταγράφονται στο φύλλο εκκίνησης, μέσω του οποίου επιλέγεται και η αντιπροσωπευτική τοποθεσία κλιματικών δεδομένων (πίνακας 5.12).

"Αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς πρότυπης Φωτοβολταϊκής εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης"

2014



Εικόνα 5.4 : Φύλλο εκκίνησης του λογισμικού RETScreen.

Μήνας	Θερμοκρασία αέρα	Σχετική υγρασία	Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία - Οριζόντια	Ατμοσφαιρική πίεση	Ταχύτητα ανέμου	Θερμοκρασία εδάφους
	°C	%	kWh/m²/d	kPa	m/s	°C
Ιανουάριος	11,0	77,3%	2,31	101,2	3,2	15,1
Φεβρουάριος	10,8	76,4%	3,20	101,1	3,3	14,9
Μάρτιος	12,6	74,4%	4,57	101,0	3,6	15,9
Απρίλιος	15,7	70,5%	6,30	100,8	3,7	17,9
Μάιος	20,1	64,4%	7,45	100,8	3,3	21,2
Ιούνιος	24,6	57,2%	8,45	100,7	3,2	24,7
Ιούλιος	26,6	57,9%	8,41	100,5	2,9	26,8
Αύγουστος	26,1	59,8%	7,58	100,5	3,0	27,3
Σεπτέμβριος	23,3	65,9%	6,14	100,8	2,9	25,8
Οκτώβριος	19,9	71,8%	4,28	101,1	2,8	22,8
Νοέμβριος	15,6	75,8%	2,65	101,1	2,8	19,3
Δεκέμβριος	12,1	78,7%	2,05	101,2	3,2	16,4
Ετήσιο	18,2	69,1%	5,29	100,9	3,2	20,7

Πίνακας 5.12: Κλιματολογικά δεδομένα για την ευρύτερη περιοχή των Χανίων μέσω του λογισμικού RETScreen.

"Αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς πρότυπης Φωτοβολταϊκής 2014 εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης"

Λειτουργία παρακολούθησης του ήλιου		Σταθεροποιημένα			
Κλίση	٥	30,0			
Αζιμούθιο	0	-50,0	ļ		
Ø	Δείξε δεδομένα		Ημερήσια		
	Μήνας	Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία - Οριζόντια	ημερησία ηλιακή ακτινοβολία - κεκλιμένο επίπεδο	Τιμή πωλούμενου ηλεκτρισμού	Ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο
		kWh/m²/d	kWh/m²/d	€/MWh	MWh
	Ιανουάριος	2,31	2,89	550,0	0,160
	Φεβρουάριος	3,20	3,71	550,0	0,185
	Μάρτιος	4,57	4,95	550,0	0,270
	Απρίλιος	6,30	6,32	550,0	0,330
	Μάιος	7,45	7,11	550,0	0,378
	Ιούνιος	8,45	7,82	550,0	0,397
	Ιούλιος	8,41	7,89	550,0	0,411
	Αύγουστος	7,58	7,55	550,0	0,394
	Σεπτέμβριος	6,14	6,56	550,0	0,334
	Οκτώβριος	4,28	5,04	550,0	0,269
	Νοέμβριος	2,65	3,29	550,0	0,173
	Δεκέμβριος	2,05	2,62	550,0	0,145
	Ετήσι ο	5,29	5,49	550,00	3,445
Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία - οριζόντιο επίπεδο	MWh/m ²	1,93			
Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία - επικλινές επίπεδο	MWh/m²	2,00			
Φωτοβολταικο 		(4.).	ן		
Ιυπος		<u> </u>			
Ηλεκτρικη ισχυς	KVV	2,18 SHARP			
Κατασκευαστης		NA-F121(G5)			
Μοντέλο		NA-1 121(G3)		18 μονάδες	
Βαθμός απόδοσης	%	8,5%			
Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας κελιού	°C	44			
Συντελεστής θερμοκρασίας	% / °C	0,24%	ļ		
Επιφάνεια ηλιακού συλλέκτη	m²	26		ft²	276
Δοιπές απώλειες	%	8.0%]		
	70	0,070	1		
Μετατροπέας (inverter)			,		
Βαθμός απόδοσης	%	94,1%			
Ισχύς	kW	2,3			
Λοιπές απώλειες	%	5,0%			
Περίληψη					
Συντελεστής ισχύος	%	18,0%			
Ηλεκτοική ενέρνεια στο δίκτυο	MWh	3.445			

Πίνακας 5.13: Ενεργειακό μοντέλο του λογισμικού RETScreen για την εξεταζόμενη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.

Στον πίνακα 5.12, συνοψίζονται τα κλιματικά δεδομένα για την ευρύτερη περιοχή των Χανίων (Σούδα), όπως λαμβάνονται από την βάση δεδομένων του λογισμικού RETScreen. Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά, οι πιο ψυχροί μήνες είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος με τις τιμές για τη μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα (*Ta*,*m*) να υπολογίζονται 11,0°C και 10,8°C αντίστοιχα, ενώ οι πιο θερμοί θεωρούνται ο Ιούλιος και ο Αύγουστος με μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες αέρα 26,6°C και 26,1°C, αντίστοιχα. Οι άνεμοι που πνέουν στην περιοχή είναι σχετικά χαμηλής εντάσεως, με τις υψηλότερες μέσες μηνιαίες τιμές ταχύτητας ανέμου (*Vw*,*m*) να παρατηρούνται από Φεβρουάριο μέχρι Απρίλιο.

Στο ενεργειακό μοντέλο του RETScreen, παρατίθενται τα αποτελέσματα προσδιορισμού της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο, και της ηλεκτρικής ενέργειας που αποδίδεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Συγκεκριμένα, η ετήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο και στο κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζονται σε 1,93 MWh/m² και 2,00 MWh/m², αντίστοιχα. Επιπλέον, η μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στην κεκλιμένη επιφάνεια (\overline{H}_T) κυμαίνεται μεταξύ 2,62 kWh/m²/d τον Δεκέμβριο και 7,89 kWh/m²/d τον Ιούλιο, με μέση ετήσια πιμή 5,49 kWh/m²/d. Παράλληλα, η μηνιαία συνολική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα ($E_{AC,m}$), σημειώνεται μεταξύ 0,145 MWh (ή 145 kWh) το Δεκέμβριο και 0,411 MWh (ή 411 kWh) τον Ιούλιο, ενώ η ετήσια συνολική παραγόμενη ενέργεια ($E_{AC,y}$) είναι 3,445 MWh (ή 3.445,0 kWh). Τέλος, βάσει των παραπάνω στοιχείων, προκύπτουν η ετήσια μέση ημερήσια τελική απόδοση ($Y_{E,y}$) ίση με 4,33 h/d και ο λόγος απόδοσης ($PR_{,y}$) ίσος με 78,9%.

Βασική περίπτωση συστήματος ηλεκτρισμού (Σενάριο Αναφοράς)		Συντελεστής εκπομπής ΑΤΘ (εξαιρούνται Μ&Δ)	Απώλειες Μ&Δ	Συντελεστής εκπομπής ΑΤΘ	
Κοάτος - περιφέρεια	Τύπος Καυσίνου	th CO-/MWb	0/_	th CO./MW/b	
			78		
Ελλαόα	Ι Ιετρέλαιο	0,748		0,748	
Ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο Εκπομπές ΑΤΘ	MWh	3	Απώλειες Μ&Δ		
Βασική περίπτωση	tn CO ₂	2,6			
Προτεινόμενη περίπτωση	tn CO ₂	0,0			
Μικτή ετήσια μείωση εκπομπών ΑΤΘ Τέλη συναλλαγών πιστώσεων εκπομπών ΑΤΘ	tn CO ₂ %	2,6]		
Καθαρή ετήσια μείωση εκπομπών ΑΤΘ	tn CO ₂	2,6	ισοδυναμεί με	0,6	Στρέμματα δάσους που απορροφούν άνθρακα
Έσοδα από τη μείωση εκπομπών ΑΤΘ Τιμή πίστωσης μείωσης εκπομπών ΑΤΘ	€/tn CO₂				

Πίνακας 5.14: Μοντέλο ανάλυσης εκπομπών του λογισμικού RETScreen για την εξεταζόμενη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.

Μια πολύ σημαντική λειτουργία που προκύπτει από την ανάπτυξη της μεθοδολογίας του λογισμικού είναι ο υπολογισμός της ποσότητας των αερίων του θερμοκηπίου που αποφεύγεται να διαρρεύσει στην ατμόσφαιρα, εφόσον χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, αντί για το κεντρικό δίκτυο. Ο προαναφερθείς υπολογισμός βασίζεται σε ισοδύναμους συντελεστές εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου από κάθε καύσιμο. Δεδομένου ότι το εξεταζόμενο σύστημα έχει ενταχθεί στο ευρύτερο περιβάλλον της Κρήτης, όπου το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται μέσω της καύσης πετρελαίου, κρίθηκε σκόπιμο η αξιολόγηση των αποφευχθέντων αερίων εκπομπών να γίνει βάσει του ανάλογου ισοδύναμου συντελεστή. Ειδικότερα, σύμφωνα με το RETScreen κάθε MWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την καύση πετρελαίου αντιστοιχεί στην εκπομπή 0,748 tn CO₂. Συνεπώς, η ετήσια συνολική παραγωγή ενέργειας του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος της τάξης των 3,445 MWh έχει θετικό αντίκτυπο στο περιβάλλον της περιοχής, ο οποίος μπορεί να αποτιμηθεί ως ετήσια απορρόφηση 2,6 tn CO₂ ή ως επέκταση της υπάρχουσας δασικής έκτασης κατά 600 m².

Οικονομικοί Παράμετροι			
Τιμή πληθωρισμού	%	2,0%	
Διάρκεια ζωής έργου	έτος	25	
Τοκοχρεολύσιο	%	0%	
Αρχικά κόστη			
Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	€	0	0,0%
Άλλο	€	8.000	100,0%
Συνολικά αρχικά κόστη	€	8.000	100,0%
Κίνητρα και επιχορηγήσεις	€	0	0,0%
Ετήσια κόστη και πληρωμές χρέρις			
Σήστος Λειτομονίας & Συντήρησης (εξοικονόμηση)	€	200	
Κόστος καισίμου - ποοτεινόμενη περίπτωση	€	0	
	€		
Συνολικά ετήσια κόστη	€	200	
Ετήσιες αποταμιεύσεις και έσοδα			
Κόστος καυσίμου - βασική περίπτωση	€	0	
Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας	€	1.895	
	€		
Συνολικές ετήσιες αποταμιεύσεις και εισόδημα	€	1.895	
Οικονομική Βιωσιμότητα			
(IRR) προ φόρου - περιουσιακά στοιχεία	%	23,4%	
Απλή αποπληρωμή	έτος	4,7	
Αποπληρωμή Μετοχών	έτος	4,5	

Πίνακας 5.15: Μοντέλο οικονομικής ανάλυσης του λογισμικού RETScreen για την εξεταζόμενη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.

Εν κατακλείδι, στον πίνακα 5.15 παρουσιάζονται τα απαραίτητα στοιχεία για την αξιολόγηση της οικονομικής αποδοτικότητας της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Τα στοιχεία αυτά, βρίσκονται κατηγοριοποιημένα στο φύλλο οικονομικής ανάλυσης στα εξής διακριτά τμήματα:

- Οικονομικοί παράμετροι
- Αρχικά κόστη
- Κίνητρα και επιχορηγήσεις
- Ετήσια κόστη και πληρωμές χρέους
- Ετήσιες αποταμιεύσεις και έσοδα
- Οικονομική βιωσιμότητα

Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί ότι το εξεταζόμενο σενάριο οικονομικού χαρακτήρα, στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στα στοιχεία (β' εξάμηνο του 2010) της έκθεσης αξιολόγησης του ειδικού προγράμματος ανάπτυξης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες που δόθηκαν πρόσφατα στην δημοσιότητα από το Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. Όπως προκύπτει από τον υπολογισμούς του λογισμικού RETScreen, η επένδυση στο για εξεταζόμενο φωτοβολταϊκό σύστημα (8.000,0 €), καταγράφει συνολικές ετήσιες απολαβές 1.895,0 € με τον δείκτη απόδοσης της επένδυσης (*IRR*) να ξεπερνάει το 23% και την αποπληρωμή του κόστους του συστήματος να συμβαίνει σε 4,7 έτη (διάγραμμα 5.26).



Διάγραμμα 5.26: Αποδοτικότητα κεφαλαίου επένδυσης συναρτήσει του χρόνου.

5.6 Αποτελέσματα αξιολόγησης εμπειρικών μοντέλων άμεσου προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων αναδεικνύεται ως μείζονος σημασίας ζήτημα για την αποδοτικότητα των συστημάτων, γεγονός που γίνεται εύκολα αντιληπτό και από το σημαντικό αριθμό προτεινόμενων μοντέλων προσδιορισμού της. Τα μοντέλα αυτά, συνδυάζουν κλιματολογικές και τεχνικές παραμέτρους, έτσι ώστε να δικαιολογούν επαρκώς το λόγο δημιουργίας τους. Δεδομένου ότι οι σχέσεις αυτές προκύπτουν μέσω στατιστικής ανάλυσης τοπικών παρατηρήσεων κατά τη διάρκεια ορισμένων περιόδων, η αξιολόγηση της προβλεπτικής τους ικανότητας σε συνθήκες διαφορετικές από τις πρότυπες, επικυρώνει την καταλληλότητα τους.

Εν προκειμένω, εφαρμόστηκε κατάλληλη μεθοδολογία για την αξιολόγηση της επάρκειας δέκα (10) διαφορετικών μοντέλων άμεσου προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, υπό δεδομένες συνθήκες (χαρακτηριστικές ημέρες) των δεκαοκτώ (18) πρώτων μηνών λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος. Στην συνέχεια της ενότητας, παρουσιάζονται υπό μορφή γραφημάτων, κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα της εφαρμοσθείσας μεθοδολογίας, τα οποία παρέχουν τις βασικές πληροφορίες για την προσαρμογή των εξεταζόμενων μοντέλων στα πρωτογενή δεδομένα που λαμβάνονται από το σύστημα παρακολούθησης. Τα ακόλουθα γραφήματα, έχουν κατηγοριοποιηθεί, ως προς τη μορφή των διερευνώμενων μοντέλων επικρατούντων συνθηκών (πίνακας 5.16).

	Καλοκαίρι	Χειμώνας
\checkmark	Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος	✓ Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος
\checkmark	Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος	✓ Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος
✓	Αίθρια ημέρα, σχεδόν μέτριος άνεμος	 ✓ Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος
✓	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος	✓ Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος
✓	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος	 ✓ Συνθήκες αραιής συννεφιάς, σχεδόν μέτριος άνεμος
	Φθινόπωρο	Άνοιξη
	-	2 I
✓	Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος	 Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος
√ √	Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος	 ✓ Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος ✓ Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος
✓ ✓ ✓	Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος	 ✓ Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος ✓ Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος ✓ Αίθρια ημέρα, σχεδόν μέτριος άνεμος
✓ ✓ ✓	Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος	 ✓ Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος ✓ Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος ✓ Αίθρια ημέρα, σχεδόν μέτριος άνεμος ✓ Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος
✓ ✓ ✓	Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος	 ✓ Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος ✓ Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος ✓ Αίθρια ημέρα, σχεδόν μέτριος άνεμος ✓ Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος ✓ Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος
✓ ✓ ✓	Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος	 ✓ Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος ✓ Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος ✓ Αίθρια ημέρα, σχεδόν μέτριος άνεμος ✓ Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος ✓ Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος ✓ Συνθήκες αραιής συννεφιάς, σχεδόν μέτριος άνεμος

Πίνακας 5.16: Κατηγοριοποίηση των υπό διερεύνηση συνθηκών.

5.6.1 Καλοκαίρι

Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος



Πίνακας 5.17: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (18/6/2010).



Διάγραμμα 5.27: Σύγκριση πειραματικών θεωρητικών και τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα Jμ ανεξάρτητες μεταβλητές: Ta, GT, Vw) κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (18/6/2010).



Διάγραμμα 5.28: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T) κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (18/6/2010).



Διάγραμμα 5.29: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και πολύ ασθενούς ανέμου (18/6/2010).

Στα διαγράμματα 5.27 και 5.28, απεικονίζεται γραφικά η ημερήσια διακύμανση των πειραματικών (πραγματικών) και των θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm) υπό δεδομένες συνθήκες (πίνακας 5.17), όπως υπολογίστηκαν από τις αντίστοιχες εμπειρικές σχέσεις. Σύμφωνα με τα γραφήματα, τα μοντέλα, στα οποία περιλαμβάνεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή η ταχύτητα ανέμου (Vw), εκφράζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τις στιγμιαίες τάσεις της θερμοκρασίας, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία αυτής της παραμέτρου. Επιπλέον, διακρίνεται ότι τα μοντέλα των King et al. (2004), Ross (1976) - Nordmann et al. (2003), Servant (1985) και Tselepis - Tripanagnostopoulos (2001) εμφανίζουν τη μεγαλύτερη προσαρμογή στα πρωτογενή δεδομένα, ενώ οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα μοντέλα των Risser – Fuentes (1983) και των Mondol et al. (2007). Ειδικότερα, το μέσο σφάλμα μεροληψίας (*MBE*), το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) για το μοντέλο των Ross (1976) - Nordmann et al. (2003) υπολογίστηκαν ίσα με 1,4%, 4,6% και 5,5%, αντίστοιχα, καθιστώντας το ως το πιο επαρκές εκ των εξεταζόμενων μοντέλων. Από την άλλη, για τη γραμμική σχέση των Risser -Fuentes (1983), τα σφάλματα προσαρμογής MBE, MAE και RMSE ήταν 32,4%, 32,4% και 33,1%,γεγονός το οποίο αποδίδεται στις τιμές των συντελεστές παλινδρόμησης του μοντέλου. Η παραπάνω διαπίστευση ενισχύεται και από τα αποτελέσματα του μοντέλου των Chenni et al. (2007).



Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος

Πίνακας 5.18: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (19/6/2011).



Διάγραμμα 5.30: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T, *Vw*) κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (19/6/2011).



Διάγραμμα 5.31: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta, G_T*) κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (19/6/2011).



Διάγραμμα 5.32: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και ασθενούς ανέμου (19/6/2011).

