



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΡΗΓΟΡΙΑΔΗΣ ΕΥΤΥΧΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΗΛΙΑΣ ΖΟΥΜΠΟΥΛΗΣ

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2012

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία συγκριτική μελέτη μεταξύ τριών φωτοβολταϊκών τεχνολογιών που βασίζονται στην τεχνολογία πυριτίου και λεπτών υμενίων, με σκοπό να αξιολογηθεί η απόδοσή τους σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών περιβάλλοντος και να εξακριβωθεί ποιες τεχνολογίες θα μπορούσαν να αποδώσουν καλύτερα στα μετεωρολογικά και γεωγραφικά δεδομένα της χώρας μας. Στην προσπάθεια αυτή μελετήθηκε και αξιολογήθηκε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα το οποίο είναι εγκατεστημένο από την εταιρία Phoenix Solar στο Χαλάνδρι.

Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται μία υβριδική τεχνολογία της εταιρίας Sanyo που συνδυάζει μονοκρυσταλλικό και άμορφο πυρίτιο και είναι βασισμένη στην τεχνολογία λεπτών υμενίων (*type A*), ένα πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό της εταιρίας Suntech (*type B*) και μία τεχνολογία Τελουριούχου Καδμίου της εταιρίας First Solar (*type C*) η οποία είναι επίσης βασισμένη στην τεχνολογία λεπτών υμενίων.

Η εταιρία Phoenix Solar, αποτελεί έναν κορυφαίο οίκο ολοκληρωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων με επιχειρηματικές δραστηριότητες σε διεθνές επίπεδο. Αναλαμβάνει αφενός τον σχεδιασμό, την προμήθεια ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και την εγκατάσταση μεγάλων Φ/Β συστημάτων διασυνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο και αφετέρου την εμπορεία Φ/Β πλαισίων, αντιστροφών και λοιπού εξοπλισμού μιας Φ/Β εγκατάστασης.

- Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται μία φυσική προσέγγιση των φωτοβολταϊκών καλύπτοντας ένα μεγάλο εύρος της θεωρίας που είναι απαραίτητη, προκειμένου να δοθεί μία σαφή εικόνα της λειτουργίας τους.
- Στο **δεύτερο κεφάλαιο** αναλύεται ένα μέρος της ηλιακής γεωμετρίας στο οποίο περιλαμβάνονται σχετικοί όροι και σχήματα που είναι απαραίτητα προκειμένου να γίνει κατανοητή η σωστή τοποθέτηση του συλλέκτη. Επίσης περιγράφεται το υπό εξέταση φωτοβολταϊκό σύστημα καθώς και οι μετεωρολογικές συνθήκες της τοποθεσίας στην οποία βρίσκεται η εταιρία.
- Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα υπό εξέταση μεγέθη μαζί με τα σφάλματά τους και εξάγονται αλγεβρικά οι αντίστοιχοι τύποι.
- Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν την αντίστοιχη περίοδο, γίνονται διαγράμματα, πίνακες και διατυπώνονται σχολιασμοί και συμπεράσματα που αφορούν την λειτουργία των τριών φωτοβολταϊκών τεχνολογιών που υπάρχουν στην εταιρία.
- Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται το σύστημα παρακολούθησης φωτοβολταϊκών συστημάτων Solar Log.

Έπειτα, ακολουθεί παράρτημα στο οποίο είναι διαθέσιμα όλα τα διαγράμματα που αφορούν τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής από τον Μάρτιο του 2010 μέχρι και τον Μάρτιο του 2011, την περίοδο δηλαδή κατά την οποία αξιολογήθηκε το φωτοβολταϊκό σύστημα.

Abstract

In the present essay a comparative research between three photovoltaic technologies, which are based on the silicon and the thin film technology, is conducted in order to evaluate their efficiency in a wide range of environmental conditions and ascertain the kind of technologies that could yield better results in the meteorological and geographical conditions of our country. During this research, a photovoltaic system that is instated by the Phoenix Solar firm in Chalandri, is studied and, thus evaluated.

More specifically, a hybrid technology of the Sanyo firm that combines single-crystal and amorphous silicon and is based on the thin film technology (type A), a polycrystalline photovoltaic system of the Suntech firm (type B) and a Candium Telluride technology of the First Solar firm (type C), which is also based the thin film technology, are considered. The Phoenix Solar is esteemed as a leading firm of integrated photovoltaic systems with business activities at international level. The firm undertakes the design, the supply of electromechanical equipment, the installation of large photovoltaic systems that are interconnected to the electrical grid and the commercial trading of photovoltaic frames, inverters and other equipment of a photovoltaic establishment.

- In the **first chapter**, a physical approach to photovoltaic systems is conducted, which encompasses a wide range of the necessary theory, in order to provide a comprehensible picture of their operation.
- In the **second chapter**, a part of the solar geometry is analyzed, in which relevant terms and figures that are essential to the understanding of the proper collector's installation are included. Moreover, the examined photovoltaic system, as well as the meteorological conditions of the firm's location are described.
- In the **third chapter**, the examined variables alongside their error margins are presented and the corresponding formulas are derived.
- In the **fourth chapter**, the results of measures that are conducted the relevant time period are presented, the resulting chart and tables are formed and comments and conclusions, which are related to the operation of the three photovoltaic technologies accessible through the firm, are formulated.
- In the **fifth chapter**, the observation system grid Solar Log of photovoltaic systems is demonstrated.

Furthermore, the relative appendix in which the complete row of charts that correspond to the meteorological data of the region from March 2010 to March 2011 is presented. This is the time period when the photovoltaic system has been evaluated.

Ευχαριστίες

Κατά την διάρκεια της διπλωματικής μου διατριβής σημαντική βοήθεια έλαβα από τον κύριο Ηλία Ζουμπούλη, διευθυντή του τομέα φυσικής της σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για την πλήρη καθοδήγηση που χρειάστηκε ώστε να ολοκληρωθεί με επιτυχία η διπλωματική μου εργασία, καθώς επίσης και από τον κύριο Χρήστο Πρωτογερόπουλο, διευθυντή της εταιρίας Phoenix Solar, ο οποίος μου εμπιστεύθηκε τις μετρήσεις του φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο και αξιολόγησα. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Γιάννη Κλωνάρη, υπάλληλο της εταιρίας Phoenix Solar, ο οποίος με την εμπειρία του σε αυτό το χώρο μπόρεσε να μου δώσει σαφείς εξηγήσεις και σχόλια που αφορούσαν τα συμπεράσματα της εργασίας μου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	01
Κεφάλαιο 1.....	03
Φυσικές αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων	
1.1 Εισαγωγή.....	03
1.2 Ημιαγωγοί.....	04
1.2.1 Εισαγωγή.....	04
1.2.2 Ημιαγωγοί και προσμίξεις.....	05
1.2.3 Φυσική προσέγγιση ημιαγωγών.....	07
1.2.4 Εξάρτηση ενεργειακού χάσματος από την θερμοκρασία.....	09
1.3 Δίοδος PN.....	10
1.3.1 Εισαγωγή.....	10
1.3.2 Αντίσταση διόδου και συντελεστής ιδεατότητας.....	13
1.4 Αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων.....	14
1.4.1 Εισαγωγή.....	14
1.4.2 Δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος.....	15
1.4.3 Ανοιχτό κύκλωμα.....	19
1.4.4 Φαινόμενα απωλειών ενέργειας.....	20
1.4.5 Ο συντελεστής πλήρωσης (<i>fill factor</i>).....	21
1.4.6 Συντελεστής απόδοσης στοιχείων η [%].....	22
1.4.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	23
1.5 Επεξεργασία πυριτίου.....	25
1.5.1 Από το πέτρωμα στην ηλιακή κυψέλη.....	25
1.5.2 Ιοντική εμφύτευση.....	26
1.6 Πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών.....	27

Κεφάλαιο 2.....	29
Μελέτη και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων	
2.1 Ηλιακή γεωμετρία.....	29
2.2 Προσανατολισμός ηλιακού συλλέκτη	32
2.3 Δομή ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος.....	36
2.4 Τύποι φωτοβολταϊκών κυττάρων.....	38
2.5 Περιγραφή του υπό μελέτη φωτοβολταϊκού συστήματος.....	43
2.5.1 Μετεωρολογικές συνθήκες γεωγραφικού τόπου.....	43
2.5.2 Πλάνο, μελέτη και εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος.....	44
Κεφάλαιο 3.....	47
Ανάλυση των υπό μελέτη μεγεθών	
3.1 Εισαγωγή.....	47
3.2 Ανάλυση των υπό μελέτη μεγεθών.....	47
3.2.1 Ανάλυση δευτερογενών μεγεθών.....	47
3.2.2 Θεωρητικά αναμενόμενες τιμές φυσικών παραμέτρων.....	48
3.3 Θεωρητική ανάλυση σφάλματος	49
3.3.1 Σφάλματα πρωτογενών παραμέτρων.....	49
3.3.2 Εσωτερικοί υπολογισμοί αντιστροφών.....	49
3.3.3 Αλγεβρικός υπολογισμός δευτερογενών μεγεθών.....	50
Κεφάλαιο 4.....	53
Πειραματική διαδικασία	
4.1 Σκοπός - Αντικείμενο της παρούσης εργασίας.....	53
4.2 Ενεργειακό δυναμικό ηλιακής ακτινοβολίας.....	53

4.3 Μελέτη εξάρτησης της ενεργειακής απόδοσης συστοιχίας από την θερμοκρασία.....	54
4.4 Μελέτη και σύγκριση των type A, type B και type C ανά κλάση ακτινοβόλησης.....	57
4.4.1 Μελέτη και σύγκριση των ενεργειακών αποδόσεων συστοιχίας ανά κλάση ημερήσιας απορροφούμενης ακτινοβόλησης.....	58
4.4.2 Μελέτη και σύγκριση της αποδοτικότητας η [%] ανά κλάση ημερήσιας απορροφούμενης ακτινοβόλησης.....	62
4.5 Μελέτη και σύγκριση της μετρούμενης μέγιστης ισχύος με την ονομαστική.....	65
4.6 Μελέτη και σύγκριση του λόγου απόδοσης PR [%].....	70
4.6.1 Υπολογισμός και σύγκριση του λόγου απόδοσης Pr με βάση την μετρούμενη και την ονομαστική μέγιστη ισχύ.....	70
4.6.2 Μελέτη του λόγου απόδοσης Pr σε διαφορετικές θερμοκρασίες.....	71
4.7 Συνολική παραγωγή ενέργειας.....	73
4.8 Υπολογισμός του παράγοντα χωρητικότητας C_F και του λόγου απόδοσης Pr σε ετήσια κλίμακα.....	76
4.9 Γενική επισκόπηση διαγραμμάτων.....	77
4.10 Προσομοίωση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών με χρήση του PVsyst.....	81
4.11 Συμπεράσματα.....	85
Κεφάλαιο 5.....	89
Παρουσίαση του συστήματος παρακολούθησης Solar Log	
5.1 Εισαγωγή.....	89
5.2 Συνδεσμολογία του Solar Log.....	90
5.2.1 Σύνδεση του Solar Log με το router	91
5.3 Φόρμα εγγραφής.....	93
5.4 Διαγράμματα που αφορούν την λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος από το Solar Log.....	94

5.5 Το περιβάλλον Solar-Log WEB.....	99
Βιβλιογραφία.....	101
Παράρτημα διαγραμμάτων.....	105

Πρόλογος

Τα τελευταία χρόνια έχει εκδηλωθεί ένα πολύ μεγάλο ενδιαφέρον σε παγκόσμιο επίπεδο που αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ο λόγος είναι ότι τα αποθέματα των συμβατικών πηγών ενέργειας του πλανήτη δεν είναι σε αφθονία, αλλά και εκτός αυτού η χρήση τους επιβαρύνει το φυσικό περιβάλλον και οδηγεί σε επικίνδυνες για τον άνθρωπο συνθήκες ζωής. Υπάρχει λοιπόν άμεση ανάγκη να στραφούμε σε πιο φιλικές προς το περιβάλλον πηγές ενέργειας.

Για τους λόγους αυτούς λοιπόν και αν σκεφτούμε ότι οι ηλιόλουστες ημέρες στην Ελλάδα καλύπτουν μεγάλες περιόδους ακόμα και τον χειμώνα (π.χ. αλκυονίδες ημέρες), γίνεται αντιληπτό πως οφείλουμε να σεβαστούμε τη φύση χρησιμοποιώντας μεθόδους παραγωγής ενέργειας που είναι συμβατές με την αειφορία του φυσικού περιβάλλοντος.

Κεφάλαιο 1

Φυσικές αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων

1.1 Εισαγωγή

Τον 19^ο αιώνα σημειώθηκε μία μεγάλη βιομηχανική επανάσταση η οποία βασίστηκε αποκλειστικά και μόνο στην ενεργειακή κατανάλωση, η οποία και εικοσαπλασιάστηκε από το 1850 μέχρι σήμερα. Τα ορυκτά καύσιμα σε λίγο καιρό δεν θα επαρκούν για τη κάλυψη των αναγκών του πλανήτη διότι δεν αποτελούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εφόσον χρειάζονται εκατομμύρια χρόνια για να σχηματιστούν ενώ εξαντλούνται με πολύ ταχύτερο ρυθμό από τον ρυθμό με τον οποίο σχηματίζονται.

Εκτιμάται, πως η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων το 2007 ήταν κατά 36% πετρέλαιο, 27,4% κάρβουνο και 23% φυσικό αέριο και καλύπτουν το 86% των ενεργειακών αναγκών παγκοσμίως. Από τις υπόλοιπες πηγές ενέργειας το 6,3% προέρχεται από την υδροηλεκτρική το 8,5% από την πυρηνική και το υπόλοιπο 0,9% από τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές (γεωθερμική, ηλιακή, αιολική, ενέργεια από την παλίρροια ή τα κύματα και ενέργεια από την επεξεργασία των απορριμμάτων).

Ωστόσο, η γη συλλαμβάνει το ένα δισεκατομμυριοστό της εκπεμπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, που όμως αντιστοιχεί σε τεράστια ενεργειακή ποσότητα αν αναλογιστούμε ότι η ηλιακή ενέργεια που φτάνει στη γη σε μία εβδομάδα είναι περίπου ίση με τη συνολικά αποθηκευμένη ενέργεια όλων των συμβατικών πηγών ενέργειας.

Είναι απειροελάχιστο λοιπόν το ποσοστό των 0.9% που αντιστοιχεί στο σύνολο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ειδικά αν σκεφτούμε τις επιπτώσεις που προξενεί η αυξημένη χρήση των ορυκτών καυσίμων στο περιβάλλον. Η κύρια επιβλαβής επίδραση, είναι η αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα που έχει ως αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του πλανήτη, όπως πιστεύει η πλειονότητα των επιστημόνων που ασχολούνται με το κλίμα.

Με την καύση των ορυκτών καυσίμων απελευθερώνονται και ραδιενεργές ουσίες όπως ουράνιο και θόριο τα οποία περιέχονται σε μικρές ποσότητες στα ορυκτά καύσιμα. Τέλος η χημική βιομηχανία και κυρίως τα διυλιστήρια έχουν αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον καθώς επιβαρύνουν και την ατμόσφαιρα με επικίνδυνα αέρια αλλά και τα επίγεια ή θαλάσσια ύδατα.

Μία διέξοδος από αυτόν τον φαύλο κύκλο στον οποίο οδήγησε η αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση κατά τους δύο τελευταίους αιώνες, είναι η εκμετάλλευση των φυσικών πόρων του πλανήτη, οι οποίοι ανανεώνονται έτσι ώστε να προσφέρουν επαρκή ενέργεια για την κάλυψη ενός μεγάλου μέρους των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη.

1.2 Ημιαγωγοί

1.2.1 Εισαγωγή

Τα κρυσταλλικά στερεά διακρίνονται ανάλογα με τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

α) Αγωγοί, που είναι κυρίως τα μέταλλα αλλά και τα κράματά τους. Στους αγωγούς, φορείς του ρεύματος είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που κινούνται στο κρυσταλλικό πλέγμα και για τον λόγο αυτό τα μέταλλα παρουσιάζουν ηλεκτρική αγωγιμότητα όταν εφαρμοστεί σε αυτά ένα ηλεκτρικό πεδίο. Στα ελεύθερα ηλεκτρόνια οφείλεται και η μεταλλική λάμψη των μετάλλων.

β) Μονωτές, οι οποίοι δεν άγουν τον ηλεκτρισμό διότι τα ηλεκτρόνια τους είναι δέσμια στα άτομα που τους αποτελούν

γ) Ημιαγωγοί, των οποίων η αγωγιμότητα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως τον εμπλουτισμό τους με φορείς, τη μορφή του ηλεκτρονικού τους διαγράμματος και του βαθμού κατάληψης των ενεργειακών τους ζωνών με ηλεκτρόνια.

Τα στοιχεία της ομάδας IVA του περιοδικού συστήματος ονομάζονται ημιαγωγοί (π.χ. Si, Ge). Επίσης υπάρχουν και οι ημιαγωγοί που δημιουργούνται από τις ενώσεις στοιχείων των ομάδων τρία (III) και πέντε (V) του περιοδικού συστήματος, που καλούνται ημιαγωγοί III-V (π.χ. GaAs, InP) και ημιαγωγοί που δημιουργούνται από ενώσεις στοιχείων των ομάδων δύο (II) και έξι (VI) που καλούνται ημιαγωγοί II-VI (π.χ. ZnS).

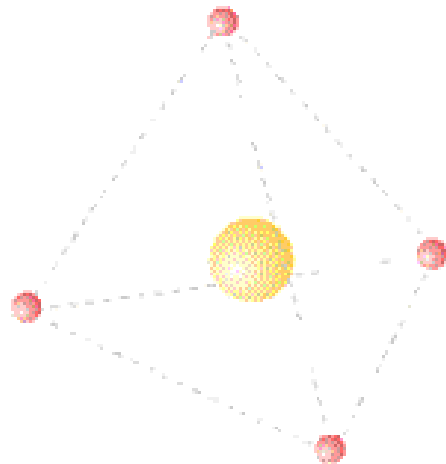
Οι λεγόμενοι εξωγενείς ημιαγωγοί δημιουργούνται με την διαδικασία του εμπλουτισμού ή ντοπαρίσματος (*doping*). Η διαδικασία αυτή συνίσταται στην εισαγωγή ενός πεντασθενούς ή ενός τρισθενούς στοιχείου στον κρύσταλλο του καθαρού ημιαγωγού. Η διαδικασία εισαγωγής γίνεται είτε χημικά, είτε με εμφύτευση ιόντων (*ion implantation*). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο έλεγχος της συγκέντρωσης των φορέων του ρεύματος, δηλαδή της αγωγιμότητας του ημιαγωγού. Η διαδικασία εμπλουτισμού δημιουργεί τους λεγόμενους ημιαγωγούς τύπου n (από το αγγλικό *negative*) όταν εισαχθούν πεντασθενή στοιχεία, όπως Φωσφόρος (P) ή Αρσενικό (As), στον κρύσταλλο ενός καθαρού ημιαγωγού. Τότε τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους του πεντασθενούς στοιχείου δημιουργούν ομοιοπολικούς δεσμούς με τα τέσσερα του ημιαγωγού (π.χ. Si) και το πέμπτο μένει ελεύθερο να κυκλοφορεί στο κρυσταλλικό πλέγμα του ημιαγωγού, “δίνοντας” έτσι έναν παραπάνω φορέα ηλεκτρικού αρνητικού φορτίου. Αν εισαχθούν προσμίξεις από ένα τρισθενές στοιχείο όπως το Βόριο (B), το Αλουμίνιο (Al) ή το Γάλλιο (Ga), τότε δημιουργούνται ημιαγωγοί τύπου p (από το αγγλικό *positive*). Στην περίπτωση αυτή, δημιουργούνται οπές με μηχανισμό ανάλογο με αυτόν που περιγράφηκε παραπάνω, αφού τώρα ένα ηλεκτρόνιο λείπει από τον τετραπλό δεσμό αφήνοντας ένα κενό.

1.2.2 Ημιαγωγοί και προσμίξεις

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται κύρια με τη χρήση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων (Φ/Β), των οποίων η λειτουργία στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την άμεση μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα κατασκευάζονται από ημιαγωγικά υλικά όπως το πυρίτιο που είναι το συνηθέστερο. Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό κύτταρο, μέρος της ακτινοβολίας διεγείρει ηλεκτρόνια τα οποία μπορούν να κινούνται σχετικά ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου υποχρεώνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς συγκεκριμένη κατεύθυνση παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα του οποίου η ισχύς καθορίζεται από τη ροή των ηλεκτρονίων και την εφαρμοζόμενη τάση στο φωτοβολταϊκό κύτταρο. Για να αυξηθεί η ροή των ελεύθερων ηλεκτρονίων προστίθενται στο καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο προσμίξεις όπως ο φώσφορος και το βόριο.

Κάθε άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια κατανομημένα σε τρεις διαφορετικές στοιβάδες. Οι δύο πρώτες είναι συμπληρωμένες με 2 και 8 άτομα αντίστοιχα. Η εξωτερική στοιβάδα περιλαμβάνει τα υπολειπόμενα 4 ηλεκτρόνια που συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου σχηματίζοντας την κρυσταλλική πυραμιδική δομή του καθαρού πυριτίου I[1].



Εικόνα 1.1 Η τετραεδρική δομή του ατόμου του Si. Οι κόκκινες σφαίρες είναι ηλεκτρόνια. Η κίτρινη ο πυρήνας.

Το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού καθώς δεν υπάρχουν ελεύθερα κινούμενα ηλεκτρόνια όπως στην περίπτωση του μεταλλικού πλέγματος.

Όταν διοχετεύεται ενέργεια στο κρυσταλλικό πυρίτιο, κάποια ηλεκτρόνια διεγείρονται, σπάζουν τους δεσμούς τους και απομακρύνονται προς γειτονικά τους άτομα δημιουργώντας διαθέσιμες θετικά φορτισμένες "οπές" στη δομή του υλικού. Οι θέσεις αυτές καταλαμβάνονται από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων και με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ροή ηλεκτρονίων μέσα στο υλικό.

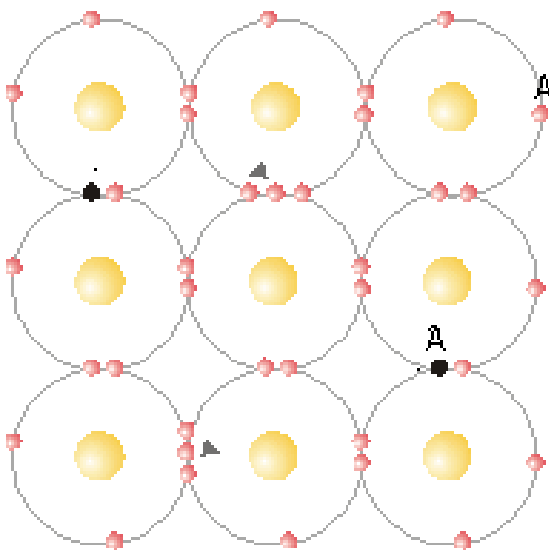
Κεφάλαιο 1 Φυσικές αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων

Ο αριθμός όμως των ηλεκτρονίων που μπορούν να κινηθούν είναι σημαντικά περιορισμένος για να χρησιμεύσει στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Για το λόγο αυτό εισάγονται ετεροάτομα στην κρυσταλλική δομή, όπως π.χ. άτομα φωσφόρου.

Η εξωτερική στοιβάδα του φωσφόρου έχει 5 ηλεκτρόνια εκ των οποίων τα 4 συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου, ενώ το πέμπτο συγκρατείται ηλεκτροστατικά από τα πρωτόνια του πυρήνα.

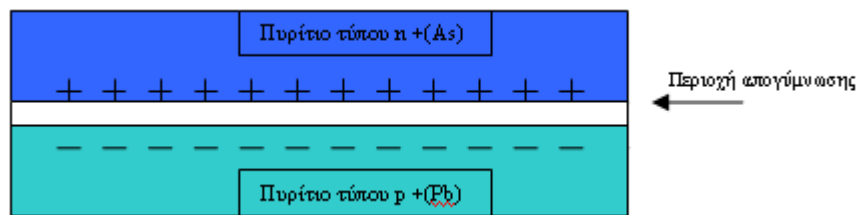
Το συγκεκριμένο ηλεκτρόνιο απαιτεί σημαντικά χαμηλότερη ενέργεια ενεργοποίησης για να κινηθεί στο κρυσταλλικό πλέγμα. Σαν αποτέλεσμα τα περισσότερα από αυτά τα ηλεκτρόνια ελευθερώνονται και γίνονται φορείς ηλεκτρικού ρεύματος που είναι πολύ περισσότεροι από αυτούς του κρυσταλλικού πυριτίου. **Η πρόσμιξη του κρυσταλλικού πυριτίου με άτομα φωσφόρου δημιουργεί ημιαγωγό τύπου n.**

Εικόνα 1.2 Όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταπηδά σε άλλο άτομο, η θέση που είχε γίνεται οπή (μαύρη σφαίρα). Αν το ηλεκτρόνιο A καταλάβει την οπή B, στη θέση A θα σχηματιστεί οπή. Η οπή B θα μετακινηθεί στη θέση A.



Αντίστοιχα για να δημιουργήσουμε έναν ημιαγωγό τύπου **p**, η αλλιώς θετικά φορτισμένο κρύσταλλο πυριτίου, χρειάζεται να γίνει πρόσμιξη στον κρύσταλλο κάποιου υλικού όπως το **βόριο (B)** που έχει 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα I[1].

Φέρνοντας σε επαφή τους ημιαγωγούς τύπου n και p σχηματίζεται ηλεκτρικό πεδίο. Τα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου n κινούνται προς τις κενές θέσεις του πυριτίου τύπου p για να τις καλύψουν. Στην ένωση των δύο υλικών επιτυγχάνεται ισορροπία και δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις δύο πλευρές. Το ηλεκτρικό πεδίο λειτουργεί σαν σύστημα ηλεκτρικά φορτισμένων παράλληλων πλακών επιτρέποντας τα ηλεκτρόνια να περάσουν από το πυρίτιο τύπου p στο n αλλά όχι αντίστροφα.

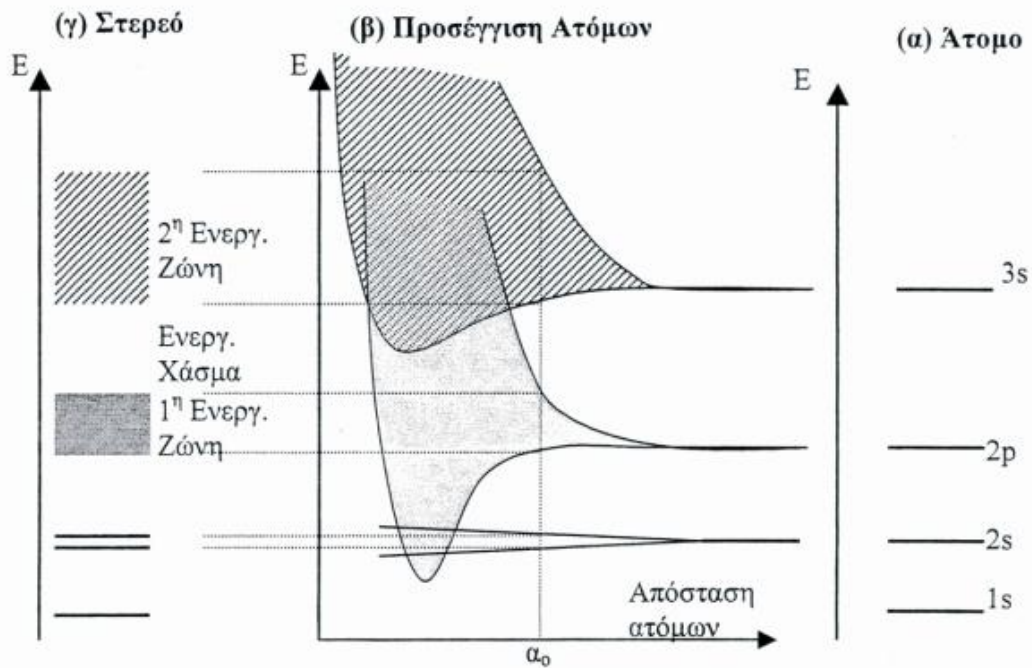


Εικόνα 1.3 Επαφή Ηλεκτρικού πεδίου

Όταν φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας, κατάλληλου μήκους κύματος, προσπίπτουν σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο διεγείρουν ηλεκτρόνια και τα ελευθερώνουν δημιουργώντας παράλληλα αντίστοιχες οπές. Κάθε φωτόνιο με αρκετή ενέργεια θα ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο και θα δημιουργήσει μια οπή. Αν αυτό συμβεί κοντά στο ηλεκτρικό πεδίο ή αν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή βρεθούν κοντά στην ένωση p-n ημιαγωγών, το πεδίο θα εξαναγκάσει το ηλεκτρόνιο να πάει στον ημιαγωγό n και θα οδηγήσει την οπή στον ημιαγωγό τύπου p. Αυτό προκαλεί μεγαλύτερη ανισορροπία στην ηλεκτρική ουδετερότητα και αν χρησιμοποιηθεί μία εξωτερική αγώγιμη οδός τα ηλεκτρόνια θα περάσουν μέσα από αυτή για να πάνε στην αρχική τους θέση από όπου το ηλεκτρικό πεδίο τα απομάκρυνε. **Η ροή αυτή των ηλεκτρονίων δημιουργεί το ρεύμα.** Στο κεφάλαιο 1.3 θα αναλυθεί σε βάθος το φωτοβολταϊκό φαινόμενο $I[1]$.

1.2.3 Φυσική προσέγγιση των ημιαγωγών

Το ενεργειακό διάγραμμα των ελεύθερων ατόμων σε έναν ημιαγωγό αποτελείται από τις διακριτές ενεργειακές στάθμες της εικόνας 1.6. Στην 3η στήλη βλέπουμε τις ενεργειακές στάθμες στις οποίες μπορεί να εντοπιστεί κάποιο ηλεκτρόνιο όταν το άτομο δεν βρίσκεται εντός του ηλεκτροστατικού πεδίου κάποιου άλλου ατόμου. Όταν όμως τα άτομα πλησιάσουν αρκετά, ώστε να σχηματίσουν μια στερεά δομή, τα εξωτερικά ηλεκτρόνια των ατόμων μπορούν να εντοπισθούν σε ένα πλήθος ενεργειακών σταθμών όπως βλέπουμε στην 2η στήλη.