Σε συνθήκες αιθριότητας και ασθενών ανέμων, τα υπό αξιολόγηση μοντέλα παρουσίασαν μια συνέχεια στην τάση υπερεκτίμησης της θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm), όπως προκύπτει τόσο από τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου (διάγραμμα 5.32), όσο και από τα πρώτιστα διαγνωστικά γραφικά τεστ (διαγράμματα 5.30 και 5.31). Βάσει των εξαχθέντων αποτελεσμάτων, σημειώνεται ότι τα μοντέλα των King et al. (2004), Ross (1976) - Nordmann et al. (2003), Servant (1985) και Tselepis -Tripanagnostopoulos (2001) δύνανται να προβλέπουν επαρκώς τη λειτουργική θερμοκρασία των πλαισίων (Tm). Αντίθετα, οι τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή των σχέσεων των Risser - Fuentes (1983) και των Mondol et al. (2007) αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό από τις πειραματικές μετρήσεις. Συγκεκριμένα, το μοντέλο των Ross (1976) - Nordmann et al. (2003) απέδωσε τις καλύτερες προβλέψεις, καθώς τα ελεγχόμενα σφάλματα προσαρμογής MBE, ΜΑΕ και RMSE υπολογίστηκαν ίσα με 3,8%, 4,2% και 5,2%. Αρκετά υψηλή προβλεπτική ικανότητα παρουσίασε και το μοντέλων των Tselepis -Tripanagnostopoulos (2001) με τους δείκτες MBE, MAE και RMSE να προκύπτουν ίσοι με 5,2%, 5,3% και 6,3%. Ενώ, το μοντέλο των Risser - Fuentes (1983) δείχνει να μην προσαρμόζεται στα αρχικά δεδομένα, σύμφωνα με τις τιμές (≥34%) των *MBE*, *MAE* και *RMSE*.

Αίθρια ημέρα, σχεδόν μέτριος άνεμος



Πίνακας 5.19: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με σχεδόν μέτριο άνεμο (26/7/2010).



Διάγραμμα 5.33: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta, G_T, Vw*) κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (26/7/2010).



Διάγραμμα 5.34: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T) κατά τη διάρκεια αίθριας καλοκαιρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (26/7/2010).



Διάγραμμα 5.35: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και ασθενούς ανέμου (26/7/2010).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, που κατεγράφησαν (διαγράμματα 5.33-5.35) από την εφαρμογή των μοντέλων προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων (*Tm*) σε συνθήκες αιθριότητας και σχεδόν μέτριων ανέμων, παρατηρήθηκε αυξημένη διαφοροποίηση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών ($|\overline{\Delta T}|_{calculated-measured}$) τιμών η οποία κυμάνθηκε μεταξύ 1,4-19,9°C. Στην προκειμένη περίπτωση, η διαφοροποίηση ($|\overline{\Delta T}|_{calculated-measured}$) θεωρείται άμεσο αποτέλεσμα της επίδρασης της ταχύτητας του ανέμου (*Vw*). Κατά συνέπεια, μικρότερα σφάλματα πρόβλεψης (*MBE, MAE, RMSE*) εμφάνισαν οι σχέσεις των King et al. (2004) και των Chenni et al. (2007), τα οποία σημειώθηκαν 11,8%, 11,8%, 12,7% και 10,1%, 12,3%, 14,8%, αντίστοιχα. Αντιθέτως, ατελείς προβλέψεις προκύπτουν από τα μοντέλα των Ross - Smockler (1986), Risser - Fuentes (1983) και Mondol et al. (2007), με τα σφάλματα προσαρμογής να ξεπερνούν το 35%.



Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος

Πίνακας 5.20: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια καλοκαιρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (4/6/2011).



Διάγραμμα 5.36: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T, *Vw*) κατά τη διάρκεια καλοκαιρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (4/6/2011).



Διάγραμμα 5.37: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta, G_T*) κατά τη διάρκεια καλοκαιρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (4/6/2011).



Διάγραμμα 5.38: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με πολύ ασθενή άνεμο (4/6/2011).

Οι μεταβολές στην ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (*G*_T), αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα των συνθηκών αραιής-παροδικής συννεφιάς μιας ημέρας και επιδρούν σημαντικά στη διακύμανση της θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα (διαγράμματα 5.36-5.38), το μοντέλο των King et al. (2004) προσέγγισε σε μεγαλύτερο βαθμό τις πραγματικές καταγεγραμμένες τιμές της θερμοκρασίας των πλαισίων, καθώς οι δείκτες προσαρμογής (*MBE, MAE, RMSE*) υπολογίστηκαν ίσοι με -0,6%, 7,0% και 8,3%, αντίστοιχα, ενώ η χειρότερη απόδοση προκύπτει για το μοντέλο των Risser - Fuentes (1983) με τα *MBE, MAE, RMSE* να λαμβάνονται ίσα με 25,8%, 25,8% και 27,1%, αντίστοιχα. Τέλος, επαναλαμβάνεται η τάση συνδιακύμανσης των μοντέλων, στα οποία συμπεριλαμβάνεται η ταχύτητα του ανέμου (*Vw*), με πειραματικές μετρήσεις.



• Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος

Πίνακας 5.21: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια καλοκαιρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (23/8/2010).



Διάγραμμα 5.39: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T, *Vw*) κατά τη διάρκεια καλοκαιρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (23/8/2010)..



Διάγραμμα 5.40: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T,) κατά τη διάρκεια καλοκαιρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (23/8/2010).



Διάγραμμα 5.41: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με ασθενή άνεμο (23/8/2010). Ο συνδυασμός συνθηκών αραιών-παροδικών νεφώσεων και ασθενών ανέμων, επηρεάζει αρνητικά την προβλεπτική ικανότητα των εξεταζόμενων μοντέλων, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των γραφικών και στατιστικών ελέγχων. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε ανά διαστήματα αυξημένη απόκλιση μεταξύ θεωρητικών (βέλτιστες προβλέψεις) και πειραματικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*), η οποία σε αρκετές περιπτώσεις ξεπερνούσε του 10°C. Ο στατιστικός έλεγχος προσαρμογής επικυρώνει τις παραπάνω διαπιστεύσεις, καθώς τα σφάλματα (*MBE, MAE, RMSE*) της καλύτερης προσαρμογής στα πρωτογενή δεδομένα εκτιμήθηκαν 8,9%, 9,4% και 12,2%, αντίστοιχα. Παραπλήσια σφάλματα προκύπτουν για τις προβλέψεις των μοντέλων των Ross (1976) - Nordmann et al. (2003), Servant (1985) και Tselepis - Tripanagnostopoulos (2001).

5.6.2 Φθινόπωρο



Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος

Πίνακας 5.22: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας φθινοπωρινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (22/10/2010).



Διάγραμμα 5.42: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta, G_T, Vw*) κατά τη διάρκεια αίθριας φθινοπωρινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (22/10/2010).



Διάγραμμα 5.43: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T,) κατά τη διάρκεια αίθριας φθινοπωρινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (22/10/2010).


Διάγραμμα 5.44: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας με πολύ ασθενή άνεμο (22/10/2011).

Στην προκειμένη περίπτωση, οι συνθήκες άπνοιας κατά τις πρωινές ώρες, έχουν αντίκτυπο στην προβλεπτική ικανότητα των υπό αξιολόγηση μοντέλων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η απόλυτη μέση απόκλιση ($|\overline{\Delta T}|_{calculated-measured}$) μεταξύ των πειραματικών και των θεωρητικών τιμών που υπολογίστηκαν από το μοντέλο Ross(1976) - Nordmann et al.(2003) για τις ώρες 7:20 π.μ. - 10:20π.μ. ήταν 5,3°C, ενώ για το χρονικό διάστημα από 10:30π.μ. - 04:10μ.μ. μειώθηκε στους 1,2°C. Επιπρόσθετα, για τους αντίστοιχους δείκτες ποσοτικοποίησης της απόδοσης του μοντέλου (*MBE, MAE* και *RMSE*) σημειώθηκαν οι τιμές -1,1%, 8,2% και 11%. Ανάλογα αποτελέσματα, καταγράφονται για τα μοντέλα των Servant (1985) και Tselepis - Tripanagnostopoulos (2001).

Αίθρια μέρα, ασθενής άνεμος



Πίνακας 5.23: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας φθινοπωρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (4/9/2011).



Διάγραμμα 5.45: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T, *Vw*) κατά τη διάρκεια αίθριας φθινοπωρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (4/9/2011).



Διάγραμμα 5.46: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T,) κατά τη διάρκεια αίθριας φθινοπωρινής ημέρας με ασθενή άνεμο (4/9/2011).



Διάγραμμα 5.47: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και ασθενούς ανέμου (4/9/2011). Σε συνθήκες αιθριότητας και ασθενών ανέμων, τα υπό αξιολόγηση μοντέλα υπερεκτιμούν τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*), όπως προκύπτει τόσο από τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου (διάγραμμα 5.47), όσο και από τα πρώτιστα διαγνωστικά γραφικά τεστ (διαγράμματα 5.45 και 5.46). Συγκεκριμένα, σημειώνεται ότι τα μοντέλα των King et al. (2004), Ross (1976) - Nordmann et al. (2003), Servant (1985) και Tselepis - Tripanagnostopoulos (2001) προσαρμόζονται επαρκώς στα αρχικά δεδομένα, ενώ αντίθετα σημαντικές αποκλίσεις (>8°C) προκύπτουν από την εφαρμογή των σχέσεων των Risser - Fuentes (1983), Ross - Smockler (1986) και *RMSE* για το μοντέλο των Ross (1976) - Nordmann et al. (2003) προσδιορίστηκαν ίσα με 7,9%, 9,0% και 10,8%, αντίστοιχα, ενώ για το μοντέλο των Risser - Fuentes (1983).



Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος

Πίνακας 5.24: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (3/10/2011).



Διάγραμμα 5.48: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T, *Vw*) κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (3/10/2011).



Διάγραμμα 5.49: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T) κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (3/10/2011).



Διάγραμμα 5.50: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με πολύ ασθενή άνεμο (3/10/2011).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα (διαγράμματα 5.48-5.50), σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με πολύ ασθενή άνεμο, διακρίνεται ότι τα μοντέλα των Ross (1976) - Nordmann et al. (2003), Servant (1985) και Tselepis - Tripanagnostopoulos (2001) εμφανίζουν τη μεγαλύτερη προσαρμογή στα πρωτογενή δεδομένα, ενώ σημαντικές διαφορές παρουσιάζονται στις τιμές που προκύπτουν από τα μοντέλα των Risser - Fuentes (1983) και των Mondol et al. (2007). Ειδικότερα, το μέσο σφάλμα μεροληψίας (*MBE*), το μέσο απόλυτο σφάλμα (*MAE*) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (*RMSE*) για το μοντέλο του Servant (1985) υπολογίστηκαν ίσα με 1,4%, 6,7 % και 8,8%, αντίστοιχα, καθιστώντας το ως το πιο επαρκές εκ των εξεταζόμενων μοντέλων. Από την άλλη, για τη γραμμική σχέση των Risser - Fuentes (1983), τα σφάλματα προσαρμογής *MBE, MAE* και *RMSE* ήταν 33,1%, 33,2% και 34,8%.



Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος

Πίνακας 5.25: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (4/11/2010).



Διάγραμμα 5.51: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta, G_T, Vw*) κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (4/11/2010).



Διάγραμμα 5.52: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T) κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (4/11/2010).



Διάγραμμα 5.53: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με ασθενή άνεμο (4/11/2010).

Κατά τη διάρκεια μια ημέρας με φαινόμενα αραιής συννεφιάς, ασθενούς ανέμου και σχεδόν σταθερής θερμοκρασίας περιβάλλοντος (*Ta*), παρατηρήθηκε ότι η τιμή της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) μεταβάλλεται σχεδόν ανάλογα με τη διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (*G*_T). Η κατάσταση αυτή, σύμφωνα τα γραφήματα συγκριτικής αξιολόγησης και στατιστικού ελέγχου (διαγράμματα 5.51-5.53), επιτρέπει σε αρκετά μοντέλα να παρέχουν ικανές προβλέψεις της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*). Ιδιαίτερα, τα μοντέλα των Ross (1976) - Nordmann et al. (2003) και Servant (1985) εμφάνισαν μεγάλη ακρίβεια στις προβλέψεις τους, με τα μέσα σφάλματα προσαρμογής τους (*MBE, MAE* και *RMSE*) να λαμβάνονται 4,5%, 5,0%, 6,5% και 2,2%, 3,6%, 4,8%, αντίστοιχα.

5.6.3 Χειμώνας



Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος

Πίνακας 5.26: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας χειμερινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (4/12/2010).



Διάγραμμα 5.54: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T, *Vw*) κατά τη διάρκεια αίθριας χειμερινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (4/12/2010).



Διάγραμμα 5.55: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta, G_T*) κατά τη διάρκεια αίθριας χειμερινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (4/12/2010).



Διάγραμμα 5.56: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και πολύ ασθενούς ανέμου (4/12/2010).

Γενικά, κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm) καταγράφεται σημαντικά μειωμένη σε σχέση με τις υπόλοιπες εποχές του χρόνου, ως άμεσο αποτελέσματα των ψυχρότερων κλιματικών συνθηκών. Στην προκειμένη περίπτωση, παρατηρείται ότι οι διακυμάνσεις της ταχύτητας μεταφοράς αερίων μαζών (:ταχύτητα ανέμου, Vw), επηρεάζουν σημαντικά τη θερμοκρασία των πλαισίων (πίνακας 5.26), και δυσχεραίνουν την διαδικασία πρόβλεψη της. Συγκεκριμένα, κανένα από τα νзδ εξεταζόμενα μοντέλα επιτυγχάνει να αποδώσει ρεαλιστικά τις παρατηρούμενες τάσεις (διάγραμμα 5.54 και 5.55), παρά το γεγονός ότι τα σφάλματα προσαρμογής (MBE, MAE, RMSE) μερικών εξ' αυτών, βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων (<10%). Συμπερασματικά, εάν κρίνεται απαραίτητη εκτίμηση της θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm) υπό τις δεδομένες συνθήκες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο των King et al. (2004).

Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος



Πίνακας 5.27: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας χειμερινής ημέρας με ασθενή άνεμο (8/12/2010).



Διάγραμμα 5.57: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta, G_T, Vw*) κατά τη διάρκεια αίθριας χειμερινής ημέρας με ασθενή άνεμο (8/12/2010).



Διάγραμμα 5.58: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T) κατά τη διάρκεια αίθριας χειμερινής ημέρας με ασθενή άνεμο (8/12/2010).



Διάγραμμα 5.59: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και ασθενούς ανέμου (8/12/2010). Ο συνδυασμός συνθηκών αιθριότητας και ασθενών ανέμων κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, δεν αποτελεί ευνοϊκό πεδίο εφαρμογής για τα εξεταζόμενα μοντέλα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των γραφικών και στατιστικών ελέγχων. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε ανά διαστήματα αυξημένη απόκλιση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*), με τα σφάλματα (*MBE, MAE, RMSE*) της καλύτερης προσαρμογής (μοντέλο Servant) στα πρωτογενή δεδομένα υπολογίζονται ίσα 12,3%, 12,3% και 13,6%, αντίστοιχα. Ενώ ταυτόχρονα, ελάχιστα πιο αυξημένα προκύπτουν τα σφάλματα για τις προβλέψεις των μοντέλων των Ross (1976) - Nordmann et al. (2003) και Tselepis - Tripanagnostopoulos (2001).



Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος

Πίνακας 5.28: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (12/1/2011).



Διάγραμμα 5.60: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T, *Vw*) κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (12/1/2011).



Διάγραμμα 5.61: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με πολύ ασθενή άνεμο (12/1/2011). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα (διαγράμματα 5.60-5.61), σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με πολύ ασθενή άνεμο, διακρίνεται ότι τα μοντέλα των Mondol et al. (2007) και Ross - Smockler (1986) δείχνουν μεγαλύτερη προσαρμογή στα πρωτογενή δεδομένα, ενώ παράλληλα τα σφάλματα πρόβλεψης (*MBE, MAE, RMSE*) υπολογίστηκαν ίσα με 4,8%, 12,1%,14,1% και 3,2%,12,2%,13,9%, αντίστοιχα. Από την άλλη, τα μοντέλα των Ross (1976) - Nordmann et al. (2003) και Tselepis - Tripanagnostopoulos (2001), υποεκτιμούν σε μεγάλο βαθμό τις τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) και δε συνίσταται η χρησιμοποίηση τους. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, ο έλεγχος των μοντέλων που περιλαμβάνουν ως ανεξάρτητη μεταβλητή την ταχύτητα ανέμου (*Vw*) δεν κατέστη εφικτός, λόγω βλάβης του ανεμόμετρου.



Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος

Πίνακας 5.29: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (7/12/2010)



Διάγραμμα 5.62: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta, G_T, Vw*) κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (7/12/2010).



Διάγραμμα 5.63: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T) κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (7/12/2010).



Διάγραμμα 5.64: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς και ασθενούς ανέμου (7/12/2010).

Οι συνεχείς μεταβολές στην ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (GT) και οι ανεμισμοί ασθενούς εντάσεως αποτελούν τις χαρακτηριστικές συνθήκες στην περιοχή έδρασης του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος κατά τη διάρκεια του χειμώνα, και συνδέονται ισχυρά με τη διακύμανση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm). Στην δεδομένη περίπτωση, παρατηρείται ότι το σύνολο των εξεταζόμενων μοντέλων αποδίδει ικανοποιητικά τις στιγμιαίες τάσεις της θερμοκρασίας των πλαισίων (Tm), γεγονός που φανερώνει την ισχυρή εξάρτηση της από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (GT). Ωστόσο, η ακρίβεια των προβλέψεων, θεωρείται σχετικά μικρή, όπως προκύπτει και από τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων στα διαγράμματα 5.62 - 5.64. Συγκεκριμένα, στο σύνολο των εξεταζόμενων μοντέλων, η απόλυτη μέση απόκλιση (| <u>Δ</u>T | calculated-measured) μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών κυμαίνονταν εντός του εύρους 3,4-10,5°C. Το μοντέλο του Servant (1985) προσέγγιζε σε μεγαλύτερο βαθμό τις πραγματικές καταγεγραμμένες τιμές της θερμοκρασίας των πλαισίων (Tm), καθώς οι δείκτες προσαρμογής (MBE, MAE, RMSE) υπολογίστηκαν ίσοι με 13,7%, 13,7% και 14,8%, αντίστοιχα, ενώ η χειρότερη απόδοση προκύπτει για το μοντέλο των Risser - Fuentes (1983) με τα MBE, MAE, RMSE να λαμβάνονται ίσα με 42,7%, 42,7% και 44,8%, αντίστοιχα.



Συνθήκες αραιής συννεφιά, σχεδόν μέτριος άνεμος

Πίνακας 5.30: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (5/12/2010).



Διάγραμμα 5.65: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta, G_T, Vw*) κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (5/12/2010).



Διάγραμμα 5.66: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T) κατά τη διάρκεια χειμερινής ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (5/12/2010).



Διάγραμμα 5.67: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς και σχεδόν μέτριου ανέμου (5/12/2010). Σε συνθήκες αραιής συννεφιάς και σχεδόν μέτριων ανέμων, τα υπό αξιολόγηση μοντέλα υπερεκτιμούν τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*), όπως προκύπτει τόσο από τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου (διάγραμμα 5.67), όσο και από τα πρώτιστα διαγνωστικά γραφικά τεστ (διαγράμματα 5.65 και 5.66). Συγκεκριμένα, σημειώνεται ότι μόνο το μοντέλο του Servant (1985) προσαρμόζεται στοιχειωδώς στα αρχικά δεδομένα, καθώς τα ελεγχόμενα σφάλματα προσαρμογής *MBE, MAE* και *RMSE* προέκυψαν ίσα με 16,7%,16,8% και 17,9%, αντίστοιχα, ενώ αντίθετα οι τιμές που υπολογίστηκαν για τα υπόλοιπα μοντέλα σημειώνονται μεγαλύτερες από 20%.