Εικόνα 1.4 Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών στην περίπτωση ατόμου και στερεού

Οι διακριτές ενεργειακές καταστάσεις των εξωτερικών ηλεκτρονίων σθένους διασπώνται λοιπόν σε ένα πλήθος ενεργειακών σταθμών, με αποτέλεσμα οι κυματοσυναρτήσεις των ηλεκτρονίων σθένους να υφίστανται ισχυρή παραμόρφωση. Ο αριθμός των διακριτών ενεργειακών καταστάσεων καθορίζεται από τον αριθμό των ηλεκτρονίων σθένους σε ένα στερεό που είναι της τάξης του αριθμού των ατόμων του δηλαδή του αριθμού Avogadro. Επειδή ο αριθμός αυτός είναι πάρα πολύ μεγάλος, οι ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων στα στερεά είναι τόσο κοντά η μία στην άλλη, ώστε το ενεργειακό διάγραμμα να μην έχει πλέον διακριτό χαρακτήρα αλλά να παίρνει τη μορφή ενεργειακών ζωνών. Στην εικόνα 1.6β μπορούμε να παρατηρήσουμε πως, όσο μικρότερη είναι η απόσταση που πλησιάζουν τα άτομα, τόσο πιο έντονη είναι η παραμόρφωση στις κυματοσυναρτήσεις των ηλεκτρονίων σθένους τα οποία παύουν να είναι εντοπισμένα στα επιμέρους άτομα αλλά εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις μέσα στο κρύσταλλο.

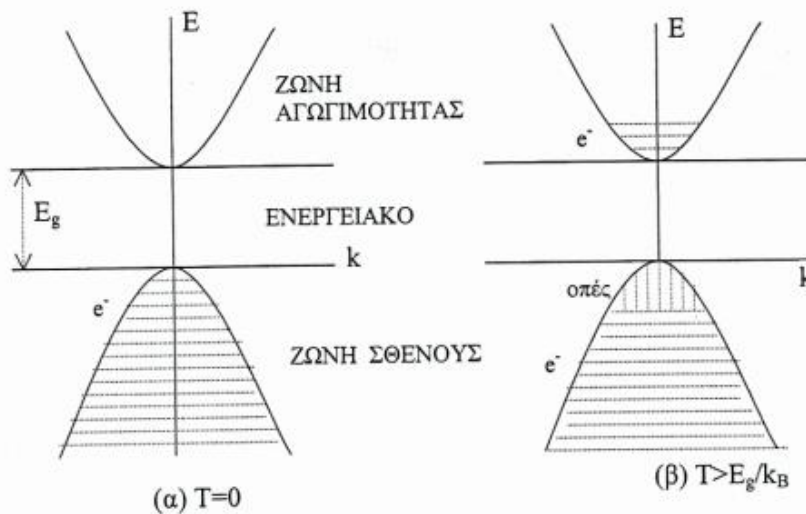
Στην 1η στήλη βλέπουμε την τελική μορφή που παίρνει το ενεργειακό διάγραμμα του στερεού και προσδιορίζεται από την απόσταση των ατόμων στη κρυσταλλική δομή. Αξίζει να παρατηρήσουμε πως τα ηλεκτρόνια χαμηλών σταθμών ($1s, 2s$) και άρα χαμηλών ενεργειών δεν επηρεάζονται σημαντικά και παραμένουν σχετικά διακριτά.

Μεταξύ των ενεργειακών ζωνών υπάρχουν απαγορευμένες περιοχές στις οποίες δεν υπάρχουν επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες. Αυτές οι περιοχές ονομάζονται **ενεργειακά χάσματα**.

1.2.4 Εξάρτηση ενεργειακού χάσματος από θερμοκρασία

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας στο ενεργειακό χάσμα και στις επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες. Στην εικόνα 1.7, στην 1η στήλη βλέπουμε την ζώνη σθένους και αγωγιμότητας ενός ημιαγωγού σε θερμοκρασία απολύτου μηδενός $T = 0 K$.

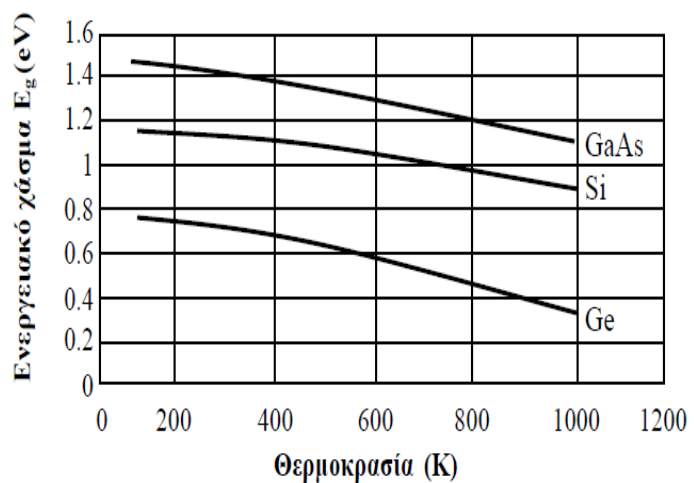
Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι τα ηλεκτρόνια σθένους συμπληρώνουν πλήρως την ζώνη σθένους, αλλά δεν εντοπίζονται καθόλου στην ζώνη αγωγιμότητας που σημαίνει ότι δεν συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα.



Εικόνα 1.5 Ενεργειακές ζώνες για διαφορετικές θερμοκρασίες

Εικόνα 1.6 Μεταβολή ενεργειακού χάσματος ημιαγωγών με την θερμοκρασία

Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, τα ηλεκτρόνια αποκτούν θερμική ενέργεια, η οποία όταν γίνει μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα τα ηλεκτρόνια διεγείρονται στη ζώνη αγωγιμότητας όπως φαίνεται στην 2η στήλη. Τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αυτή είναι κατά βάση αποδεσμευμένα από τα επιμέρους άτομα και κινούνται ελεύθερα στο κρύσταλλο. Κάθε ηλεκτρόνιο που μεταπίπτει στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνει στη θέση του μία οπή.



Το ενεργειακό χάσμα λοιπόν στους ημιαγωγούς εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Όταν αυτή αυξάνεται το χάσμα μικραίνει. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα αν σκεφθούμε ότι, λόγω της θερμικής ενέργειας, αυξάνει το πλάτος των ατομικών ταλαντώσεων και ως εκ τούτου, αυξάνει η απόσταση μεταξύ των ατόμων. Μια αύξηση των διατομικών αποστάσεων, ελαττώνει το δυναμικό που βλέπουν τα ηλεκτρόνια του κρυσταλλικού στερεού και αυτό με τη σειρά του μικραίνει το ενεργειακό χάσμα.

1.3 Δίοδος PN

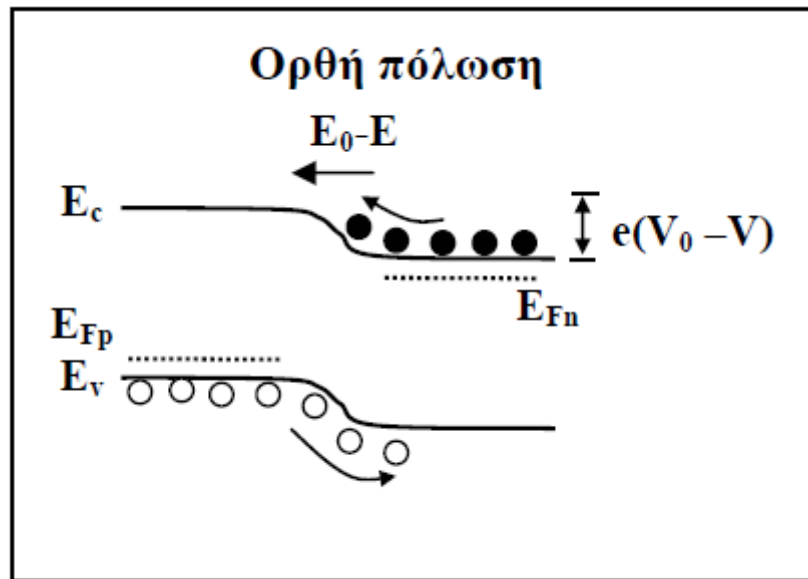
1.3.1 Εισαγωγή

Μια δίοδος είναι με απλά λόγια μία ένωση p-n, η οποία δημιουργείται από μια επαφή ανάμεσα σε έναν ημιαγωγό τύπου p και έναν ημιαγωγό τύπου n. Το βασικό χαρακτηριστικό της διόδου το οποίο την έχει κάνει τόσο δημοφιλή σε όλη την τεχνολογία είναι ότι η ένωση που κατασκευάζεται έχει ανορθωτικές ιδιότητες καθώς το ρεύμα ρέει προς μία κατεύθυνση με ευκολία ενώ αντίθετα, στην άλλη κατεύθυνση περιορίζεται.

Όταν εφαρμόσουμε τάση σε μία ένωση p-n, τότε παύουν να είναι ευθυγραμμισμένες οι στάθμες Fermi των δύο υλικών και για αυτό το λόγο μεγαλώνουν ή μικραίνουν οι πιθανότητες να περάσουν ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό τύπου n στον ημιαγωγό τύπου p.

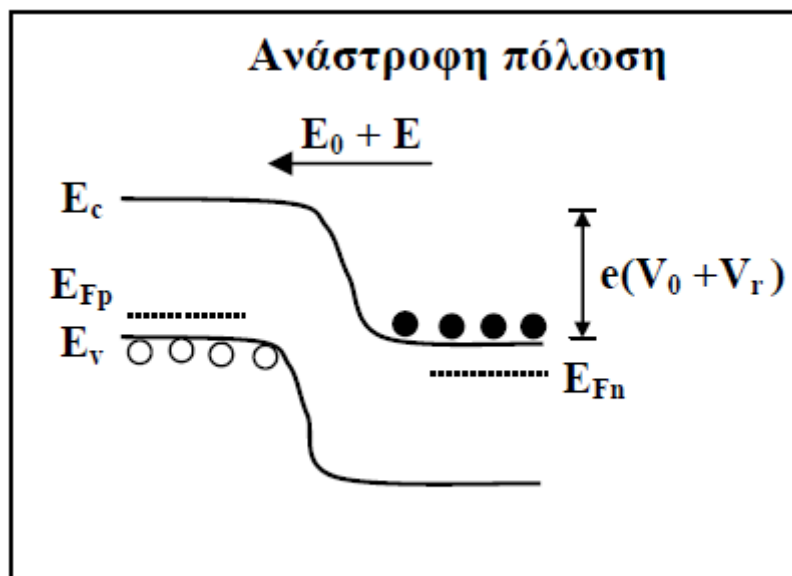
Αυτό το φαινόμενο μας επιτρέπει να ελέγξουμε την κατεύθυνση του ρεύματος ή μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε τη δίοδο ως διακόπτη και άλλες εφαρμογές.

Όταν **πολωθεί ορθά** η δίοδος, δηλαδή όταν συνδέσουμε τον αρνητικό ακροδέκτη της πηγής στον ημιαγωγό τύπου n, η αρνητική πολικότητα της παροχής θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του φράγματος δυναμικού V_o κατά V . (δηλαδή η ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού τύπου n θα πλησιάσει στη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού τύπου p και θα μπορεί να μεταβεί το ηλεκτρόνιο στην άλλη περιοχή με μεγαλύτερη ευκολία) [2].



Εικόνα 1.7 Ενεργειακό διάγραμμα ορθής πόλωσης

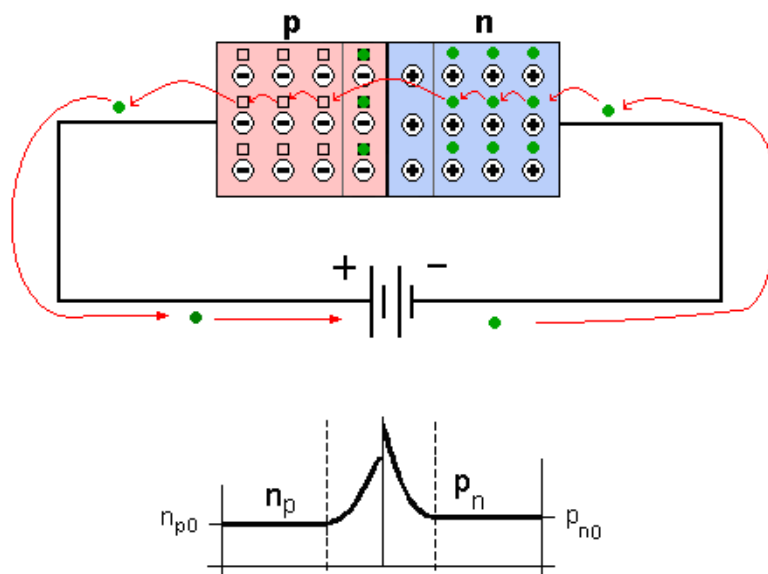
Αντίθετα, όταν η ένωση πολωθεί ανάστροφα ο αρνητικός πόλος έλκει τις οπές της p περιοχής και τις απομακρύνει από την περιοχή φορτίου χώρου και ο θετικός πόλος έλκει τα ηλεκτρόνια δημιουργώντας περισσότερους απογυμνωμένους θετικούς δότες. Στη περίπτωση αυτή η ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού τύπου n και του ημιαγωγού τύπου p θα απομακρυνθούν με αποτέλεσμα το ηλεκτρόνιο να μην μπορεί να μεταβεί στην άλλη περιοχή με ευκολία [2].



Εικόνα 1.8 Ενεργειακό διάγραμμα ανάστροφης πόλωσης

Κεφάλαιο 1 Φυσικές αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων

Λόγω λοιπόν της επαφής αυτής των δύο διαφορετικών υλικών έχουμε μετακίνηση φορέων από τη μία περιοχή στην άλλη. Θα υποθέσουμε τώρα ότι ανάμεσα στην περιοχή p και την περιοχή n υπάρχει απότομη μετάβαση. Το γεγονός αυτό ονομάζεται μεταλλουργική ένωση. Λόγω της βαθμίδας στη συγκέντρωση των οπών ανάμεσα στην πλευρά p, όπου $p = p_{p0}$, και την πλευρά n, όπου $p = p_{n0}$, οι οπές διαχέονται προς τα δεξιά. Αντίστοιχα, η κλίση της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων ωθεί τα ηλεκτρόνια να διαχυθούν προς τα αριστερά. Οι οπές που διαχέονται και εισέρχονται στην περιοχή n επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια της n περιοχής που βρίσκονται κοντά στην ένωση. Αντίστοιχα, τα ηλεκτρόνια που διαχέονται και εισέρχονται στην p περιοχή επανασυνδέονται με τις οπές της p περιοχής που βρίσκονται κοντά στην ένωση. Τα ηλεκτρόνια που εγκαταλείπουν την n περιοχή κοντά στην ένωση δημιουργούν μια περιοχή με θετικά φορτισμένα ιόντα δοτών, απογυμνωμένα από ηλεκτρόνια, με συγκέντρωση N_d . Αντίστοιχα, οι οπές που εγκαταλείπουν την p περιοχή κοντά στην ένωση, δημιουργούν μια περιοχή με αρνητικά φορτισμένα ιόντα αποδεκτών, με συγκέντρωση N_a .



Εικόνα 1.9 Περιοχή απογύμνωσης

Υπάρχει, λοιπόν, γύρω από την μεταλλουργική ένωση, μια περιοχή φορτίου χώρου η οποία καλείται και περιοχή απογύμνωσης. Η κατάσταση αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου επιτευχθεί κατάσταση “ισορροπίας”, στην οποία οι οπές που διαχέονται προς τα δεξιά εξισορροπούνται από τις οπές που ολισθαίνουν προς τα αριστερά λόγω του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου E_o .

Ως αποτέλεσμα αυτών, η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται τόσο στην p πλευρά όσο και στην n πλευρά αντίστοιχα, διευρύνοντας την περιοχή απογύμνωσης. Έτσι, η συγκέντρωση των οπών, ακριβώς έξω από την περιοχή φορτίου χώρου είναι, λόγω του νόμου της επαφής, σχεδόν μηδέν, ενώ η συγκέντρωση των οπών στο κύριο σώμα του ημιαγωγού (ή κοντά στον αρνητικό πόλο) ισούται με τη συγκέντρωση ισορροπίας που είναι πολύ μικρή. Υπάρχει, λοιπόν, μια μικρή βαθμίδα συγκέντρωσης και επομένως ένα ασθενές ρεύμα διάχυσης των οπών προς την περιοχή φορτίου χώρου. Υπάρχει επίσης και ένα αντίστοιχα ασθενές ρεύμα λόγω διάχυσης των ηλεκτρονίων από το κύριο σώμα της p περιοχής προς την περιοχή φορτίου χώρου, μέσα στην οποία οι φορείς ολισθαίνουν λόγω του πεδίου $I[2]$.

Αξίζει να τονίσω πως στις εφαρμογές της διόδου όταν αυτή τοποθετείται στα διάφορα κυκλώματα πρέπει να έρχεται σε επαφή με μέταλλα τα οποία έχουν μικρότερο έργο εξόδου από τον ημιαγωγό. Τότε έχουμε πολλά ενεργητικά ηλεκτρόνια στο μέταλλο τα οποία θα μεταβούν στην ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού αναζητώντας χαμηλότερα ενεργειακά επίπεδα λόγω του φαινομένου σήραγγας. Η επαφή αυτή λέγεται ωμική και με τον τρόπο αυτό δεν έχουμε απώλεια ρεύματος (πχ λόγω θερμότητας στο μέταλλο).

Η σχέση ανάμεσα στο ρεύμα της διόδου και την εφαρμοζόμενη τάση αποτελεί την χαρακτηριστική εξίσωση της διόδου :

$$I(V) = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2)$$

όπου I_s το ρεύμα κόρου, q το φορτίου του ηλεκτρονίου, V η τάση πόλωσης, k η σταθερά του Boltzmann και T η θερμοκρασία $I[4]$.

1.3.2 Αντίσταση διόδου και συντελεστής ιδεατότητας

Αν θέλουμε να κάνουμε μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση της συμπεριφοράς της διόδου πρέπει να λάβουμε υπ όψιν και την αντίσταση της διόδου, R_s . Τροποποιούμε τη σχέση (2) ως εξής:

$$I(V) = I_s \left(\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{kT}\right) - 1 \right) \quad (3)$$

Μελετώντας τη παραπάνω σχέση μπορούμε να δούμε ότι η αύξηση της τιμής του ρεύματος περιορίζεται από την παρουσία του όρου IR_s στον εκθέτη. Σε μικρές τάσεις, όπου το ρεύμα είναι ακόμα μικρό, η συμπεριφορά της διόδου προσεγγίζεται ικανοποιητικά από την χαρακτηριστική της ιδανικής. Καθώς ανεβαίνουμε στις μεγαλύτερες τάσεις άρα και ρεύματα η επίδραση του όρου γίνεται πιο έντονη κάτι το οποίο περιορίζει την περαιτέρω αύξηση του ρεύματος.

Η παραπάνω σχέση παραβλέπει το γεγονός ότι φαινόμενα γένεσης και επανασύνδεσης φορέων μπορεί να εμφανιστούν και με διαφορετικούς τρόπους εκτός από παγίδες που ενδέχεται να υπάρχουν στο σώμα του ημιαγωγού ή από μεταβάσεις μεταξύ ζωνών. Αυτό εισάγει μια απόκλιση από την ιδανική συμπεριφορά, η οποία μπορεί να περιγραφεί, σε πρώτη προσέγγιση, από την εισαγωγή του συντελεστή ιδεατότητας, η . Η τιμή του συντελεστή κυμαίνεται από 1 (ιδανική δίοδος, επικράτηση διάχυσης) ως 2 (η επανασύνδεση επικρατεί της διάχυσης). Έτσι η σχέση τάσης - ρεύματος μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση :

$$I(V) = I_s \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{\eta k T} \right) - 1 \right) \quad (4)$$

1.4 Αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων

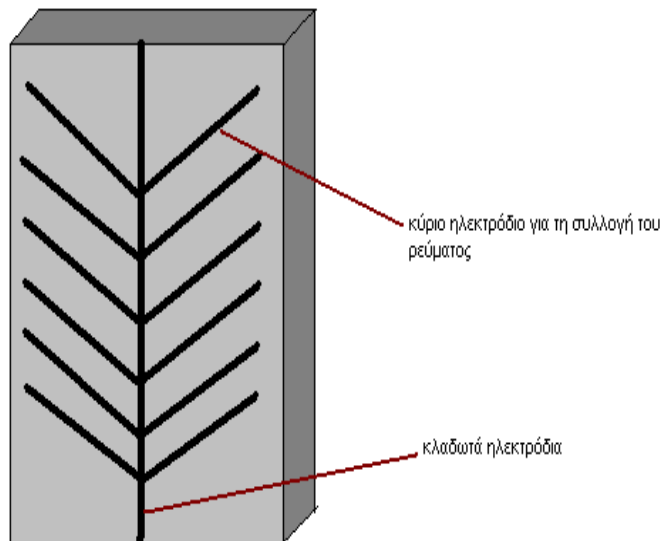
1.4.1 Εισαγωγή

Όπως έχουμε πει υπάρχουν δύο παράγοντες δυνάμεων στην δίοδο:

1. **ο παράγοντας της διάχυσης**, που οφείλεται στις συγκεντρώσεις των οπών και των ηλεκτρονίων και ο οποίος διαχέει τις οπές στην περιοχή n και τα ηλεκτρόνια στην περιοχή p
2. **ο παράγοντας του ηλεκτρικού πεδίου**, που προκαλεί την ολίσθηση των οπών στην p -περιοχή και των ηλεκτρονίων στην n περιοχή, δηλαδή αντισιθεται στον παράγοντα της διάχυσης.

Στη παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα ενός ηλιακού κυττάρου.

Τα ηλεκτρόδια που είναι συνδεδεμένα στην n περιοχή πρέπει να επιτρέπουν στην ακτινοβολία να φτάνει μέχρι τη διάταξη διατηρώντας όμως χαμηλή εν σειρά αντίσταση.



Αυτή η χαμηλή αντίσταση γίνεται εφικτή με την εναπόθεση ηλεκτροδίων σε μία κλαδωτή διάταξη πάνω στην επιφάνεια n , όπως βλέπουμε στην εικόνα 1.12. Στην επιφάνεια τοποθετείται μία λεπτή αντανάκλαστική επικάλυψη χάρη στην οποία μειώνεται η ανάκλαση και αυξάνεται η ακτινοβολία που φτάνει στην διάταξη.

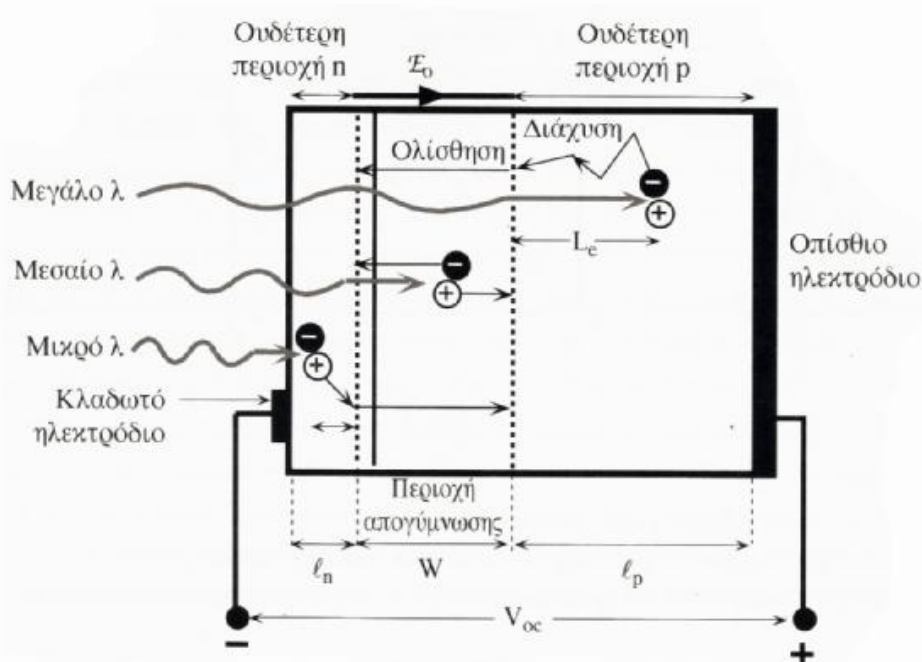
Εικόνα 1.10 Διάταξη ηλεκτροδίων συλλογής φωτορεύματος

1.4.2 Δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος

Θεωρούμε μία ένωση pn με πολύ λεπτή και έντονα νοθευμένη περιοχή n . Η ακτινοβόληση γίνεται από την πλευρά της λεπτής n - περιοχής. Η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται κατά κύριο λόγο στην περιοχή p .

Αφού η n περιοχή είναι πάρα πολύ λεπτή τα πιο πολλά φωτόνια απορροφώνται εντός της περιοχής απογύμνωσης και της ουδέτερης p περιοχής και έτσι δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων οπών (με το μηχανισμό που έχει περιγραφεί παραπάνω) τα οποία διαχωρίζονται αμέσως λόγω της επίδρασης του ηλεκτρικού πεδίου E_0 .

Το ηλεκτρόνιο ολισθαίνει και φθάνει στην n περιοχή καθιστώντας την αρνητική κατά ένα ποσό φορτίου $-e$, ενώ η οπή ολισθαίνει και φθάνει στην p περιοχή καθιστώντας την θετικά φορτισμένη.



Εικόνα 1.11 Αρχή λειτουργίας ηλιακού κύτταρου

Έτσι δημιουργείται μία τάση ανοιχτού κυκλώματος ανάμεσα στους ακροδέκτες της διάταξης και η p περιοχή είναι θετικά φορτισμένη σε σχέση με την n περιοχή. Αν συνδέσουμε και ένα εξωτερικό φορτίο τότε τα επιπλέον ηλεκτρόνια που έχουν καταφθάσει στην n περιοχή μπορούν, καταναλώνοντας έργο, να μετακινηθούν διαμέσου του εξωτερικού κυκλώματος και να φθάσουν στην p περιοχή, όπου επανασυνδέονται με τις επιπλέον οπές που βρίσκονται εκεί.

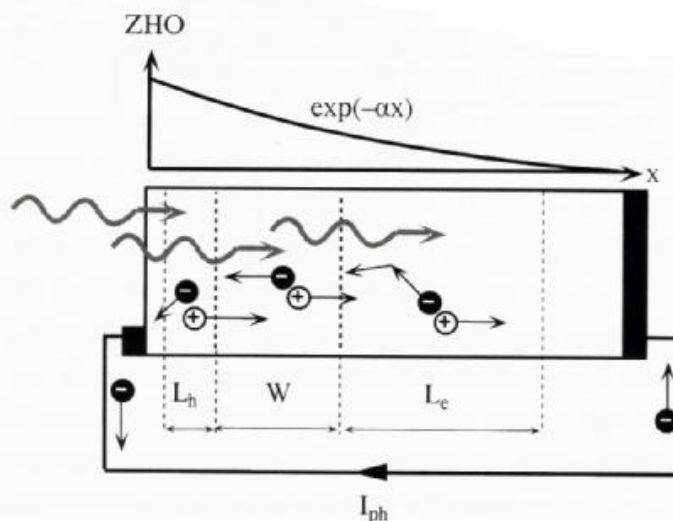
Ανάλογα με το μήκος κύματος των απορροφημένων φωτονίων, τα ζεύγη ηλεκτρονίων οπών δημιουργούνται στην περιοχή n (αν το μήκος κύματος είναι μικρό) ή στη περιοχή p (αν το μήκος κύματος είναι μεγάλο). Θα εξεταστούν οι δύο περιπτώσεις:

- Για μεγάλα μήκη κύματος, όπου τα ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών δημιουργούνται στην p περιοχή, αν η απόσταση δημιουργίας του ζεύγους από την περιοχή απογύμνωσης είναι μεγαλύτερη του μήκους διάχυσης (των ηλεκτρονίων) αυτά χάνονται λόγω επανασύνδεσης. Διαφορετικά, τα ηλεκτρόνια μπορούν να φτάσουν μέχρι και το στρώμα απογύμνωσης όπου και σαρώνονται στην n περιοχή. Για το λόγο αυτό πρέπει να εξασφαλίζουμε ότι το μήκος διάχυσης είναι όσον το δυνατό μεγαλύτερο. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο επιλέγουμε την πλευρά αυτή της ένωσης να είναι τύπου p και επομένως να έχει φορείς μειονότητας ηλεκτρόνια, τα οποία έχουν μεγαλύτερο μήκος διάχυσης από τις οπές.

- Για μικρότερα μήκη κύματος, όπου τα ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών δημιουργούνται στην n περιοχή, αν η απόσταση δημιουργίας του ζεύγους από την περιοχή απογύμνωσης είναι μεγαλύτερη του μήκους διάχυσης των οπών, πάλι χάνονται λόγω επανασύνδεσης. Οι οπές όμως που δημιουργούνται εντός απόστασης μικρότερης του μήκους διάχυσης (των οπών), αυτά μπορούν να φτάσουν μέχρι και το στρώμα απογύμνωσης όπου και σαρώνονται στην p περιοχή.

Εδώ, φαίνεται και η σημασία ύπαρξης του ηλεκτρικού πεδίου, αφού χωρίς αυτό δεν μπορούν να διαχωριστούν τα ζεύγη ηλεκτρονίων - οπών και να συσσωρευτούν επιπλέον ηλεκτρόνια στην n περιοχή και επιπλέον οπές στην p περιοχή δίνοντας έτσι επιπλέον φορτίο στις περιοχές αυτές.

Η μέση απόσταση στην οποία διαχέεται το ηλεκτρόνιο στην περιοχή p εξαρτάται από τον χρόνο επανασύνδεσης τ_e και από τον συντελεστή διάχυσης του ηλεκτρονίου στην p περιοχή D_e . Το μήκος διάχυσης του ηλεκτρονίου στην περιοχή p ορίζεται ως $L_e = \sqrt{\tau_e D_e}$. Και αντίστοιχα το μήκος διάχυσης της οπής στην περιοχή n ορίζεται ως $L_h = \sqrt{D_h \tau_h}$. Έτσι μόνο τα φωτοδημιουργούμενα ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών που βρίσκονται σε απόσταση μήκους διάχυσης L_e και L_h από το στρώμα απογύμνωσης συνεισφέρουν στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Επομένως η φωτοδιέγερση των ζευγών ηλεκτρονίων – οπών που συνεισφέρει στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο λαμβάνει χώρα στη περιοχή μήκους $L_h + L_e + W$, όπου W η περιοχή απογύμνωσης.