5.6.4 Άνοιξη



Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος

Πίνακας 5.31: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (23/4/2011).



Διάγραμμα 5.68: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T, *Vw*) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (23/4/2011).



Διάγραμμα 5.69: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (23/4/2011).



Διάγραμμα 5.70: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και πολύ ασθενούς ανέμου (23/4/2011).

Σε συνθήκες αιθριότητας και πολύ ασθενών ανέμων, τα μοντέλα των King et al. (2004), Ross (1976) - Nordmann et al. (2003), Servant (1985) και Tselepis -Tripanagnostopoulos (2001) παρήγαγαν ικανοποιητικές προβλέψεις για τις τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm), όπως προκύπτει τόσο από τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου (διάγραμμα 5.70), όσο και από τα πρώτιστα διαγνωστικά γραφικά τεστ (διαγράμματα 5.68 και 5.69). Αντίθετα, οι τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή των σχέσεων των Risser - Fuentes(1983) και των Mondol et al.(2007) αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό από τις πειραματικές μετρήσεις. Τα μοντέλα των Tselepis Tripanagnostopoulos (2001) και Servant (1985) απέδωσαν τις καλύτερες προβλέψεις, ειδικά κατά το διάστημα οπότε σταθεροποιήθηκαν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (GT), η ταχύτητα του ανέμου (Vw) και η θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ta). Τα αντίστοιχα σφάλματα προσαρμογής (MBE, MAE, RMSE) για τα προαναφερθέντα μοντέλα υπολογίστηκαν ίσα με -2,1%, 7,3%, 10,4% και -4,3%, 7,7%, 10,7%. Ενώ, το μοντέλο των Risser - Fuentes (1983) διαφοροποιείται από τα αρχικά δεδομένα, σύμφωνα με τις τιμές (≥30%) των δεικτών MBE, MAE και RMSE.

Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος



Πίνακας 5.32: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με ασθενή άνεμο (7/5/2011).



Διάγραμμα 5.71: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T, *Vw*) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με ασθενή άνεμο (7/5/2011).



Διάγραμμα 5.72: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με ασθενή άνεμο (7/5/2011).



Διάγραμμα 5.73: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και πολύ ασθενούς ανέμου (7/5/2011). Κατά τη διάρκεια αίθριας ημέρας και ενώ έπνεε άνεμος ασθενούς εντάσεως, οι σχέσεις των Ross (1976) - Nordmann et al. (2003) και King et al. (2004), πειραματικές εμφάνισαν ικανοποιητική προσαρμογή στις τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm) (διαγράμματα 5.71 και 5.72), με τα ελεγχόμενα σφάλματα προσαρμογής MBE ,MAE και RMSE να λαμβάνονται ως -1,3%, 9,3%,10,9% και 0,9%, 9,9%, 11,8%,αντίστοιχα. Αντίθετα, παρατηρήθηκε μεγάλη απόκλιση των τιμών, που προσδιορίστηκαν από την εφαρμογή των σχέσεων των Risser - Fuentes(1983), Mondol et al. (2007) και Ross - Smockler(1986), σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι τα σφάλματα προσέγγισης των παραπάνω σχέσεων, βρίσκονται εντός του εύρους 20-30%.



Αίθρια ημέρα, σχεδόν μέτριος άνεμος

Πίνακας 5.33: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με σχεδόν μέτριο άνεμο (9/4/2011).



Διάγραμμα 5.74: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta, G*_T, *Vw*) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με σχεδόν μέτριο (9/4/2011).



Διάγραμμα 5.75: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με σχεδόν μέτριο άνεμο (9/4/2011).



Διάγραμμα 5.76: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αιθριότητας και σχεδόν μέτριο άνεμο (9/4/2011).

Αναλύοντας τα αποτελέσματα που σημειώθηκαν (διαγράμματα 5.74-5.76) κατά την εφαρμογή των σχέσεων προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων (Tm) σε συνθήκες αιθριότητας και σχεδόν μέτριου ανέμου, καταγράφεται διαφοροποίηση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών $(|\overline{\Delta T}|_{calculated-measured})$ τιμών, η οποία κυμάνθηκε μεταξύ 3,5-13,5 °C. Εν προκειμένω, η παρατηρούμενη διαφοροποίηση ($|\overline{\Delta T}|_{calculated-measured}$) οφείλεται στη σχετικά υψηλή, για τα δεδομένα της περιοχής, ταχύτητα του ανέμου (Vw) και στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (Τα). Τα μικρότερα σφάλματα πρόβλεψης (MBE, MAE, RMSE) εμφάνισαν οι σχέσεις των King et al. (2004) και των Servant (1985), για τα οποία προσδιορίστηκαν οι τιμές 17,0%,17,0%, 18,7% και 13,0%, 13,0%, 14,6%, αντίστοιχα. Από την άλλη, οι θεωρητικές τιμές που υπολογίζονται από τα μοντέλα των Ross - Smockler (1986), Risser - Fuentes (1983) και Mondol et al. (2007) κρίνονται ως ελλιπείς, με τα αντίστοιχα σφάλματα έλεγχου προσαρμογής να βρίσκονται σε ποσοστά μεγαλύτερα του 40%.



Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος

Πίνακας 5.34: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (26/5/2010).



Διάγραμμα 5.77: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta, G_T, Vw*) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (26/5/2011).



Διάγραμμα 5.78: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και πολύ ασθενή άνεμο (26/5/2011).



Διάγραμμα 5.79: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με πολύ ασθενή άνεμο (26/5/2011).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα (διαγράμματα 5.77-5.79), σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με πολύ ασθενή άνεμο, διακρίνεται αξιόλογη προσαρμογή των μοντέλων King et al. (2004), Ross (1976) - Nordmann et al. (2003), Servant (1985) και Tselepis - Tripanagnostopoulos (2001) στα πρωτογενή δεδομένα, ενώ αντίθετα παρατηρείται αυξημένη διάσταση μεταξύ των πειραματικών και των θεωρητικών τιμών, που λαμβάνονται από τη εφαρμογή των σχέσεων των Ross - Smockler (1986), Risser - Fuentes (1983) και Mondol et al.(2007). Ειδικότερα, το μέσο σφάλμα μεροληψίας (*MBE*), το μέσο απόλυτο σφάλμα (*MAE*) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (*RMSE*) λαμβάνουν για το μοντέλο των King et al. (2003) τις τιμές 0,7%, 8,3%, 10,0%, για το μοντέλο του Servant (1985) τις τιμές 0,2%, 6,8%,8,5% και για το μοντέλο των Tselepis - Tripanagnostopoulos (2001) τις τιμές 0,5%, 7,7%, 9,7%, αντίστοιχα. Για τα μοντέλα των Ross - Smockler (1986), Risser - Fuentes (1983) και Mondol et al.(2007).



Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος

Πίνακας 5.35: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (16/4/2010).



Διάγραμμα 5.80: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta, G_T, Vw*) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (16/4/2011).



Διάγραμμα 5.81: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και ασθενή άνεμο (16/4/2011).



Διάγραμμα 5.82: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς και ασθενούς ανέμου (16/4/2011).

Κατά τη διάρκεια ημέρας με φαινόμενα αραιής συννεφιάς, ασθενούς ανέμου και σχεδόν σταθερής θερμοκρασίας περιβάλλοντος, οι παρατηρούμενες μεταβολές της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm) προέρχονται κυρίως από τη διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (GT). Όπως αποτυπώνεται στα γραφήματα συγκριτικής αξιολόγησης και στατιστικού ελέγχου (διαγράμματα 5.80-5.82), αρκετά μοντέλα καθίστανται ικανά να αποδίδουν με καλή ακρίβεια τις τιμές της θερμοκρασίας των πλαισίων (Tm). Ιδιαίτερα, τα μοντέλα των King et al. (2004), Ross (1976) - Nordmann et al. (2003), Servant (1985) και Tselepis - Tripanagnostopoulos (2001) διασφαλίζουν εγκυρότητα στις προβλέψεις τους, με τις αντίστοιχες τιμές του μέσου σφάλματος μεροληψίας (MBE) να λαμβάνονται ίσες με 7,0%, 5,4%, -0,5%, 2,9%, του μέσου απόλυτο σφάλματος (MAE) ίσες με 8,0%, 6,7%, 3,6%, 4,1% και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) ίσες με 9,4%, 8,1%, 4,5%, 5,2%. Αντίθετα, στην προκειμένη περίπτωση, οι εκτιμήσεις των σχέσεων των Ross - Smockler (1986), Risser - Fuentes (1983) και Mondol et al. (2007) χαρακτηρίζονται ως αναξιόπιστες.



Συνθήκες αραιής συννεφιάς, σχεδόν μέτριος άνεμος

Πίνακας 5.36: Συνθήκες λειτουργίας της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011).



Διάγραμμα 5.83: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta, G_T, Vw*) κατά τη διάρκεια ανοιξιάτικης ημέρας με αραιή συννεφιά και σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011).



Διάγραμμα 5.84: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές: *Ta*, *G*_T) κατά τη διάρκεια αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011).



Διάγραμμα 5.85: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων, σε συνθήκες αραιής συννεφιάς με σχεδόν μέτριο άνεμο (2/5/2011).

Σε συνθήκες αραιής συννεφιάς και σχεδόν μέτριων ανέμων κατά διάρκεια ανοιξιάτικής ημέρας, τα υπό αξιολόγηση μοντέλα, υπερεκτιμούν τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*), όπως προκύπτει τόσο από τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου (διάγραμμα 5.85), όσο και από τα πρώτιστα διαγνωστικά γραφικά τεστ (διαγράμματα 5.83 και 5.84). Ειδικότερα, παρατηρήθηκε αυξημένη απόκλιση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*), με τα σφάλματα (*MBE, MAE, RMSE*) της καλύτερης προσαρμογής (μοντέλο Servant) στα πρωτογενή δεδομένα να προσδιορίζονται ίσα με 14,7%, 14,7% και 16,3%, αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, οι σχετικές τιμές που προκύπτουν για τα υπόλοιπα μοντέλα καταγράφονται σημαντικά αυξημένες (≥ 20%), με εξαίρεση τη σχέση των King et al. (2004).

5.7 Αποτελέσματα ανάπτυξης "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm) αποτελεί ένα περίπλοκο ζήτημα, δεδομένου ότι εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις χωροχρονικά μεταβαλλόμενες κλιματολογικές παραμέτρους, αλλά και τα ιδιαίτερα τεχνικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Ως εκ τούτου, απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη ενός ικανού μοντέλου πρόβλεψης, θεωρείται ο σχεδιασμός της κατάλληλης μεθοδολογικής προσέγγισης. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη тα αποτελέσματα από την αξιολόγηση διαφόρων μεθόδων προσδιορισμού θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων (Tm) (παράγραφος 5.6), η διαμόρφωση κάθε "νέου" εμπειρικού μοντέλου, εξελίχθηκε βάσει του κριτηρίου βελτίωσης με σεβασμό στην βασική περίπτωση αναφοράς (improvement with respect).

Ειδικότερα, αναλύοντας στατιστικά τα πρωτογενή δεδομένα των ημερών που αντιπροσωπεύουν σε ποσοστό 70% τις κλιματικές συνθήκες στην εξεταζόμενη περιοχή ($K_T \ge 0,5$), αναπτύχθηκαν δύο (2) κατάλληλα εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm). Η επεξεργασία των δεδομένων υλοποιήθηκε αξιοποιώντας τις δυνατότητες του λογισμικού υπολογιστικών φύλλων Microsoft Excel και της ελεύθερης έκδοσης του λογισμικού Analyse-it. Τα αποτελέσματα μοντελοποίησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm) περιλαμβάνουν τον στατιστικό έλεγχο προσαρμογής και τη γραφική ανάλυση των μοντέλων.
Για K_T≥0,5, V_W<4,5m/s

[Savvakis,2013] Στατιστικά παλινδρόμησης Πολλαπλό R 0,94 R ² 0,88 Τυπικό σφάλμα 2,88 Μέγεθος 2236,00 δείψματος 2236,00 ΛΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ 13206 3 44021 5290 0 Υπόλοιπο 2232 18573 8 Σύνολο 2235 15063 7 Γεταγμένη επί την αρχή 0,834 0,371 2,248 0,025 0,106 1,561 0,106 1,561 Gτ 0,020 0,000 69,827 0,000 0,020 0,021 0,020 0,021 Vw -1,593 0,062 -25,787 0,000 -1,714 -1,472 -1,714 -1,472 Τa 1,128 0,013 88,740 0,000 1,103 1,153 1,103 1,153	$T_m = 0,02 *$	$G_T + 1,12$	8 * Tα -	- 1,593	$*V_W +$	0,834			[5.1]
Στατιστικά παλινδρόμησης Πολλαπλό R 0,94 R ² 0,88 Προσαρμοσμένο R ² 0,88 Τυπικό σφάλμα 2,88 Μέγεθος 2236,00 δεάψματος 2236,00 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ Πολικδρόμηση 3 13206 3 13206 3 3 13206 3 10λικδρόμηση 3 13206 3 13206 90 Υπόλοιπο 2232 18573 Σύνολο 2235 15063 7 15063 7 Εταχιμένη επί 0,834 0,371 2,248 0,025 0,106 1,561 0,106 1,561 Gr 0,020 0,000 69,827 0,000 0,020 0,021 0,020 0,021 Γεταγμένη επί 0,062 -25,787 0,000 1,103 1,153 1,103 1,153	[Savvakis,2	013]							
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Στατιστικά παλι	νδρόμησης							
R^2 0,88Προσαρμοσμένο R^2 0,88Τυπικό σφάλμα2,88Μέγεθος δείγματος2236,00ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣΠαλινδρόμηση313206 3440215290Παλινδρόμηση313206 34402152900Υπόλοιπο2232185738Σύνολο22357Ειταγμένη επί την αρχή0,8340,3712,2480,0250,106Τεταγμένη επί την αρχή0,8340,3712,2480,0250,1061,5610,106Για0,0200,00069,8270,0000,0200,0210,0200,021Υψη-1,1280,01388,7400,0001,1031,1531,1031,153	Πολλαπλό R	0,94	-						
Προσαρμοσμένο R ² 0,88 Τυπικό σφάλμα 2,88 Μέγεθος 2236,00 ΔΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ Γισικό σφάμοι SS M5 F Σημαντικότητα Γαλινδρόμηση 3 13206 3 44021 5290 0 Υπόλοιπο 2232 18573 8 Σύνολο 2235 7 Υψηλότερο Κατώτερο Υψηλότερο 95,0% <td>R²</td> <td>0,88</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>	R ²	0,88							
Τυπικό σφάλμα Μέγεθος δείγματος2,88Μέγεθος δείγματος2236,00ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣΠαλινδρόμηση3 $\frac{55}{3}$ MS F Σημαντικότητα FΠαλινδρόμηση3 $\frac{13206}{3}$ 4402152900Υπόλοιπο2232185738Σύνολο2235 $\frac{15063}{7}$ 7Γεταγμένη επί την αρχή0,8340,3712,2480,0250,106Γαταγμένη επί την αρχή0,8340,3712,2480,0250,106Γα0,0200,00069,8270,0000,0200,0210,020Υψη-1,5930,062-25,7870,000-1,714-1,472-1,714-1,472Τα1,1280,01388,7400,0001,1031,1531,1031,153	Προσαρμοσμένο R ²	0,88							
Μέγεθος δείγματος2236,00ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ βαθμοί ελευθερίαςSSMS F Σημαντικότητα F Παλινδρόμηση3 $\frac{13206}{3}$ 4402152900Υπόλοιπο2232185738 $$	Τυπικό σφάλμα	2,88							
ΔΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ βαθμοί ελευθερίας SS MS F Σημαντικότητα F Παλινδρόμηση 3 13206 3 44021 5290 0 Υπόλοιπο 2232 18573 8 - Σύνολο 2235 15063 7 - - - Γιαμινόρια Ο 15063 7 - - - - Σύνολο 2235 Τυπικό σφάλμα t τιμή-P Κατώτερο 95% Yψηλότερο 95% % Yψηλότερο 95,0% Yψηλότερο 95,0% 95,0%	Μέγεθος δείγματος	2236,00	_						
δαθμοί ελευθερίαςSSMSFΣημαντικότητα FΠαλινδρόμηση3 $\frac{13206}{3}$ 4402152900Υπόλοιτο2232185738-Σύνολο2235 $\frac{15063}{7}$ Σύνολο2235 $\frac{15063}{7}$ Συντελεστές $\frac{Τυπικό}{σφάλμα}$ t $τμή-P$ $\frac{Κατώτερο}{95\%}$ $\frac{Υψηλότερο}{95\%}$ $\frac{Κατώτερο}{95,0\%}$ Τεταγμένη επί την αρχή0,8340,3712,2480,0250,1061,5610,1061,561Gτ0,0200,00069,8270,0000,0200,0210,0200,0210,021Vw-1,5930,062-25,7870,000-1,714-1,472-1,714-1,472Ta1,1280,01388,7400,0001,1031,1531,1031,153	ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑκ	ΥΜΑΝΣΗΣ							
Παλινδρόμηση3 $\frac{13206}{3}$ 4402152900Υπόλοιτο2232185738-Σύνολο2235 $\frac{15063}{7}$ Σύνολο2235 $\frac{15063}{7}$ Γυτικό σφάλμαt $τιμή-P$ Κατώτερο 95%Υψηλότερο 95%Κατώτερο 95,0%Γεταγμένη επί την αρχή0,8340,3712,2480,0250,1061,5610,1061,561Γεταγμένη επί την αρχή0,0200,00069,8270,0000,0200,0210,0200,021Γεταγμένη επί την αρχή0,062-25,7870,000-1,714-1,472-1,714-1,472Τα1,1280,01388,7400,0001,1031,1531,1031,153		βαθμοί ελευθερίας	SS	MS	F	Σημαντικότητα F			
Υπόλοιπο2232185738Σύνολο223515063 77Σύνολο223515063 77ΣυντελεστέςΤυπικό σφάλμαtτιμή-PΚατώτερο 95%Υψηλότερο 95%Κατώτερο 95,0%Υψηλότερο 95,0%Τεταγμένη επί την αρχή0,8340,3712,2480,0250,1061,5610,1061,561Gτ0,0200,00069,8270,0000,0200,0210,0200,021Vw-1,5930,062-25,7870,000-1,714-1,472-1,714-1,472Ta1,1280,01388,7400,0001,1031,1531,1031,153	Παλινδρόμηση	3	13206 3	44021	5290	0			
Σύνολο 2235 15063 7 Σύνολο 2235 15063 7 Γυπικό σφάλμα τ τιμή-Ρ Κατώτερο 95% Υψηλότερο 95% Κατώτερο 95,0% Υψηλότερο 95,0% Τεταγμένη επί την αρχή 0,834 0,371 2,248 0,025 0,106 1,561 0,106 1,561 Gτ 0,020 0,000 69,827 0,000 0,020 0,021 0,020 0,021 Vw -1,593 0,062 -25,787 0,000 -1,714 -1,472 -1,714 -1,472 Ta 1,128 0,013 88,740 0,000 1,103 1,153 1,103 1,153	Υπόλοιπο	2232	18573	8					
Συντελεστές Τυπικό σφάλμα τμή-P Κατώτερο 95% Υψηλότερο 95% Κατώτερο 95,0% Υψηλότερο 95,0% Τεταγμένη επί την αρχή 0,834 0,371 2,248 0,025 0,106 1,561 0,106 1,561 Gτ 0,020 0,000 69,827 0,000 0,020 0,021 0,020 0,021 Vw -1,593 0,062 -25,787 0,000 -1,714 -1,472 -1,714 -1,472 Ta 1,128 0,013 88,740 0,000 1,103 1,153 1,103 1,153	Σύνολο	2235	15063 7				_		
Συντελεστές Τυπικό σφάλμα τιμή-P Κατώτερο 95% Υψηλότερο 95% Υψηλότερο 95,0% Τεταγμένη επί την αρχή 0,834 0,371 2,248 0,025 0,106 1,561 0,106 1,561 Gτ 0,020 0,000 69,827 0,000 0,020 0,021 0,020 0,021 Vw -1,593 0,062 -25,787 0,000 -1,714 -1,472 -1,714 -1,472 Ta 1,128 0,013 88,740 0,000 1,103 1,153 1,103 1,153									
Τεταγμένη επί την αρχή0,8340,3712,2480,0250,1061,5610,1061,561Gτ0,0200,00069,8270,0000,0200,0210,0200,021Vw-1,5930,062-25,7870,000-1,714-1,472-1,714-1,472Ta1,1280,01388,7400,0001,1031,1531,1031,153		Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-Ρ	Κατώτερο 95%	Υψηλότερο 95%	Κατώτερο 95,0%	Υψηλότερο 95,0%
Gτ 0,020 0,000 69,827 0,000 0,020 0,021 0,020 0,021 Vw -1,593 0,062 -25,787 0,000 -1,714 -1,472 -1,714 -1,472 Ta 1,128 0,013 88,740 0,000 1,103 1,153 1,103 1,153	Τεταγμένη επί την αρχή	0,834	0,371	2,248	0,025	0,106	1,561	0,106	1,561
Vw -1,593 0,062 -25,787 0,000 -1,714 -1,472 -1,714 -1,472 Ta 1,128 0,013 88,740 0,000 1,103 1,153 1,103 1,153	Gτ	0,020	0,000	69,827	0,000	0,020	0,021	0,020	0,021
Ta 1,128 0,013 88,740 0,000 1,103 1,153 1,103 1,153	Vw	-1,593	0,062	-25,787	0,000	-1,714	-1,472	-1,714	-1,472
	Та	1,128	0,013	88,740	0,000	1,103	1,153	1,103	1,153