Εικόνα 1.12 Παραγωγή φωτορρέυματος

Αν οι ακροδέκτες της διάταξης είναι βραχυκυκλωμένοι όπως στην παραπάνω εικόνα, τότε τα επιπλέον ηλεκτρόνια της n περιοχής μπορούν να ρεύσουν μέσω του

Κεφάλαιο 1 Φυσικές αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων

εξωτερικού κυκλώματος και να εξουδετερώσουν τις οπές στη p περιοχή. Το ρεύμα που οφείλεται στη ροή των φωτοδιεγερμένων φορέων ονομάζεται φωτόρρευμα.

Για την πυκνότητα του φωτορρέυματος, ισχύει ικανοποιητικά η σχέση:

$$I_{\varphi} = e g (L_e + L_h) \quad (5)$$

όπου e είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, g είναι ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών φορέων από τα φωτόνια της ακτινοβολίας (πλήθος ζευγών ηλεκτρονίων-οπών ανά μονάδα χρόνου και μονάδα όγκου του ημιαγωγού), και L_e , L_h είναι τα μέσα μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα.

Προκειμένου να υπολογίσουμε το φωτόρρευμα, ένα μέγεθος που θα μας απασχολήσει είναι η φασματική απόκριση S (ή απόδοση συλλογής ή κβαντική απόδοση), που ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, σε σχέση με τη φωτονική ροή Φ , δηλαδή με το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου.

Για ακτινοβολία μήκους κύματος λ , η φασματική απόκριση $S(\lambda)$ θα είναι :

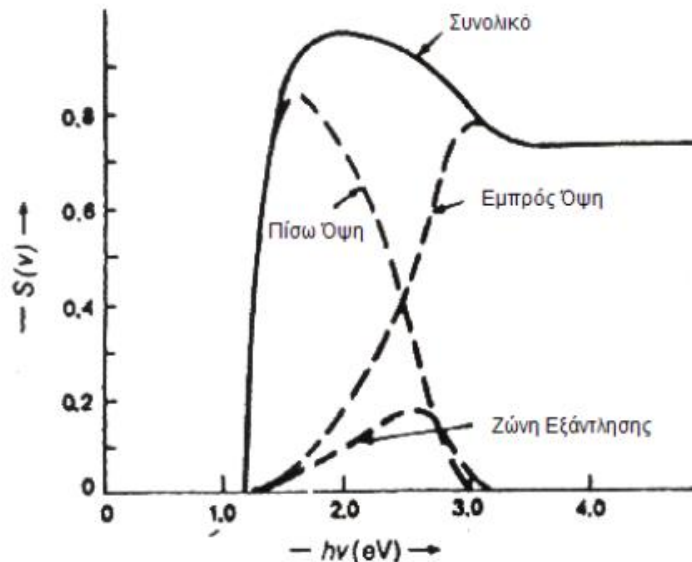
$$S(\lambda) = I_{\varphi}(\lambda) / e\Phi(\lambda) \quad (6)$$

όπου $\Phi(\lambda)$ είναι το πλήθος των φωτονίων με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από λ μέχρι $\lambda + d\lambda$, και επομένως το συνολικό φωτόρρευμα του στοιχείου, όταν δέχεται πολυχρωματική ακτινοβολία, θα είναι :

$$I_{\varphi} = e \int_0^{\lambda} S(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

Η τιμή της φασματικής απόκρισης, και συνεπώς του φωτορρέυματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, εξαρτάται από πολλούς κατασκευαστικούς παράγοντες, όπως ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου, ο συντελεστής απορρόφησης, το πάχος του ημιαγωγού και το πλήθος των επανασυνδέσεων των

φορέων. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η εξάρτηση της φασματικής απόκρισης από την ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων.



Εικόνα 1.13 Η μεταβολή της φασματικής απόκρισης $S(\lambda)$ συναρτήσει της ενέργειας των φωτονίων της ακτινοβολίας, στις 3 περιοχές ενός φωτοβολταϊκού ηλιακού στοιχείου πυριτίου

1.4.3 Ανοιχτό κύκλωμα

Υπό συνθήκες στάσιμης κατάστασης, δεν είναι δυνατό να υπάρξει ρεύμα όταν το ηλιακό κύτταρο είναι ανοιχτοκυκλωμένο. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα εντός της διάταξης που οφείλεται στη ροή των φωτοδιεγερμένων φορέων εξισορροπείται από τη ροή των φορέων προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτοί οι τελευταίοι φορείς είναι φορείς μειονότητας που εγχέονται λόγω της φωτοβολταϊκής τάσης της ένωσης, της τάσης δηλαδή που υπάρχει σε κάθε δίοδο.

Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος λοιπόν, θα αποκατασταθεί μια ισορροπία όταν η τάση που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου θα προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα. Δηλαδή, σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα ισχύει η σχέση :

$$I_{\varphi} = I_0[\exp(eV/\gamma kT)-1] \quad (10)$$

Κεφάλαιο 1 Φυσικές αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων

από την οποία βρίσκουμε ότι η τιμή τάσης ανοιχτού κυκλώματος του στοιχείου V_{oc} (open circuit Voltage) θα είναι:

$$V_{oc} = (\gamma kT/e) \ln[(I_\phi/I_0) - 1] \quad (11)$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η τιμή του I_ϕ είναι πολύ μεγαλύτερη από το I_0 και επομένως η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί στην:

$$V_{oc} = (\gamma kT/e) \ln(I_\phi/I_0) \quad (12)$$

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

Στην άλλη ακραία περίπτωση, δηλαδή σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου το ρεύμα I_{sc} (short-circuit current) δηλαδή το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα ισούται με το παραγόμενο φωτόρρευμα :

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

Όταν όμως το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου κλείσει διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης R_L (Load resistance), το ρεύμα θα πάρει μια μικρότερη τιμή I_L που βρίσκεται με την λύση της εξίσωσης:

$$I_L = I_\phi - I_0 [\exp (eR_L I_L / \gamma kT) - 1] \quad (13)$$

1.4.4 Φαινόμενα απωλειών ενέργειας

Το κρυσταλλικό πυρίτιο έχει ενεργειακό χάσμα 1.12 eV [12] το οποίο αντιστοιχεί σε μήκος κύματος κατωφλίου 1.10 μm . Η ενέργεια που προσπίπτει και αντιστοιχεί σε μήκος κύματος μεγαλύτερο των 1.12 eV χάνεται. Η ενέργεια αυτή φθάνει μέχρι και το 25% [12].

Ο κυριότερος λόγος όμως, για τον οποίο περιορίζεται η απόδοση είναι ότι τα φωτόνια υψηλής ενέργειας απορροφώνται στην επιφανειακή περιοχή του μετάλλου και χάνονται λόγω επανασύνδεσης στην περιοχή αυτή. Υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση κέντρων επανασύνδεσης στις κρυσταλλικές επιφάνειες, οι οποίες διευκολύνουν την επανασύνδεση των ζευγών ηλεκτρονίων – οπών. Οι απώλειες που οφείλονται στην επανασύνδεση των ζευγών ηλεκτρονίων – οπών κοντά στην επιφάνεια είναι μέχρι 40% B[1].

Ο συνδυασμός αυτών των δύο μηχανισμών απώλειας μειώνει την απόδοση μέχρι και 45% B[1]. Αν λάβουμε υπ' όψη και το γεγονός ότι η αντι-ανακλαστική επιφάνεια δεν είναι τέλεια, τότε η απόδοση μειώνεται κατά ένα παράγοντα 0.8 – 0.9 B[1]. Αν συνυπολογίσουμε τώρα και τους περιορισμούς στην απόδοση λόγω της ίδιας της φωτοβολταϊκής δράσης (που θα αναφερθεί παρακάτω), τότε το άνω όριο της απόδοσης μιας φωτοβολταϊκής διάταξης που χρησιμοποιεί μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, είναι σε θερμοκρασία δωματίου, περίπου 24 – 26% B[1].

1.4.5 Ο συντελεστής πλήρωσης (*fill factor*)

Η πρακτικά μέγιστη ηλεκτρική ισχύς της ηλιακής κυψέλης δίνεται από τη σχέση:

$$P_m = I_m V_m \quad (15)$$

Η θεωρητικά μέγιστη ισχύς P_m είναι:

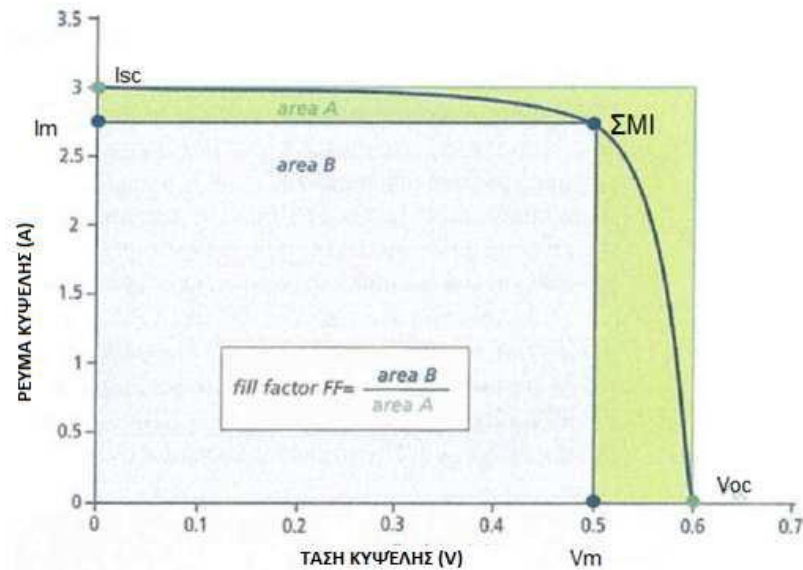
$$P_m = I_{sc} V_{oc}$$

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος $P_m = I_m V_m$ προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος $I_{sc} V_{oc}$ ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF (*fill factor*):

$$FF = I_m V_m / I_{sc} V_{oc} \quad (16)$$

Κεφάλαιο 1 Φυσικές αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων

Στο παρακάτω διάγραμμα, ο FF δίνεται από το λόγο του εμβαδού του μέγιστου ορθογωνίου που μπορεί να εγγραφεί στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V του στοιχείου, προς το εμβαδόν που ορίζεται από τις τιμές I_{sc} και V_{oc} .



Εικόνα 1.14 Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης ρεύματος

1.4.6 Συντελεστής απόδοσης στοιχείων $\eta\%$

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης ορίζεται ως :

$$\text{ισχύς εξόδου} / \text{ισχύς εισόδου}$$

ή διαφορετικά:

$$n = \frac{P_m}{AG} = \frac{I_m V_m}{AG} = FF \frac{I_{sc} V_{oc}}{AG} \quad (17)$$

όπου G είναι η ένταση του ακτινοβολισμού που δέχεται η επιφάνεια του Φ/B στοιχείου, και A το εμβαδό του κυττάρου. Όπως βλέπουμε, για την πραγματοποίηση αυξημένων αποδόσεων, επιδιώκεται οι τιμές των FF , I_{sc} και V_{oc} να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες. Επίσης είναι φανερό ότι οι παράμετροι FF , I_{sc} και V_{oc} είναι τα κυριότερα μεγέθη για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους.

Μία άλλη σχέση που συνδέει τον συντελεστή απόδοσης με το ενεργειακό χάσμα είναι η ακόλουθη:

$$n = \Phi(E_g) V_m / \Phi E_\mu \quad (18)$$

όπου $\Phi(E_g)$ είναι η ροή των φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, Φ είναι η συνολική φωτονική ροή που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο και E_μ είναι η μέση ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας.

Στην ηλιακή ακτινοβολία, περίπου τα 2/3 των φωτονίων έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου (1.12eV). Επίσης, η V_m των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου ίση με το 1/3 της E_μ της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως βρίσκουμε πρόχειρα ότι η θεωρητική απόδοση των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου $n = 2/3 \cdot 1/3 = 22\%$.

1.4.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Επειδή η αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι μία παράμετρος που εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες όπως η αύξηση της θερμοκρασίας του Φ/Β στοιχείου, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ο ημιαγωγός από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο ο οποίος πρέπει να χαρακτηρίζεται από μεγάλη μέση διάρκεια των φορέων μειονότητας, η απόσταση μεταξύ της όψης του στοιχείου και της ένωσης p – n και ο συντελεστής απορρόφησης ο οποίος μάλιστα μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, υπάρχει μία διαφοροποίηση μεταξύ της αποδοτικότητας του κελιού, του φωτοβολταϊκού στοιχείου και του συστήματος.

Με τον όρο αποδοτικότητα κελιού αναφερόμαστε στην υψηλότερη αποδοτικότητα που μπορεί να επιτευχθεί στο πλαίσιο του εργαστηρίου και η οποία αγγίζει 31% Δ[2]. Όμως η αύξηση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, όπως θα εξηγήσω αργότερα, καθώς και το γεγονός πως δεν καλύπτεται ολόκληρη η επιφάνεια του κυττάρου με κελιά, έχει σαν αποτέλεσμα η αποδοτικότητα του φωτοβολταϊκού στοιχείου να είναι αισθητά μικρότερη από την αποδοτικότητα των κελιών. Τέλος, μία επιπλέον μείωση της αποδοτικότητας των φωτοβολταϊκών στοιχείων παρατηρείται

στο πλαίσιο ολόκληρου του φωτοβολταϊκού συστήματος λόγω απωλειών ή δυσλειτουργιών στους αντιστροφείς, στις καλωδιώσεις, στη σκίαση της επιφάνειας των κυττάρων ή ακόμα και σε διακοπές του ηλεκτρικού δικτύου Δ[4].

Όταν προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά στοιχεία ηλιακή ακτινοβολία, δεν είναι δυνατή η ολική μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον. Στη συνέχεια, από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, προφανώς δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά, ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα. Έτσι, η αντίστοιχη ακτινοβολία διαπερνά άθικτη το ημιαγωγίμο υλικό του στοιχείου και απορροφάται τελικά στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του με αποτέλεσμα να το θερμαίνει. Αλλά και από τα φωτόνια που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο το μέρος εκείνο της ενέργειάς τους που ισούται με το ενεργειακό χάσμα συμβάλλει στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το υπόλοιπο μεταφέρεται, σαν κινητική ενέργεια, στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε από τον δεσμό και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα.

Η αύξηση της θερμοκρασίας του Φ/Β στοιχείου επιδρά αρνητικά στην απόδοση του. Η ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από το φωτοβολταϊκό μετατρέπεται κατά ένα μέρος σε ηλεκτρική που απομακρύνεται από τα στοιχεία μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, και κατά ένα μέρος σε θερμική. Η θερμική ενέργεια αυξάνει τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού και λόγω διαφοράς με το περιβάλλον, η θερμότητα μεταφέρεται σε αυτό με ένα συνδυασμό μηχανισμών θερμικής μεταφοράς. Η θερμική μεταφορά από το φωτοβολταϊκό πρέπει να μεγιστοποιείται για να λειτουργούν τα στοιχεία με όσο το δυνατόν μικρότερη θερμοκρασία, διότι όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοσή του.

1.5 Επεξεργασία πυριτίου

1.5.1 Από το πέτρωμα στην ηλιακή κυψέλη

Η τεχνογνωσία που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια σχετικά με την επεξεργασία του πυριτίου ως του κυρίαρχου υλικού κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων καθιστά συμφέρουσα και τη χρήση του ως μηχανικού υλικού.

Τα πολυκρυσταλλικά πλινθώματα σχηματίζονται με την χύτευση υψηλής καθαρότητας πρώτης ύλης πυριτίου σε καλούπια και την κρυσταλλοποίηση τους σε αυτά. Η επίτευξη υψηλής ποιότητας πολυκρυσταλλικών πλινθωμάτων συνεπάγεται υψηλή ποιότητα τελικού προϊόντος και υψηλό βαθμό απόδοσης των Φ/Β συστημάτων.



Οι πολυπυριτικές ενώσεις λιώνουν μέσα σε καμίνους και το λιωμένο προϊόν υποβάλλεται σε κρυσταλλοποίηση μέσα σε καλούπια, όπου βαθμιαία σκληραίνει και παίρνει το σχήμα τους, δημιουργώντας τα πλινθώματα.

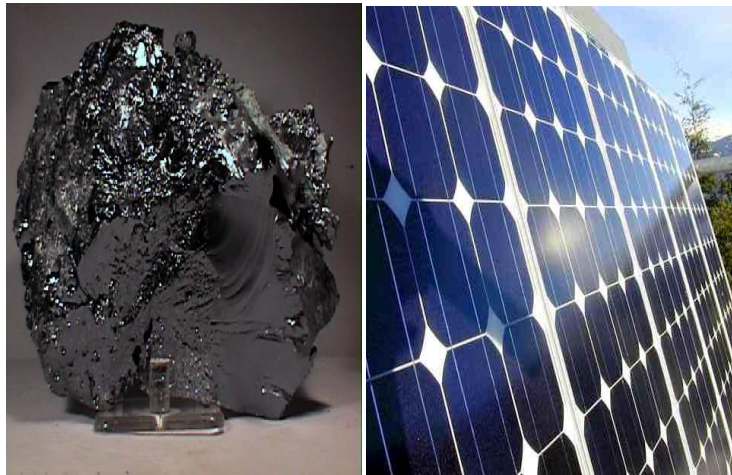
Εικόνα 1.15 Στήλες πυριτίου

Οι στήλες που παράχθηκαν παραπάνω, τεμαχίζονται σε φέτες με πολύ λεπτά **συρμάτινα πριόνια** (*wire saws*). Όσο πιο λεπτές είναι οι φέτες τόσο πιο αποδοτικές θα είναι στην συνέχεια οι Φ/Β κυψέλες. Έτσι το κόστος τους ανά watt παραγόμενης ισχύος θα είναι χαμηλότερο, αφού αυξάνεται ο αριθμός των κυψελών σε μικρότερο εμβαδόν.



Εικόνα 1.16 Συρμάτινα πριόνια κοπής φετών πυριτίου

Οι πυριτικές φέτες καθαρίζονται αρχικά από έλαια και διάφορα σωματίδια με την εφαρμογή υπερήχων. Στην συνέχεια ακολουθεί χημικός καθαρισμός, δημιουργώντας μία καθαρή επιφάνεια η οποία μειώνει την αντανάκλαση και αυξάνει την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας των κυψελίδων. Μέσω της διεργασίας της ιοντικής εμφύτευσης που ακολουθεί παρακάτω, εισάγονται στις φέτες προσμίξεις για να δημιουργηθεί εσωτερικά των κυψελίδων ηλεκτρικό πεδίο. Στη συνέχεια οι φέτες μονώνονται ηλεκτρικά στην επάνω και στην κάτω επιφάνεια, αφαιρώντας ένα λεπτό στρώμα υλικού τους. Η επάνω επιφάνεια των φετών επικαλύπτεται με ένα αντι-ανακλαστικό υλικό που βοηθάει την απορρόφηση του ηλιακού φωτός. Η τελευταία διαδικασία περιλαμβάνει την δημιουργία μεταλλικού πλέγματος (ηλεκτρικές συνδέσεις) στην επάνω και κάτω επιφάνεια των κυψελίδων. Το πυρίτιο και τα μεταλλικό πλέγμα των ηλεκτροδίων “δένουν” με την εισαγωγή των κυψελίδων σε φούρνο υψηλής θερμοκρασίας.



Εικόνα 1.17 Από το πέτρωμα του πυριτίου στην ηλιακή κυψέλη

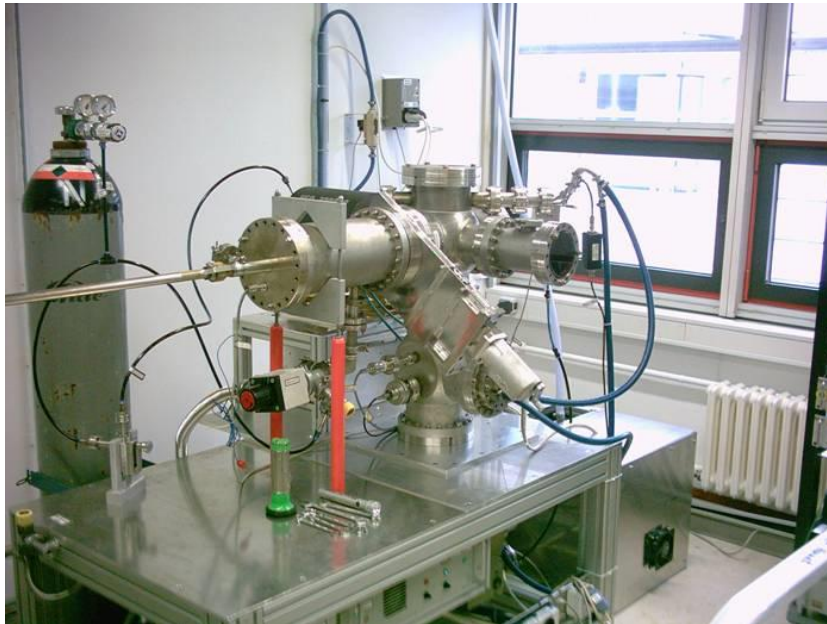
1.5.2 Ιοντική εμφύτευση

Η εμφύτευση ιόντων είναι μία μέθοδος εισαγωγής προσμίξεων σε έναν ημιαγωγό. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί ιόντα τα οποία επιταχύνονται ηλεκτροστατικά για να βομβαρδίσουν τα ημιαγώγιμα υλικά.

Η επιλογή του προς εμφύτευση ιόντος γίνεται με ένα μαγνήτη, ο οποίος προκαλεί απόκλιση της πορείας ενός ιόντος η οποία εξαρτάται από το ατομικό του βάρος.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της ιοντικής εμφύτευσης είναι ότι :

- το βάθος διείσδυσης των προσμίξεων στην εμφύτευση μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια με βάση την ενέργεια της εμφύτευσης, η δε ποσότητα της εισαγομένης πρόσμιξης με βάση το μετρούμενο ρεύμα.
- επίσης, η ιοντική εμφύτευση βοηθάει στη σμίκρυνση διαστάσεων των διατάξεων με την ελαχιστοποίηση των φαινομένων δύο διαστάσεων.



Εικόνα 1.18 Συσκευή ιοντικής εμφύτευσης

Ο συνολικός αριθμός των ατόμων της πρόσμιξης που περνάει στον ημιαγωγό από την επιφάνεια είναι ανάλογος της έντασης της δέσμης. Η κατανομή της συγκέντρωσης των προσμίξεων είναι συνάρτηση του εμφυτευμένου είδους, του υποστρώματος και της ενέργειας του ιόντος. Οι συγκρούσεις μεταξύ του εμφυτευμένου ιόντος και των ατόμων του κρυστάλλου καθορίζουν την πορεία του ιόντος.

1.6 Πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών

Τα φωτοβολταϊκά είναι μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες της σημερινής εποχής και αποτελεί πάνω από όλα ζήτημα ζωτικής σημασίας για το πλανήτη. Τα φωτοβολταϊκά συνεπάγονται σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον, την κοινωνία, τον καταναλωτή και για κάθε είδους ανάπτυξη. Ο ήλιος αποτελεί μία πηγή ενέργειας ανεξάρτητη, αυτόνομη, απεριόριστη, φιλική προς τον άνθρωπο και πάνω από όλα ανανεώσιμη.

Κεφάλαιο 1 Φυσικές αρχές φωτοβολταϊκών διατάξεων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια από τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών [8].

- έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία
- εφόσον δεν χρειάζονται καύσιμα για να λειτουργήσουν δεν παράγουν υποπροϊόντα, άρα έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων
- η κατασκευή τους γίνεται από ανακυκλώσιμα υλικά (γυαλί, αλουμίνιο, πυρίτιο)
- αθόρυβη λειτουργία – μηδενική ηχορύπανση
- παρέχουν πλήρη αυτονομία
- μπορούν πολύ εύκολα να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις για ενέργεια του χρήστη
- δεν απαιτείται σημαντική συντήρηση
- μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως **δομικά υλικά**

Πράγματι, αν σκεφτεί κανείς το γεγονός ότι τα φωτοβολταϊκά διατίθενται σε ποικιλία χρωμάτων, μεγεθών, σχημάτων και μπορούν να παρέχουν ευελιξία και πλαστικότητα στη φόρμα, προσφέρουν και την δυνατότητα χρήσης αυτών ως δομικά υλικά και μάλιστα αντικαθιστώντας μέρος των συμβατικών δομικών υλικών συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο την οικονομία [9].



Εικόνα 1.19 Μοντέρνος σχεδιασμός κτιρίων βασισμένος πάνω σε φωτοβολταϊκά

Με τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε [7]:

- ηλεκτροδότηση επαρχιακών περιοχών(σπίτια, φάρμες)
- άντληση νερού
- τηλεπικοινωνίες(τηλέφωνο, ραδιόφωνο, τηλεόραση)
- φάρoi
- προϊόντα γραφείου χαμηλής ισχύος (αριθμομηχανές, ρολόγια)
- συστήματα πυρασφάλειας
- τεχνολογία διαστήματος
- παραγωγή ηλεκτρισμού σε σύνδεση με το δίκτυο

Κεφάλαιο 2

Μελέτη και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών

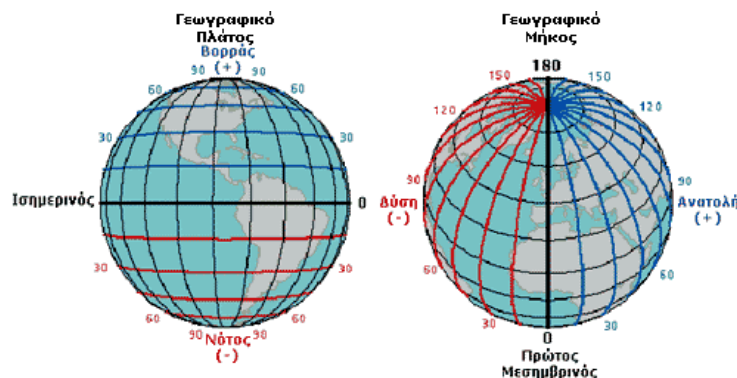
2.1 Ηλιακή γεωμετρία

Στην παράγραφο αυτή θα οριστούν κάποια μεγέθη με την βοήθεια των οποίων θα μπορέσουμε να προσδιορίσουμε την θέση ενός τόπου πάνω από την επιφάνεια της γης. Η θέση του ήλιου πάνω στο στερέωμα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την σωστή τοποθέτηση των ηλιακών συλλεκτών. Πρέπει να τοποθετούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εκμεταλλευόμαστε όσο το δυνατόν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία. Μάλιστα, για να το πετύχουμε αυτό, θα πρέπει οι συλλέκτες να παίρνουν τέτοιο προσανατολισμό, ώστε κάθε στιγμή οι ακτίνες του ήλιου να πέφτουν κάθετα στην επιφάνειά τους.

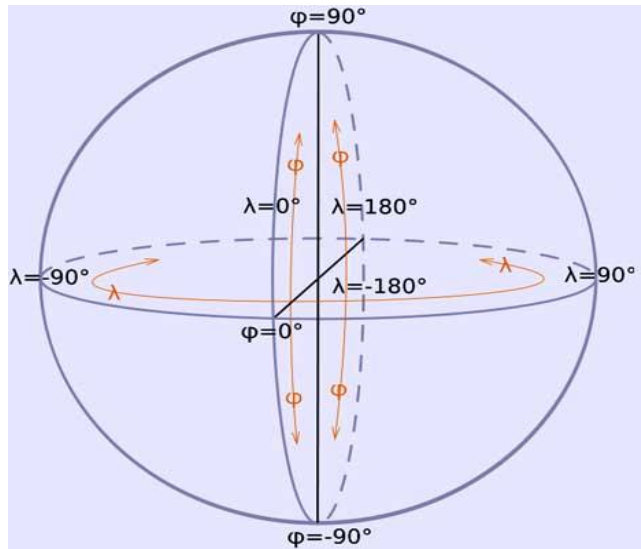
Μπορούμε να θεωρήσουμε τη γη σαν μια σφαίρα και να τη κόψουμε σε ένα οριζόντιο επίπεδο που περνά από το κέντρο της, το επίπεδο αυτό ονομάζεται ισημερινό επίπεδο ή **ισημερινός**. Στη συνέχεια αν κόψουμε την γήινη σφαίρα σε κατακόρυφα επίπεδα που θα περνούν και αυτά από το κέντρο της, ορίζουμε τους **μεσημβρινούς** ή μεσημβρινά επίπεδα. Ο μεσημβρινός που περνά από το αστεροσκοπείο του Γκρήνουιτς στην Αγγλία ονομάζεται μηδενικός μεσημβρινός. Οι υπόλοιποι μεσημβρινοί βρίσκονται οι μεν 180^0 ανατολικά και οι δε 180^0 δυτικά αυτού.

Το **γεωγραφικό πλάτος** (*latitude*) ϕ του τόπου είναι ένα από τα μεγέθη, με τη βοήθεια των οποίων θα μπορέσουμε να προσδιορίσουμε την θέση ενός τόπου πάνω στην επιφάνεια της γης και εκφράζει τη γωνία που σχηματίζει ο τόπος με τον ισημερινό. Πιο συγκεκριμένα, είναι μια γωνία που ορίζεται από την ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το σημείο τομής του ισημερινού και του μεσημβρινού που μας ενδιαφέρει και την ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το σημείο που μας ενδιαφέρει στο συγκεκριμένο μεσημβρινό που περνά από το σημείο αυτό. Γνωρίζοντας, τώρα, το γεωγραφικό πλάτος και τον μεσημβρινό γνωρίζουμε και την ακριβή θέση του τόπου πάνω στην επιφάνεια της γης.

Εικόνα 2.1 Γεωγραφικό πλάτος και μήκος



Το **γεωγραφικό μήκος** (*longitude*) (λ) ενός τόπου στην επιφάνεια της γης ονομάζεται το τόξο του ισημερινού που περικλείεται μεταξύ του πρώτου μεσημβρινού και του μεσημβρινού του ίδιου του τόπου. Το γεωγραφικό μήκος χαρακτηρίζεται ανατολικό (Α) ή δυτικό (Δ) ανάλογα σε ποιά ημισφαίριο βρίσκεται ο τόπος. Το γεωγραφικό μήκος μετράται σε μοίρες και υποδιαιρέσεις αυτών (πρώτα και δεύτερα από $0^\circ - 180^\circ$ Α ή $0^\circ - 180^\circ$ Δ), όπου ορίζουμε τον πρώτο μεσημβρινό αυτόν που έχει γεωγραφικό μήκος 0° .