Πίνακας 5.37: Στατιστικός έλεγχος προσαρμογής του γραμμικού μοντέλου πολλαπλής παλινδρόμησης για τις συνθήκες $K_T \ge 0.5$ και $V_W < 4.5$ m/s.

Στον πίνακα 5.31 συνοψίζονται τα στοιχεία στατιστικού ελέγχου για τη σχέση που προέκυψε μέσω πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης πρωτογενών δεδομένων υπό τους κατάλληλους περιορισμούς στο δείκτη αιθριότητας $(K_T \ge 0,5)$ και στη ταχύτητα ανέμου $(V_W < 4,5 \text{ m/s})$, θεωρώντας ως ανεξάρτητες μεταβλητές την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_T), τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ta) και την ταχύτητα ανέμου (Vw). Ειδικότερα, τα στατιστικά της παλινδρόμησης περιγραφούν την "καλή" προσαρμογή του μοντέλου πρόβλεψης, καθώς η παρατηρούμενη τιμή του συντελεστή συσχέτισης είναι ικανοποιητικά μεγάλη (R=0,94). Επιπλέον το ποσοστό της ερμηνευτικής ικανότητας του μοντέλου είναι 88,0% (R²=0,88), δηλαδή μόνο το 12,0% της μεταβολής της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων δεν προέρχεται από τις διακυμάνσεις των ανεξάρτητών μεταβλητών, ενώ η τιμή που λαμβάνει το προσαρμοσμένο συντελεστή προσδιορισμού (R²adj) παραμένει αμετάβλητη και δείχνει ότι το μοντέλο μπορεί να επεκταθεί στο σύνολο του πληθυσμού. Η ανάλυση διακύμανσης, καθορίζει ως σημαντικό το μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (σχέση 5.1) και επικυρώνει την εξαρτημένη σχέση μεταξύ των μεταβλητών του προβλήματος, εφόσον ο δείκτης

σημαντικότητας *F* είναι μικρότερος από την τιμή 0,001. Επιχειρώντας την ερμηνεία του μοντέλου καταλήγουμε στις εξής παρατηρήσεις:

- Οι συντελεστές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Ta) και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (GT) εμφανίζουν θετικό πρόσημο, οπότε όσο αυξάνουν οι τιμές των μεταβλητών τόσο μεγαλύτερη σημειώνεται η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Tm).
- Αντίθετα, ο συντελεστής της ταχύτητας ανέμου (*Vw*) παρουσιάζεται αρνητικός, δηλαδή η αύξηση στην τιμή της μεταβλητής επιφέρει μείωση στη θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Τα t-tests για κάθε συντελεστή των επιλεγέντων ανεξάρτητων μεταβλητών έδωσαν p<0,001,επομένως όλες οι μεταβλητές κρίνονται ως σημαντικές.
- Βάσει των μεγεθών t, οι ανεξάρτητες μεταβλητές κατατάσσονται κατά αύξουσα σειρά σημαντικότητας ως εξής: θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ta), προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_T) και ταχύτητα ανέμου (Vw)



Διάγραμμα 5.86: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) υπό τους περιορισμούς *K*₇≥0,5 και *V*_W<4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it.



Διάγραμμα 5.87: Γραφική ανάλυση υπολοίπων για το "νέο" εμπειρικού μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) υπό τους περιορισμούς *K*_T≥0,5 και V_W<4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it.

Για K_T≥0,5 και V_W>4,5m/s

$T_m = 0,01$ [Savvakis	1 * <i>G_T</i> + 0,9' ,2013]	73 * Tα –	0,264 *	$V_W + 2$	2,604			[5.2]
Στατιστικά παλ	ινδρόμησης							
Πολλαπλό R	0,95							
R ²	0,89							
Προσαρμοσμένο R ²	0,89							
Τυπικό σφάλμα	1,76							
Μέγεθος δείγματος	1512,00							
ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ								
	βαθμοί ελευθερίας	SS	MS	F	Σημαντικότητα F			
Παλινδρόμηση	3	39559	13186	4236	0			
Υπόλοιπο	1508	4694	3					
Σύνολο	1511	44254						
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-Ρ	Κατώτερο 95%	Υψηλότερο 95%	Κατώτερο 95,0%	Υψηλότερο 95,0%
Τεταγμένη επί την αρχή	2,604	0,361	7,214	0,000	1,896	3,312	1,896	3,312
Gτ	0,011	0,000	52,233	0,000	0,010	0,011	0,010	0,011
Vw	-0,264	0,032	-8,260	0,000	-0,327	-0,202	-0,327	-0,202
Та	0,973	0,012	83,696	0,000	0,950	0,995	0,950	0,995
=/								<i>(</i>)

Πίνακας 5.38: Στατιστικός έλεγχος προσαρμογής του γραμμικού μοντέλου πολλαπλής παλινδρόμησης για τις συνθήκες *K*_T≥0,5 και *V*_W>4,5m/s.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αξιολόγησης εμπειρικών μοντέλων άμεσου προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) (παράγραφος 5.6), οι υψηλές ταχύτητες ανέμου επηρεάζουν αρνητικά την προβλεπτική ικανότητα των μοντέλων αυτών και ως εκ τούτου, θεωρήθηκε σκόπιμο να δημιουργηθεί μια "νέα" σχέση εκτίμησης υπό τις δεδομένες συνθήκες ($K_T \ge 0.5$, $V_W < 4.5 m/s$). Ειδικότερα, μέσω πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης των αντίστοιχών πρωτογενών δεδομένων και λαμβάνοντας ως ανεξάρτητες μεταβλητές την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (*G_T*), τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (*Ta*) και την ταχύτητα ανέμου (*Vw*), προκύπτει κατάλληλο μοντέλο [5.2], τα στατιστικά στοιχεία του οποίου, συνοψίζονται στον πίνακα 5.32.

Συγκεκριμένα, τα στατιστικά της παλινδρόμησης καθιστούν ως "καλή" την προσαρμογή του μοντέλου, καθώς ο συντελεστή συσχέτισης λαμβάνει τιμή ικανοποιητικά υψηλή (*R*=0,95). Επιπρόσθετα, διακρίνεται ισχυρή συσχέτιση μεταξύ εξαρτημένης και όλων των ανεξάρτητων μεταβλητών (*R*²=0,89), ενώ η προσαρμοσμένη τιμή του συντελεστή προσδιορισμού (*R*²_{adj}=0,89), δείχνει ότι το μοντέλο μπορεί να επεκταθεί στο σύνολο του πληθυσμού. Ακόμη το "νέο" γραμμικό μοντέλο (σχέση 5.2), σύμφωνα με τα αποτελέσματα από την ανάλυση

διακύμανσης, συνεισφέρει σημαντικά στην πρόβλεψη της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (εξαρτημένη μεταβλητή), με τον δείκτη σημαντικότητας *F* να υπολογίζεται μικρότερος από την τιμή 0,001·δηλαδή απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση και αποδεικνύεται ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των μεταβλητών (εξαρτημένης - ανεξάρτητων) του προβλήματος. Επιχειρώντας την ερμήνευση του παλινδρομικού μοντέλου καταλήγουμε στις εξής παρατηρήσεις:

- Οι συντελεστές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (*Ta*) και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (*G_T*) εμφανίζουν θετικό πρόσημο, δηλαδή η αύξηση στις τιμές των προαναφερθέντων μεταβλητών επιφέρει υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.
- Αντίθετα, ο συντελεστής της ταχύτητας ανέμου (Vw) παρουσιάζει αρνητικό πρόσημο, οπότε η αύξηση στην τιμή της συγκεκριμένης μεταβλητής συνεπάγεται μείωση στη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Οι ανεξάρτητες μεταβλητές συμβάλλουν σημαντικά στην ερμηνεία της ζητούμενης μεταβλητής (*T_m*), σύμφωνα με τις τιμές των αντίστοιχών συντελεστών (p<0,001) κατά τους ελέγχους των t-μεγεθών (t-tests).
- Η κατάταξη των ανεξάρτητων μεταβλητών (αύξουσα σειρά σημαντικότητας) βάσει των μέτρων "συμβολής" τους στο μοντέλο είναι : θερμοκρασία περιβάλλοντος (*Ta*), προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (*G_T*) και ταχύτητα ανέμου (*Vw*).



Διάγραμμα 5.88: Γραφική απεικόνιση της προσαρμογής του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) υπό τους περιορισμούς *K*_T≥0,5 και *V*_W>4,5m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it.



Διάγραμμα 5.87: Γραφική ανάλυση υπολοίπων για το "νέο" εμπειρικού μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*) υπό τους περιορισμούς $K_T \ge 0.5$ και $V_W > 4.5$ m/s, μέσω του λογισμικού Analyse-it.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°: ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός πρότυπου φωτοβολταϊκού συστήματος, ονομαστικής ισχύος 2,18 kWp, το οποίο εγκαταστάθηκε στους χώρους του Πολυτεχνείου Κρήτης τον Μάιο του 2010. Ειδικότερα, οι καταγεγραμμένες πειραματικές μετρήσεις, της περιόδου Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012, από το ελέγχου και εποπτείας της εξεταζόμενης σύστημα φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, αναλύθηκαν επισταμένως σε μηνιαία και ετήσια βάση, ώστε να προκύψουν κατάλληλα συμπεράσματα που σκιαγραφούν με σαφήνεια την ενεργειακή απόκριση της, υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διερεύνηση των κρίσιμων, για την τελική απόδοση του συστήματος, παραμέτρων, ενώ παράλληλα εξετάστηκε η εγκυρότητα των προβλέψεων που λαμβάνονται από τη θεωρητική προσέγγιση του φωτοβολταϊκού συστήματος μέσω των ειδικών λογισμικών προσομοίωσης PVGIS, SMA Sunny Design και RETScreen. Τέλος, στο πλαίσιο των ερευνητικών στόχων της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, ανεδείχθη κατάλληλη μεθοδολογία για την αξιολόγηση της προβλεπτικής ικανότητας δέκα (10) θεωρητικών μοντέλων άμεσου προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και την ανάπτυξη ενός νέου εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της.

6.2 Αξιολόγηση των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής μελέτης

Η καταλληλότητα μιας τοποθεσίας για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος/πάρκου εξαρτάται άμεσα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (ηλιακό δυναμικό, θερμοκρασία περιβάλλοντος, επίπεδα ρύπανσης, κλπ.) της ευρύτερης περιοχής. Ειδικότερα, οι απαιτήσεις για ικανή ενεργειακή απόδοση κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής μιας τέτοιας εγκατάστασης (~30 έτη), ορίζουν την ανάγκη διερεύνησης του βαθμού σταθερότητας των κλιματολογικών παραμέτρων. Σε αυτό το γενικότερο πλαίσιο, κρίθηκε απαραίτητη η συγκριτική αξιολόγηση (πινάκας 6.1) των πειραματικών αποτελεσμάτων της περιόδου επιτήρησης του συστήματος με τις αντίστοιχες τιμές μακροχρόνιας παρακολούθησης (χρονική περίοδος: 1958 - 2001) που δημοσιεύονται σε επίσημο τεχνικό οδηγό, προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των συμπερασμάτων της παρούσας μελέτης.

2014

Μήνας	1 ^η περίοδος παρακολούθησης			2 ^η περίοδος παρακολούθησης			ΤΟΤΕΕ (χρονική περίοδος: 1958-2001)		
Μήνας	\overline{H}	\overline{K}_T	Τα	\overline{H}	\overline{K}_T	Τα	\overline{H}	\overline{K}_T	Τα
	kWh/m²/d	-	°C	kWh/m²/d	-	°C	kWh/m²/d	-	°C
Ιούνιος	7,35	0,64	25,9	7,20	0,62	25,1	7,33	0,63	25,8
Ιούλιος	7,56	0,67	28,2	7,53	0,67	28,1	7,26	0,64	27,6
Αύγουστος	6,72	0,65	29,3	6,72	0,65	27,1	6,61	0,64	27,3
Σεπτέμβριος	5,37	0,61	26,1	5,32	0,61	25,9	5,37	0,61	24,6
Οκτώβριος	3,26	0,47	22,1	3,37	0,49	19,3	3,58	0,52	20,7
Νοέμβριος	2,97	0,57	20,4	2,01	0,39	14,4	2,60	0,50	17,5
Δεκέμβριος	2,09	0,46	16,8	2,18	0,48	14,6	1,90	0,42	14,5
Ιανουάριος	2,21	0,44	13,9	1,94	0,39	11,0	2,21	0,40	12,9
Φεβρουάριος	2,53	0,40	13,5	2,64	0,41	11,8	2,58	0,45	13,2
Μάρτιος	3,62	0,44	14,4	4,52	0,55	15,1	4,00	0,49	14,6
Απρίλιος	5,06	0,51	15,9	6,16	0,62	19,0	5,57	0,56	17,7
Μάιος	6,39	0,58	20,1	7,10	0,64	21,7	6,84	0,62	21,5
Ετήσιος μέσος όρος	4,59	0,54	20,5	4,72	0,54	19,4	4,65	0,54	19,8

Πινάκας 6.1: Συγκριτικός πίνακας διακύμανσης των παραμέτρων: μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (*H*), μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος (*Ta*,m) κατά τις ώρες ηλιοφάνειας, μέσος μηνιαίος δείκτης αιθριότητας (*R*).

Σύμφωνα με τα στοιχεία μακροχρόνιας παρακολούθησης από το μετεωρολογικό σταθμό της περιοχής των Χανίων (Σούδα), ως πιο ψυχροί μήνες χαρακτηρίζονται ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος, με μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας (κατά τις ώρες ηλιοφάνειας) 12,9°C και 13,2°C, αντίστοιχα. Αντίθετα, ως πιο θερμοί μήνες θεωρούνται ο Ιούλιος και ο Αύγουστος, με μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας (κατά τις ώρες ηλιοφάνειας) 27,6°C και 27,3°C, αντίστοιχα. Ενώ, σε ότι αφορά τις παραμέτρους, μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (\overline{H}) και μέσος μηνιαίος δείκτης αιθριότητας ($\overline{K_T}$), οι οποίες καθορίζουν το ηλιακό δυναμικό της εξεταζόμενης περιοχής, οι αναφερόμενες τιμές συνιστούν ένα ιδιαίτερα ευνοϊκό πεδίο ηλιακών εφαρμογών. Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα, με τα αντίστοιχα δεδομένα που προέκυψαν από την επίβλεψη του φωτοβολταϊκού συστήματος, καταλήγουμε στις εξής παρατηρήσεις:

- Γενικά, καταγράφεται σχετική σύγκλιση των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο και του δείκτη αιθριότητας, με τις όποιες διαφοροποιήσεις να είναι κυρίως αποτέλεσμα της εποχικής μεταβλητότητας.
- Επιπλέον, οι τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για τους θερμότερους μήνες της περιόδου παρακολούθησης, σημειώθηκαν ελαφρώς αυξημένες (0,5-2°C) σε σχέση τις μακροχρόνιες παρατηρήσεις, γεγονός που προκύπτει πιθανότατα οφείλεται στις συνθήκες κλιματικής αλλαγής, οι οποίες επικρατούν τα τελευταία χρόνια.

 Τέλος, ο βαθμός σταθερότητας των κυριότερων κλιματολογικών παραμέτρων (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος, δείκτης αιθριότητας) διαπιστώνεται υψηλότερος κατά τους μήνες Μάιος-Σεπτέμβριος, οπότε τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη μέση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

6.3 Αξιολόγηση των λειτουργικών παραμέτρων της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης, το εξεταζόμενο φωτοβολταϊκό σύστημα παρήγαγε συνολικά 3.540,97 kWh ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος (E_{DC,v}), και τροφοδότησε με 3.360,25 kWh ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΑC,ν) το ηλεκτρικό δίκτυο του Πολυτεχνείου Κρήτης κατά την πρώτη φάση λειτουργίας του (περίοδος Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2011), ενώ, κατά την περίοδο Ιουνίου 2011 - Μαΐου 2012 η παράγωγη ενέργειας συνεχούς (E_{DC,v}) και εναλλασσόμενου (E_{AC,v}) ρεύματος καταγράφηκαν μειωμένες κατά 1,6% (3.484,35 kWh) και 1,7% (3.305,27 kWh), αντίστοιχα. Ειδικότερα, η μηνιαία συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος (EDCm) κυμάνθηκε μεταξύ 149,94 kWh τον Δεκέμβριο του 2010 και 464,73 kWh τον Ιούλιο 2010 (περίοδος Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2011), και από 124,32 kWh το Νοέμβριο 2011 έως 451,92 kWh τον Ιούλιο του 2011 (περίοδος Ιουνίου 2011 - Μαΐου 2012). Αντίστοιχα, η ολική μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος παρουσίαζε την ελάχιστη τιμή (E_{AC,m,min}) της, 141,48 kWh, τον Δεκέμβριο του 2010 και την μέγιστη τιμή (E_{AC.m.max}) της, 442,03 kWh, τον Ιούλιο 2010 (περίοδος Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2011), ενώ κατά την δεύτερη περίοδο παρατήρησης του συστήματος (περίοδος Ιουνίου 2011 - Μαΐου 2012) η ελάχιστη τιμή (E_{AC.m.min}) της σημειώθηκε 116,98 kWh το Νοέμβριο 2011 και η μέγιστη (E_{AC,m,max}) ήταν 429,86 kWh τον Ιούλιο του 2011.