Εικόνα 2.2 Προσδιορισμός γεωγραφικού μήκους (λ)

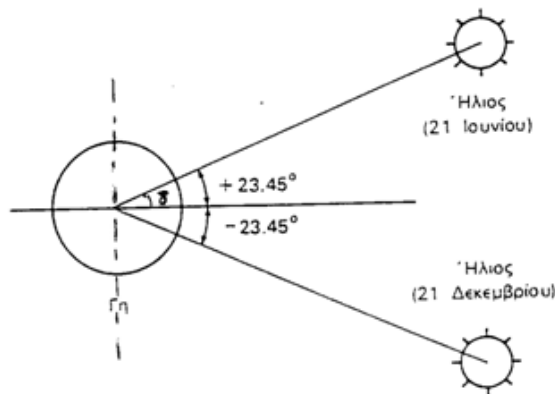
Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα γεωγραφικά πλάτη διαφόρων ελληνικών περιοχών:

Κόνιτσα, Γρεβενά, Λιτοχωρό, Κασσάνδρα, Λήμνος	40°
Κέρκυρα, Ηγουμενίτσα, Ιωάννινα, Μέτσοβο, Τρίκαλα, Καρδίτσα, Λάρισα, Βόλος -	$39^\circ 30'$
Λευκάδα, Πρέβεζα, Άρτα, Καρπενήσι, Λαμία, Σκύρος, Μυτιλήνη	39°
Κεφαλληνία, Ιθάκη, Αγρίνιο, Μεσολόγγι, Πάτρα, Αμφιλοχία, Λιβαδειά, Θήβα, Χαλκίδα, Χίος	$38^\circ 30'$
Ζάκυνθος, Αμαλιάδα, Καλάβρυτα, Κόρινθος, Μέγαρα, Ελευσίνα, Αθήνα, Ραφήνα, Κάρυστος, Άνδρος, Ικαρία, Σάμος	38°
Πύργος, Μεγαλόπολη, Τρίπολη, Αργος, Ναύπλιο, Πόρος, Σύρος, Πάμπος	$37^\circ 30'$
Πύλος, Καλαμάτα, Σπάρτη, Πάρος, Νάξος, Κάλυμνος, Κως	37°
Γύθειο, Μήλος, Σαντορίνη, Ρόδος	$36^\circ 30'$
Κύθηρα, Καστελόριζο	36°
Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο, Κάσσο, Κάρπαθος	$35^\circ 30'$
Χώρα Σφακίων, Ιεράπετρα, Αγ.Νικόλαος Κρήτης, Κύπρος	35°

Πίνακας 2.1 Γεωγραφικά πλάτη Ελληνικών περιοχών

Απόκλιση είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου, και το επίπεδο του ισημερινού. Λόγω μεταβολών στην απόκλιση κατά τη διάρκεια του έτους, ο ήλιος παίρνει πολλές και διαφορετικές θέσεις απέναντι στη γη.

Η απόκλιση του ήλιου δίνεται από την εξίσωση $\delta = 23.45 \left(\frac{360(284+n)}{365} \right)$, όπου n είναι οι μέρες του έτους. Η απόκλιση σχετίζεται με το γεγονός ότι το καλοκαίρι ο ήλιος ανατέλλει νωρίτερα το πρωί και δύει αργότερα το βράδυ, αντίθετα το χειμώνα ανατέλλει αργότερα και δύει νωρίτερα. Συνεπώς η απόκλιση δ παίρνει μεγάλες τιμές το καλοκαίρι και μικρές το χειμώνα, με μέγιστη τιμή στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο $\delta=+23,45^\circ$) και μεγαλύτερη μέρα και ελάχιστη τιμή στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο $\delta=-23,45^\circ$) και μεγαλύτερη νύχτα



Εικόνα 2.3 Απόκλιση του ήλιου

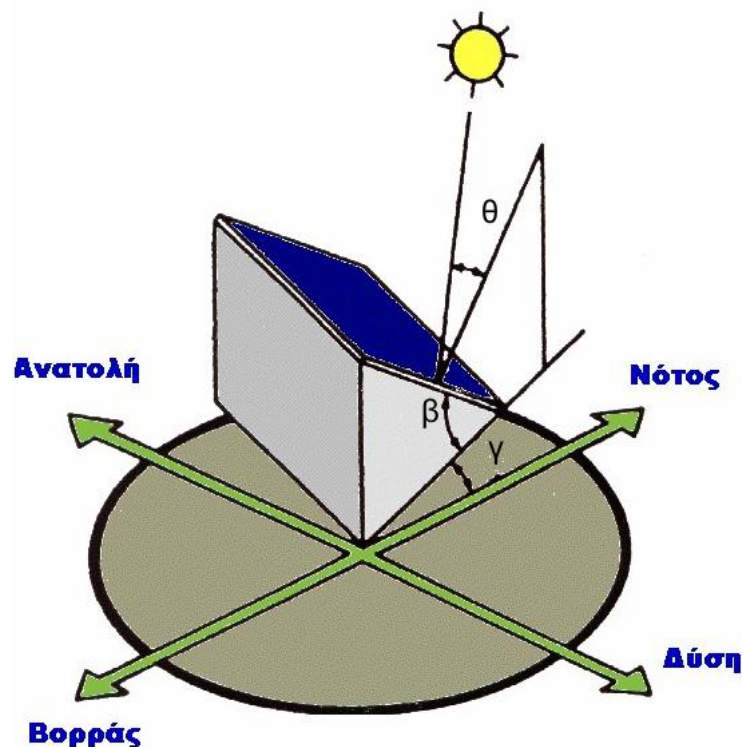
Ένας παράγοντας που δείχνει με ποια γωνία πρέπει να τοποθετήσουμε τα φωτοβολταϊκά μας στο συγκεκριμένο τόπο ώστε να δέχονται όσο το δυνατόν περισσότερη ηλιακή ενέργεια είναι το ύψος του ήλιου. Το ύψος εκφράζει τη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στο οριζόντιο επίπεδο του τόπου αυτού ή διαφορετικά μας δείχνει πόσο «ψηλά» ή «χαμηλά» είναι ο ήλιος σε ένα συγκεκριμένο τόπο τη συγκεκριμένη εποχή. Η συμπληρωματική γωνία του ύψους, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο ονομάζεται ζενιθιακή απόσταση (ή ζενιθιακή γωνία) του ήλιου (θ_z).

Αζιμούθιο γ είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στη προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά - νότου. Προς τα δεξιά από τον νότο, το ηλιακό αζιμούθιο παίρνει θετικές τιμές και προς τα αριστερά αρνητικές τιμές.

2.2 Προσανατολισμός ηλιακού συλλέκτη

Προκειμένου να εκμεταλλευτούμε στο μεγαλύτερο βαθμό την ηλιακή ενέργεια πρέπει να λάβουμε υπ' όψη δύο βασικές γωνίες του συλλέκτη, την **κλίση (β)** και την **αζιμούθια γωνία (γ)**.

- Η κλίση του συλλέκτη είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του επιπέδου του συλλέκτη και του οριζοντα και μπορεί να πάρει τιμές από 0° έως 180° . Είναι προφανές πως για κλίσεις μεγαλύτερες από 90° ο συλλέκτης είναι στραμμένος προς τα κάτω.
- Η αζιμούθια γωνία είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από -180° μέχρι $+180^\circ$. Η γωνία -180° αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς το βορρά, η γωνία -90° προς την ανατολή, η γωνία 0° προς το νότο και η γωνία $+90^\circ$ προς τη δύση.



Εικόνα 2.4 Κλίση και αζιμούθια γωνία

Ο προσανατολισμός και η κλίση του συλλέκτη επηρεάζει την απόδοσή του κατά δύο τρόπους. **Πρώτον**, επηρεάζει σημαντικά το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη και **δεύτερον** επηρεάζει τον συντελεστή διάβασης των διαφανών καλυμμάτων και τον συντελεστή απορρόφησης του αποροφητήρα, αφού οι δύο συντελεστές είναι συναρτήσεις της γωνίας υπό την οποία η ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη.

Κεφάλαιο 2 Μελέτη και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών

Για να έχουμε πυκνότερη ισχύ σε μια δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας, θα πρέπει η επιφάνεια του συλλέκτη να είναι κάθετη προς τη κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης (θ) να είναι 0° . Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έτσι λοιπόν συνηθίζεται οι συλλέκτες να τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, κατά τη διάρκεια του έτους.

Για την χώρα μας και γενικότερα για το βόρειο ημισφαίριο έχει εκτιμηθεί εμπειρικά πως για να πετύχουμε βέλτιστη κλίση σε έναν συλλέκτη πρέπει η κλίση να είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (ϕ) στον οποίο έχουμε τοποθετήσει το συλλέκτη και η αζιμούθια γωνία να είναι μηδέν, δηλαδή ο συλλέκτης να κοιτάει προς το νότο. Λόγω όμως της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή. Το καλοκαίρι δηλαδή, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου 10° ως 15° μικρότερη από την παράλληλο του τόπου, ενώ τον χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου 10° ως 15° μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου.

Η Ελλάδα έχει γεωγραφικό πλάτος ανάμεσα στις 35° και 41° περίπου και η διαφορά του βορειότερου από το νοτιότερο τόπο είναι περίπου της τάξης των 6° , πολύ μικρή. Όπως παρατηρούμε από τον παρακάτω πίνακα η βέλτιστη κλίση σε ετήσια (E) κλίμακα κυμαίνεται από $20-36^\circ$ περίπου για γεωγραφικά πλάτη $41.2-35.0^\circ$ B αντίστοιχα, ενώ η βέλτιστη χειμερινή και η βέλτιστη θερινή κλίση κυμαίνεται από $38-56^\circ$ και $5-17^\circ$ αντίστοιχως.

Πίνακας 2.2 Βέλτιστες κλίσεις συλλεκτών για διάφορες περιοχές της χώρας μας και για διαφορετικές χρονικές περιόδους [16]

Μηνιαία Ηλιακή Ενέργεια για τις βέλτιστες γωνίες κλίσης β των Φ/B (kWh/m ² .μήνα), και βέλτιστη κλίση σε ετήσια (E) βάση, χειμερινή (X) και θερινή (Θ) περίοδο, για διάφορες περιοχές της Ελλάδας															
Κλίση β (°)	I	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	Ο	N	Δ	E	X	Θ
Αθήνα ($\phi=37,96^\circ$, $L=23,92^\circ$)															
7-14	70	84	118	151	190	201	217	206	158	117	84	67	1664	540	1124
23-33	86	97	126	151	181	188	204	202	166	133	104	85	1724	649	1092
42-52	98	103	124	137	154	156	171	178	159	140	118	99	1637	682	955
Ηράκλειο ($\phi=35,33^\circ$, $L=25,15^\circ$)															
5-12	73	90	133	175	211	216	221	207	173	129	94	73	1794	637	1203
20-30	87	101	140	174	202	203	210	203	180	143	112	89	1844	703	1172

Κεφάλαιο 2 Μελέτη και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών

38-48	96	107	140	163	180	177	185	186	176	151	124	101	1787	732	1067
Θεσσαλονίκη ($\phi=40,63^\circ$, $L=22,93^\circ$)															
9-16	62	75	105	140	174	183	203	182	141	101	69	58	1495	510	1024
25-35	77	87	111	139	166	171	191	178	148	114	85	74	1543	574	994
45-55	86	92	110	130	148	150	168	163	144	119	94	85	1490	597	903
Ιωάννινα ($\phi=39,67^\circ$, $L=20,83^\circ$)															
9-16	63	76	118	148	189	200	215	199	154	118	77	57	1614	539	1105
24-34	75	86	125	148	181	188	204	196	161	132	92	70	1659	596	1079
44-54	86	91	125	137	159	162	177	178	157	140	104	81	1596	624	969
Καλαμάτα ($\phi=36,07^\circ$, $L=22,12^\circ$)															
6-13	79	90	136	158	209	214	220	204	166	128	93	68	1766	624	1172
22-32	94	102	145	158	201	202	208	201	173	143	111	83	1820	692	1142
40-50	107	109	144	146	176	172	180	181	168	151	126	95	1754	726	1022
Κομοτηνή ($\phi=41,13^\circ$, $L=25,42^\circ$)															
10-17	67	79	117	151	188	205	212	198	160	120	77	63	1638	555	1114
26-36	80	89	124	151	180	192	201	195	166	134	92	78	1681	614	1084
46-56	91	95	123	139	157	164	173	175	161	142	104	90	1612	642	968
Λάρισα ($\phi=39,63^\circ$, $L=22,42^\circ$)															
9-16	59	78	121	160	203	210	218	202	160	114	79	57	1662	555	1154
24-34	75	92	131	160	193	194	203	198	170	132	101	76	1726	636	1118
44-54	83	96	131	151	175	173	182	184	167	138	112	85	1676	658	1032
Μυτιλήνη ($\phi=39,10^\circ$, $L=26,53^\circ$)															
9-16	63	80	122	161	209	216	222	205	167	124	81	62	1713	569	1180
24-34	80	94	132	161	198	199	207	201	177	145	104	82	1778	652	1142
43-53	87	99	131	152	179	177	185	186	173	152	114	92	1727	675	1052
Πάτρα ($\phi=38,25^\circ$, $L=21,73^\circ$)															
7-14	66	82	134	151	200	212	216	201	163	121	79	66	1692	578	1144

Κεφάλαιο 2 Μελέτη και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών

23-33	83	96	145	150	189	195	201	196	172	140	100	86	1753	660	1102
42-52	91	100	145	141	170	173	180	181	168	146	109	96	1699	682	1013

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

Ενώ όταν τοποθετούμε συλλέκτες σε περιοχές, όπου το έδαφος ανακλά μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας, δηλαδή έχει μεγάλο συντελεστή ανάκλασης (π.χ. χιόνι), οι συλλέκτες πρέπει να τοποθετούνται με κλίση 10° ως 15° μεγαλύτερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους, έτσι ώστε να συλλέγουν μεγάλο ποσό της ανακλώμενης από το έδαφος ακτινοβολίας.

Ο **συντελεστής ανάκλασης** κυμαίνεται από 0, για πλήρη απορρόφηση της ακτινοβολίας, μέχρι 1, για πλήρη ανάκλαση.

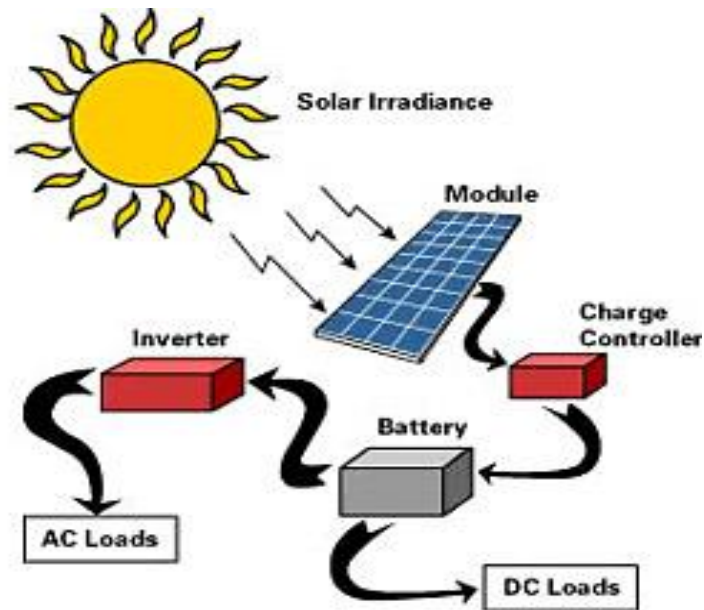
Στο παρακάτω πίνακα δίνονται ενδεικτικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης του φωτός για ορισμένες επιφάνειες.

Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης
Επιφάνεια νερού, Θάλασσα	0.05
Ασφαλτόστρωμα	0.07
Αγρός με σκοτεινόχρωμα χώμα	0.08
Πράσινος αγρός	0.15
Βραχώδη επιφάνεια	0.20
Επιφάνεια παλαιού τσιμέντου	0.24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου	0.30
Χιόνι	0.60

Πίνακας 2.3 Συντελεστής ανάκλασης του φωτός για ορισμένες επιφάνειες [17]

2.3 Η δομή ενός ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος

Στη παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν επιγραμματικά τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα ολοκληρωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα [18].



Εικόνα 2.5 Σχηματικό διάγραμμα δομής Φ/Β συστήματος

- ΜΠΑΤΑΡΙΑ

Η μπαταρία παίζει το ρόλο της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ώστε να την δίνει στον καταναλωτή όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια (δηλαδή τη νύχτα ή τις συννεφιασμένες μέρες). Οι πιο οικονομικές μπαταρίες οι οποίες και χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι με ηλεκτρόδια μολυβδου σε διάλυμα θεικού οξέος.

- ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

Οι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα για την αποθήκευση μιας ποσότητας από την περίσσεια της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν απαιτηθεί.

- Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια περιέχουν μία σειρά συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων τα οποία συγκροτούνται ανάμεσα σε δύο φύλλα γυαλιού ή ανάμεσα σε ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικού. Τα Φ/Β πάνελ κατασκευάζονται από την συναρμολόγηση των Φ/Β κυψελίδων, οι οποίες συνδέονται εσωτερικά μεταξύ τους μέσω ηλεκτρικών επαφών. Το σύνολο των συνδεδεμένων κυψελίδων ενσωματώνεται μέσα σε έναν σκελετό, δημιουργώντας ένα ανθεκτικό και αδιάβροχο Φ/Β πάνελ. Τα

πάνελ κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη ώστε να ταιριάζουν στον ολοένα αυξανόμενο αριθμό εφαρμογών. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια πρέπει να παρέχουν αρκετή τάση, η οποία να μπορεί να φορτίσει τον συσσωρευτή ακόμα και σε συννεφιασμένες μέρες. Έτσι λοιπόν, ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται συνήθως από 36 στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο τάση μεγαλύτερη από 13V.

- Φ/Β ΜΟΝΑΔΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ

Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες αποτελούνται από συνδεδεμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σειρά ή σε διακλάδωση ώστε πάντα να προκύπτει η επιθυμητή τάση και ρεύμα. Μία φωτοβολταϊκή συστοιχία μπορεί να λειτουργήσει από τα 12V μέχρι και τα 240V ανάλογα με τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής .

- ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Ο ρυθμιστής φόρτισης είναι μια ηλεκτρονική διάταξη που χρησιμοποιείται στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα για τη ρύθμιση της φόρτισης των συσσωρευτών δηλαδή της αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε μπαταρίες, ώστε αυτή να χρησιμοποιηθεί όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ανεπαρκής ή ανύπαρκτη.

Η συσκευή αυτή, ρυθμίζει την ροή του ρεύματος προς τις μπαταρίες αποθήκευσης διατηρώντας την κανονική κατάσταση φόρτισης των μπαταριών, δηλαδή στην περίπτωση που η μπαταρία πλησιάζει στην πλήρη φόρτισή της ο ρυθμιστής ελαττώνει το ρεύμα που δίνουν τα πλαίσια εμποδίζοντας την υπερφόρτισή της. Αυτό είναι εξαιρετικά χρήσιμο, εφόσον η υπερφόρτιση μίας μπαταρίας ελαττώνει το χρόνο ζωής της.

- ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ-ΕΝΑΛΛΑΣΟΜΑΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Οι αντιστροφείς τάσης (*inverters*) είναι ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος DC, που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, σε εναλλασσόμενο ρεύμα AC. Το εναλλασσόμενο ρεύμα είτε διοχετεύεται στο δίκτυο της ΔΕΗ, είτε τροφοδοτεί τις ηλεκτρικές συσκευές ενός κτιρίου.

Ανάλογα με το είδος των φωτοβολταϊκών στοιχείων που χρησιμοποιούνται επιλέγονται και οι κατάλληλοι μετατροπείς. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα που είναι συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο, συνδέεται μετατροπέας που λειτουργεί με την τάση του κεντρικού δικτύου και μετατρέπει την συνεχή τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε εναλλασσόμενη ώστε να τροφοδοτείται το ηλεκτρικό δίκτυο.

- ΣΤΗΡΙΞΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ



Εικόνα 2.6 Σταθερή δομή στήριξης Φ/Β πλαισίων

Οι σταθερές βάσεις στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων (πάνελ) κατασκευάζονται εξ' ολοκλήρου από αλουμίνιο, από γαλβανισμένο χάλυβα ή από συνδυασμό των παραπάνω υλικών. Η σταθερή βάση σχεδιάζεται και κατασκευάζεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις κάθε εγκατάστασης συνυπολογίζοντας στατικές και λοιπές φορτίσεις (όπως πχ. Φορτίο χιονιού, ανέμου και μόνιμο βάρος, αποφυγή σκιασμού).

Κάποια επιπλέον στοιχεία που πρέπει να προσέξουμε κατά την τοποθέτηση των βάσεων στήριξης είναι η κατασκευή να είναι αρκετά υψηλή ώστε να μπορεί να κοπεί εύκολα η βλάστηση που μπορεί να υπάρχει κάτω από τα πάνελ. Σε περίπτωση που τοποθετηθεί φράχτης πρέπει να είναι σε απόσταση από τα πάνελ για αποφυγή φαινόμενων σκιασμού. Επίσης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πρέπει να είναι καλά στερεωμένα στη βάση ώστε να μην είναι εύκολη η κλοπή τους.

2.4 Τύποι φωτοβολταϊκών κυττάρων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ανήκουν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα φωτοβολταϊκά **κρυσταλλικού πυριτίου** (*crystalline silicon*) και τα φωτοβολταϊκά **λεπτών υμενίων** (*thin-film*). Οι παραπάνω κατηγοριοποιήσεις γίνονται με βάση το υλικό παρασκευής τους, τη δομή του βασικού υλικού καθώς και τον τρόπο παρασκευής.

Επίσης, υπάρχει και ακόμη μία κατηγορία στην οποία ανήκουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που αποτελούνται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών και ονομάζονται **πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά ΗΠΤ** (*Heterojunction with Intrinsic Thin-layer*). Τα πιο γνωστά εμπορικά πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2% [12] και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Άλλα πλεονεκτήματα για τα πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού τα φωτοβολταϊκά αυτά έχουν τα παραπάνω πλεονεκτήματα, είναι ακριβότερα σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Φωτοβολταϊκά υλικά κρυσταλλικού πυριτίου:

1) Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (*Single Crystalline Silicon, sc-Si*). *Εικόνα 2.7*

Έχουν πάχος γύρω στα 0,2 - 0,3 mm. Η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 - 18% [12] για το πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7% [12]. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας ή "ενεργειακής πυκνότητας". Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (*Czochralski*) και η μέθοδος FZ (*float zone*). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με την υψηλότερη απόδοση στο εμπόριο σήμερα έχει απόδοση πλαισίου 18,5%.

2) Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*MultiCrystalline Silicon, mc-Si*). *Εικόνα 2.8*

Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,2-0,3 mm. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% [12] ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με

αποδόσεις από 13 έως και 15% I[12] για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ). Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (*directional solidification*), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση"), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.

3) Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (*Ribbon Silicon*). *Εικόνα 2.9*

Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις "παραδοσιακές τεχνικές" κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου. Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τους έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος τους είναι περίπου 0,3 mm. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.

Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών υμενίων:

1) Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (*CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη γάλλιου CIGS*). *Εικόνα 2.10*

Ο Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο) I[12]. Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8% I[12] η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γάλλιου (*CIGS*) η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.

2) Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (*Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si*). *Εικόνα 2.11*

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

προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά thin films πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6% έως 8% I[12] ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14% I[12]. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά ΦΒ, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά την διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 mm ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 mm I[12].

3) Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe). Εικόνα 2.12

Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό χάσμα γύρω στο 1,44 eV I[12], το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8% I[12]. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φθάσει το 16% I[12]. Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Τροχοπέδη για την χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Επίσης προβληματίζει η σπανιότητα του τελούριου.

4) Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs). Εικόνα 2.13

Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το Αρσένιο δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το Αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό χάσμα 1,42eV I[12] που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (*multijunction*) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (*solar concentrators*). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της

Κεφάλαιο 2 Μελέτη και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών

τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.

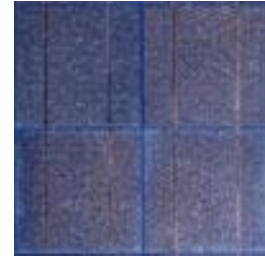
Παρακάτω ακολουθούν οι φωτογραφίες όλων των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών που παρουσιάστηκαν:



Εικόνα 2.7



Εικόνα 2.8



Εικόνα 2.9



Εικόνα 2.10



Εικόνα 2.11



Εικόνα 2.12



Εικόνα 2.13

2.5 Περιγραφή του υπό μελέτη φωτοβολταϊκού συστήματος

2.5.1 Μετεωρολογικές συνθήκες γεωγραφικού τόπου

Το υπό εξέταση φωτοβολταϊκό σύστημα είναι εγκατεστημένο από την εταιρία Phoenix Solar στο Χαλάνδρι. Το κλίμα που επικρατεί στην περιοχή είναι εύκρατο και εντάσσεται κλιματολογικά στον μεσογειακό τύπο κλίματος. Χαρακτηριστικά είναι τα σχετικά ξηρά καλοκαίρια καθώς και τα χαμηλά ύψη βροχής που δεν ξεπερνούν τα 400-450mm. Οι ηλιόλουστες ημέρες αποτελούν πολύ συνηθισμένο φαινόμενο ακόμα και τον χειμώνα κατά τις αλκυονίδες ημέρες, γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως οι παραπάνω συνθήκες ευνοούν την ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που σχετίζονται με την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στη χώρα μας.

Μια πιο σαφή εικόνα για τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής δίνεται από τον παρακάτω πίνακα.

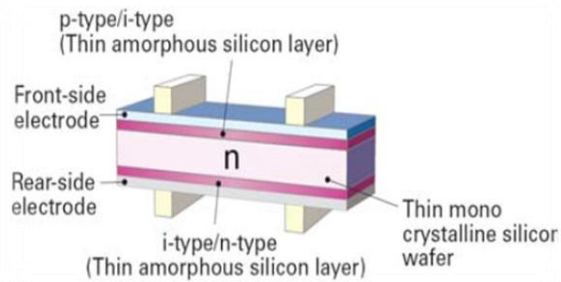
Πίνακας 2.4 Μετεωρολογικά δεδομένα γεωγραφικής τοποθεσίας

Μήνες	Μέση θερμοκρασία [°C]	Μέγιστη θερμοκρασία [°C]	Ελάχιστη θερμοκρασία [°C]	Μέση ταχύτητα ανέμου [m/s]
Μάρτιος 2010	13,6	25,1	0,1	0,76
Απρίλιος 2010	17,3	28,3	9,2	0,98
Μάιος 2010	22,3	36,8	13,1	0,37
Ιούνιος 2010	25,9	40,5	16,2	0,54
Ιούλιος 2010	28,8	40,1	20,5	0,72
Αύγουστος 2010	30,1	41,9	22,7	1,14
Σεπτέμβριος 2010	25,2	35,9	18,5	0,79
Οκτώβριος 2010	19,4	29,7	10,0	0,68
Νοέμβριος 2010	18,9	28,6	11,1	0,72
Δεκέμβριος 2010	13,8	26,1	1,3	0,64
Ιανουάριος 2011	11,4	21,3	3,7	0,66
Φεβρουάριος 2011	8,2	20,1	1,2	0,98
Μάρτιος 2011	7,9	19,4	-5,0	0,93

2.5.2 Πλάνο και εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος

Τα υπό μελέτη φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι αντιπροσωπευτικά των κατηγοριών πυριτίου και λεπτών υμενίων. Οι τρεις τεχνολογίες που εξετάζονται περιγράφονται παρακάτω.

Το **type A** είναι ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο της εταιρίας Sanyo, κατασκευασμένο με την τεχνική των λεπτών υμενίων, το οποίο αποτελείται από 2 υπέρλεπτες στρώσεις άμορφου πυριτίου ενώ ενδιάμεσα υπάρχει ένα λεπτό υπόστρωμα μονοκρυσταλλικού πυριτίου I[19] τεχνολογίας HIT.



Εικόνα 2.14 Κύτταρο τύπου HIT

Το **type B** είναι ένα φωτοβολταϊκό πολυκρυσταλλικού πυριτίου της εταιρίας Suntech I[21] και το **type C** είναι ένα φωτοβολταϊκό λεπτών υμενίων από Τελουριούχο Κάδμιο (*CdTe*) της εταιρίας First Solar I[20]. Οι αποδοτικότητες των παραπάνω τεχνολογιών όπως δίνονται από τους κατασκευαστές είναι 16,7%, 14,4%, 10,42% για τα type A, τα type B και τα type C αντιστοίχως.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι ταξινομημένα σε τρεις συστοιχίες, μία για κάθε τεχνολογία. Η συνδεσμολογία των συστοιχιών φαίνεται στον πίνακα 2.5. Οι τρεις συστοιχίες είναι συνδεδεμένες σε διαφορετικούς αντιστροφείς και παράλληλα μεταξύ τους. Όλα τα φωτοβολταϊκά είναι προσανατολισμένα προς το νότο και τοποθετημένα σε κλίση 20° με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται κάθε είδους σκίαση πάνω στην επιφάνεια των κυττάρων. Τα στοιχεία είναι τοποθετημένα σε σταθερές δομές στήριξης μεταξύ των οποίων οι αποστάσεις είναι ίδιες.



Εικόνα 2.15 (type A)



Εικόνα 2.16 (type B)



Εικόνα 2.17 (type C)

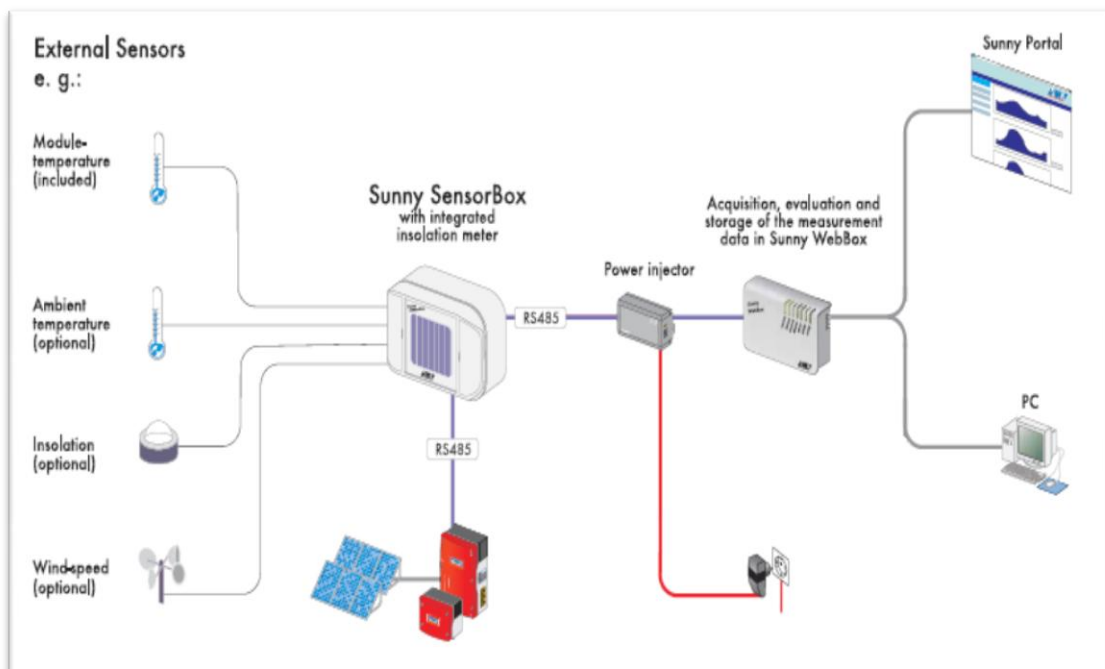
Κεφάλαιο 2 Μελέτη και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται βασικές ονομαστικές τιμές των 3 τεχνολογιών.

Πίνακας 2.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος

Συστοιχίες	Αποδοτικότητα [%]	Ονομαστική Ισχύς [Wp]	Στοιχεία σε σειρά	Στοιχεία σε Διακλάδωση	Συνολική ισχύς συστοιχίας [kW]
type A	16,70	210	11	3	6,93
type B	14,40	280	12	2	6,72
type C	10,42	75	6	15	6,75

Ο διαθέσιμος εξοπλισμός διέθετε εξωτερικούς αισθητήρες για την θερμοκρασία περιβάλλοντος, την θερμοκρασία στην επιφάνεια του κυττάρου και την ταχύτητα του ανέμου, πληροφορίες οι οποίες μαζί με τις πληροφορίες από τους τρεις αντιστροφείς συλλέγονταν από το μετρητικό Sunny Sensorbox. Ένας επιπλέον αισθητήρας ηλιακής ακτινοβολίας ήταν τοποθετημένος πάνω στο Sunny Sensorbox I[22]. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα, τα δεδομένα οδηγούνται στο καταγραφέα δεδομένων Sunny WebBox και έπειτα ανακτούνται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή για επιπλέον επεξεργασία. Το σύστημα μας παρείχε μετρήσεις ανά 5 λεπτά. Το συγκεκριμένο διάστημα δειγματοληψίας ήταν το μικρότερο που μπορούσε να επιτευχθεί με τον διαθέσιμο εξοπλισμό Δ[1].



Εικόνα 2.18 Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης του μετρητικού Sunny Sensorbox και του καταγραφέα δεδομένων Sunny WebBox

Κεφάλαιο 3

Ανάλυση των υπό μελέτη μεγεθών

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα δομηθεί το πειραματικό μέρος. Αναλύονται θεωρητικά όλα τα υπό εξέταση μεγέθη μαζί με τα σφάλματά τους, παρουσιάζονται τα αριθμητικά πλαίσια μέσα στα οποία αναμένονται οι μετρούμενες τιμές, εξάγονται αλγεβρικά όλοι οι τύποι των δευτερευουσών παραμέτρων και περιγράφονται οι αλγεβρικοί υπολογισμοί που υλοποιούνται στο εσωτερικό των αντιστροφών.

3.2 Ανάλυση των υπό μελέτη μεγεθών

3.2.1 Ανάλυση δευτερογενών μεγεθών

Στη παράγραφο αυτή περιγράφονται τα βασικά δευτερογενή μεγέθη, με τα οποία θα αξιολογήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών. Με τον όρο δευτερογενή, αναφέρομαι σε εκείνα μεγέθη, τα οποία προκύπτουν μέσω της αλγεβρικής 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

- Ενεργειακή απόδοση συστοιχίας Y_A : Η ενεργειακή απόδοση συστοιχίας, όπως θα αναλύσουμε αργότερα, εκφράζει το ποσό παραγόμενης ενέργειας ανά εγκατεστημένο kWp του φωτοβολταϊκού συστήματος. Δίνοντας μία πιο κατανοητή ερμηνεία του μεγέθους μπορούμε να πούμε πως αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ωρών, για τον οποίο αν λειτουργούσε το φωτοβολταϊκό σύστημα στην ονομαστική του ισχύ θα παρήγαγε το ίδιο ποσό ενέργειας με αυτό που μετρήθηκε.
- Ενεργειακή απόδοση αναφοράς Y_R : Η ενεργειακή απόδοση αναφοράς αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ωρών για τις οποίες αν λειτουργήσει το φωτοβολταϊκό σύστημα υπό συνθήκες πρότυπου ελέγχου (*STC levels*), θα παράγει το ποσό της ενέργειας που αντιστοιχεί στο αντίστοιχο ποσό απορροφούμενης ακτινοβολίας.

Από εδώ και στο εξής με τον όρο επίπεδα αναφοράς για την ηλιακή ακτινοβολία (Standard Testing Conditions) θα αναφερόμαστε σε συνθήκες ακτινοβολισμού $G=1000 \frac{W}{m^2}$ και θερμοκρασίας στην επιφάνεια του κυττάρου $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Απώλειες σύλληψης συστοιχίας L_c : Οι απώλειες σύλληψης συστοιχίας αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των ωρών λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος, υπό συνθήκες πρότυπου ελέγχου (*STC levels*), οι οποίες χάθηκαν, με άλλα λόγια είναι ένα μέτρο της αξιολόγησης του βαθμού εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας για το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό σύστημα.
- Αποδοτικότητα η_A : Η αποδοτικότητα αποτελεί ένα μέτρο της ικανότητας του φωτοβολταϊκού συστήματος να παράγει ενέργεια, συναρτήσει της συνολικά κατειλημμένης επιφάνειας καθώς και της δεδομένης ακτινοβολίας που δέχεται ο συλλέκτης.
- Λόγος απόδοσης Pr : Ο λόγος απόδοσης αποτελεί το πιο συνηθισμένο μέτρο αξιολόγησης φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς παρέχει μία σαφή εικόνα της λειτουργίας του συστήματος συναρτήσει της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και της ονομαστικής ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος.

3.2.2 Θεωρητικά αναμενόμενες τιμές φυσικών παραμέτρων

Προκειμένου να εξετάσουμε την ποιότητα των δεδομένων και την εγκυρότητα των αλγεβρικών υπολογισμών, κάτι που συνεπάγεται και την ισχύ των θεωρητικών πορισμάτων που θα προκύψουν από τα διαθέσιμα δεδομένα, πρέπει τα τελευταία να επανεξεταστούν στο πλαίσιο αριθμητικών ορίων τα οποία ορίζονται στην αντίστοιχη βιβλιογραφία.

Η διαδικασία αυτή θα μας βοηθήσει να απορρίψουμε κάποια δεδομένα τα οποία προφανώς δεν αντιπροσωπεύουν την συμπεριφορά του συστήματος, μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες να βγάλουμε εσφαλμένα αποτελέσματα Δ [4]. Στη παράγραφο αυτή εξετάστηκαν τα όρια μέσα στα οποία αναμένονται οι τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_{amb}), θερμοκρασίας κυττάρου (T_{mod}) και ταχύτητας ανέμου Ws όπως τις λαμβάνουμε από τους αισθητήρες περιβάλλοντος. Σύμφωνα με την I[25] η θερμοκρασία περιβάλλοντος αναμένεται στο διάστημα $-10...40^{\circ}\text{C}$, η θερμοκρασία στην επιφάνεια του κυττάρου στο διάστημα $-10...80^{\circ}\text{C}$, ενώ σύμφωνα με την I[26], η ταχύτητα του ανέμου αναμένεται μέσα στο διάστημα $0...35 \text{ m/sec}$.

3.3 Θεωρητική ανάλυση σφάλματος

3.3.1 Σφάλματα πρωτογενών παραμέτρων

Στη παράγραφο αυτή θα εξεταστούν κάποια από τα χαρακτηριστικά του μετρητικού συστήματος *Sunny Sensorbox*. Συγκεκριμένα θα εξεταστεί το αντίστοιχο, για κάθε μέγεθος, σφάλμα του οργάνου καθώς και η αντίστοιχη, για κάθε μέγεθος, κλίμακα μέτρησης. Στην επόμενη παράγραφο περιγράφεται η διαδικασία με την οποία οι αντιστροφείς επεξεργάζονται αυτά τα δεδομένα μέσω αλγεβρικών υπολογισμών και παράγουν δευτερογενείς παραμέτρους καθώς και τα αντίστοιχα σφάλματα, ώστε όλα μαζί να οδηγηθούν στον καταγραφέα δεδομένων *Sunny WebBox*.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τα πρωτογενή μεγέθη, την κλίμακα μέτρησης τους από το μετρητικό *Sunny Sensorbox* καθώς και το σφάλμα μέτρησής τους όπως μας παρέχονται από το εγχειρίδιο λειτουργίας του κατασκευαστή [22],[23].

Πίνακας 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του μετρητικού *Sunny Sensorbox*

Παράμετροι	Σύμβολο	Μονάδα	Κλίμακα οργάνου	Απόλυτο σφάλμα
Ακτινοβολία	G	$\frac{W}{m^2}$	0...1500	±120
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	$T_{περ}$	°C	-30...+80	±0.55
Θερμοκρασία κυττάρου	$T_{συλ}$	°C	-20...+110	±0.65
Ταχύτητα ανέμου	S_W	$\frac{m}{s}$	0.8...40	±0.196
Τάση εξόδου συστοιχίας	V_A	V	139...320	±7.24
Ρεύμα εξόδου συστοιχίας	I_A	A	0...10	±0.4
Τάση δικτύου	V_U	V	220...240	±0.6

3.3.2 Εσωτερικοί υπολογισμοί αντιστροφών

Στο εσωτερικό κάθε αντιστροφέα περιλαμβάνεται μία ηλεκτρονική μονάδα, η οποία υλοποιεί αλγεβρικούς υπολογισμούς αξιοποιώντας τα πρωτογενή μεγέθη. Στη

παράγραφο αυτή θα αναλύσουμε, σύμφωνα με την B[5], αυτούς τους υπολογισμούς δίνοντας και ένα προσεγγιστικό τύπο θεωρητικού σφάλματος που αντιστοιχεί σε κάθε μέγεθος, χρησιμοποιώντας κάθε φορά τον τύπο διάδοσης σφαλμάτων για την τυπική απόκλιση της μέσης τιμής μιας τυχαίας συνάρτησης f :

$\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial u} \delta u\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial v} \delta v\right)^2 + \dots}$, όπου η f είναι τυχαία συνάρτηση των μεταβλητών u, v οι οποίες έχουν σφάλμα $\delta u, \delta v$ αντίστοιχα.

Με τους παρακάτω τύπους μπορούμε να υπολογίσουμε τα σφάλματα των τελικών παραμέτρων.

- Ισχύς συλλέκτη P_A [W]: Αρχικά τα μεγέθη V_A, I_A των κυττάρων, όπως λαμβάνονται κάθε 5 λεπτά, πολλαπλασιάζονται μέσω αλγορίθμου δίνοντας την ισχύ της κάθε συστοιχίας, η οποία αντιπροσωπεύει την μέση ισχύ της λειτουργίας του κυττάρου μέσα στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα δειγματοληψίας. Το σφάλμα που προκύπτει είναι $\delta P_A =$

$$\sqrt{\left(\frac{\partial P_A}{\partial I_A} \delta I_A\right)^2 + \left(\frac{\partial P_A}{\partial V_A} \delta V_A\right)^2}, \text{ όπου } P_A = V_A * I_A.$$

- Ισχύς δικτύου P_{TU} [W]: Έπειτα υπολογίζεται η ισχύς που επιστρέφει στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω της σχέσης $P_{TU} = P_A \cdot \eta_{INV}$, όπου η_{INV} είναι η ονομαστική αποδοτικότητα των αντιστροφών. Το σφάλμα που προκύπτει

$$\text{είναι } \delta P_{TU} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{TU}}{\partial P_A} \delta P_A\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{TU}}{\partial \eta_{INV}} \delta \eta_{INV}\right)^2}.$$

- Ενέργεια δικτύου E_A [kWh]: Τέλος η ενέργεια σε kWh που επιστρέφει στο δίκτυο υπολογίζεται από τον τύπο $E_A = \frac{60}{9} \cdot \frac{1}{3.6 \cdot 10^6} \cdot P_{TU}$. Η P_{TU} δειγματολογείται 9 φορές το λεπτό και για κάθε μία από αυτές μέσω του παραπάνω τύπου, μετατρέπεται σε kWh, με την προϋπόθεση ότι στο χρονικό διάστημα δειγματοληψίας η P_{TU} παραμένει σταθερή. Το σφάλμα που

$$\text{προκύπτει είναι } \delta E_A = \sqrt{\left(\frac{\partial E_A}{\partial P_{TU}} \delta P_{TU}\right)^2}.$$

3.3.3 Αλγεβρικός υπολογισμός δευτερογενών μεγεθών

- Ακτινοβολία H [$\frac{kWh}{m^2}$]: Μπορούμε να εξαγάγουμε την ακτινοβολία από τον ακτινοβολισμό G [$\frac{W}{m^2}$] μέσω της εξίσωσης $H = \frac{5}{60} \cdot \frac{1}{1000} \cdot G$ η οποία μετατρέπει τα W σε kWh. Το αντίστοιχο σφάλμα όπως προκύπτει από τον

$$\text{τύπο διάδοσης σφαλμάτων είναι } \delta H = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial G} \delta G\right)^2}.$$

- Ονομαστική ισχύς P_{AO} [kW]: Η ονομαστική ισχύς αποτελεί ένα μέγεθος το οποίο αναφέρεται στην αναμενόμενη λειτουργία του φωτοβολταϊκού, όπως έχει αξιολογηθεί από τον κατασκευαστή και υπολογίζεται από τις μετρήσεις V, I οι οποίες αντιστοιχούν στη μέγιστη απόδοση του κυττάρου. Η ονομαστική ισχύς είναι καταχωρημένη στα αντίστοιχα εγχειρίδια των κατασκευαστών, παρ' όλα αυτά θα μπορούσαμε να κάνουμε μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση μέσω του τύπου $P_{AO} = \sum P_{mod}^i$ όπου $\sum P_{mod}^i = \sum V_{mod}^i \cdot I_{mod}^i$ και το αντίστοιχο σφάλμα είναι $\delta_{P_{AO}} = \sqrt{\sum (\delta_{P_{mod}^i})^2}$ [1].
- Ενεργειακή απόδοση συστοιχίας $[\frac{kWh}{kW}]$: Η ενεργειακή απόδοση συστοιχίας υπολογίζεται ως το πηλίκο $Y_A = E_A / P_{AO}$ και μετριέται σε $\frac{kWh}{kW} = h$. Το αντίστοιχο σφάλμα είναι $\delta_{Y_A} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y_A}{\partial E_A} \delta E_A\right)^2 + \left(\frac{\partial Y_A}{\partial P_{AO}} \delta P_{AO}\right)^2}$.
- Ενεργειακή απόδοση αναφοράς $[\frac{kWh}{kW}]$: Η ενεργειακή απόδοση αναφοράς υπολογίζεται ως το πηλίκο $Y_R = H / G_{STC}$ και μετριέται σε $\frac{kWh}{kW} = h$. Το αντίστοιχο σφάλμα είναι $\delta_{Y_R} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y_R}{\partial H} \delta H\right)^2}$.
- Απώλειες σύλληψης συστοιχίας $L_c [\frac{kWh}{kW}]$: Οι απώλειες σύλληψης συστοιχίας υπολογίζονται ως η διαφορά $L_c = Y_R - Y_A$ και μετριούνται σε $\frac{kWh}{kW} = h$. Το αντίστοιχο σφάλμα είναι $\delta_{L_c} = \sqrt{\left(\frac{\partial L_c}{\partial Y_R} \delta Y_R\right)^2 + \left(\frac{\partial L_c}{\partial Y_A} \delta Y_A\right)^2}$.
- Αποδοτικότητα συστοιχίας η_A [%]: Η αποδοτικότητα της συστοιχίας υπολογίζεται από τον τύπο $\eta_A = \frac{E_A}{A_A \cdot H}$, όπου A_A είναι η συνολική κατειλημμένη από τα φωτοβολταϊκά επιφάνεια. Το αντίστοιχο σφάλμα είναι $\delta_{\eta_A} = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_A}{\partial E_A} \delta E_A\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_A}{\partial H} \delta H\right)^2}$.
- Λόγος απόδοσης Pr [%]: Ο λόγος απόδοσης (Performance ratio) υπολογίζεται από τον τύπο $Pr = \frac{E_A \cdot G_{STC}}{P_{AO} \cdot H}$, είναι ποσοστό και το αντίστοιχο σφάλμα είναι:

$$\delta_{Pr} = \sqrt{\left(\frac{\partial Pr}{\partial E_A} \delta E_A\right)^2 + \left(\frac{\partial Pr}{\partial H} \delta H\right)^2 + \left(\frac{\partial Pr}{\partial P_{AO}} \delta P_{AO}\right)^2}$$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα τελικά σφάλματα των παραμέτρων αξιολόγησης του φωτοβολταϊκού συστήματος, υπολογισμένα στο πλαίσιο της μίας ώρας.

Πίνακας 3.2 Τελικά σφάλματα των παραμέτρων αξιολόγησης του φωτοβολταϊκού συστήματος

Παράμετροι	Σφάλμα
Ακτινοβολία H [$\frac{kWh}{m^2}$]	$\pm 0,12$
Ονομαστική ισχύς P_{AO} [kW]	$\pm 0,021$
Ισχύς δικτύου P_{TU} [W]	± 112
Ενέργεια δικτύου E_A [kWh]	$\pm 0,112$
Ενεργειακή απόδοση συστοιχίας Y_A [h]	$\pm 0,105$
Ενεργειακή απόδοση αναφοράς Y_R [h]	$\pm 0,12$
Απώλειες σύλληψης συστοιχίας L_c [h]	$\pm 0,12$
Αποδοτικότητα η_A [%]	Type A: $\pm 0,057\%$ Type B: $\pm 0,050\%$ Type C: $\pm 0,030\%$
Λόγος απόδοσης Pr [%]	Type A: $\pm 0,81\%$ Type B: $\pm 0,53\%$ Type C: $\pm 1,45\%$

Κεφάλαιο 4

4.1 Σκοπός - Αντικείμενο της παρούσης εργασίας

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας κατά το χρονικό διάστημα Μάρτιος του 2010 - Μάρτιος του 2011. Με τη βοήθεια των μετρήσεων αυτών, έγιναν υπολογισμοί και διαγράμματα που σχετίζονται με τη λειτουργία και την απόδοση των φωτοβολταϊκών πυριτίου και λεπτών υμενίων που διαθέτει η εταιρία.

Η περίοδος μελέτης του φωτοβολταϊκού συστήματος αρχίζει από τον Μάρτιο του 2010 και τελειώνει τον Μάρτιο του 2011. Λόγω υπολειτουργίας των φωτοβολταϊκών ΤΥΡΕ C που διαπιστώθηκε την πρώτη εβδομάδα του Ιουνίου όταν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και στις τρεις συστοιχίες, αντικαταστάθηκαν με καινούργια φωτοβολταϊκά τα οποία ήταν κατασκευασμένα το 2010, ένα χρόνο δηλαδή αργότερα από τα παλαιότερα. Όπως θα δούμε και από τα αντίστοιχα διαγράμματα, από τη πρώτη μόλις βδομάδα όπου και δοκιμάστηκαν, διαπιστώθηκε σημαντική βελτίωση στην απόδοση των κυττάρων, σε σύγκριση ακόμα και με τα υπόλοιπα φωτοβολταϊκά πυριτίου.

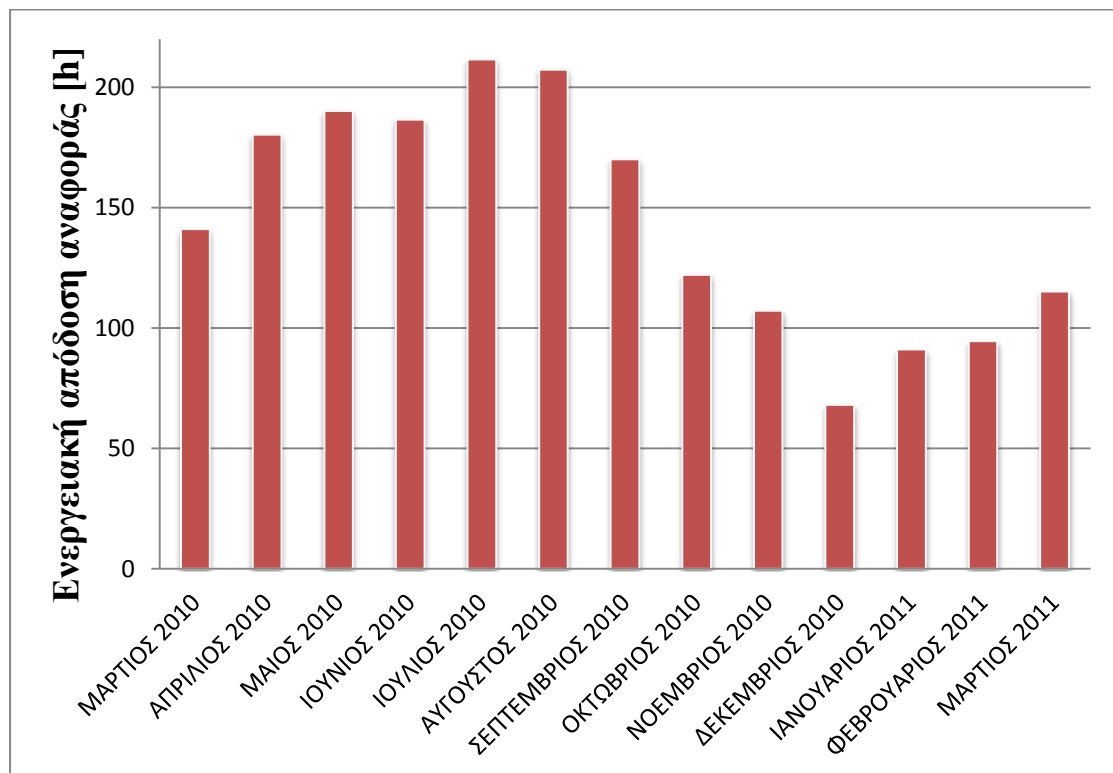
Η αξιολόγηση, λοιπόν, έγινε σε ετήσια βάση δίνοντας μία σαφή εικόνα της συμπεριφοράς των τριών φωτοβολταϊκών τεχνολογιών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και σε ακραίες θερμοκρασίες. Με στόχο την εκτίμηση μακροσκοπικών παραμέτρων που σχετίζονται με την απόδοση των φωτοβολταϊκών σε σχέση με τα εγκατεστημένα kW, την κατειλημμένη επιφάνεια και την ακτινοβολία, δεν δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση σε μικροσκοπικές παραμέτρους που σχετίζονται με τη φυσική των κυττάρων.

4.2 Ενεργειακό δυναμικό ηλιακής ακτινοβολίας

Επειδή οι συγκρίσεις, οι κριτικές και τα σχόλια που θα γίνουν μεταξύ των φωτοβολταϊκών πυριτίου και λεπτών υμενίων που διαθέτει η εταιρία, γίνονται καθώς αυτά λειτουργούν σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών περιβάλλοντος και ακτινοβολιών, θεωρείται σκόπιμο να δοθεί μία γενική εικόνα του ενεργειακού δυναμικού της ακτινοβολίας σε ετήσια κλίμακα. Στο τέλος της εργασίας δίνεται Παράρτημα στο οποίο είναι διαθέσιμα όλα τα διαγράμματα που αφορούν τις μετρήσεις από τους αισθητήρες περιβάλλοντος δίνοντας μία σαφή εικόνα για τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής.

Το παρακάτω διάγραμμα είναι απαραίτητο προκειμένου να μελετήσουμε το βαθμό στον οποίο κάθε τεχνολογία εκμεταλλεύεται την ηλιακή ακτινοβολία. Η ενεργειακή απόδοση αναφοράς Y_R [h] έχει αναλυθεί λεπτομερώς στις παραγράφους 3.2.1 και 3.3.3 και προκύπτει από το πηλίκο της απορροφημένης ηλιακής ενέργειας για κάθε μήνα, όπως αυτή μετρήθηκε από τους αισθητήρες ηλιοφάνειας, προς τα εγκατεστημένα kWp.

Διάγραμμα 4.1 Ενεργειακή απόδοση αναφοράς



4.3 Μελέτη εξάρτησης της ενεργειακής απόδοσης συστοιχίας από την θερμοκρασία

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε την συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών πυριτίου και λεπτών υμενίων σε μέρες όπου παρατηρούνται ακραίες θερμοκρασίες. Είναι γνωστό από τα εγχειρίδια λειτουργίας, ότι κάθε διαφορετική τεχνολογία παρουσιάζει διαφορετικό θερμοκρασιακό συντελεστή, πιο συγκεκριμένα τα type C παρουσιάζουν τον χαμηλότερο $T_c = -0,25 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ σε σύγκριση με τα type A και type B τα οποία παρουσιάζουν $T_c = -0,30 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ και $T_c = -0,47 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ αντιστοίχως. Το συμπέρασμα το οποίο ανάγεται από τις παραπάνω τιμές και που επαληθεύεται στην παρούσα παράγραφο, είναι ότι τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (type B) είναι περισσότερο ευάλωτα, ενώ τα λεπτών υμενίων CdTe (type C) πιο σταθερά στις υψηλές θερμοκρασίες Δ[11]. Επίσης, μεταξύ των φωτοβολταϊκών πυριτίου, τα type A φαίνεται να συμπεριφέρονται καλύτερα από τα type B σε υψηλές τιμές της θερμοκρασίας Δ[11], εφόσον παρουσιάζουν μικρότερη μείωση στην ενεργειακή απόδοση συστοιχίας Y_A [h]. Επιλέχθηκαν λοιπόν κάποιες

ημερομηνίες όπου παρατηρήθηκαν ακραίες τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος αλλά ταυτόχρονα όμοια ποσά απορροφούμενης ακτινοβολίας και μελετήθηκε η μεταβολή στην ενεργειακή απόδοση συστοιχίας Y_A [h], στο λόγο απόδοσης Pr [%] και στις απώλειες σύλληψης συστοιχίας L_c [h]. Οι ημερομηνίες που επιλέχθηκαν καλύπτουν όλο το εύρος της εξεταζόμενης περιόδου ύστερα του Ιουνίου του 2010, όπου αντικαταστήθηκαν τα φωτοβολταϊκά type C.

Πίνακας 4.1 Μελέτη και σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης συστοιχίας Y_A [h] των type A, type B και type C σε ημερομηνίες με ακραίες θερμοκρασίες.

Ημερομηνίες	Τμέγιστη (°C)	H (kWh/m ²)	Y_A [$\frac{kWh}{kW}$] (type A)	Y_A [$\frac{kWh}{kW}$] (type B)	Y_A [$\frac{kWh}{kW}$] (type C)
26/3/2011	18,7	5,95	5,89	5,93	5,92
4/8/2010	39,1	5,92	5,56	5,49	5,92
30/3/2011	19,4	5,76	5,30	5,24	5,36
6/9/2010	29,1	5,76	5,36	5,11	5,62
8/10/2010	20,9	4,80	4,51	4,49	4,64
30/6/2010	34,6	4,74	4,45	4,45	4,85
10/8/2010	34,9	6,83	6,35	6,29	6,70
16/6/2010	40,5	6,80	6,35	6,14	6,74
3/10/2010	27,9	5,98	5,59	5,50	5,72
4/8/2010	39,1	5,93	5,56	5,49	5,92

Ένα επιπλέον στοιχείο το οποίο αποδεικνύει την υπεροχή των φωτοβολταϊκών λεπτών υμενίων CdTe (type C) σε υψηλές θερμοκρασίες, διαπιστώνεται από τους παρακάτω πίνακες οι οποίοι δείχνουν την εξάρτηση του λόγου απόδοσης Pr και των απωλειών σύλληψης συστοιχίας L_c από ακραίες θερμοκρασίες.

Πίνακας 4.2 Μελέτη και σύγκριση των απωλειών σύλληψης συστοιχίας L_c των type A, type B και type C σε ημερομηνίες κατά τις οποίες σημειώθηκαν διαφορετικές μέγιστες θερμοκρασίες.

Ημερομηνίες	Τμέγιστη (°C)	H (kWh/m ²)	L_c (type A)	L_c (type B)	L_c (type C)
26/3/2011	18,7	5,95	0,059033	0,019033	0,029033
4/8/2010	39,1	5,92	0,359444	0,429444	0,000944
30/3/2011	19,4	5,76	0,460000	0,520000	0,400000
6/9/2010	29,1	5,76	0,399799	0,649799	0,139799
8/10/2010	20,9	4,80	0,299491	0,316491	0,160091
30/6/2010	34,6	4,74	0,290000	0,290000	-0,110000
10/8/2010	34,9	6,83	0,478916	0,530316	0,124916
16/6/2010	40,5	6,80	0,450000	0,660000	0,060000
3/10/2010	27,9	5,98	0,394200	0,481500	0,258600
4/8/2010	39,1	5,93	0,359400	0,429400	0,000900

Πίνακας 4.3 Μελέτη και σύγκριση του λόγου απόδοσης Pr των type A, type B και type C σε ημερομηνίες κατά τις οποίες σημειώθηκαν διαφορετικές μέγιστες θερμοκρασίες.