Προκειμένου να επιτευχθούν τα παραπάνω αποτελέσματα, τα οποία συνιστούν υψηλή ενεργειακή απόδοση, σημαντικό ρόλο διαδραμάτισαν οι συνθήκες λειτουργίας του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος. Συγκεκριμένα, στην περιοχή μελέτης παρουσιάζεται υψηλή συχνότητα αιθριότητας, καθώς σημειώθηκαν αίθριες συνθήκες ($K_T \ge 0.65$) για 295 d από τις 730 d της εξεταζόμενης περιόδου, τιμή που αντιστοιχεί σε ποσοστό 40,4% επί του συνόλου. Ακόμη, παρατηρήθηκαν συνθήκες αραιής συννεφιάς ($0.5 \le K_T < 0.65$) για 205 d, νεφελώδης συνθήκες ($0.35 \le K_T < 0.5$) για 101 d, βροχερές συνθήκες ($K_T < 0.35$) για 129 d, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά επί του συνολικού αριθμού των ημερών παρακολούθησης ήταν 28,1%, 13,8% και 17,7%.

Η ετήσια μέση ημερήσια απόδοση αναφοράς (*Y*_{R,y}) αυξήθηκε από 4,80 h/d για το πρώτο έτος της περιόδου παρακολούθησης σε 4,89 h/d για το δεύτερο έτος, δηλαδή η παρατηρούμενη ποσοστιαία αύξηση ήταν 1,8 %. Αντίθετα, η ετήσια

μέση ημερήσια τελική απόδοση (Y_{Fy}) μειώθηκε από 4,23 h/d το πρώτο έτος της περιόδου παρακολούθησης σε 4,16 h/d το δεύτερο έτος (μείωση 2,1%). Ανάλογη τάση παρουσιάστηκε, στην απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (Y_{A,v}), η οποία μειώθηκε από την τιμή 4,46 h/d του πρώτου έτους της περιόδου παρακολούθησης στην τιμή 4,38 h/d το δεύτερο έτος (μείωση σε 1,8%). Ο ετήσιος μέσος δείκτης απόδοσης (PR,y) μειώθηκε από την τιμή 86,7% που έλαβε για το πρώτο έτος της περιόδου παρακολούθησης σε 83,5% το δεύτερο έτος, με την παρατηρούμενη μεταβολή να είναι της τάξης του 3,2%. Η της παρατηρούμενη μείωση μεταξύ των δύο (2) ετών περιόδου παρακολούθησης συνδέεται άμεσα με το φαινόμενο υποβάθμισης Staebler-Wronski, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 2.1.2.3.

Οι απώλειες του συστήματος ($L_{S,y}$) παρέμειναν σχεδόν σταθερές το πρώτο και το δεύτερο έτος (0,23 h/d και 0,22 h/d, αντίστοιχα). Η παρατηρούμενη μείωση ποσοστό 4,3% είναι εντός των ορίων του σφάλματος των υπολογισμών. Το γεγονός αυτό σχετίζεται άμεσα με την αποδοτικότητα του αντιστροφέα ($n_{inv,y}$), τα οποία μεταβάλλονται ελάχιστα μεταξύ των δύο (2) ετών παρακολούθησης.

Η ετήσια μέση αποδοτικότητα συστοιχίας (*n*_{pv,y}) διαπιστώθηκε μειωμένη κατά 0,3% το δεύτερο έτος της περιόδου παρακολούθησης σε σχέση με τη τιμή 7,8% του πρώτου έτους. Παρόμοια ήταν τα αποτελέσματα για την ετήσια μέση αποδοτικότητα του συστήματος (*n*_{syst,y}), καθώς η ποσοστιαία τιμή 7,4% του πρώτου έτους μειώθηκε σε 7,1% το δεύτερο έτος παρακολούθησης.

Η μέγιστη μηνιαία τιμή 95,4% του λόγου απόδοσης (*PR*,*m*,*max*) παρατηρήθηκε τον Ιούνιο του 2010, ο οποίος ήταν ο πρώτος μήνας πλήρους λειτουργίας του συστήματος. Το γεγονός αυτό θεωρείται αναμενόμενο και επαληθεύει την μέγιστη μηνιαία τιμή αποδοτικότητας της συστοιχίας (*n*_{pv},*m*,*max*=8,6 %) κατά την ίδια χρονική στιγμή. Αντίθετα, η ελάχιστη τιμή (*PR*,*m*,*m*) κατά το πρώτο έτος παρακολούθησης, σημειώθηκε τον Δεκέμβριο 2010.

Γενικά, κατά του θερινούς μήνες της περιόδου επιτήρησης, οπότε το εύρος διακύμανσης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (*Tm*,_m) ήταν 34,6-39,3 °C και η τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (\overline{H}_{T}) κυμαίνονταν από 6,68 kWh/m²/d έως 7,12 kWh/m²/d, παρατηρήθηκαν υψηλότερες τιμές για τον λόγο απόδοσης (93,0% και 89,6%) και την αποδοτικότητα της συστοιχίας (8,3% και 8,0%), ενώ αντίθετα κατά τους χειμερινούς μήνες, για τις συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος 11,0-16,8 °C και προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (\overline{H}_T) μεταξύ 2,33-3,01 kWh/m²/d, σημειώθηκαν σημαντικά μειωμένες (82,1% και 79,0% / 7,3% και 7,0%). Η καταγραφείσα τάση, εμφανίζεται αντίστροφη σε σχέση με τις παρατηρήσεις που αναφέρονται στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία από εγκαταστάσεις στις οποίες αξιοποιούνται φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού ή μονοκρυσταλλικού πυριτίου (όπου παρουσιάζεται υψηλός λόγος απόδοσης κατά τους χειμερινούς μήνες και χαμηλότερος κατά τους θερινούς), και σύμφωνη με τα συμπεράσματα μελετών που αφορούν την τεχνολογία άμορφου-μικροάμορφου πυριτίου.

	Y_R	Y_T	YA	Y_F	LCT	<i>L</i> _{СМ}	Lc	Ls	PR	Тт
				h	/d				%	°C
Καλοκαίρι 2010	6,87	6,67	6,72	6,39	0,20	-0,05	0,15	0,33	93,0	37,3
Φθινόπωρο 2010	4,49	4,42	4,13	3,92	0,07	0,29	0,36	0,21	86,7	30,5
Χειμώνας 2010-2011	2,77	2,77	2,41	2,28	0,00	0,36	0,36	0,14	82,1	20,5
Άνοιξη 2011	5,07	5,05	4,58	4,34	0,02	0,47	0,49	0,23	85,1	24,3
Καλοκαίρι 2011	6,82	6,63	6,43	6,12	0,19	0,2	0,39	0,32	89,6	36,8
Φθινόπωρο 2011	4,00	3,95	3,55	3,36	0,05	0,4	0,45	0,19	82,5	27,2
Χειμώνας 2011-2012	2,72	2,72	2,28	2,15	0,00	0,44	0,44	0,13	79,0	18,1
Άνοιξη 2012	6,02	5,97	5,25	4,99	0,05	0,71	0,76	0,26	82,8	27,7

Πίνακας 6.2: Εποχική διακύμανση τιμών για τις παραμέτρους: απόδοση αναφοράς (Y_R), διορθωμένη απόδοση αναφοράς (Y_T), απόδοση συστοιχίας (Y_A), τελική απόδοση (Y_F), θερμικές απώλειες (L_{CT}), απώλειες διαφοροποίησης συστοιχίας (L_{CM}), απώλειες σύλληψης συστοιχίας (L_C), απώλειες συστήματος (L_S), λόγος απόδοσης (*PR*), Θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012.

Επιπλέον, σύμφωνα με τα αποτελέσματα, οι απώλειες σύλληψης συστοιχίας (L_c) προκύπτουν αυξημένες κατά την περίοδο της άνοιξης (0,49 h/d και 0,76 h/d) και μειωμένες κατά την περίοδο του καλοκαιριού (0,15 h/d και 0,39 h/d), ενώ παράλληλα, η ετήσια μέση ημερήσια τιμή $(L_{c,y}=0,34$ h/d) για το πρώτο έτος της περιόδου παρακολούθησης αυξήθηκε σε 0,51 h/d το δεύτερο έτος. Η παρατηρηθείσα μεταβολή, οφείλεται κυρίως στην ανάλογη αυξητική τάση των απωλειών διαφοροποίησης συστοιχίας (L_{CM}) ως πιθανό αποτέλεσμα του ελλιπούς καθαρισμού των φωτοβολταϊκών πλαισίων και των διαφοροποιήσεων στη σύνθεση της προσπίπτουσας της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις μεταβατικές εποχές (φθινόπωρο, άνοιξη). Από την άλλη, οι απώλειες συστήματος (L_s) εμφανίστηκαν αυξημένες κατά την θερινή περίοδο (0,33 h/d και 0,32 h/d) και μειωμένες κατά την χειμερινή περίοδο (0,14 h/d και 0,13 h/d), γεγονός αναμενόμενο καθώς ο αντιστροφέας τάσης λειτουργεί με ελάχιστες απώλειες σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Παράμετρος	Μονάδες	1° έτος παρακολούθησης, περίοδος Ιουνίου- Αυγούστου 2010	2° έτος παρακολούθησης, περίοδος Ιουνίου- Αυγούστου 2011	Κατασκευαστής
Αποδοτικότητα συστοιχίας,(n _{pv})	%/°C	-0,029	-0,028	-
DC ourront	mA/°C	-	-	-
Do current	%/°C	-	29 -0,028 - - 2,5 -119,7 33 -0.32 -(+0,07
DC voltage	mV/°C	-122,5	-119,7	-
DC Voltage	%/°C	-0,33	-0,32	-0,30
DC nowor	W/°C	-6,27	-5,74	-
DC homei	%/°C	-0,30	-0,29	-0,24

Πίνακας 6.3: Επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Σε περιοχές όπως η Κρήτη, με υψηλό ηλιακό δυναμικό και θερμό κλίμα, η ενεργειακή συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στα πλαίσια διερεύνησης του μηχανισμού και του βαθμού επίδρασης της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων (*Tm*) στην αποδοτικότητα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (*n_{pv}*), ειδικά κατά τους θερινούς μήνες λειτουργίας, εξετάσθηκε ένας σημαντικός αριθμός δεδομένων που αφορούσαν σ τις περιόδους Ιουνίου - Αυγούστου 2010 και Ιουνίου - Αυγούστου 2011. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν τη γραμμική μείωση της ισχύος (αποδοτικότητας, τάσης) με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ διαπιστώθηκε διαφοροποίηση σε σχέση με τις τιμές των θερμοκρασίας συντελεστών που ορίζονταν από τον κατασκευαστή (πίνακας 6.3) και μικρές αποκλίσεις μεταξύ των δύο ετών παρακολούθησης της εγκατάστασης.

Τοποθεσία	Τύπος πλαισίων	Περίοδος μετρήσεων	E _{AC}	Y_F	n_{pv}	n _{syst}	n _{inv}	PR	Βιβλιογραφική αναφορά
			kWh/kWp	h/d	%	%	%	%	
Σητεία, Ελλάδα	PC-Si	1 έτος (2007)	1.336,4	2,0-5,1	-	-	-	67,4	Kymakis et al., 2009
Malaga, Ισπανία	-	1 έτος (1997)	1.361,0	3,7	8,8-10,3	6,1-8,0	85,5-87,8	64,5	Cardona και Lopez,1999
Jaen, Ισπανία	-	4 έτη (2000- 2003)	892,1	2,4	8,9	7,8	88,1	62,7	Drif et al., 2007
Calabria, Ιταλία	PC-Si	Noέ.2001 - Ιαν.2005	1.230,0	3,4	7,6	-	84,8	-	Cucumo et al., 2006
Salento, Ιταλία	MC-Si	Μάρ-Οκτ. 2012	-	3,2-6,2	-	5,0-7,0	-	80,0	Congedo et al, 2013
Cairo, Αίγυπτος	a-Si	1 έτος (2010)	-	4,35	4,2	4,0	94,5	77,3	Elhodeiby et al.,2011
Mugla, Τουρκία	PC-Si	1 έτος (2008)	1.412,8	3,9	-	7,3	-	72,0	Demicran και Eke,2013
Ballymena, Β.Ιρλανδία	MC-Si	Απρ. 2001 - Δεκ. 2003	616,9	1,7	7,5-10,0	6,0-9,0	87,0	60,0-62,0	Mondol et al., 2006
Dublin, Ιρλανδία	MC-Si	1 έτος (Νοέ.2008 - Οκτ.2009)	885,1	2,4	14,9	12,6	89,2	81,5	Ayompe et al., 2011
Γαλλία	-	1 έτος (2010)	1.163,0	-	-	-	-	76,0	Leloux et al., 2012a
Βέλγιο	-	1 έτος (2010)	892,0	-	-	-	-	78,0	Leloux et al., 2012a
Γερμανία	PC-Si	1 έτος (1994)	680,0	-	-	-	-	66,5	Decker και Jahn,1997
Γερμανία	-	10 έτη (1991-2002)	730,0	-	-	-	-	67,0	Jahn και Nasse,2004
Warsaw, Πολωνία	a-Si	1 έτος (2001)	830,0	-	-	4,0-5,0	-	60,0-80,0	Pietruszko και Gradzki,2003
Mae Hong Son, Ταϊλάνδη	PC-Si	ΜαρΟκτ. 2004	-	2,9-4,0	-	9,0- 12,0	-	70,0-90,0	Chokmaviroj et al.,2005
Khatar- Kalan, Ινδία	PC-Si	1 έτος (2011)	812,8	2,2	-	8,3	-	74,0	Sharma και Chandel,2013
Singapore, Μαλαισία	PC-Si	Οκτ.2009 - Μαρ.2011	-	3,1	11,8	11,2	94,8	81,0	Wittkopf et al., 2012
Χανιά, Ελλάδα	a-Si/µc-Si	Ιούν.2010 - Μάι.2012	1.530,2	4,2	7,65	7,25	94,7	85,1	Παρούσα μελέτη
PC-Si:πολυκ	ουσταλλικού τ	τυριτίου, MC-S	ί:μονοκρυστα	αλλικού πυ	ριτίου, μς-Si	:μικροκρυ	σταλλικού π	υριτίου, a-Si	:άμορφου

PC-Si:πολυκρυσταλλικού πυριτίου, MC-Si:μονοκρυσταλλικού πυριτίου, μc-Si:μικροκρυσταλλικού πυριτίου, a-Si:άμορφο πυριτίου, a-Si/μc-Si:μικροάμορφου πυριτίου

Πίνακας 6.4: Αντίστοιχες μελέτες που απαντώνται στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την παρούσα μελέτη, με τα αποτελέσματα αντίστοιχων μελετών που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία, η τιμή 4,2 kWh/kWp/day ή h/d για την ετήσια μέση ημερήσια τελική ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκού συστήματος, σημειώθηκε υψηλότερη σε σχέση με τις τιμές που αναφέρονται για τις Γερμανία, Πολωνία, Βέλγιο, Τουρκία, Ισπανία, Ιρλανδία, Β. Ιρλανδία, Ινδία, Μαλαισία και Ταϊλάνδη, ενώ διαπιστώθηκε συγκρίσιμη με την περιοχή της Σητείας, της Αιγύπτου και της Νότια Ιταλίας. Επιπλέον, το εξεταζόμενο φωτοβολταϊκό σύστημα παρουσίαζε τον υψηλότερο μέσο ετήσιο λόγο απόδοσης αλλά χαμηλότερη αποδοτικότητα συστοιχίας και συστήματος σε σχέση με τις μελέτες όπου χρησιμοποιούνται κλασικές τεχνολογίες κρυσταλλικού πυριτίου (μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά).

Εν κατακλείδι, η εξεταζόμενη πρότυπη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση λειτούργησε άκρως ικανοποιητικά, δεδομένων των περιορισμών που ανέκυπταν από την θέση έδρασης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (γωνία αζιμουθίου:-50°, νοτιοανατολικός προσανατολισμός), τον ελλιπή καθαρισμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων και τις συνθήκες ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών κατά τους πρώτους μήνες λειτουργίας. Ως εκ τούτου, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η αξιοποίηση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας στις χώρες της Μεσογείου της Βόρειας Αφρικής και της Μέσης Ανατολής (μικρής-μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις) κρίνεται ως ικανή και ανταγωνιστική επιλογή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συμβάλλει ουσιαστικά στην προστασία TOU περιβάλλοντος, ενώ παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Ωστόσο, η υιοθέτηση ορθολογικών πολιτικών στήριξης της συγκεκριμένης τεχνολογίας ΑΠΕ είναι απαραίτητη για την περαιτέρω ενίσχυση του ρόλου της, στο δεδομένο ενεργειακό μίγμα των χωρών αυτών.

6.4 Αξιολόγηση των λογισμικών προσομοίωσης PVGIS, SMA Sunny design, Retscreen

Στα πλαίσια υλοποίησης αμφίδρομου ελέγχου της εγκυρότητας των ρεαλιστικών (μέσω επεξεργασίας πραγματικών μετρήσεων) και των θεωρητικών αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος, αξιοποιώντας τις δυνατότητες των ειδικών λογισμικών PVGIS, SMA Sunny Design και RETScreen. Γενικά, тα προαναφερθέντα λογισμικά ικανοποιούν σε μεγάλο βαθμό τις απαιτήσεις διαμόρφωσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα ειδικά χαρακτηριστικά TOU, ωνз παράλληλα εμφανίζουν σχετικά αξιόπιστα αποτελέσματα.

Ειδικότερα από τη χρήση των συγκεκριμένων λογισμικών εργαλείων συμπεραίνεται ότι:

 Τα λογισμικά PVGIS και RETScreen, προσεγγίζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τα εξαχθέντα αποτελέσματα από την περίοδο παρακολούθησης του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος, εμφανίζοντας ωστόσο μια τάση υπερτίμησης των. Αντίθετα, για το λογισμικό SMA Sunny Design σημειώνεται τάση υποεκτίμησης της ενεργειακής παραγωγής.