Ημερομηνίες	Τμέγιστη (°C)	H (kWh/m ²)	Pr (type A)	Pr (type B)	Pr (type C)
26/3/2011	18,7	5,95	0,990077	0,996801	0,99512
4/8/2010	39,1	5,92	0,939277	0,927452	0,999841
30/3/2011	19,4	5,76	0,920139	0,909722	0,930556
6/9/2010	29,1	5,76	0,930588	0,887184	0,975729
8/10/2010	20,9	4,80	0,937664	0,934126	0,966679
30/6/2010	34,6	4,74	0,938819	0,938819	1,023207
10/8/2010	34,9	6,83	0,929828	0,922297	0,981697
16/6/2010	40,5	6,80	0,933824	0,902941	0,991176
3/10/2010	27,9	5,98	0,93408	0,919482	0,956756
4/8/2010	39,1	5,93	0,939284	0,927459	0,999848

Όπως μπορούμε να δούμε από τους παραπάνω πίνακες, οι θερμοκρασιακοί συντελεστές παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην απόδοση των κυττάρων καθώς και στις απώλειες σύλληψης συστοιχίας, δηλαδή καθορίζουν το ποσοστό εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μέρες με υψηλές θερμοκρασίες $\Delta[4]$. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμπεριφορά των type C σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου παρατηρούμε τις μηδενικές τιμές που παρουσιάζουν οι απώλειες σύλληψης συστοιχίας σε σύγκριση με τις αντίστοιχες αυξημένες τιμές των φωτοβολταϊκών πυριτίου $\Delta[1]$. Ωστόσο, οι τιμές αυτές όπως και οι τιμές του πίνακα 4.3 που αντιστοιχούν στο λόγο απόδοσης Pr , λόγω ανακρίβειας του αισθητήρα ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της ακτινοβολίας, δεν μπορούν να θεωρηθούν ιδιαίτερα αξιόπιστες, μπορούμε όμως να πάρουμε μία συγκριτική εικόνα μεταξύ των τριών φωτοβολταϊκών τεχνολογιών της εταιρίας.

4.4 Μελέτη και σύγκριση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών type A, type B και type C ανά κλάση ακτινοβολήσης

Δεδομένου ότι υπάρχουν χώρες οι οποίες δέχονται χαμηλές, μέτριες ή και υψηλές μέσες ακτινοβολίες κατά τη διάρκεια του έτους, λόγω γεωγραφικής τοποθεσίας αλλά και τοπικών καιρικών φαινομένων όπως συννεφιά, μολυσμένη ατμόσφαιρα ή ακόμα και ανεπιθύμητη σκίαση, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ποιες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών μπορούν να αποδώσουν καλύτερα για τις αντίστοιχες τιμές της ακτινοβολίας.

Στη παράγραφο αυτή, επιλέχθηκαν ορισμένες ημερομηνίες οι οποίες και ταξινομήθηκαν σε κλάσεις ανάλογα με την συνολική απορροφημένη ακτινοβολία. Οι ημερομηνίες επιλέχθηκαν έτσι ώστε να καλύπτουν μεγάλο εύρος θερμοκρασιών περιβάλλοντος σε κάθε κλάση. Στόχος είναι, για τις αντίστοιχες τιμές της ακτινοβολίας, να μελετήσουμε την ενεργειακή απόδοση συστοιχίας των φωτοβολταϊκών πυριτίου και λεπτών υμενίων, να διαπιστώσουμε σε ποιες θερμοκρασίες περιβάλλοντος και μέσες τιμές ακτινοβολιών η κάθε τεχνολογία προσεγγίζει περισσότερο ή λιγότερο την ονομαστική τιμή της απόδοσης και να συγκρίνουμε τα παραγόμενα ποσά ενέργειας μέσα σε όλο το εύρος των ακτινοβολιών, όπως αυτές μετρήθηκαν από τους αισθητήρες περιβάλλοντος.

4.4.1 Μελέτη και σύγκριση των ενεργειακών αποδόσεων συστοιχίας σε κλάσεις ημερήσιας απορροφούμενης ακτινοβολίας

Πίνακας 4.4 Μελέτη και σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης συστοιχίας Y_A [h] των type A, type B και type C σε ημερομηνίες ταξινομημένες σε κλάσεις αυξανόμενης απορροφούμενης ακτινοβολίας. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται κάποιες ημερομηνίες όπου παρατηρούνται αισθητές αλλαγές στη λειτουργία των φωτοβολταϊκών.

Κλάσεις Ακτινοβολίας Η (kWh/m ²)	Ακτινοβολία Η (kWh/m ²)	Ημερομηνία	$T_{περ}$ (°C) (μέση τιμή)	Y_A (type A)	Y_A (type B)	Y_A (type C)
0-1	0,42	2/1/11	11,5	0,29	0,32	0,34
	0,61	28/1/11	10,1	0,45	0,48	0,51
	0,79	2/3/11	5,6	0,59	0,64	0,69
1-2	1,25	7/3/11	4,3	1,04	1,09	1,14
	1,45	16/1/11	11,7	1,25	1,29	1,33
	1,88	24/1/11	11,1	1,74	1,75	1,80
	1,91	13/1/11	12,7	1,76	1,76	1,85
	1,99	21/1/11	12,9	1,87	1,85	1,94
2-3	2,11	8/11/10	20,2	1,89	1,88	2,01
	2,13	1/3/11	6,4	1,93	1,99	2,05
	2,29	17/11/10	18,4	2,00	1,99	2,11
	2,48	14/1/11	13,6	2,36	2,33	2,42
	2,76	25/9/10	23,8	2,29	2,28	2,46
	2,90	3/11/10	16,2	2,68	2,61	2,77
3-4	3,00	16/11/10	18,5	2,80	2,74	2,90
	3,27	9/11/10	21,5	2,94	2,90	3,07
4-5	3,81	20/3/11	8,4	3,39	3,42	3,53
	4,15	22/3/11	4,3	3,83	3,86	3,86
	4,19	8/12/10	16,9	3,94	3,81	3,99
	4,25	24/3/11	7,7	4,04	4,01	4,01
	4,44	26/1/11	7,4	4,33	4,20	4,22
	4,54	8/1/11	11,4	4,24	4,13	4,25
	4,97	20/9/10	27,2	4,72	4,70	4,98

Κλάσεις Ακτινοβολίας H (kWh/m ²)	Ακτινο- βόληση H(kWh/ m ²)	Ημερομηνία	T _{περ} (°C) (μέση τιμή)	Y _A (type A)	Y _A (type B)	Y _A (type C)
5-6	5,26	1/11/10	15,4	4,95	4,79	4,94
	5,79	14/3/11	10,2	5,26	5,21	5,27
	5,92	4/8/10	30,9	5,56	5,49	5,92
6-7	6,26	15/3/11	10,6	5,84	5,83	5,88
	6,44	9/9/10	27,2	6,06	5,66	6,24
	6,75	3/8/10	30,9	6,33	6,25	6,67
7-8	7,01	3/7/10	27,7	6,62	6,55	7,03
	7,14	1/7/10	26,3	6,74	6,66	7,15
	7,24	9/7/10	25,6	6,89	6,85	7,27

Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε πως τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων *CdTe* (type C) παρουσιάζουν μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση συστοιχίας Y_A [h] σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά πυριτίου σε όλες τις κλάσεις ακτινοβολίας.

Αυτή η διαφορά παίρνει μικρές τιμές για χαμηλές τιμές ημερήσιας απορροφούμενης ακτινοβόλησης, ενώ κορυφώνεται στις τελευταίες γραμμές του πίνακα, οι οποίες αντιστοιχούν σε μέρες με μεγάλη ηλιοφάνεια και ταυτόχρονα μεγάλες θερμοκρασίες. Αυτό μάλιστα είναι ένα ακόμα στοιχείο το οποίο αποδεικνύει την υπεροχή των φωτοβολταϊκών λεπτών υμενίων *CdTe* (type C) σε ημερομηνίες με υψηλές μέσες τιμές θερμοκρασιών Δ [11], όπως έχει ήδη διαπιστωθεί στη παράγραφο 4.3.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη κλάση 4-5 (kWh/m²) παρουσιάζεται ένα σημείο καμπής για πρώτη φορά, το οποίο αντιστοιχεί σε ακτινοβολίες ανάμεσα στις τιμές 4.20 και 4.50 (kWh/m²), όπου η ενεργειακή απόδοση συστοιχίας Y_A [h] των φωτοβολταϊκών λεπτών υμενίων *CdTe* (type C) γίνεται ίση και ελαφρώς μικρότερη από αυτή των φωτοβολταϊκών πυριτίου. Έπειτα και πριν από αυτές τις τιμές, η διαφορά είναι αισθητή υπέρ των φωτοβολταϊκών λεπτών υμενίων *CdTe* (type C).

Όσον αφορά τώρα την ενεργειακή απόδοση συστοιχίας των type A και type B, παρουσιάζεται επίσης ένα σημείο καμπής για ακτινοβολία 1.91 (kWh/m²), στο οποίο για πρώτη φορά εξισώνονται.

Το ενδιαφέρον είναι πως για ημερομηνίες που παρατηρήθηκε συνολικά απορροφούμενη ακτινοβόληση μικρότερη των 1.91 (kWh/m²) και οι οποίες αντιστοιχούν σε συννεφιασμένες ημέρες με ιδιαίτερη χαμηλή μέση τιμή ακτινοβολίας, τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (type B) παρουσιάζουν

μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση συστοιχίας Y_A [h] από αυτή των φωτοβολταϊκών μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο (*type A*), ενώ για ημερομηνίες με συνολικά απορροφούμενη ακτινοβολία μεγαλύτερη των 1.91 (kWh/m²) μικρότερη.

Οι ημερομηνίες κατά τις οποίες το προβάδισμα είχαν τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*type B*) είναι ελάχιστες ετησίως στα μετεωρολογικά δεδομένα της Ελλάδας, μεμονωμένες σε κάποιους χειμερινούς μήνες και για αυτό θα διαπιστώσουμε αργότερα πως σε κανένα μήνα δεν παρήγαγαν μεγαλύτερο ποσό ενέργειας από αυτό που παρήγαγαν τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο (*type A*).

Φυσικά, σε γεωγραφικές τοποθεσίες όπου παρατηρούνται καιρικά φαινόμενα με έντονη νεφοκάλυψη, μολυσμένη ατμόσφαιρα ή ακόμα και ανεπιθύμητη σκίαση τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*type B*) θα μπορούσαν να παράγουν μεγαλύτερο ποσό ενέργειας, ακόμα και από τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο (*type A*).

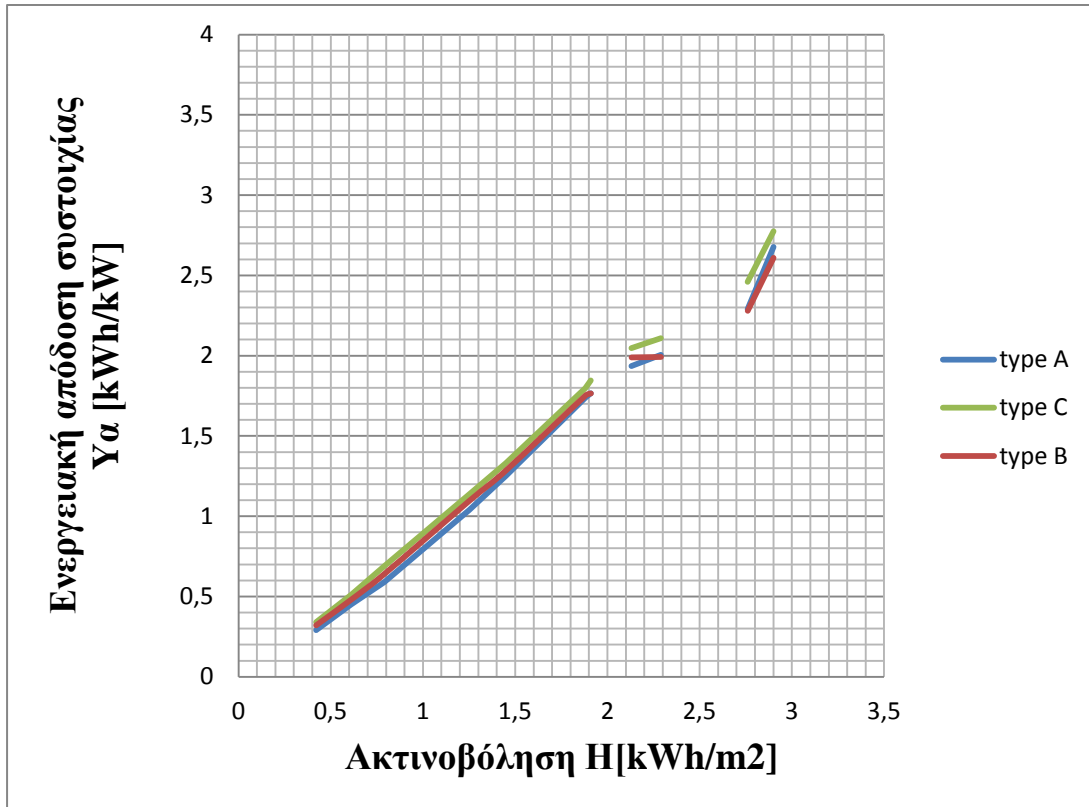
Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε, πως τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*type B*) λειτουργούν πιο αποδοτικά σε χαμηλές τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ενώ τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο (*type A*) σε υψηλές Δ [2].

Αυτό παρατηρείται συγκεκριμένα τις ημερομηνίες 1/3/11, 20/3/11 και 22/3/11, όπου ενώ η ενεργειακή απόδοση συστοιχίας των *type A* έχει αρχίσει ήδη να αυξάνεται ολοένα και περισσότερο ξεπερνώντας την ενεργειακή απόδοση συστοιχίας των *type B*, ξαφνικά λόγω πολύ χαμηλής θερμοκρασίας παρατηρείται μία ανατροπή στις ενεργειακές αποδόσεις των δύο φωτοβολταϊκών, με αποτέλεσμα τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*type B*) να παρουσιάσουν μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση συστοιχίας από τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο (*type A*).

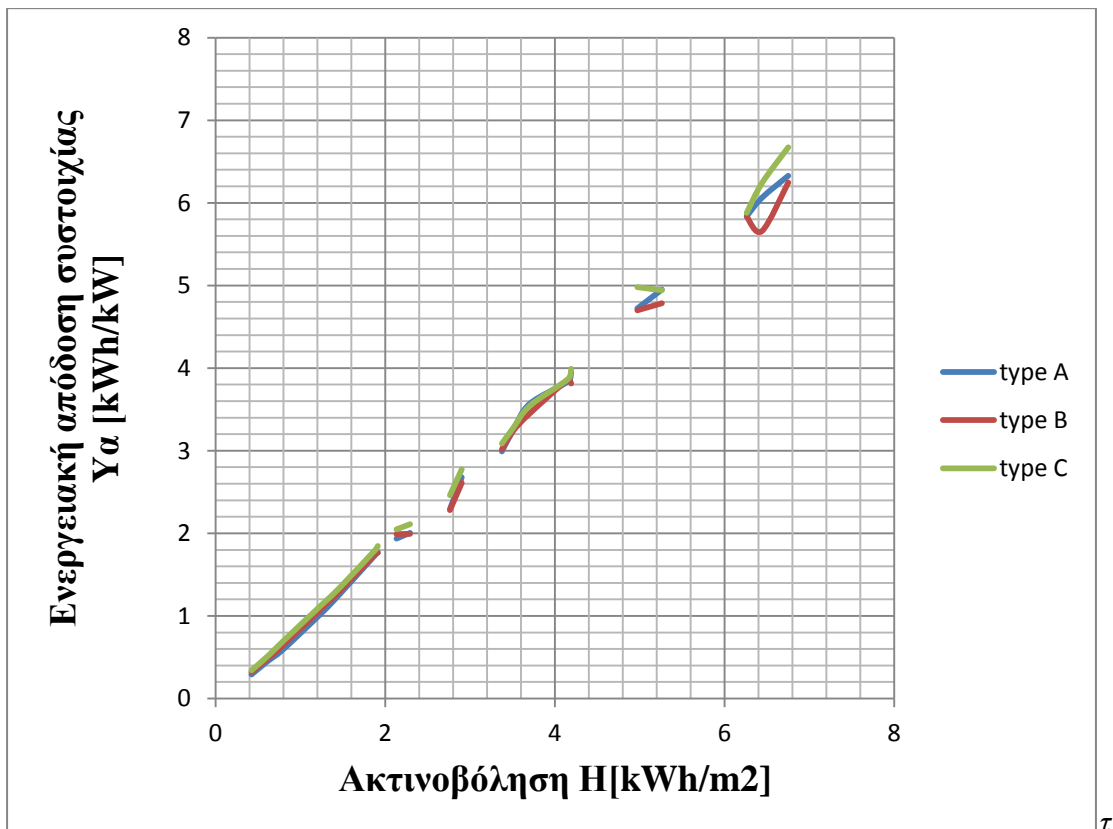
Από την Δ [12] εξάλλου, γνωρίζουμε πως τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο (*a-Si*) αποδίδουν καλύτερα σε μήκη κύματος που αντιστοιχούν στο εύρος 400-500nm, δηλαδή στο χρώμα καθαρού ουρανού σε ημερομηνίες με μεγάλη ηλιοφάνεια.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις συνοψίζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν:

Διάγραμμα 4.2α Στον κάθετο άξονα αναγράφονται οι τιμές των ενεργειακών αποδόσεων συστοιχίας Y_A [h] και στον οριζόντιο άξονα οι αντίστοιχες τιμές της ακτινοβολίας για τις οποίες παρατηρήθηκαν.



Διάγραμμα 4.2β Στον κάθετο άξονα αναγράφονται οι τιμές των ενεργειακών αποδόσεων συστοιχίας Y_A [h] και στον οριζόντιο άξονα οι αντίστοιχες τιμές της ακτινοβολήσης για τις οποίες παρατηρήθηκαν



4.4.2 Μελέτη και σύγκριση της αποδοτικότητας η [%] ανά κλάση ημερήσιας απορροφούμενης ακτινοβολίας

Θεωρητικά, σύμφωνα με τα εγχειρίδια λειτουργίας των κατασκευαστών, οι αποδοτικότητες είναι 16,7%, 14,4% και 10,42% για τα *type A*, *type B* και *type C* αντιστοίχως. Ωστόσο, μελετώντας κάθε κλάση ξεχωριστά μπορούμε να δούμε πως η αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών συγκλίνει ή αποκλίνει από την ονομαστική της τιμή για τις διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

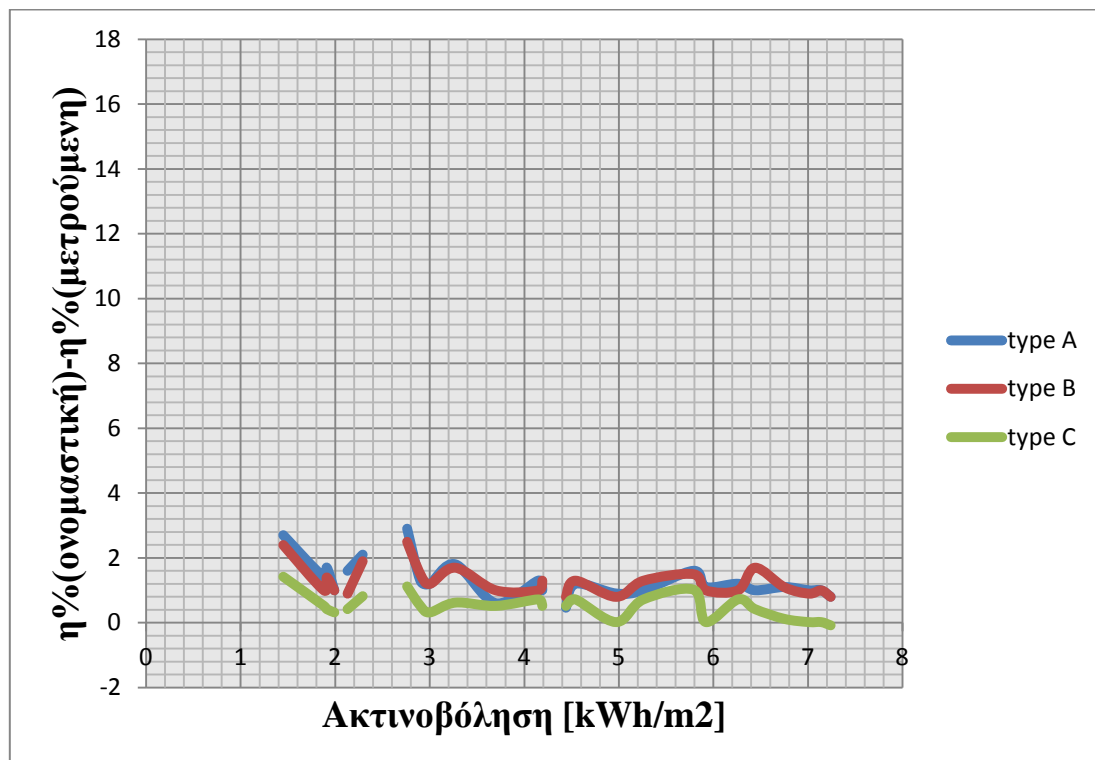
Πίνακας 4.5 Μελέτη και σύγκριση των αποδόσεων η [%] των type A, type B και type C σε ημερομηνίες ταξινομημένες σε κλάσεις αυξανόμενης απορροφούμενης ακτινοβολίας.

Κλάσεις Ακτινοβολίας $H[\text{kWh}/\text{m}^2]$	Ακτινοβολία $H[\text{kWh}/\text{m}^2]$	Ημερομηνία	$T_{\text{περ}}(^{\circ}\text{C})$ (μέση τιμή)	η [%] (type A)	η [%] (type B)	η [%] (type C)
0-1	0,42	2/1/11	11,5	11,50	10,90	8,40
	0,61	28/1/11	10,1	12,30	11,30	8,70
	0,79	2/3/11	5,6	12,40	11,70	9,00
1-2	1,25	7/3/11	4,3	13,80	12,60	9,40
	1,45	16/1/11	11,7	14,00	12,00	9,00
	1,88	24/1/11	11,1	15,30	13,40	9,90
	1,91	13/1/11	12,7	15,00	13,00	10,00
	1,99	21/1/11	12,9	15,70	13,40	10,10
2-3	2,11	8/11/10	20,2	14,90	12,90	9,90
	2,13	1/3/11	6,4	15,10	13,50	10,00
	2,29	17/11/10	18,4	14,60	12,50	9,60
	2,48	14/1/11	13,6	15,90	13,60	10,10
	2,76	25/9/10	23,8	13,80	11,90	9,30
	2,9	3/11/10	16,2	15,40	12,90	9,90
3-4	3,00	16/11/10	18,5	15,50	13,20	10,10
	3,27	9/11/10	21,5	14,90	12,70	9,80
	3,7	9/1/11	12,4	16,10	13,40	9,90
4-5	4,15	22/3/11	4,3	15,40	13,40	9,70
	4,19	8/12/10	16,9	15,70	13,10	9,90
	4,25	24/3/11	7,7	15,80	13,60	9,80
	4,44	26/1/11	7,4	16,24	13,60	9,90
	4,54	8/1/11	11,4	15,50	13,10	9,70

Κλάσεις Ακτινοβολίας $H[\text{kWh}/\text{m}^2]$	Ακτινοβολήση $H[\text{kWh}/\text{m}^2]$	Ημερομηνία	$T_{\text{περ}}(^{\circ}\text{C})$ (μέση τιμή)	η [%] (type A)	η [%] (type B)	η [%] (type C)
5-6	4,97	20/9/10	27,2	15,80	13,60	10,40
	5,26	1/11/10	15,4	15,70	13,10	9,70
	5,79	14/3/11	10,2	15,10	12,90	9,40
6-7	5,92	4/8/10	30,9	15,60	13,40	10,40
	6,26	15/3/11	10,6	15,50	13,40	9,70
	6,44	9/9/10	27,2	15,70	12,70	10,00
7-8	6,75	3/8/10	30,9	15,60	13,30	10,30
	7,01	3/7/10	27,7	15,70	13,50	10,40
	7,14	1/7/10	26,3	15,70	13,40	10,40
	7,24	9/7/10	25,6	15,90	13,60	10,50

Στόχος είναι η εκτίμηση της απόκλισης της αποδοτικότητας κάθε φωτοβολταϊκού από την ονομαστική της τιμή. Στο πλαίσιο αυτής της προσπάθειας έγινε το παρακάτω διάγραμμα, όπου στον κάθετο άξονα αναγράφονται οι διαφορές μεταξύ των αποδόσεων από τις ονομαστικές τους τιμές και στον οριζόντιο οι αντίστοιχες τιμές τις ακτινοβολίας.

Διάγραμμα 4.3 Στον κάθετο άξονα αναγράφονται οι διαφορές μεταξύ των αποδόσεων από τις ονομαστικές τους τιμές και στον οριζόντιο οι αντίστοιχες ακτινοβολήσεις.

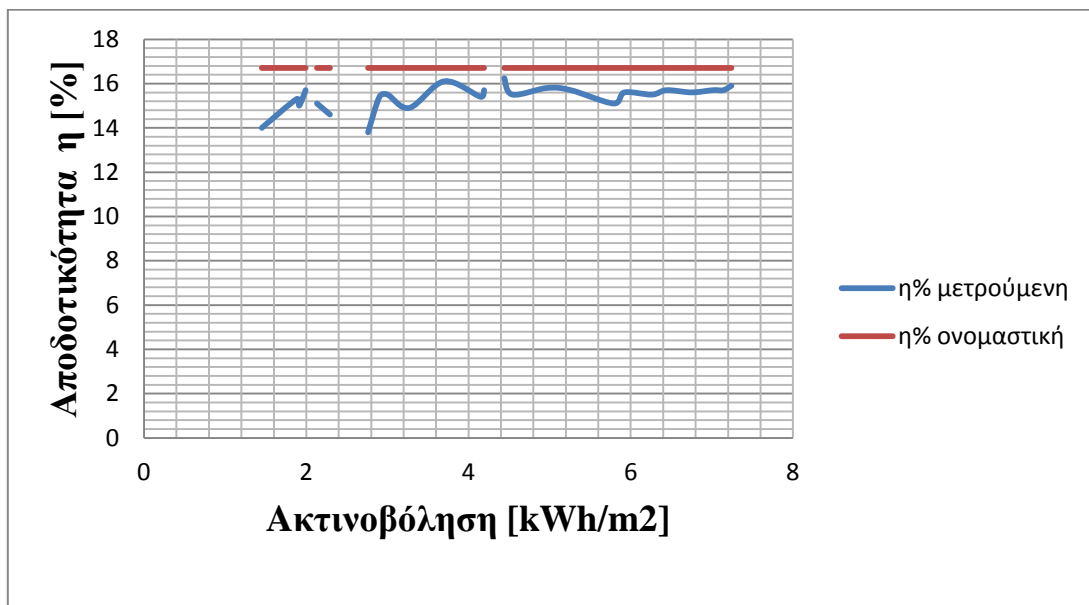


Αξίζει να σημειωθεί πως τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων *CdTe* (*type C*) είναι τα μόνα για τα οποία παρατηρείται την ημερομηνία 09/07/10 αποδοτικότητα μεγαλύτερη της ονομαστικής και είναι αυτά που παρουσιάζουν την μικρότερη απόκλιση από την ονομαστική τιμή της απόδοσης ενώ δεν λείπουν και ημερομηνίες κατά τις οποίες η τιμή της απόδοσης συμπίπτει με την ονομαστική της τιμή.

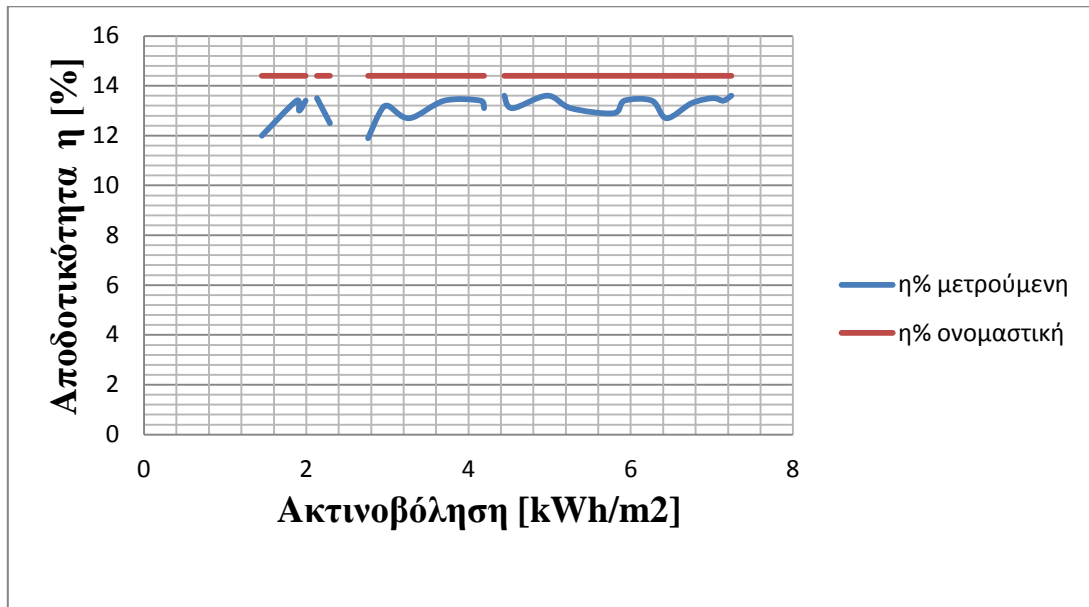
Επίσης, όπως είναι αναμενόμενο από την παράγραφο 4.3, για υψηλές θερμοκρασίες και ακτινοβολήσεις παρατηρούμε πως τα *type B* παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις από την ονομαστική τους απόδοση, ενώ τα *type A* παρουσιάζουν μικρότερες και είναι πιο σταθερά. Αντίστοιχα, σε χαμηλές θερμοκρασίες και ακτινοβολήσεις, υπεροχή έχουν τα *type B* των οποίων η απόκλιση από την ονομαστική τους τιμή της απόδοσης είναι μικρότερη από αυτή των *type A*. Η καλύτερη συμπεριφορά των *type A* σε υψηλές θερμοκρασίες, εξηγείται από το μεγάλο ενεργειακό χάσμα του άμορφου πυριτίου Δ [12], το οποίο καθιστά το κύτταρο λιγότερο ευάλωτο στις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Στα παρακάτω διαγράμματα δίνεται μία πιο σαφής εικόνα για την σχέση μεταξύ μετρούμενης και ονομαστικής απόδοσης για τις διάφορες τιμές τις ακτινοβολίας. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι και τα φωτοβολταϊκά πυριτίου αλλά και αυτά των λεπτών υμενίων προσεγγίζουν περισσότερο την ονομαστική τιμή της απόδοσης σε υψηλές τιμές ακτινοβολιών.