Παράμετρος	Μονάδα	Περίοδος παρακολούθησης: Ιούνιος 2010 - Μάιος 2012	PVGIS	SMA Sunny Design	RETScreen
Ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (Π)	kWh/m²/d	4,66	5,21	-	5,29
Ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο (\overline{H}_T)	kWh/m²/d	4,84	5,50	-	5,49
Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τις ώρες ηλιοφάνειας (Τα,,,,)	°C	19,95	19,20	-	-
Συνολική Ενεργειακή παραγωγή (<i>E</i> _{AC,m})	kWh	3.332,76	3.406,00	2.727,40	3.445,00
Ενεργειακή απόδοση αναφοράς (Y _{R,m})	h/d	4,84	5,50	-	5,49
Τελική ενεργειακή απόδοση(<i>Υ_{F,m}</i>)	h/d	4,20	4,28	-	4,33
Συνολικές απώλειες ενέργειας (<i>L</i> total)	h/d	0,64	1,22	-	1,16
Λόγος απόδοσης (<i>PR,m</i>)	%	85,10	77,8	75,4	78,90
Αποδοτικότητα συστήματος (n _{syst.m})	%	7,25	6,6	-	-

Πίνακας 6.5: Πίνακας συγκριτικής αξιολόγησης πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων.

- Οι χρονικές απαιτήσεις για την υλοποίηση των απαιτούμενων προσομοιώσεων, ορίζονται ως ιδιαίτερα μικρές, καθώς και τα τρία λογισμικά χαρακτηρίζονται από:
 - ✓ φιλικό περιβάλλον για τους χρήστες.
 - ✓ απλότητα στην εισαγωγή δεδομένων.
 - ✓ ευκολία στην εκμάθηση τους.
 - υψηλή ταχύτητα εξαγωγής αποτελεσμάτων.
- Βασικό πλεονέκτημα του λογισμικού SMA Sunny Design αποτελεί η ικανότητα ορθολογικής διαμόρφωσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος και έλεγχου της συμβατότητας των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των συνεργαζόμενων μερών του συστήματος. Ωστόσο η ελλιπής βάση κλιματικών δεδομένων και οι περιορισμοί στην εισαγωγή εξωτερικών δεδομένων, αποτέλεσαν ανασταλτικούς παράγοντες για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων.
- Σε ό,τι αφορά τα κλιματικά δεδομένα των λογισμικών PVGIS και RETScreen, παρατηρείται ταύτιση των στοιχείων που εμφανίζουν οι χρησιμοποιούμενες βάσεις δεομένων, τα οποία όμως αποκλίνουν από τις πειραματικά καταγεγραμμένες τιμές.

- Κύριο χαρακτηριστικό του λογισμικού RETScreen αποτελούν οι διευρυμένες δυνατότητες ανάλυσης (οικονομοτεχνικές παραμέτρους, αερίων εκπομπών κλπ.). ωστόσο δεν είναι εφικτή η μικροσκοπική ανάλυση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός φωτοβολταϊκού συστήματος/πάρκου, η οποία συμβάλει στην πλήρη κατανόηση της λειτουργίας του. Επιπλέον, καταγράφονται μερικές ελλείψεις στην ενημέρωση του διαθεσίμου τεχνικού εξοπλισμού (φωτοβολταϊκά πλαίσια, αντιστροφείς, κλπ.)
- Το λογισμικό PVGIS, διαπιστώθηκε να υστερεί στον τομέα τεχνικής διαμόρφωσης μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, γεγονός που επηρεάζει άμεσα την αξιοπιστία των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.

Επομένως, το γενικότερο συμπέρασμα που προκύπτει από την αξιολόγηση των λογισμικών PVGIS, SMA Sunny Design και RETScreen, είναι ότι η μελέτη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος/πάρκου μέσω προσομοιώσεων, μπορεί να δώσει μια ικανοποιητική εικόνα για την ενεργειακή συμπεριφορά του, στα πλαίσια μιας προκαταρκτικής αξιολόγησης. Σε καμία περίπτωση, τα αποτελέσματα προσομοιώσεων δεν είναι ικανά να αντικαταστήσουν πειραματικές μετρήσεις.

6.4 Αξιολόγηση των μεθόδων προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Στη διεθνή βιβλιογραφία, εντοπίζεται ένας μεγάλος αριθμός επιστημονικών εργασιών σχετικά με τις μεθόδους προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στις μεθόδους αυτές, λαμβάνονται υπόψη κλιματολογικές μεταβλητές, καθώς και ειδικές τεχνικές παράμετροι, εξαρτώμενες από το είδος και την τεχνολογία φωτοβολταϊκού συστήματος. Δεδομένου ότι, οι σχέσεις αυτές, αποτελούν τη μαθηματική έκφραση της εμπειρίας που προκύπτει από την παρατήρηση και ανάλυση πρότυπων εγκαταστάσεων, η αξιολόγηση της προβλεπτικής τους ικανότητας σε διαφορετικές συνθήκες πεδίου, επικυρώνει την καταλληλότητά τους.

Εν προκειμένω, εφαρμόστηκε ικανή μεθοδολογία, ώστε να ελεγχθεί η επάρκεια δέκα (10) διαφορετικών μοντέλων άμεσου προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, υπό τις δεδομένες συνθήκες (χαρακτηριστικές ημέρες) των δεκαοκτώ (18) πρώτων μηνών λειτουργίας του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των βιβλιογραφικών συσχετίσεων, παρουσιάζονται συνοπτικά υπό μορφή πινάκων (πίνακας 6.6-6.7).

		King et al., 2004	Risser and Fuentes, 1983	Chenni et al., 2007	Servant, 1985	King, 1997
	Καλοκαίρι					
✓	Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος					
✓	Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος					
~	Αίθρια ημέρα, σχεδόν μέτριος άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος					
	Φθινόπωρο					
~	Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος					
~	Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος					
	Χειμώνας					
~	Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος					
~	Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος	-	-	-	-	-
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, σχεδόν μέτριος άνεμος					
	Άνοιξη					
~	Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος					
~	Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος					
~	Αίθρια ημέρα, σχεδόν μέτριος άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, σχεδόν μέτριος άνεμος					
		:Μη ικανοποι	ητική προσέγγ	ιση		
		:Λίγο ικανοπο	οιητική προσέγ	γιση		
		:Αρκετά ικανα	οποιητική προσ	σέγγιση		
		:Πολύ ικανοπ	οιητική προσέ	γγιση		

Πίνακας 6.6: Συμπεράσματα από την σύγκριση των εμπειρικών μοντέλων των King et al. (2004), Risser-Fuentes (1983), Chenni et al. (2007), Servant (1985), King (1997) υπό τις δεδομένες συνθήκες των δεκαοκτώ (18) πρώτων μηνών λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος.

		Ross and	Ross, 1976 and	Tselepis and	Mondol et	Schott, 1985
		Smockler,	Nordmann et	Tripanagnosto-	al., 2007	
		1986	al., 2003	poulos, 2001		
	Καλοκαίρι					
✓	Αίθρια ημέρα,					
	πολύ ασθενής άνεμος					
v	Αιθρία ημερά, ασθενής άνεμος					
✓	Αίθρια ημέρα,					
	σχεδόν μέτριος άνεμος					
•	πολύ ασθενής άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος					
	Φθινόπωρο					
~	Αίθρια ημέρα, πολύ ασθενής άνεμος					
~	Αίθρια ημέρα, ασθενής άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος					
	Χειμώνας					
✓	Αίθρια ημέρα,					
	πολύ ασθενής άνεμος					
~	Αιθρια ημερα, ασθενής άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς,					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς,					
	Δνοιξη					
~	Αίθρια ημέρα, πολύ απθαικές έναυρο					
~	Αίθρια ημέρα,					
1	ασθενής ανεμος Δίθοια ρυέρα					
	σχεδόν μέτριος άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, πολύ ασθενής άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, ασθενής άνεμος					
~	Συνθήκες αραιής συννεφιάς, σχεδόν μέτριος άνευος					
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	:Μη ικανοπ	οιητική προσέγγ	ιση		
		:Λίγο ικανο	ποιητική προσέγ	γιση		
		:Αρκετά ικο	ινοποιητική προα	σέγγιση		
		:Πολύ ικανα	οποιητική προσέ	γγιση		

Πίνακας 6.7: Συμπεράσματα από την σύγκριση των εμπειρικών μοντέλων των Ross - Smockler (1986), Ross (1976) - Nordmann et al. (2003), Tselepis -Tripanagnostopoulos (2001), Mondol et al. (2007) και Schott (1985) υπό τις δεδομένες συνθήκες των δεκαοκτώ (18) πρώτων μηνών λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος.



6.5 Αξιολόγηση του "νέου" εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η αξιολόγηση των διαφόρων μεθόδων προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ανέδειξε τις ατέλειες προσαρμογής των στις συνθήκες του δεδομένου πεδίου. Προκειμένου να υπερκεραστούν οι αβεβαιότητες, κρίθηκε σκόπιμη η διαμόρφωση ενός "νέου" μοντέλου, βάσει του κριτηρίου που ορίζεται σαν βελτίωση με σεβασμό (improvement with respect), ως προς το μοντέλο αναφοράς. Ειδικότερα, για τις δεδομένες συνθήκες χαρακτηριστικών ημερών που αντιπροσωπεύουν το 70% του συνόλου ($K_T \ge 0.5$), αναπτύχθηκαν δύο (2) κατάλληλα γραμμικά μοντέλα σύμφωνα με τις βασικές αρχές ανάλυσης και ελέγχου της στατιστικής επιστήμης.

Συνθήκες	Εμπειρικές σχέσεις	Μελετητής
<i>K</i> ₇ ≥0,5, V _W <4,5m/s	$T_m = 0.02 * G_T + 1.128 * T\alpha - 1.593 * V_W + 0.834$	[Sawakis 2013]
<i>K</i> ₇ ≥0,5 και V _W >4,5m/s	$T_m = 0.011 * G_T + 0.973 * T\alpha - 0.264 * V_W + 2.604$	[00//08/3,2010]

6.6 Προτάσεις για την περαιτέρω αξιοποίηση της παρούσας μελέτης

Η ανάλυση της λειτουργίας και η αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, η οποία απαιτεί σημαντική ακρίβεια. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, η έλλειψη κατάλληλης διάταξης άμεσης καταγραφής των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην κεκλιμένη επιφάνεια της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, οδήγησε στην ανάπτυξη αλγορίθμου αναγωγής των πειραματικών τιμών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, από το οριζόντιο στο κεκλιμένο επίπεδο. Προκειμένου να έχουμε μια καλύτερη εκτίμηση για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν στην παρούσα μελέτη, θα έπρεπε να γίνει σύγκρισή τους με πειραματικές μετρήσεις, με προοπτική τη διαμόρφωση κατάλληλου λογισμικού.

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης της εξετασθείσας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, προσέγγιζαν επαρκώς την πραγματικότητα, με την εύκολη και γρήγορη εφαρμογή των χρησιμοποιηθέντων λογισμικών να αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα. Ωστόσο σε περιπτώσεις προσομοίωσης που απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια πρέπει να αξιοποιούνται λογισμικά αυξημένων δυνατοτήτων (TRNSYS, PV SOL, PVSYST, κλπ.) με τη διαδικασία αξιολόγησης να κρίνεται ως ενδιαφέρουσα πρόταση μελέτης.

Η αναλυτική προσέγγιση παραγόντων, όπως ο προσανατολισμός, η σκίαση, η ρύπανση, η γήρανση κ.ά., που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων θα μπορούσε να οδηγήσει στην πλήρη κατανόηση των καταγεγραμμένων απωλειών.

Επιπλέον, όπως αποδεικνύεται σε αρκετές περιπτώσεις στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή απόκριση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα πρόταση θα ήταν η μελέτη και κατασκευή ικανού και οικονομικά αποδοτικού συστήματος ψύξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Τέλος, θα ήταν σημαντική η συγκριτική αξιολόγηση από ενεργειακή, οικονομική, και περιβαλλοντική άποψη της εφαρμογής φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίρια με άλλες μεθόδους αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. ηλιακός κλιματισμός, κ.α.) στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης.

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

- 1. Alonso García M.C., Balenzategui J.L., Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on Nominal Operation Cell Temperature calculations, Renewable Energy, Vol. 29,pp 1997-2010, (2004).
- 2. Andersen P., Comments on «Calculations of monthly average insolation on tilted surfaces» by S. A. Klein, Solar Energy, Vol. 25, p. 87, (1980).
- 3. Ayompe L.M., Duffy A., McCormack S.J., Conlon M., Validated real-time energy models for small-scale grid-connected PV-systems, Energy, Vol. 35, pp. 4086-4091, (2010).
- Ayompe L.M., Duffy A., McCormack S.J., Conlon M., Measured performance of a 1,72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland, Energy Conversion and Management, Vol. 52, pp. 816-825, (2011).
- 5. Ayompe L.M., Doctoral Thesis: Performance and Policy Evaluation of Solar Energy Technologies for Domestic Application in Ireland, Dublin Institute of Technology, (2011).
- 6. Cardona M., López L., Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system, Energy, Vol. 24, Pages 93-102, (1999).
- 7. Chenni R, Makhlouf M, Kerbache T, Bouzid A., A detailed modelling method for photovoltaic cells, Energy, Vol.32, pp. 1724–1730, 2007.
- Chokmaviroj S., Wattanapong R., Suchart Y., Performance of a 500 kWp grid connected photovoltaic system at Mae Hong Son Province, Thailand., Renewable Energy, Vol. 31, pp. 19-28, (2006).
- 9. Chouder A., Silvestre S., Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis, Energy Conversion and Management, Vol. 51, pp. 1929-1937, (2010).
- Congedo P.M., Malvoni M., Mele M., De Giorgi M.G., Performance measurements of monocrystalline silicon PV modules in South-eastern Italy, Energy Conversion and Management, Vol. 68, pp. 1-10, (2013).
- 11. Cucumo M., De Rosa A., Ferraro V., Kaliakatsos D., Marinelli V., Performance analysis of a 3kW grid-connected photovoltaic plant, Renewable Energy, Vol. 31,pp.1129-1138, (2006).
- Decker B., Jahn U., Performance of 170 grid connected PV plants in Northern Germany-Analysis of yields and optimization potentials, Solar Energy, Vol. 59, Issues 4–6, pp. 127-133, (1997)
- Drif M., Pérez P.J., Aguilera J., Almonacid G., Gomez P., de la Casa J., Aguilar J.D., Univer Project. A grid connected photovoltaic system of 200 kWp at Jaén University. Overview and performance analysis, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 91, pp. 670-683, (2007).

- 14. Duffie J.A, Beckman W.A, «Solar Engineering on Thermal Processes», Second edition, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- 15. Eicker U., «Solar Technologies for Buildings», John Wiley & Sons, Chichester, 2003.
- Eke R., Demircan H., Performance analysis of a multi crystalline Si photovoltaic module under Mugla climatic conditions in Turkey, Energy Conversion and Management, Vol. 65, pp. 580-586, (2013).
- 17. Elhodeiby A.S., Metwally H.M.B., Farahat M.A., Performance analysis of 3,6 kW rooftop grid-connected photovoltaic system in Egypt, International Conference on Energy Systems and Technologies (ICEST 2011), March 2011.
- 18. Eltawil M. A., Zhao Z., Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems-A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, pp. 112-129,(2010).
- 19. EPIA, «Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017», May 2013.
- 20. EUROBSERV'ER, Photovoltaic barometer, April 2013.
- 21. Fantidis J.G., Bandekas D.V., Potolias C., Vordos N., Cost of PV electricity Case study of Greece, Solar Energy, Vol. 91, pp. 120-130, (2013).
- 22. German Energy Society (Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS)), «Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects, and engineers», Earthscan, London 2008, pp. 23-51.
- 23. Google earth, 2013.
- 24. Haeberlin H., Beutler Ch., "Normalized representation of energy and power for analysis of performance and on-line error detection in PV-systems", 13th EU PV Conference on Solar Energy, Nice, France,(1995).
- 25. IEC 61724, Photovoltaic system performance monitoring-Guidelines for measurement, data exchange and analysis, (1998).
- 26. International Energy Agency (IEA), «Photovoltaic power systems (PVPS) annual report 2012», (2012).
- 27. IRENA, Solar Photovoltaics Technology Brief, January 2013.
- Jahn U, Nasse W. Operational performance of grid-connected PV systems on buildings in Germany. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 12(6): 441–448, (2004).
- Jakhrani A.Q., Othman A.K., Rigit A.R.H., Samo S.R., Comparison of solar photovoltaic module temperature models, World Applied Sciences Journal 14 (Special Issue of Food & Environment), pp. 1-8, (2011).

- Kamkird P., Ketjoy N., Rakwichian W., Sukchai S., Investigation on Temperature Coefficients of Three Types Photovoltaic Module Technologies under Thailand Operating Condition, Procedia Engineering, Vol. 32, pp. 376-383, (2012).
- 31. Klein S.A., Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces, Solar Energy, Vol. 19, pp. 325-329, (1977).
- Koehl M., Heck M., Wiesmeier S., Wirth J., Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 95, pp. 1638-1646, (2011).
- 33. *Kolodziej A., Staebler-Wronski* effect in amorphous silicon and its alloys, Opto-Electronic Reviews, Vol. 12, pp. 21-32., (2004).
- 34. Krishna Seshan, «Handbook of thin-film deposition processes and techniques, Noyes publications, New York, USA, (2002).
- 35. Kroll Ulrich, «From R&D to Thin Film Silicon PV at Oerlikon Solar», 3rd Gen Photovoltaics: CleanTech Day, CSEM Basel, August 2009.
- 36. Kurnik J., Jankovec M., Brecl K., Topic M., Outdoor testing of PV module temperature and performance under different mounting and operational conditions, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 95, pp. 373-376, (2011).
- Kymakis E., Kalykakis S., Papazoglou T., Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete, Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp.433-438,(2009).
- 38. Leloux J., Narvarte L., Trebosc D., Review of the performance of residential PV systems in France, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, pp. 1369-1376, (2012).
- 39. Leloux J., Narvarte L., Trebosc D., Review of the performance of residential PV systems in Belgium, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, Pages 178-184, (2012).
- 40. Makrides G., Zinsser B., Norton M., Georghiou G., «Third Generation Photovoltaics: Performance of photovoltaics under actual operating conditions», edited by Dr. Vasilis Fthenakis, InTech, March 2012.
- 41. Malik A.Q., Damit S.J.B.H., Outdoor testing of single crystal silicon solar cells, Renewable Energy, Vol. 28,pp. 1433-1445, (2003).
- 42. Mani M., Pillai R., Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, pp. 3124-3131, (2010).
- 43. Meral M.E., Dinçer F., A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 2176-2184, (2011).