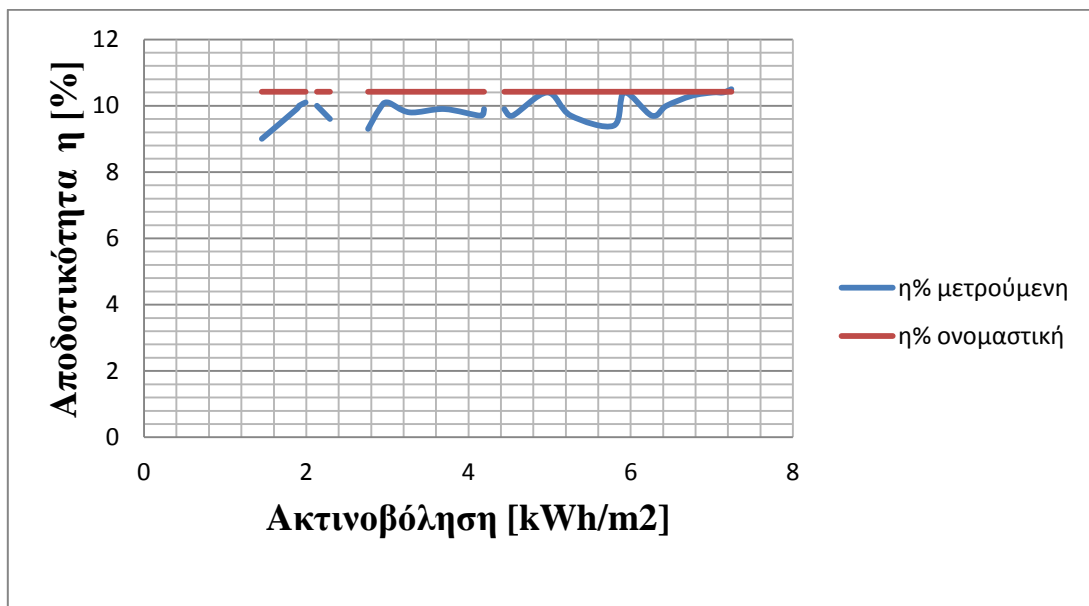
Διάγραμμα 4.4 Σχέση μεταξύ μετρούμενης και ονομαστικής τιμής της αποδοτικότητας για τις διάφορες τιμές της ακτινοβολήσης για τα φωτοβολταϊκά *type A*



Διάγραμμα 4.5 Σχέση μεταξύ μετρούμενης και ονομαστικής τιμής της αποδοτικότητας για τις διάφορες τιμές της ακτινοβολήσης για τα φωτοβολταϊκά type B



Διάγραμμα 4.6 Σχέση μεταξύ μετρούμενης και ονομαστικής τιμής της αποδοτικότητας για τις διάφορες τιμές της ακτινοβολήσης για τα φωτοβολταϊκά type C



4.5 Μελέτη και σύγκριση της μετρούμενης μέγιστης ισχύος με την ονομαστική

Στη παράγραφο αυτή επιλέχθηκαν οι μέγιστες τιμές της ισχύος [kW] της κάθε συστοιχίας όπως καταγράφηκαν μέσα σε κάθε μήνα ξεχωριστά, προκειμένου να διαπιστωθεί η σταθερότητα των φωτοβολταϊκών σε ετήσια κλίμακα. Στον παρακάτω

πίνακα παρουσιάζονται η μέση θερμοκρασία πάνω στην επιφάνεια των κυττάρων, οι μέγιστες τιμές της ισχύος που μετρήθηκαν για κάθε συστοιχία σε κάθε μήνα καθώς και το ποσοστό της απόκλισης της μετρούμενης μέγιστης ισχύος από την ονομαστική.

Πίνακας 4.6 Μελέτη και σύγκριση της μετρούμενης μέγιστης ισχύος με την ονομαστική

Μήνες	T [°C]	Type A Pmax[Wp]	Po- Pmax [%]	Type B Pmax[Wp]	Po- Pmax [%]	Type C Pmax[Wp]	Po- Pmax [%]
Μάρτιος	24,2	6971,70	-0,60	6810,00	-1,33	5904,06	12,53
Απρίλιος	29,9	7011,45	-1,17	6835,09	-1,71	7009,23	-3,84
Μάιος	35,4	7010,67	-1,16	6935,50	-3,20	6101,23	9,61
Ιούνιος	36,6	6986,27	-0,81	6798,37	-1,16	6791,80	-0,61
Ιούλιος	38,6	6670,28	3,75	6186,19	7,94	6707,58	0,63
Αύγουστος	39,2	6335,37	8,58	5895,13	12,27	6237,65	7,59
Σεπτέμβριος	32,4	6933,27	-0,04	6745,60	-0,38	6910,45	-2,37
Οκτώβριος	25,9	6911,10	0,27	6633,06	1,29	6782,90	-0,48
Νοέμβριος	24,9	6247,23	9,85	5850,87	12,93	6020,00	10,81
Δεκέμβριος	19,0	5491,87	20,75	5187,65	22,80	5205,63	22,87
Ιανουάριος	17,8	6849,63	1,15	6631,53	1,316	6433,63	4,69
Φεβρουάριος	17,7	7004,10	-1,06	6826,50	-1,58	6848,81	-1,46
Μάρτιος	19,1	7010,73	-1,16	6999,34	-4,15	7009,23	-3,84

Αν εξαιρέσουμε τους μήνες του Ιουλίου και του Αυγούστου όπου σημειώθηκαν υψηλές θερμοκρασίες στην επιφάνεια των κυττάρων και τους μήνες του Νοεμβρίου και του Δεκεμβρίου όπου παρατηρήθηκαν ιδιαίτερα χαμηλές τιμές ακτινοβολίας, τους υπόλοιπους μήνες και για τις τρεις συστοιχίες η μέγιστη ισχύς που μετρήθηκε ήταν υψηλότερη έως και 1,5% από την ονομαστική της τιμή.

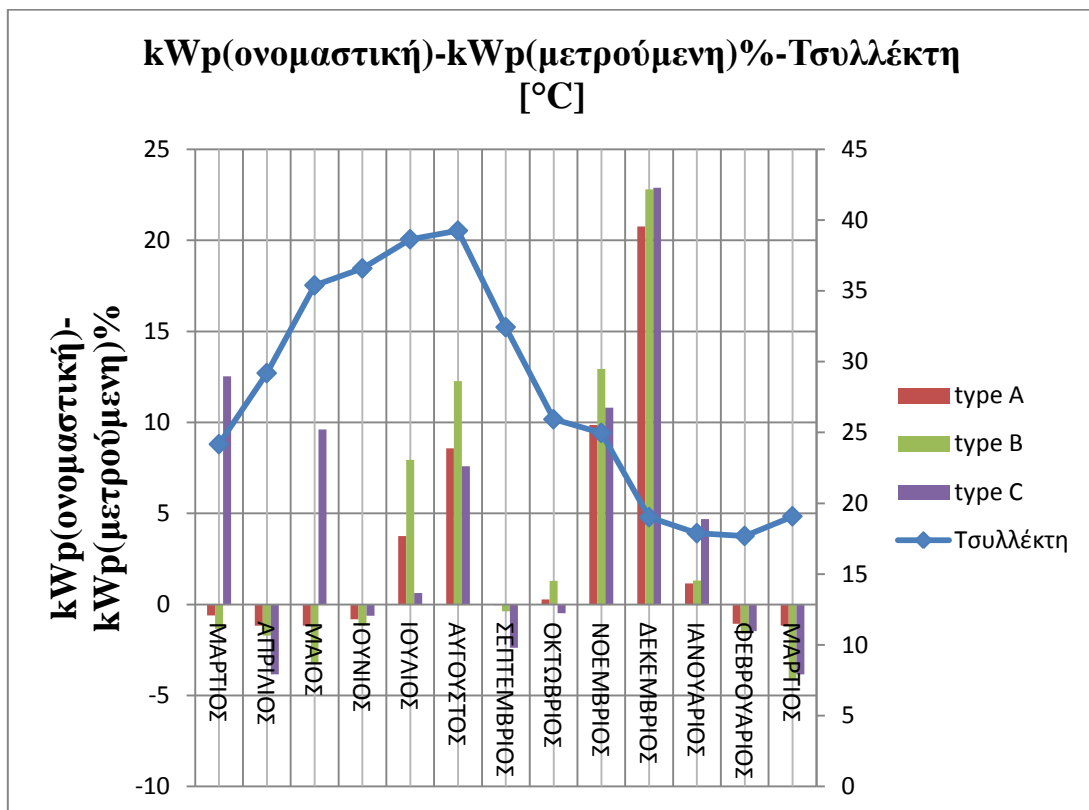
Τον Αύγουστο η μεγαλύτερη απόκλιση που υπολογίστηκε από την ονομαστική ισχύ ήταν των φωτοβολταϊκών πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*type B*) η οποία άγγιξε το 12,27%, λόγω του υψηλού τους θερμοκρασιακού συντελεστή, ενώ η μικρότερη υπολογίστηκε για τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων Τελουριούχου Καδμίου (*type C*) η οποία ήταν μόλις 7,59%. Αυτό είναι ένα επιπλέον στοιχείο που αποδεικνύει την υπεροχή των φωτοβολταϊκών Τελουριούχου Καδμίου *CaTe* (*type C*) σε υψηλές θερμοκρασίες ενώ ταυτόχρονα την αδυναμία των φωτοβολταϊκών πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*type B*) να αποδώσουν ικανοποιητικά σε αυτές τις συνθήκες Δ[8].

Οι συνολικές αποκλίσεις της μετρούμενης μέγιστης ισχύος από την ονομαστική της τιμή που παρατηρούνται σε ετήσια κλίμακα είναι 2,95% για τα *type A* και 3,46% για τα *type B*. Για τα *type C* δεν μπορούμε να έχουμε μία ετήσια εικόνα, εφόσον τον Ιούνιο του 2010 έγινε η αντικατάσταση των κυττάρων με νέα. Ωστόσο, πριν την αντικατάσταση οι συνολικές αποκλίσεις άγγιξαν το 6,10%, ενώ τα νέα φωτοβολταϊκά

λεπτών υμενίων, κατά την διάρκεια από τον Ιούλιο του 2010 μέχρι και τον Μάρτιο του 2011, είχαν συνολικές αποκλίσεις μόλις 4,27%, τα *type B* 5,83% και τα *type A* 4,67%.

Μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα μπορεί να δοθεί από το διάγραμμα 4.7, όπου φαίνεται το ποσοστό της διαφοράς της μέγιστης ισχύος που μετρήθηκε για κάθε μήνα από την ονομαστική μέγιστη ισχύ της κάθε συστοιχίας. Προφανώς, τους μήνες όπου το ποσοστό είναι αρνητικό, η μέγιστη ισχύς που μετρήθηκε ήταν μεγαλύτερη από την ονομαστική της τιμή. Στο δεξιό άξονα μετριέται η θερμοκρασία στην επιφάνεια του κυττάρου ($^{\circ}\text{C}$).

Διάγραμμα 4.7 Στο κάθετο άξονα αναγράφεται το ποσοστό της διαφοράς της μέγιστης ισχύος kWp που μετρήθηκε από την ονομαστική μέγιστη ισχύ της κάθε συστοιχίας



Είναι φανερό, πως τα νέα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων *CdTe* δείχνουν εντελώς διαφορετική εικόνα σε σχέση με τα προηγούμενα. Συγκεκριμένα, ενώ τον Μάρτιο του 2010 δώσανε μία μέγιστη ισχύ μειωμένη κατά 12,53% σε σχέση με την ονομαστική, μετά από έναν χρόνο, το Μάρτιο του 2011 η μέγιστη ισχύς που μετρήθηκε ήταν αυξημένη κατά 3,84% της ονομαστικής της τιμής. Επίσης, η συνολική ενέργεια που παράχθηκε από τα *type C* τον Μάρτιο του 2010 ήταν 727,08 kWh, ενώ έναν χρόνο αργότερα μετρήθηκε 820,88 kWh, δηλαδή αυξημένη κατά 12,9%.

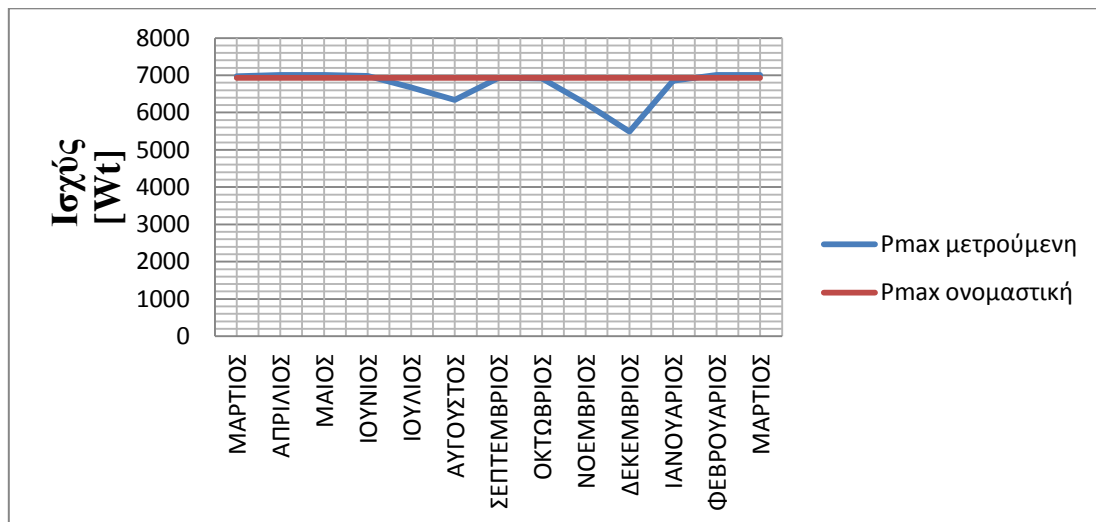
Τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, η μείωση που σημειώνεται στην μέγιστη μετρούμενη ισχύ σε σχέση με την ονομαστική λόγω της υψηλής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του κυττάρου, γίνεται κυρίως αισθητή στα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού

πυριτίου (η οποία αγγίζει το 10,11%), ενώ τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων $CdTe$ (*type C*) είναι αυτά που πλησιάζουν περισσότερο την ονομαστική τιμή με απόκλιση μόλις 4,12%. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί αν λάβουμε υπ' όψιν ότι τα φωτοβολταϊκά Τελουριούχου Καδμίου $CaTe$ (*type C*) παρουσιάζουν τον χαμηλότερο θερμοκρασιακό συντελεστή $T_c = -0,25 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ [20], σε σύγκριση με τα *type A* και *type B*, τα οποία παρουσιάζουν $T_c = -0,30 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ [19] και $T_c = -0,47 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ [21] αντιστοίχως.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, παρουσιάζει η βελτίωση που σημειώνεται στα φωτοβολταϊκά πυριτίου στο χρονικό διάστημα ανάμεσα στον Μάρτιο του 2010 και τον Μάρτιο του 2011. Τα *type A* και *type B* το Μάρτιο του 2011 έδωσαν μέγιστη ισχύ 0,56% και 2,78% αντιστοίχως παραπάνω από αυτήν που μετρήθηκε τον Μάρτιο του 2010.

Στο παρακάτω διάγραμμα η κόκκινη γραμμή αναπαριστά την ονομαστική ισχύ της κάθε συστοιχίας. Βλέπουμε πως από την αρχή της περιόδου μελέτης η μετρούμενη μέγιστη ισχύς κάθε μήνα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη της ονομαστικής, κάτι που υποδηλώνει την σταθερότητα της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών από τις πρώτες εβδομάδες έκθεσής τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Διάγραμμα 4.8 Σύγκριση ονομαστικής και μετρούμενης μέγιστης ισχύος για τα φωτοβολταϊκά *type A*

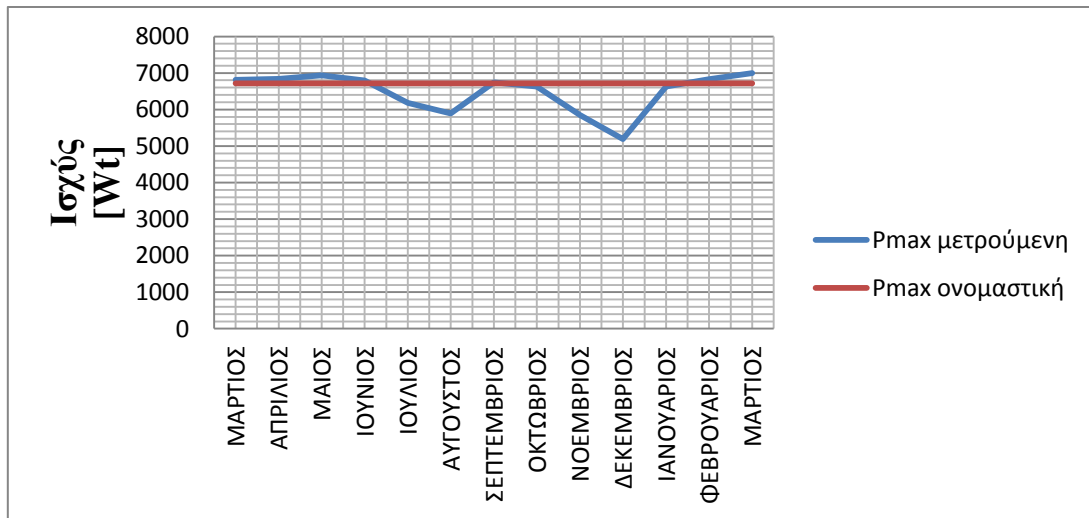


Σύμφωνα με την Δ[9] είναι συνηθισμένο το φαινόμενο να παρατηρείται μία ελαφριά απόκλιση της μετρούμενης μέγιστης ισχύος από την ονομαστική για τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου (*a-Si*) τις πρώτες εβδομάδες της έκθεσής τους στην ηλιακή ακτινοβολία, μετά τις οποίες γίνονται ιδιαίτερα σταθερά. Κάτι τέτοιο εδώ δεν φαίνεται να συμβαίνει, εφόσον βλέπουμε πως από τις πρώτες μόλις μέρες παρατηρείται μέγιστη ισχύς υψηλότερη της ονομαστικής.

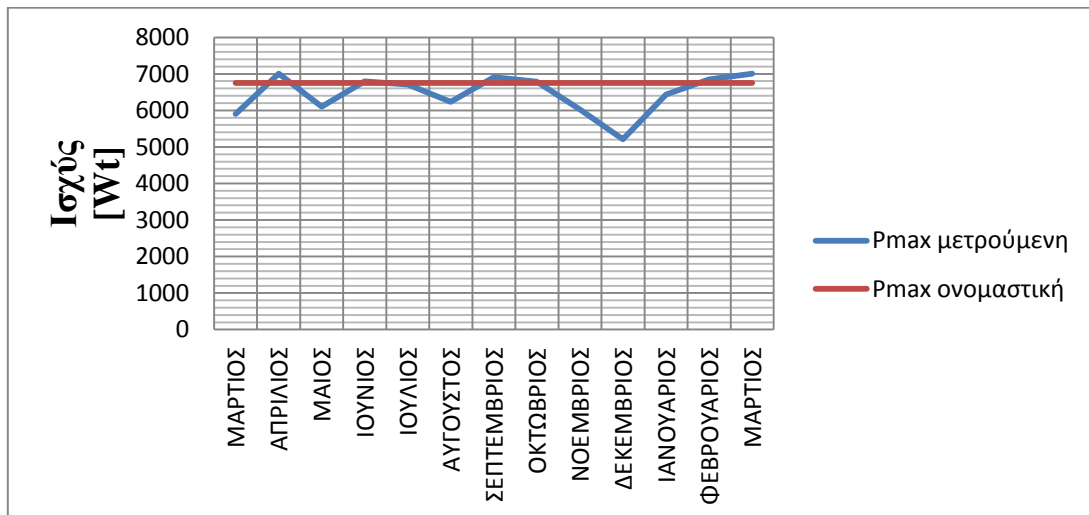
Συγκεκριμένα, σε μια προσομοίωση που έλαβε χώρα στο πανεπιστήμιο Murdoch στην Αυστραλία Δ[8], όπου αξιολογήθηκαν 7 διαφορετικές φωτοβολταϊκές

τεχνολογίες, παρατηρήθηκε ειδικά για το $a-Si$ στην αρχή της περιόδου μέγιστη ισχύς μειωμένη κατά 25% της ονομαστικής, ενώ στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου το άμορφο πυρίτιο έδωσε μία μέγιστη ισχύ 12% μεγαλύτερη της ονομαστικής.

Διάγραμμα 4.9 Σύγκριση ονομαστικής και μετρούμενης μέγιστης ισχύος για τα φωτοβολταϊκά type B



Διάγραμμα 4.10 Σύγκριση ονομαστικής και μετρούμενης μέγιστης ισχύος για τα φωτοβολταϊκά type C



Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται και για τις τρεις συστοιχίες αισθητή μείωση στην μετρούμενη μέγιστη ισχύ τους μήνες του Ιουλίου, του Αυγούστου, του Νοεμβρίου και του Δεκεμβρίου όπως είναι αναμενόμενο από το πίνακα 4.6. Επίσης από το διάγραμμα 4.10 διαπιστώνουμε την υπολειτουργία των συλλεκτών type C πριν λάβει χώρα η αντικατάσταση των συλλεκτών με καινούργιους.

4.6 Μελέτη και σύγκριση του λόγου απόδοσης Pr

4.6.1 Υπολογισμός και σύγκριση του λόγου απόδοσης Pr με βάση την μετρούμενη και την ονομαστική μέγιστη ισχύ.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει στη παράγραφο 4.2.1, ο λόγος απόδοσης Pr δίνει μία σαφή εικόνα της απόδοσης του κυττάρου συναρτήσει της ονομαστικής του τιμής της ισχύος, όπως αυτή αναγράφεται στο εγχειρίδιο λειτουργίας. Συχνά όμως η μέγιστη απόδοση που μετριέται δεν ταυτίζεται με την ονομαστική αλλά παρατηρούνται αποκλίσεις οι οποίες δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Ο λόγος απόδοσης λοιπόν, δεν μπορεί να θεωρείται πάντα ένα αξιόπιστο μέτρο σύγκρισης και αξιολόγησης των φωτοβολταϊκών, εφόσον έχει αποδειχτεί στην παράγραφο 4.5 ότι υπάρχει ένα χάσμα μεταξύ της ονομαστικής τιμής της ισχύος και της μετρούμενης. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την ακριβή μέγιστη ισχύ που μπορεί να αποδώσει το φωτοβολταϊκό, εφόσον αυτή είναι καθοριστική για τον λόγο απόδοσης Pr .

Από το διάγραμμα 4.7 παρατηρούμε πως ο λόγος απόδοσης δεν μπορεί να μας δώσει μία σαφή εικόνα τους μήνες του Ιουλίου, του Αυγούστου, του Νοεμβρίου και του Δεκεμβρίου όπου παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις από την ονομαστική τιμή της ισχύος.

Στο πλαίσιο του προβλήματος αυτού επιλέχθηκαν οι μέγιστες τιμές της μετρούμενης ισχύος κάθε μήνα και υπολογίστηκε ο λόγος απόδοσης ώστε να συγκριθεί με αυτόν που προκύπτει από τις αντίστοιχες ονομαστικές τιμές της ισχύος $\Delta[8]$.

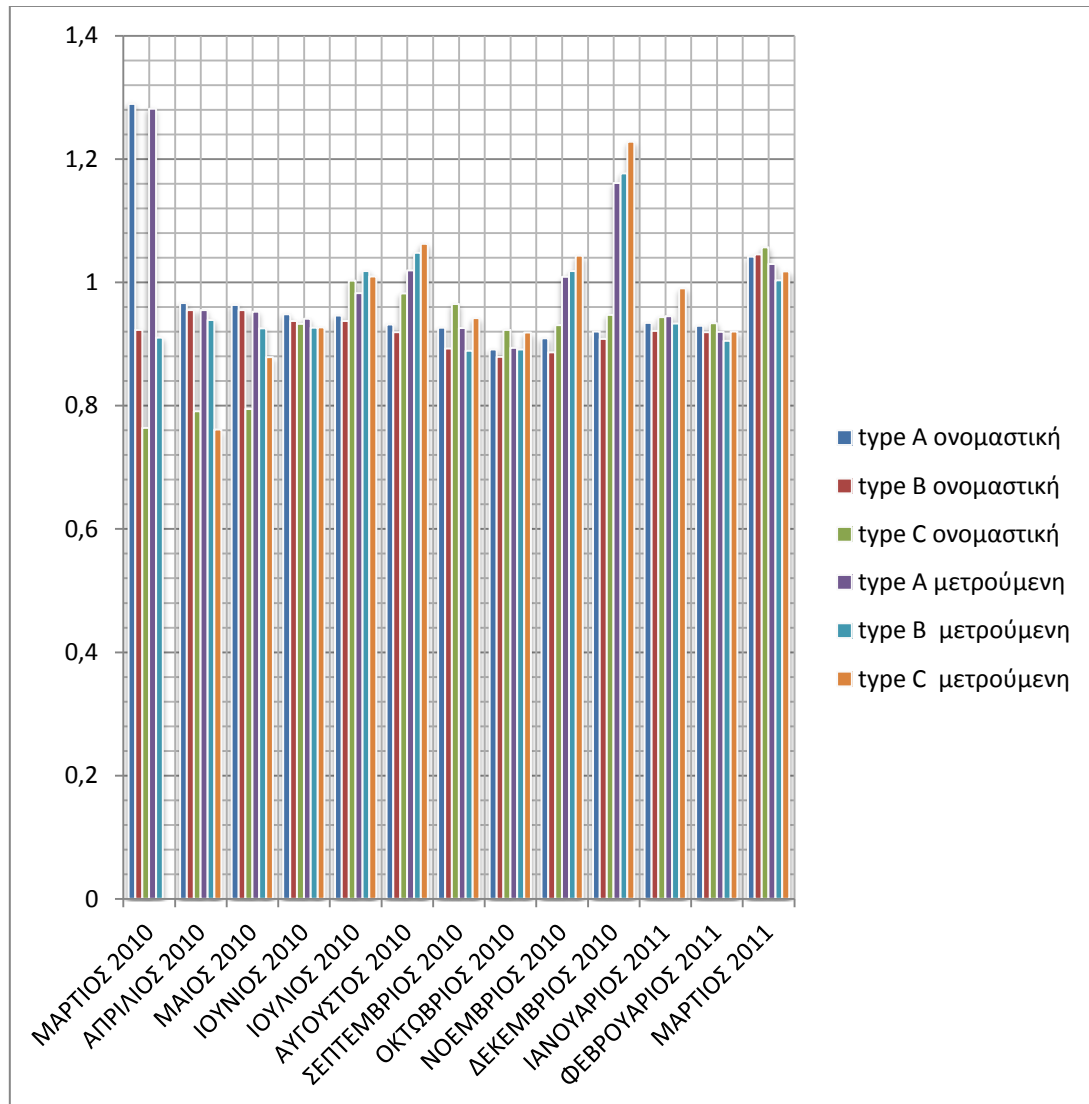
Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα 4.11, ο λόγος απόδοσης ο οποίος είναι ποσοστό παίρνει τιμές οι οποίες ξεπερνούν την μονάδα. Ο βασικός λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι η ιδιαίτερα χαμηλή ακρίβεια του αισθητήρα ηλιοφάνειας ο οποίος διαθέτει ακρίβεια μέτρησης +/- 8%. Αυτή η ακρίβεια είναι αρκετή για την βασική επίβλεψη του σταθμού, όχι όμως για να δώσει μετρήσεις ακριβείας πόσο μάλλον όταν οι μετρήσεις ηλιοφάνειας μετρούνται για υπολογισμούς του λόγου απόδοσης.

Καταρχάς, αξίζει να σημειωθεί, όπως διαπιστώνουμε από την $\Delta[15]$, ότι ο λόγος απόδοσης δεν αντιπροσωπεύει απαραίτητα την παραγόμενη ενέργεια. Πράγματι, σε ημερομηνίες με υψηλή μέση ακτινοβολία, ενώ η ενέργεια που θα παραχθεί μπορεί να είναι αντιπροσωπευτική της υψηλής μέσης ακτινοβολίας, ο λόγος απόδοσης μπορεί να πάρει μικρές τιμές εφόσον είναι αντιστρόφως ανάλογος της απορροφημένης ακτινοβολίας.

Τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων μετά τον Ιούνιο του 2010, όπου έγινε η αντικατάσταση των κυττάρων με καινούργια, παρουσιάζουν μεγαλύτερο λόγο απόδοσης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται τους μήνες του Ιουλίου, του Αυγούστου, του Νοεμβρίου και του Δεκεμβρίου όπου ο λόγος απόδοσης με βάση την ονομαστική μέγιστη ισχύ των type A είναι μεγαλύτερος από αυτόν των type B, ενώ ο λόγος απόδοσης με βάση την μετρούμενη μέγιστη ισχύ μικρότερος. Αυτό προκύπτει λόγω των μεγάλων αποκλίσεων από την ονομαστική ισχύ που παρατηρούνται τους αντίστοιχους μήνες, όπως διαπιστώνουμε από το διάγραμμα 4.7.

Διάγραμμα 4.11 Λόγος απόδοσης Pr των type A,B,C με βάση την μετρούμενη και την ονομαστική μέγιστη ισχύ



4.6.2 Μελέτη του λόγου απόδοσης Pr σε διαφορετικές θερμοκρασίες

Εφόσον κάθε τεχνολογία έχει διαφορετικό θερμοκρασιακό συντελεστή, είναι αναμενόμενο να παρουσιάζει διαφορετικό λόγο απόδοσης για διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας. Στην παράγραφο αυτή θεωρήθηκε σκόπιμο να επιλεγούν ημερομηνίες για τις οποίες οι μέσες τιμές θερμοκρασίας καλύπτουν ένα μεγάλο

εύρος, ώστε να γίνει σύγκριση του λόγου απόδοσης Pr μεταξύ των φωτοβολταϊκών πυριτίου και λεπτών υμενίων.

Πίνακας 4.7 Μελέτη και σύγκριση του λόγου απόδοσης Pr των *type A*, *type B* και *type C* σε ημερομηνίες με διαφορετικές θερμοκρασίες.

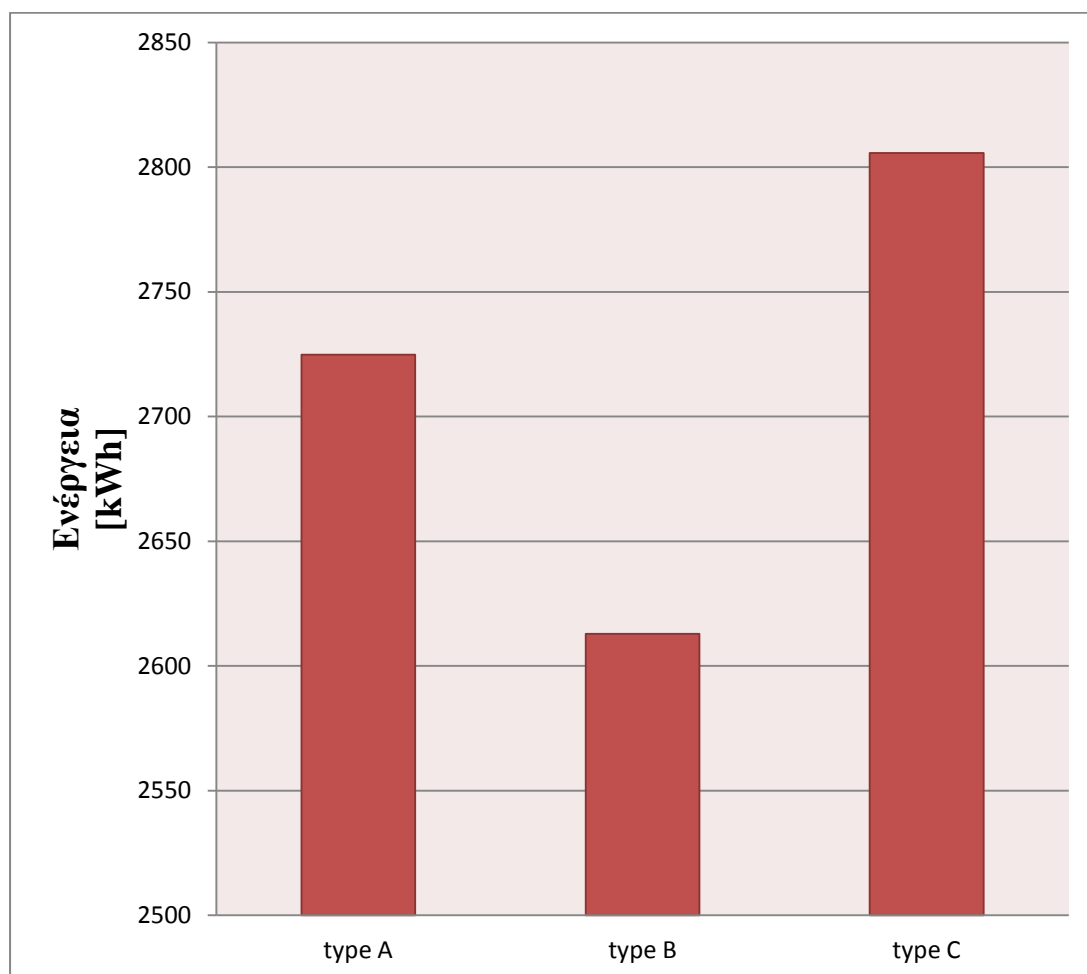
Ημερομηνία	Type	Τμέγιστη(°C)	Ενέργεια(kWh)	Ακτινοβολία H(kWh/m ²)	Pr(%)
15/12/2010	A	11,3	3,47	0,66	75,87
	B	11,3	3,62	0,66	81,62
	C	11,3	3,85	0,66	86,42
22/2/2011	A	16,9	14,16	2,26	90,41
	B	16,9	13,95	2,26	91,85
	C	16,9	14,43	2,26	91,87
9/2/2011	A	17,3	35,80	5,48	94,27
	B	17,3	33,74	5,48	91,62
	C	17,3	34,57	5,48	96,46
12/1/2011	A	20,7	18,07	2,78	93,79
	B	20,7	17,08	2,78	91,43
	C	20,7	17,84	2,78	95,07
6/9/2010	A	29,1	37,15	5,75	93,23
	B	29,1	34,36	5,75	88,92
	C	29,1	37,94	5,75	97,75
16/7/2010	A	33,6	46,25	7,04	94,74
	B	33,6	44,61	7,04	94,24
	C	33,6	48,15	7,04	1,01
22/7/2010	A	36,8	43,56	6,71	93,68
	B	36,8	41,77	6,71	92,63
	C	36,8	45,08	6,71	99,53
24/7/2010	A	40,1	43,42	6,74	92,96
	B	40,1	41,39	6,74	91,38
	C	40,1	44,72	6,74	98,29

Από τον παραπάνω πίνακα επαληθεύθηκε πως τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου (*type A*) σε υψηλές θερμοκρασίες αποδίδουν καλύτερα από τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*type B*), όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 4.4 και όπως διαπιστώνουμε από την Δ[1]. Τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων Τελουριούχου Καδμίου *CdTe* (*type C*) παρουσιάζουν υψηλότερο λόγο απόδοσης Pr σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά πυριτίου σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών. Αξίζει να σημειωθεί πως το προβάδισμα αυτό παίρνει μεγαλύτερες τιμές τις ημερομηνίες που παρατηρούνται ιδιαίτερα υψηλές τιμές θερμοκρασίας Δ[8].

4.7 Συνολική παραγωγή ενέργειας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα type C, αν εξαιρέσουμε τους μήνες πριν του Ιουνίου του 2010 όπου έλαβε χώρα η αντικατάσταση των συλλεκτών, παρουσιάζουν τις χαμηλότερες απώλειες και συνολικά παράγουν περισσότερη ενέργεια. Η διαφορά αυτή της παραγόμενης ενέργειας κορυφώνεται τους μήνες του Ιουλίου και του Αυγούστου του 2010 όπως φαίνεται από το διάγραμμα 4.12. Στην παράγραφο 4.4 εξάλλου, έχει εξακριβωθεί η υπεροχή των φωτοβολταϊκών λεπτών υμενίων *CdTe* (type C) έναντι αυτών του πυριτίου σε υψηλές θερμοκρασίες, με τελευταία να έρχονται τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Διάγραμμα 4.12 Συνολική παραγωγή ενέργειας για τους μήνες του Ιουλίου και του Αυγούστου 2010

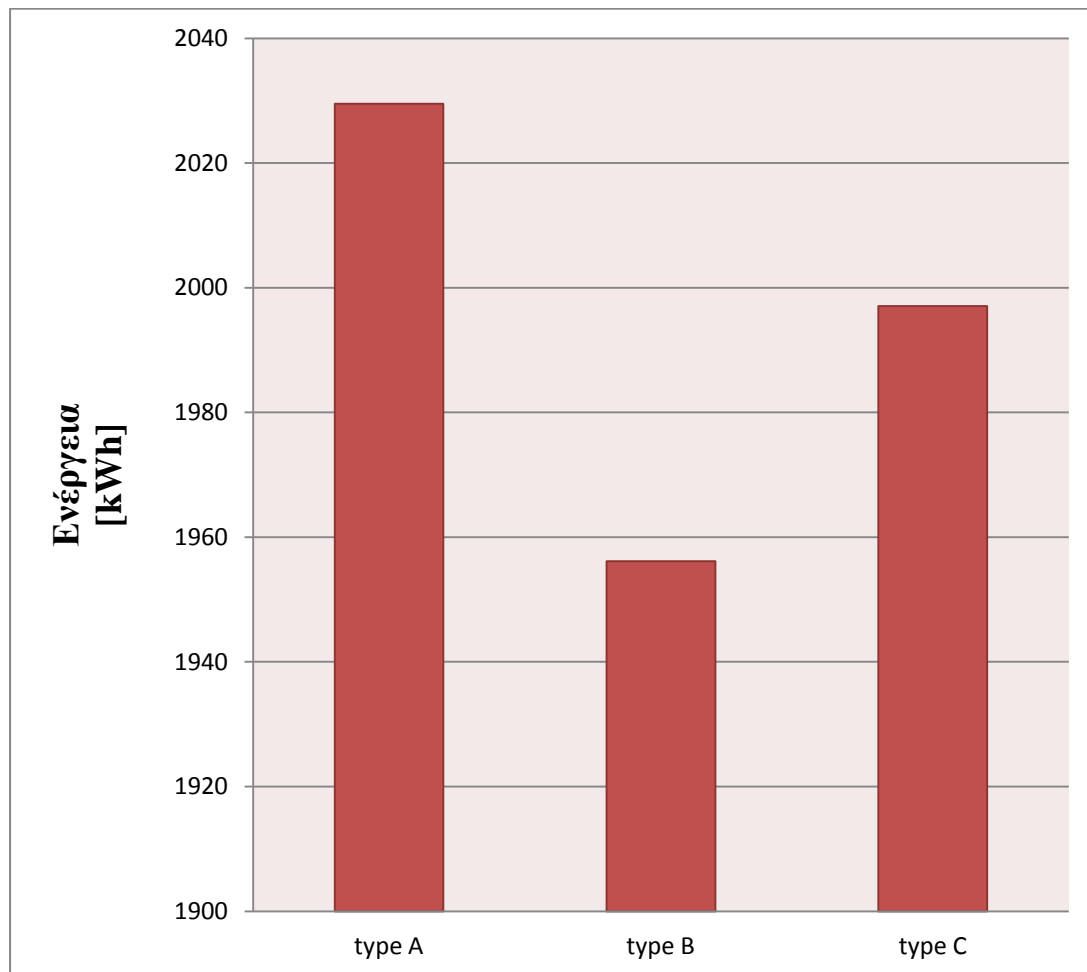


Τα type C παρατηρούμε πως τον Ιούλιο και τον Αύγουστο του 2010 αθροιστικά παρήγαγαν 80,89 kWh και 192,83 kWh αντιστοίχως περισσότερες από τα type A και type B. Αυτή η διαφορά θα μπορούσε να ήταν ακόμα μεγαλύτερη αν λαμβάναμε υπ' όψιν και τον Ιούνιο του 2010 κατά τον οποίο όμως τα type C υπολειπούνταν.

Τους θερμούς μήνες λοιπόν του Ιουλίου και του Αυγούστου τα φωτοβολταϊκά *type C* παράγγααν περίπου 2,9% περισσότερη ενέργεια από τα *type A*.

Τους μοναδικού μήνες που παρατηρείται αθροιστικά χαμηλότερη παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων είναι τους ψυχρούς μήνες του Ιανουαρίου, του Φεβρουαρίου και του Μαρτίου του 2011, όπως φαίνεται από το διάγραμμα 4.13.

Διάγραμμα 4.13 Συνολική παραγωγή ενέργειας για τους μήνες του Ιανουαρίου, του Φεβρουαρίου και του Μαρτίου του 2011

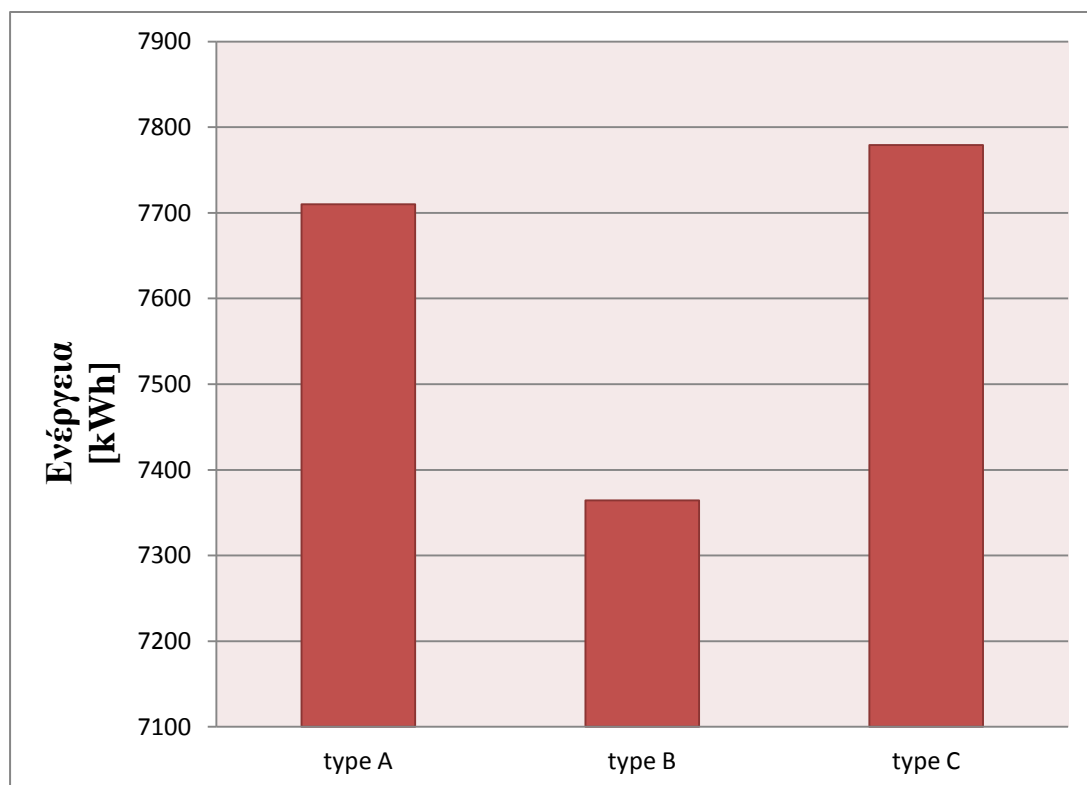


Από το διάγραμμα 4.13 φαίνεται πως τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων Τελουριούχου Καδμίου (*type C*), τους μήνες του Ιανουαρίου, του Φεβρουαρίου και του Μαρτίου του 2011 είχαν ένα μικρό έλλειμμα παραγόμενης ενέργειας σε σχέση με αυτήν που παράχθηκε από τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο (*type A*) το οποίο άγγιζε το 1,6%, φυσικά το έλλειμμα αυτό καλύπτεται από το πλεόνασμα της παραγόμενης ενέργειας τους θερμούς μήνες του Ιουλίου και του Αυγούστου που άγγιζε το 2,9%, όπως φαίνεται από το διάγραμμα 4.12.

Από την Δ[12] γνωρίζουμε πως ενώ και τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο (*a-Si*) αλλά και τα φωτοβολταϊκά Τελουριούχου Καδμίου (*CdTe*) αποδίδουν καλύτερα σε ημερομηνίες με ηλιοφάνεια, συγκεκριμένα τα φωτοβολταϊκά (*a-Si*) σε ημερομηνίες με συννεφιά, παρουσιάζουν μία μικρή αύξηση στην αποδοτικότητα για πολύ χαμηλές τιμές της ακτινοβολίας. Επομένως, εξηγείται το πλεόνασμα της παραγόμενης ενέργειας των φωτοβολταϊκών (*a-Si*) για τους μήνες του Ιανουαρίου, του Φεβρουαρίου και του Μαρτίου του 2011. (Διάγραμμα 4.13)

Ωστόσο, αν λάβουμε υπ' όψιν ολόκληρη την περίοδο από τον Ιούλιο του 2010 μέχρι και τον Μάρτιο του 2011, δηλαδή αν εξαιρέσουμε την περίοδο στην οποία δεν είχαν αντικατασταθεί ακόμα τα φωτοβολταϊκά type C, παρατηρούμε πως τα type C παρήγαγαν 7779,24 kWh σε σύγκριση με τα type A και type B τα οποία παρήγαγαν 7709,83kWh και 7364,51kWh αντιστοίχως. Δηλαδή παρατηρούμε πως όχι μόνο καλύφτηκε το έλλειμμα παραγόμενης ενέργειας που προέκυψε τους μήνες του Ιανουαρίου, του Φεβρουαρίου και του Μαρτίου του 2011 αλλά τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων παρήγαγαν συνολικά 0,9% και 5,6% περισσότερη ενέργεια από τα type A και type B αντιστοίχως.

Διάγραμμα 4.14 Συνολική παραγωγή ενέργειας από τον Ιούλιο του 2010 μέχρι και τον Μάρτιο του 2011



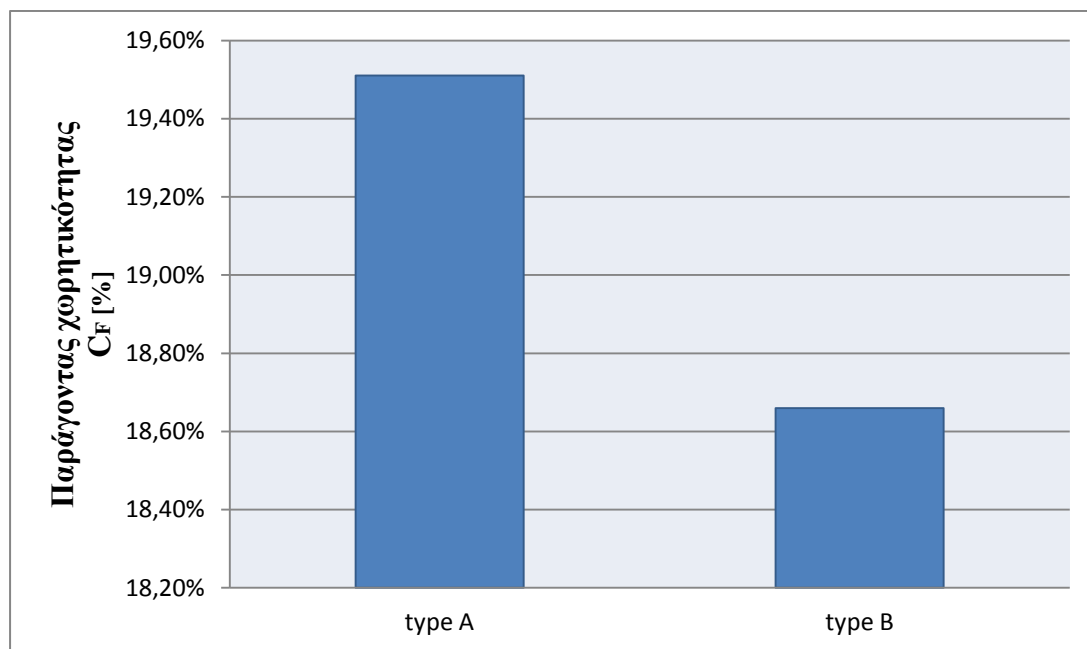
4.8 Υπολογισμός του παράγοντα χωρητικότητας C_F και του λόγου απόδοσης Pr σε ετήσια κλίμακα

Στη παράγραφο αυτή υπολογίζονται ετησίως τα μεγέθη Pr και C_F για τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου, για τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων δεν μπορούμε να έχουμε μία ετήσια εικόνα, εφόσον τους 4 πρώτους μήνες υπολειπούνταν.

Ο παράγοντας χωρητικότητας C_F υπολογίζεται ως το πηλίκο της ενέργειας που παράχθηκε ετησίως από το φωτοβολταϊκό σύστημα προς την ενέργεια που θα έπρεπε να παραχθεί αν τα φωτοβολταϊκά δούλευαν στην ονομαστική τους ισχύ 24 ώρες για την κάθε ημέρα του έτους. Με άλλα λόγια παρέχει μία εικόνα σε ετήσια κλίμακα η οποία δείχνει το ποσοστό των συνολικών ωρών λειτουργίας ετησίως που το σύστημα χρειάστηκε να λειτουργήσει στην ονομαστική του ισχύ, ώστε να παράγει το ποσό της ενέργειας που παράχθηκε.

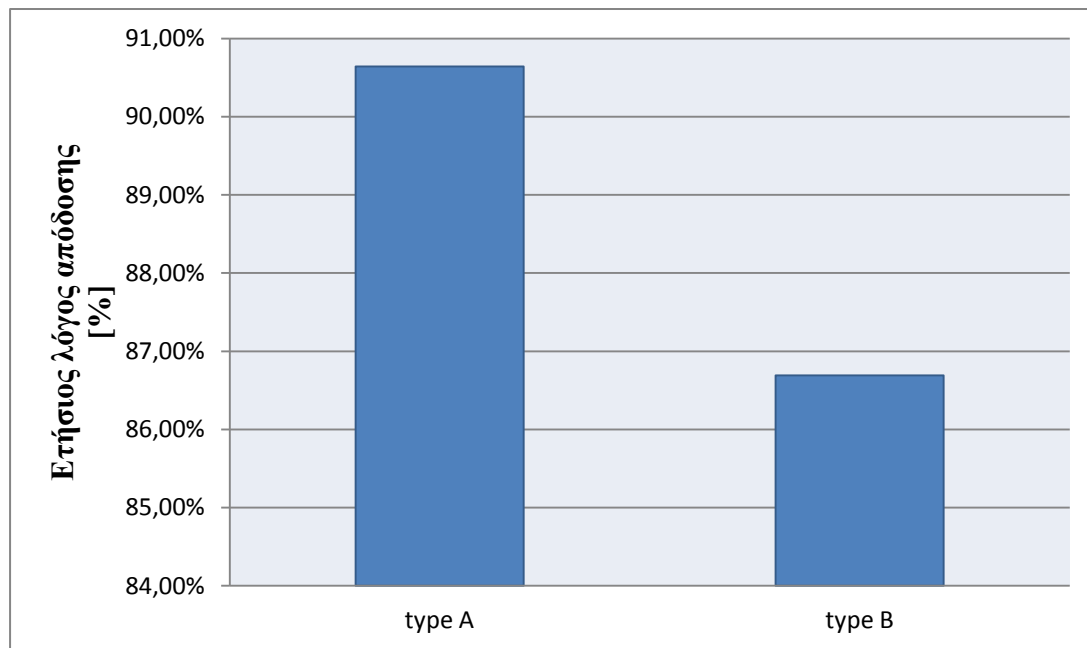
Ο παράγοντας χωρητικότητας υπολογίζεται $C_F = \frac{E}{8760 Wp} = \frac{Y_A}{8760}$, όπου E η ενέργεια που παράχθηκε από το Μάρτιο του 2010 ως τον Φεβρουάριο του 2011.

Διάγραμμα 4.15 Στον κάθετο άξονα αναγράφονται οι τιμές του παράγοντα χωρητικότητας C_F για τα φωτοβολταϊκά type A,B



Έχοντας πλέον την ετήσια παραγόμενη ενέργεια από τον Μάρτιο του 2010 έως τον Φεβρουάριο του 2011 υπολογίστηκε ο δείκτης Pr σε ετήσια κλίμακα με βάση την ονομαστική ισχύ των type A και type B.

Διάγραμμα 4.16 Ο λόγος απόδοσης Pr σε ετήσια κλίμακα των type A και type B με βάση την ονομαστική ισχύ

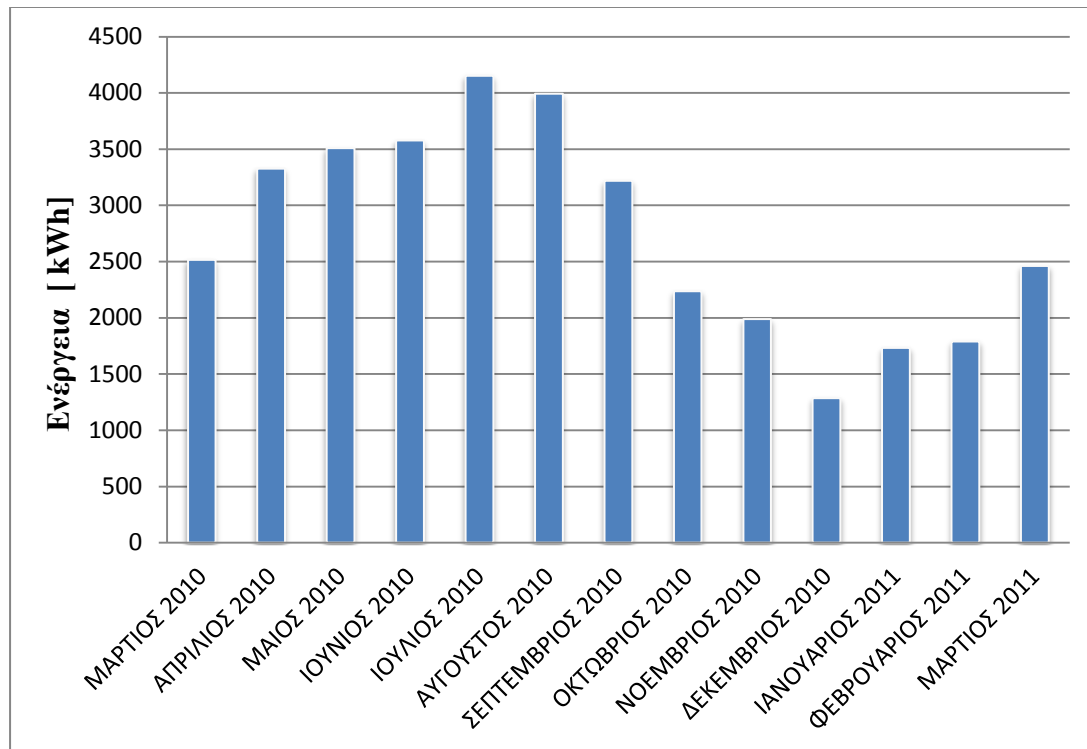


Παρατηρούμε πως τα type A παρουσιάζουν σε ετήσια κλίμακα λόγο απόδοσης Pr ο οποίος αγγίζει το 90,6% σε σύγκριση με τον αντίστοιχο των type B που είναι μόλις 86,7%. Πίσω από τη διαφορά αυτή κρύβεται το έλλειμμα της ενέργειας που παρατηρήθηκε στην παράγραφο 4.7 και το οποίο αγγίζει το 4,5%.

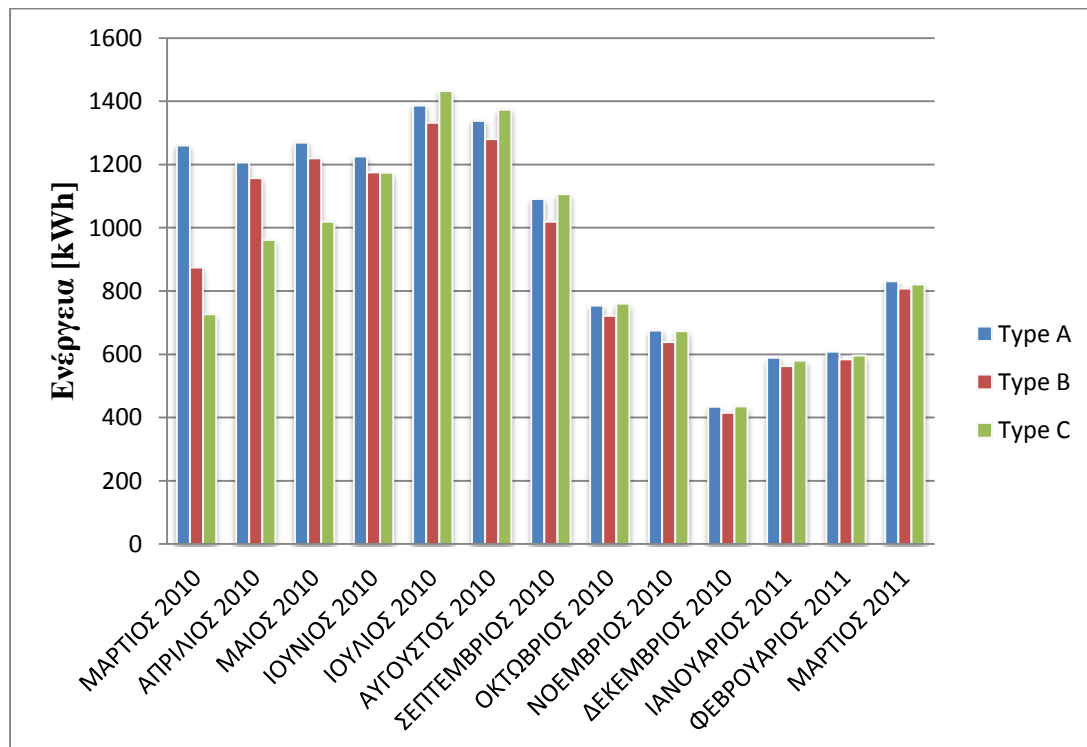
4.9 Γενική επισκόπηση διαγραμμάτων

Οι περισσότερες από τις παραπάνω παρατηρήσεις συνοψίζονται στα παρακάτω διαγράμματα, τα οποία δίνουν μία ετήσια εικόνα για την λειτουργία των φωτοβολταϊκών.

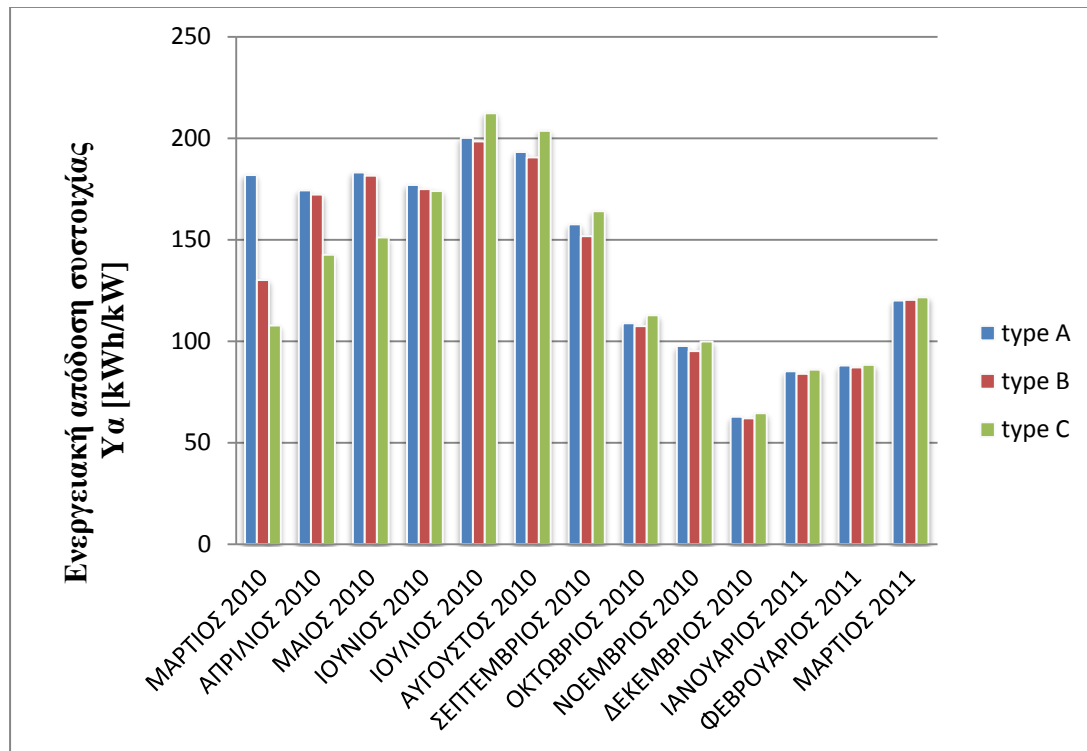
Διάγραμμα 4.17 Συνολική παραχθείσα ενέργεια των type A, type B και type C ανά μήνα