- Minemoto T., Toda M., Nagae S., Gotoh M., Nakajima A., Yamamoto K., Takakura H., Hamakawa Y., Effect of spectral irradiance distribution on the outdoor performance of amorphous Si//thin-film crystalline Si stacked photovoltaic modules, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 91, pp.120-122, (2007).
- 45. Mondol J., Yohanis Y., Smyth M., Norton B, Long-term validated simulation of a building integrated photovoltaic system, Solar Energy, Vol. 78, pp. 163-176, (2005).
- 46. Mondol J., Yohanis Y., Smyth M., Norton B., Long term performance analysis of a grid connected photovoltaic system in Northern Ireland, Energy Conversion and Management, Vol. 47, pp.2925-2947, (2006).
- 47. Nordmann T, Clavadetscher L. Understanding temperature effects on PV system performance. In: Proceedings of the third world conference on photovoltaic energy conversion, Osaka, Japan, poster. pp. 2243–2246. 2003,
- 48. Pietruszko S.M., Gradzki M., Performance of a grid connected small PV system in Poland, Applied Energy, Vol.74, pp. 177-184, (2003).
- 49. RETScreen, Εγχειρίδιο χειρισμού, (2013).
- 50. Quesada B., Sánchez C., Cañada J., Royo R., Payá J., Experimental results and simulation with TRNSYS of a 7.2kWp grid-connected photovoltaic system, Applied Energy, Vol. 88,pp. 1772-1783, (2011).
- 51. Sharma V., Chandel S.S., Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 27, pp. 753-767, (2013).
- 52. Skoplaki E., Palyvos J.A., Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations, Renewable Energy, Vol.34, pp.23-29, (2009).
- 53. SMA Sunny Design, Εγχειρίδιο χειρισμού, (2013).
- 54. Synodinou B.M., Katsoulis B.D., A comparison of three models for estimation of global irradiation on tilted and oriented surfaces in Athens, Vol. 18, pp. 83-102, (1996), Published online:(2007).
- 55. Tamizhmani G., Ji L., Tang Y., Petacci L., Photovoltaic module thermal-wind performance: Long-term monitoring and model development for energy rating. NCPV and solar program review meeting, 2003.
- 56. Thevenard D., Haddad K., Ground reflectivity in the context of building energy simulation. Energy and Buildings, Vol. 38, pp. 972-980, (2006).
- 57. Trinuruk P., Sorapipatana C., Chenvidhya D., Estimating operating cell temperature of BIPV modules in Thailand, Renewable Energy, Vol. 34, pp. 2515-2523, (2009).
- 58. Tripathy S.C., Saxena A.K., Performance evaluation of 20 kWp photovoltaic system, Energy Conservation and Management, Vol.34, pp. 619–626, (1993).

- 59. U.S. Energy Information Administration (EIA), «International Energy Outlook 2013», July 2013.
- 60. Wittkopf S., Valliappan S., Liu L., Kian Seng A., Seng Chye C. J., Analytical performance monitoring of a 142.5 kWp grid-connected rooftop BIPV system in Singapore, Renewable Energy, Vol. 47, pp. 9-20, (2012).
- 61. Ye Z., Nobre A., Reindl T., Luther J., Reise C., On PV module temperatures in tropical regions, Solar Energy, Vol. 88, pp. 80-87, (2013).
- 62. Αιολική Ltd, «Μελέτη Εκτίμησης Επιπτώσεων στο Περιβάλλον από τη λειτουργία Φωτοβολταϊκού Πάρκου στην κοινότητα Απεσιάς», Κύπρος, Μάρτιος 2012.
- 63. Γεωργούλας Ευστράτιος, Διπλωματική εργασία: «Ανάλυση λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων άμορφου πυριτίου υπό συνθήκες μερικής σκίασης», Ε.Μ.Π., Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Μάρτιος 2013.
- 64. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ), Οδηγίες για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτηριακές εγκαταστάσεις, Αύγουστος 2009.
- 65. Κατσιά Ελένη, Διδακτορική διατριβή: «Εναπόθεση λεπτών υμενίων υδρογονωμένου πυριτίου για φωτοβολταϊκή εφαρμογή σε αντιδραστήρες πλάσματος: επίδραση της πίεσης, της χημικής σύστασης και της εξωτερικής πόλωσης στον ρυθμό εναπόθεσης και στην μετάβαση από άμορφο σε νανοκρυσταλλικό», Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Οκτώβριος 2006.
- 66. Κεκάτος Νικόλαος, Διπλωματική εργασία: «Μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος σε κτίριο της Εθνικής τράπεζας της Ελλάδος, στην Αθήνα», Ε.Μ.Π., Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ιούλιος 2012.
- 67. Μεγάλη εγκυκλοπαίδεια Γιοβάνη, Τόμος 10, Εκδόσεις Χ. Γιοβάνη, Αθήνα, 1982
- 68. Μόνιμη επιτροπή ενέργειας ΤΕΕ/ΤΚΜ, «Οδηγός μελέτης και υλοποίησης φωτοβολταϊκών έργων», Θεσσαλονίκη, Απρίλιος 2011.
- 69. Παπαδάκης Δημήτριος, Διπλωματική εργασία: «Μοντελοποίηση επένδυσης και δημιουργίας φωτοβολταϊκού σταθμού», Ε.Μ.Π., Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Οκτώβριος 2010.
- 70. Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών (ΣΕΦ), «Ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός», Ιανουάριος 2011.
- 71. Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών (ΣΕΦ), «Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών», Οκτώβριος 2013
- 72. Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-3/2010, «Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών», Αθήνα, Ιούλιος 2010.
- 73. Τεχνικό φυλλάδιο LÜTZE Thermoflex solar cable, 2010.
- 74. Τεχνικό φυλλάδιο SHARP NA series, 2010.
- 243 Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων

- 75. Τεχνικό φυλλάδιο SMA SB2500, 2013.
- 76. Τσοτσολή Έλλη και Μυλωνάς Σωτήρης, «Ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στις στέγες», σεμινάριο μικρής διάρκειας: «Φωτοβολταϊκά στη στέγη», Δραστηριότητες ΤΕΕ/ΤΚΜ, Μάρτιος 2011.
- 77. Τσούτσος Θεοχάρης, «Σημειώσεις για το μάθημα Ανανεώσιμες πηγές και Περιβάλλον», Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Άνοιξη 2008.
- 78. Υ.Π.Ε.Κ.Α., Έκθεση για τις Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις του Ειδικού Προγράμματος Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων σε Στέγες, Μάιος 2013.
- 79. Φραγκιαδάκης Ιωάννης,« Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2006.

INTERNET SITES

- 1. <u>http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg</u> (15/12/2013)
- 2. <u>http://www.prizmasolar.com/eng/pv_uygulama.html</u> (10/9/2013)
- 3. <u>http://en.wikipedia.org/wiki/Staebler%E2%80%93Wronski_effect</u> (12/9/2013)
- 4. <u>http://www.renewableenergyworld.com/rea/images/producing-high-performance-thin-film-silicon-pv-panels/53705</u> (17/9/2013)
- 5. <u>http://www.hnms.gr/hnms/greek/climatology/climatology region diagrams html?dr city</u> <u>=Chania_Souda</u> (20/7/2013)
- 6. <u>http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmaps/eu_cmsaf_opt/G_opt_GR.png</u> (15/7/2013)
- 7. <u>http://www.homepower.com/</u> (17/7/2013)
- 8. <u>http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/</u> (15/3/2013)
- 9. <u>http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe</u> (16/3/2013)
- 10. <u>http://www.gscp.gr/ggpp/site/home/ws/promote/fisikes/fenomena/anemi.csp</u> (15/10/2013)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- 1. Willmott C.J., Matsuura K., Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance, Climate Research, Vol. 30, pp. 79-82, (2005).
- Κατσάνος Χρήστος, Αβούρης Νικόλαος, Στατιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης Πειραματικών Δεδομένων Συνεργασίας, Συνεργατική Τεχνολογία, Συστήματα και Μοντέλα Συνεργασίας για Εργασία, Μάθηση Κοινότητες Πρακτικής και Δημιουργία Γνώσης, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2008.
- Κιουβεντζη Όλγα, Μεταπτυχιακή διατριβή: «Το Κλασσικό Πολλαπλό Γραμμικό Μοντέλο Παλινδρόμησης – Στατιστικά Συμπεράσματα και Εκτιμήσεις», Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μαθηματικών, 2006.
- Κομίλης Δημήτριος, «Σημειώσεις για το μάθημα Πειραματικός σχεδιασμός και στατιστική ανάλυση», Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, 2006.
- 5. Μπόνια Αρετή, Διπλωματική εργασία: «Επιμερισμός Και Διαχείριση Χρόνου Φοιτητών Πολυτεχνικών Σχολών. Η Περίπτωση Του Πολυτεχνείου Κρήτης», Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, 2009.

<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</u>

<u>Παράρτημα 1</u>

Πίνακας 1: Συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες για την περίοδο Ιουνίου 2010 - Αυγούστου 2010.

Date	Time	DC	DC current	P(DC)	Gτ	Tm	n _{pv}
		voltage					
		(V)	(A)	(W)	(W/m²)	(°C)	(%)
26/7/2010	11:20:00	385	5,4	2089	899	36,6	9,1
26/7/2010	11:30:00	386	5,4	2093	903	37,3	9,1
26/7/2010	11:10:00	383	5,4	2073	898	38,1	9,0
27/7/2010	11:50:00	383	5,4	2070	900	38,1	9,0
27/7/2010	11:40:00	382	5,4	2071	899	38,3	9,0
26/7/2010	12:00:00	384	5,4	2079	905	38,3	9,0
26/7/2010	11:40:00	383	5,4	2088	904	38,6	9,0
26/7/2010	12:10:00	384	5,4	2067	902	38,7	9,0
31/8/2010	11:30:00	382	5,3	2032	894	38,9	8,9
27/7/2010	11:30:00	382	5,4	2069	900	39,0	9,0
26/7/2010	12:20:00	382	5,4	2047	894	39,0	8,9
28/6/2010	11:00:00	383	5,4	2083	893	39,0	9,1
27/7/2010	11:20:00	380	5,4	2058	894	39,0	9,0
27/7/2010	12:00:00	382	5,4	2059	897	39,2	9,0
27/7/2010	12:10:00	381	5,4	2049	895	39,4	8,9
28/6/2010	11:20:00	379	5,5	2099	907	41,9	9,0
28/6/2010	12:30:00	381	5,4	2057	893	42,2	9,0
4/6/2010	12:00:00	377	5,5	2075	908	43,8	8,9
25/7/2010	11:40:00	374	5,4	2014	891	44,1	8,8
4/6/2010	12:10:00	377	5,4	2053	899	44,9	8,9
4/6/2010	10:30:00	377	5,4	2018	893	45,0	8,8
21/6/2010	12:00:00	378	5,5	2066	906	45,1	8,9
12/8/2010	11:40:00	374	5,4	2024	902	45,3	8,8
12/8/2010	11:30:00	373	5,4	2019	900	45,7	8,8
12/7/2010	11:10:00	375	5,4	2031	900	45,7	8,8
12/7/2010	12:10:00	374	5,4	2022	901	45,8	8,8
12/7/2010	12:00:00	375	5,4	2033	905	45,8	8,8
12/7/2010	11:00:00	373	5,4	2016	893	45,9	8,8
12/8/2010	11:10:00	373	5,4	2006	893	46,1	8,8
21/6/2010	11:50:00	376	5,5	2070	910	46,1	8,9
12/8/2010	11:20:00	373	5,4	2016	898	46,2	8,8
12/7/2010	11:20:00	373	5,5	2035	904	46,4	8,8
12/8/2010	11:50:00	371	5,4	2010	901	46,9	8,7
4/6/2010	10:50:00	375	5,5	2059	909	47,0	8,9

"Αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς πρότυπης Φωτοβολταϊκής εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης"

2014

11/8/2010	11:20:00	371	5,3	1983	890	47,1	8,7
11/8/2010	11:30:00	371	5,4	1984	894	47,3	8,7
21/6/2010	12:10:00	374	5,5	2039	899	47,4	8,9
4/6/2010	10:40:00	374	5,4	2034	900	47,4	8,8
12/7/2010	11:30:00	371	5,5	2030	907	47,5	8,7
15/8/2010	11:50:00	371	5,4	2002	891	47,6	8,8
12/7/2010	12:20:00	373	5,4	1999	896	47,7	8,7
21/6/2010	10:40:00	373	5,4	2023	900	47,9	8,8
12/8/2010	12:00:00	371	5,4	2000	898	48,0	8,7
12/7/2010	11:50:00	371	5,5	2028	907	48,0	8,7
15/8/2010	11:30:00	370	5,4	1997	890	48,2	8,8
12/7/2010	11:40:00	370	5,5	2027	908	48,4	8,7
15/8/2010	11:40:00	370	5,4	1998	893	48,4	8,7
21/6/2010	10:50:00	371	5,5	2029	909	48,9	8,7
21/6/2010	10:30:00	371	5,4	1991	894	49,3	8,7
17/6/2010	11:10:00	367	5,4	1976	896	51,0	8,6
17/6/2010	11:20:00	365	5,4	1983	904	52,1	8,6
17/6/2010	11:30:00	367	5,4	1984	910	52,2	8,5

Πίνακας 2: Συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες για την περίοδο Ιουνίου 2011 - Αυγούστου 2011.

		DC	DC	P(DC)	Gτ	Tm	n _{pv}
		voltage	current				
		(V)	(A)	(W)			
12/6/2011	12:20:00	381	5,2	1998	894	32,3	8,7
12/6/2011	11:20:00	378	5,3	2020	902	32,7	8,7
12/6/2011	12:00:00	379	5,3	2007	897	32,9	8,7
12/6/2011	12:10:00	379	5,3	2004	895	33,0	8,8
12/6/2011	11:50:00	379	5,3	2011	896	33,1	8,8
12/6/2011	11:40:00	378	5,3	2002	901	33,2	8,7
25/7/2011	12:00:00	379	5,4	2030	895	35,9	8,9
25/7/2011	12:10:00	380	5,3	2027	898	35,9	8,8
11/6/2011	11:20:00	375	5,3	2002	908	35,9	8,6
25/7/2011	12:20:00	379	5,3	2012	894	36,0	8,8
11/6/2011	11:10:00	375	5,3	1991	904	36,1	8,6
25/7/2011	11:50:00	378	5,4	2026	896	36,2	8,8
11/6/2011	11:00:00	375	5,3	1975	899	36,4	8,6
11/6/2011	12:20:00	374	5,3	1974	898	37,9	8,6
11/6/2011	12:10:00	372	5,3	1983	905	38,8	8,6
11/6/2011	12:00:00	372	5,4	1994	910	38,9	8,6
20/8/2011	12:30:00	375	5,3	2005	908	39,0	8,6
20/8/2011	12:40:00	373	5,2	1945	909	39,6	8,4

248

"Αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς πρότυπης Φωτοβολταϊκής ενκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρήτης"	2014
εγκατάστασης του Πολυτεχνείου Κρητής	

22/6/2011	11:10:00	372	5,3	1970	901	40,4	8,5
22/6/2011	11:20:00	370	5,3	1978	904	40,6	8,6
22/6/2011	12:20:00	370	5,3	1955	904	41,1	8,5
22/6/2011	12:10:00	370	5,3	1968	907	41,2	8,5
22/6/2011	12:00:00	370	5,3	1972	909	41,3	8,5
22/6/2011	12:30:00	369	5,3	1941	897	41,3	8,5
11/7/2011	11:40:00	369	5,4	1980	899	41,5	8,6
11/7/2011	11:30:00	369	5,3	1972	895	41,6	8,6
22/6/2011	11:50:00	369	5,4	1979	910	41,6	8,5
11/7/2011	12:00:00	369	5,3	1967	897	42,4	8,6
11/7/2011	11:50:00	368	5,4	1973	898	42,7	8,6
23/6/2011	11:10:00	367	5,3	1945	898	42,7	8,5
15/8/2011	11:10:00	367	5,3	1952	901	44,0	8,5
24/8/2011	11:00:00	369	5,3	1946	903	44,2	8,4
24/8/2011	12:40:00	369	5,3	1942	901	44,2	8,4
15/8/2011	11:20:00	367	5,3	1962	906	44,8	8,5
24/8/2011	12:30:00	368	5,3	1956	910	44,8	8,4
15/8/2011	11:30:00	367	5,4	1973	909	45,2	8,5
19/6/2011	11:50:00	365	5,3	1923	895	45,5	8,4
19/6/2011	11:40:00	364	5,3	1915	894	45,8	8,4
23/6/2011	12:30:00	365	5,3	1917	899	46,1	8,3
23/6/2011	11:20:00	364	5,3	1938	904	46,4	8,4
15/8/2011	12:20:00	366	5,4	1959	905	46,6	8,5
23/6/2011	12:20:00	365	5,3	1930	905	47,1	8,3
15/8/2011	12:30:00	365	5,3	1939	898	47,3	8,4
25/6/2011	11:00:00	361	5,3	1912	897	47,4	8,3
23/6/2011	11:30:00	363	5,4	1947	910	47,5	8,4
15/8/2011	10:50:00	363	5,2	1896	895	47,6	8,3
25/6/2011	11:10:00	360	5,3	1910	901	48,4	8,3
23/6/2011	12:10:00	361	5,3	1923	908	49,3	8,3
25/6/2011	12:30:00	358	5,3	1901	899	49,9	8,3
25/6/2011	12:20:00	360	5,3	1917	905	50,1	8,3
25/6/2011	11:20:00	358	5,3	1909	905	51,1	8,2
25/6/2011	11:30:00	355	5,4	1908	907	52,5	8,2
25/6/2011	12:00:00	354	5,4	1911	910	53,2	8,2
25/6/2011	11:40:00	352	5,4	1899	909	55,2	8,2
25/6/2011	12:10:00	353	5,4	1895	908	55,4	8,2

Στατιστική μέθοδος αξιολόγησης της απόδοσης μοντέλων πρόβλεψης

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες στατιστικές μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης των μοντέλων που εκτιμούν τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Μεταξύ αυτών το μέσο σφάλμα μεροληψίας (*MBE*),το μέσο απόλυτο σφάλμα (*MAE*) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (*RMSE*), οι οποίοι είναι οι κυριότεροι δείκτες καλής προσαρμογής ενός εμπειρικού μοντέλου στα δεδομένα τα οποία καλείται να υπολογίσει. Οι δείκτες αυτοί περιγράφονται ως εξής :

- Μέσο σφάλμα μεροληψίας (Mean Bias Error, MBE) το οποίο δίνεται σε μονάδες ίδιες με αυτές της εξηρτημένης μεταβλητής και εκφράζει το κατά πόσον το μοντέλο υπολογισμού συστηματικά υπερεκτιμά (θετικό MBE) ή υποεκτιμά (αρνητικό MBE) τα πραγματικά δεδομένα. Δεν υπάρχουν ανώτερα ή κατώτερα όρια για τις τιμές του.
- Μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error, MAE) το οποίο δίνεται σε μονάδες ίδιες με αυτές της εξαρτημένης μεταβλητής και εκφράζει τη μέση διαφορά των εκτιμήσεων του μοντέλου από τα πραγματικά δεδομένα. Δεν υπάρχει ανώτερο όριο για τις τιμές του, ενώ το κατώτερο όριο είναι το 0.
- Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square Error, RMSE) το οποίο δίνεται σε μονάδες ίδιες με αυτές της εξηρτημένης μεταβλητής και εκφράζει τη μέση διασπορά των εκτιμήσεων του μοντέλου γύρω από τα πραγματικά δεδομένα. Η διαφορά του από το MAE είναι ότι χρησιμοποιώντας τετραγωνικές διαφορές επιτρέπει σε μεγάλες διαφορές να έχουν μεγαλύτερη αναλογικά επίδραση από τις μικρότερες, ενώ το MAE χειρίζεται όλες τις διαφορές εξίσου. Πρακτικά επιβάλλει ποινή στα πρότυπα τα οποία παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές από τα πραγματικά δεδομένα, έστω και αν αυτές είναι ελάχιστες.

Οι ανωτέρω δείκτες υπολογιζόμενοι σε εκατοστιαία αναλογία δίνονται από τις σχέσεις:

•
$$MBE(\%) = 100 * \frac{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} (C_i - M_i)}{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} (Mi)}$$

•
$$MAE(\%) = 100 * \frac{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} |c_i - M_i|}{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} (Mi)}$$

•
$$RMSE(\%) = 100 * \frac{\sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} (C_i - M_i)^2}}{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} (Mi)}$$

Όπου, C_i:η εκτιμώμενη τιμή από το μοντέλο υπολογισμού

Μ_ί:η τιμή που λαμβάνεται από πραγματικά δεδομένα

Ν:το πλήθος των δεδομένων επί των οποίων γίνεται ο έλεγχος προσαρμογής [Willmott and Matsuura,2005]

Μοντελοποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων-Στατιστικός έλεγχος υποθέσεων

Μοντελοποίηση

Ο πειραματισμός αποτελεί σημαντικό μέρος της επιστημονικής σκέψης. Ο στόχος του πειράματος λοιπόν, είναι ο εντοπισμός βέλτιστων τιμών καθώς και η μαθηματική περιγραφή του φαινομένου που μελετάται. Η μαθηματική περιγραφή (ή μοντελοποίηση) έχει σαν στόχο τη ανάπτυξη μαθηματικών εξισώσεων, ώστε η εξαγωγή αποτελεσμάτων σε κάποια μελλοντική στιγμή να μην χρήζει επαναληπτικά κάποιο πείραμα. Συνήθως το πείραμα έχει κόστος οικονομικό και είναι χρονοβόρο ενώ πάντα η δυνατότητα χρήσης των «φθηνών» μαθηματικών εξισώσεων ή μοντέλων προτιμάται. Παραδειγματικά, η σχέση μίας απόκρισης y από τους παράγοντες X, Z, Y – δηλ. y=f(X,Z,Y) – μπορεί να εκφραστεί από το εμπειρικό (γραμμικό) μοντέλο: y=b1*X+b2*Z+b3 *Y ή από το μη γραμμικό εμπειρικό μοντέλο y=b1*X+b2*Z+b3*Y+b4*XZ. Οι συντελεστές b1, b2, b3, b4 θα πρέπει να προσδιοριστούν κατά τη διαδικασία προσαρμογής του μοντέλου στα δεδομένα. Όμοια με πριν, θα πρέπει να προστίθεται το πειραματικό σφάλμα στη μαθηματική εξίσωση, δηλ. η σωστή έκφραση του γραμμικού μοντέλου είναι: y=b1*X+b2*Z+b3*Y + ε.[Κομιλης,2006]



Διάγραμμα 4.3: Διάγραμμα ροής των σταδίων δημιουργίας ενός πειραματικού μοντέλου [Κομιλης,2006]

Επαγωγική Στατιστική, Έλεγχος Υποθέσεων

Συνήθως όταν ένας ερευνητής σχεδιάζει κάποιο πείραμα έχει κάποια θεωρία που θέλει να επαληθεύσει, και επομένως κάποια ένδειξη για τα τελικά αποτελέσματα. Αυτή η πρόβλεψη του ερευνητή για το τελικό αποτέλεσμα ονομάζεται στην στατιστική, υπόθεση (hypothesis). Ουσιαστικά μία υπόθεση αποτελεί την πρόβλεψη του ερευνητή για την επίδραση της αλλαγής της ανεξάρτητης μεταβλητής στην εξαρτημένη. Ο έλεγχος υποθέσεων (hypothesis testing) αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι της επαγωγικής στατιστικής και ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον ερευνητή, καθώς του επιτρέπει να ελέγξει την εγκυρότητα της θεωρίας του. [Κατσάνος και Αβούρης,2008]

Η Λογική του Ελέγχου Υποθέσεων

Η λογική του ελέγχου υποθέσεων μπορεί να συνοψιστεί στα εξής τέσσερα βήματα: διατύπωση υποθέσεων, διαμόρφωση των κριτηρίων για την λήψη μιας απόφασης, συλλογή δεδομένων από δείγματα και αξιολόγηση της μηδενικής υπόθεσης.

<u>Βήμα 1°</u> : Διατύπωση των Υποθέσεων

Το πρώτο βήμα σε έναν έλεγχο υποθέσεων είναι να διατυπωθεί η μηδενική υπόθεση H_0 (null hypothesis). Η μηδενική υπόθεση είναι μία πρόταση που προβλέπει ότι η αλλαγή της ανεξάρτητης μεταβλητής (μεταβλητή που ελέγχω) δεν έχει καμία επίδραση στην εξαρτημένη μεταβλητή (μεταβλητή που παρατηρώ). Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να θεωρήσουμε γνωστές τις παραμέτρους του νέου πληθυσμού που δημιουργείται από την αλλαγή της τιμής της ανεξάρτητης μεταβλητής (μεταβλητή που τλάγγη). Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να θεωρήσουμε γνωστές τις παραμέτρους του νέου πληθυσμού που δημιουργείται από την αλλαγή της τιμής της ανεξάρτητης μεταβλητής, καθώς υποθέτουμε ότι αυτή η αλλαγή δεν έχει καμία επίδραση. Επομένως, οι τιμές των παραμέτρων του πληθυσμού μετά την αλλαγή της ανεξάρτητης μεταβλητής είναι ίδιες με αυτές πριν την αλλαγή. Η δεύτερη υπόθεση που διατυπώνει ο ερευνητής ονομάζεται εναλλακτική υπόθεση H₁ (alternative hypothesis), και είναι η ακριβώς αντίθετη από τη μηδενική υπόθεση, δηλαδή δηλώνει ότι η αλλαγή της ανεξάρτητης μεταβλητή. Ο στόχος της μεθόδου ελέγχου υποθέσεων είναι να αποδείξει ότι η μηδενική υπόθεση μπορεί να απορριφθεί με κάποιο βαθμό βεβαιότητας. [Κατσάνος και Αβούρης,2008]

<u>Βήμα 2°</u> : Διαμόρφωση των Κριτηρίων για τη Λήψη μιας Απόφασης

Ο ερευνητής τελικά θα συλλέξει κάποια δεδομένα από δείγματα για να αξιολογήσει την αξιοπιστία της μηδενικής υπόθεσης. Με άλλα λόγια, θα χρησιμοποιήσει στατιστικούς δείκτες για να βγάλει συμπεράσματα για την τιμή μιας παραμέτρου του πληθυσμού. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, όσο αντιπροσωπευτικό και αν είναι το δείγμα, πάντα θα υπάρχει μια ασυμφωνία (σφάλμα δειγματοληψίας) ανάμεσα στην πραγματική τιμή της παραμέτρου και του στατιστικού δείκτη. Το ερώτημα λοιπόν που προκύπτει είναι αν η διαφορά
ανάμεσα στην τιμή του στατιστικού δείκτη και στην τιμή που προβλέπει η μηδενική υπόθεση για την παράμετρο του πληθυσμού οφείλεται πραγματικά στην επίδραση της ανεξάρτητης μεταβλητής, ή οφείλεται απλά σε σφάλματα δειγματοληψίας. Για να απαντήσει σε αυτό το ερώτημα ο ερευνητής χρειάζεται να θέσει κάποια κριτήρια που καθορίζουν επακριβώς πόση διαφορά χρειάζεται να υφίσταται ανάμεσα σε αυτές τις δύο τιμές, ώστε να δικαιολογείται η απόφαση να απορριφθεί η μηδενική υπόθεση. Αν τελικά αποφασίσει να απορρίψει τη μηδενική υπόθεση, θα πρέπει να καθορίσει το βαθμό βεβαιότητας με τον οποίο προβαίνει σε μία τέτοια απόφαση, ή με άλλα λόγια την πιθανότητα τα αποτελέσματα της ανάλυσής του να είναι εσφαλμένα. Η πιθανότητα αυτή ονομάζεται επίπεδο σημαντικότητας (level of significance or alpha level), και καθορίζει τη μέγιστη πιθανότητα το αποτέλεσμα μιας στατιστικής ανάλυσης να οφείλεται σε σφάλματα ή τυχαίους παράγοντες. [Κατσάνος και Αβούρης,2008]

Στατιστική σημαντικότητα (p-value): Η στατιστική σημαντικότητα ενός αποτελέσματος είναι η πιθανότητα που η παρατηρηθείσα σχέση (π.χ., μεταξύ των μεταβλητών) ή μια διαφορά (π.χ., μεταξύ των μέσων) σε ένα δείγμα εμφανίστηκε καθαρά κατά τύχη και ότι στον πληθυσμό από τον οποίο προήλθε το δείγμα, δεν υπάρχει καμία τέτοια σχέση ή διαφορά. Πιο συγκεκριμένα, η p-value μιας δοκιμής στατιστικής σημαντικότητας αντιπροσωπεύει την πιθανότητα της λήψης τιμών της στατιστικής δοκιμής που είναι ίσες με ή μεγαλύτερες στο μέγεθος από την παρατηρηθείσα στατιστική δοκιμή. Χρησιμοποιώντας λιγότερο τεχνικούς όρους, κάποιος θα μπορούσε να πει ότι η στατιστική σημαντικότητα ενός αποτελέσματος μας λέει κάτι για το βαθμό στον οποίο το αποτέλεσμα είναι "αληθινό" (υπό την έννοια ότι είναι "αντιπροσωπευτικό του πληθυσμού"). Πιο τεχνικά, η τιμή του p-value αντιπροσωπεύει έναν μειωτικό δείκτη της αξιοπιστίας του αποτελέσματος. Όσο πιο υψηλό είναι το p-value, τόσο λιγότερο μπορούμε να πιστέψουμε ότι η παρατηρηθείς σχέση μεταξύ των μεταβλητών στο δείγμα είναι ένας αξιόπιστος δείκτης της σχέσης μεταξύ των αντίστοιχων μεταβλητών στον πληθυσμό. Συγκεκριμένα, το p-value παριστάνει την πιθανότητα του λάθους που περιλαμβάνεται στην αποδοχή του παρατηρηθέντος αποτελέσματός μας ως έγκυρου, δηλαδή ως "αντιπροσωπευτικό του πληθυσμού". Παραδείγματος χάριν, μια p-value του .05 (δηλαδή 1/20) δείχνει ότι υπάρχει 5% πιθανότητα η σχέση μεταξύ των μεταβλητών που βρίσκονται στο δείγμα μας να είναι "τυχαία επιτυχία". Με άλλα λόγια, υποθέτοντας ότι στον πληθυσμό δεν υπήρξε καμία σχέση μεταξύ των μεταβλητών και επαναλαμβάναμε τα πειράματά μας το ένα μετά το άλλο, θα μπορούσαμε να αναμείνουμε ότι σε περίπου κάθε 20 επαναλήψεις του πειράματος θα υπήρχε ένα στο οποίο η σχέση μεταξύ των εν λόγω μεταβλητών θα ήταν ίση ή ισχυρότερη από τη δική μας σχέση. (Σημειώστε ότι αυτό δεν είναι το ίδιο με το να πούμε ότι δεδομένου ότι υπάρχει μια σχέση μεταξύ των μεταβλητών, μπορούμε να αναμείνουμε ότι θα ξαναπάρουμε τα ίδια αποτελέσματα σε 5% του αριθμού των επαναλήψεων ή 95% αυτών. Όταν υπάρχει μια σχέση μεταξύ των μεταβλητών στον πληθυσμό, η πιθανότητα της αντιγραφής της μελέτης και της διαπίστωσης της σχέσης σχετίζεται με τη στατιστική δύναμη, (δηλαδή την πιθανότητα απόρριψης μιας ψευδής στατιστικής κενής υπόθεσης). Σε πολλούς τομείς της έρευνας, το p-value του 0.05 συνήθως αντιμετωπίζεται ως ένα αποδεκτό "επίπεδο λάθους".

Δεν υπάρχει κανένας τρόπος να αποφευχθεί η αυθαιρεσία στην τελική απόφαση ως προς ποιο επίπεδο σημαντικότητας θα αντιμετωπιστεί ως πραγματικά σημαντικό. Δηλαδή η επιλογή κάποιου επιπέδου σημαντικότητας, μέχρι το οποίο τα αποτελέσματα να απορριφθούν ως άκυρα, είναι αυθαίρετη. Στην πράξη, η τελική απόφαση εξαρτάται συνήθως από το εάν η έκβαση προβλέφθηκε από την αρχή ή βρέθηκε μόνο μετά από πολλές αναλύσεις και συγκρίσεις που εκτελέστηκαν στο σύνολο των δεδομένων. Χαρακτηριστικά, σε πολλές επιστήμες, αποτελέσματα που δίνουν p< 0.05 θεωρούνται διαχωριστική γραμμή στατιστικά σημαντική αλλά θυμηθείτε ότι αυτό το επίπεδο σημαντικότητας περιλαμβάνει μια αρκετά υψηλή πιθανότητα λάθους (5%). Αποτελέσματα που είναι σημαντικά στο p<0.01 επίπεδο θεωρούνται συνήθως στατιστικά σημαντικά και p<0.005 ή p<0.001 επίπεδα καλούνται συχνά "ιδιαίτερα" σημαντικά. Αλλά αυτές οι ταξινομήσεις αντιπροσωπεύουν μόνο αυθαίρετες συμβάσεις που είναι ανεπίσημα βασισμένες στη γενική ερευνητική εμπειρία.[Κιούφεντζη,2006]

<u>Βήμα 3°</u> : Συλλογή Δεδομένων από Δείγματα

Το επόμενο βήμα στη μέθοδο ελέγχου υποθέσεων είναι η συλλογή των δεδομένων από το δείγμα και ο υπολογισμός των κατάλληλων περιγραφικών στατιστικών δεικτών. Είναι εξαιρετικά σημαντικό να επιλεγεί ένα δείγμα, ώστε η μέθοδος να αντιπροσωπευτικό παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η μέθοδος της τυχαίας δειγματοληψίας εξασφαλίζει αυτή την απαίτηση. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία της συλλογής των δεδομένων από το δείγμα γίνεται αφού ο ερευνητής διαμορφώσει τα κριτήρια για την λήψη μιας απόφασης, ώστε να είναι αμερόληπτος και ανεπηρέαστος από τα δεδομένα αυτά.

<u>Βήμα 4°</u> : Αξιολόγηση της Μηδενικής Υπόθεσης

Στο τελευταίο βήμα της μεθόδου ελέγχου υποθέσεων ο ερευνητής μελετά την εγκυρότητα της μηδενικής υπόθεσης με τη βοήθεια στατιστικών δεικτών, ώστε να λάβει μια απόφαση σύμφωνα με τα κριτήρια που έχει θέσει στο δεύτερο βήμα. Υπάρχουν λοιπόν δύο δυνατότητες, είτε αποφασίζει να απορρίψει τη μηδενική υπόθεση (reject the null hypothesis) όταν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το δείγμα είναι σημαντικά (significantly) διαφορετικά από αυτά που προβλέπει η μηδενική υπόθεση, είτε οδηγείται στην απόφαση ότι απέτυχε να απορρίψει τη μηδενική υπόθεση (fail to reject the null hypothesis) όταν τα

αποτελέσματα του πειράματος δεν παρέχουν επαρκείς αποδείξεις ότι η μηδενική υπόθεση δεν ισχύει.[Κατσάνος και Αβούρης,2009]

Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA)

Η ανάλυση της διακύμανσης (ANalysis Of VAriance – ANOVA) είναι μια στατιστική μέθοδος με την οποία η μεταβλητότητα που υπάρχει σ' ένα σύνολο δεδομένων διασπάται στις επιμέρους συνιστώσες της με στόχο την κατανόηση της σημαντικότητας των διαφορετικών πηγών προέλευσής της. Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας οφείλεται στον θεμελιωτή της σύγχρονης στατιστικής επιστήμης, άγγλο στατιστικό Sir Ronald Aylmer Fisher (1890 - 1962). Στην πραγματικότητα η ΑΝΟVA περιλαμβάνει μια ομάδα στατιστικών μεθόδων καταλλήλων για την ανάλυση δεδομένων που προκύπτουν από πειραματικούς σχεδιασμούς.

Τα δεδομένα ενός δείγματος ανάλογα με την προέλευσή τους διακρίνονται σε μη πειραματικά (non-experimental) ή σε πειραματικά (experimental). Στην πρώτη κατηγορία ο στατιστικός ερευνητής απλά παρατηρεί τις τιμές που εμφανίζονται χωρίς να έχει δυνατότητα επέμβασης στις αντίστοιχες μεταβλητές. Αντίθετα στη δεύτερη κατηγορία ο στατιστικός ερευνητής προσπαθεί να ελέγξει τα επίπεδα μιας ή περισσοτέρων ανεξάρτητων (independent) μεταβλητών προκειμένου να προσδιορίσει την επίδραση που έχουν πάνω στην υπό μελέτη μεταβλητή που καλείται εξαρτημένη (dependent) η απόκριση (response).

Στόχος κάθε στατιστικού πειράματος είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης μιας ή περισσοτέρων ανεξάρτητων μεταβλητών πάνω στην απόκριση (εξαρτημένη μεταβλητή). Οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται συνήθως σαν παράγοντες (factors) και μπορεί να είναι είτε ποσοτικές είτε ποιοτικές. Οι τιμές του παράγοντα που προσδιορίζονται στην έρευνα, λέγονται επίπεδα (levels). Σε ένα πείραμα με ένα παράγοντα οι μεταχειρίσεις (treatments) του πειράματος είναι τα επίπεδα του παράγοντα. Σε ένα πείραμα με δύο ή περισσότερους παράγοντες οι μεταχειρίσεις είναι οι συνδυασμοί παραγόντων-επιπέδων.

Ο έλεγχος λόγου διακυμάνσεων (έλεγχος F) δείχνει αν κάποιες μη συσχετισμένες ομάδες τιμών διαφέρουν στη διακύμανση γύρω από το μέσο όρο (δηλαδή, αν οι διακυμάνσεις είναι σημαντικά διαφορετικές). Αυτό είναι σαφώς διαφορετικό από τον υπολογισμό του αν διαφέρουν οι μέσοι όροι, και πρέπει να αποσαφηνιστεί ότι οι διακυμάνσεις μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ακόμη και όταν οι μέσοι όροι των συνόλων τιμών είναι ίσοι. Συνεπώς η εξέταση των διακυμάνσεων των μεταβλητών μπορεί να είναι το ίδιο σημαντική όσο και η σύγκριση των μέσων τιμών τους.

Μία αναγκαία συνθήκη για την ύπαρξη της κατανομής είναι ότι τα δείγματα θα πρέπει να ακολουθούν την κανονική κατανομή. Εν τούτοις σε περιπτώσεις που οι δειγματικές κατανομές αποκλίνουν από την κανονική, η δοκιμασία μένει σχετικά ανεπηρέαστη, εφόσον οι δύο πληθυσμοί είναι τουλάχιστον μονοκόρυφοι και τα μεγέθη των δειγμάτων είναι παρόμοια.[Μπόνια, 2009]

256 Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων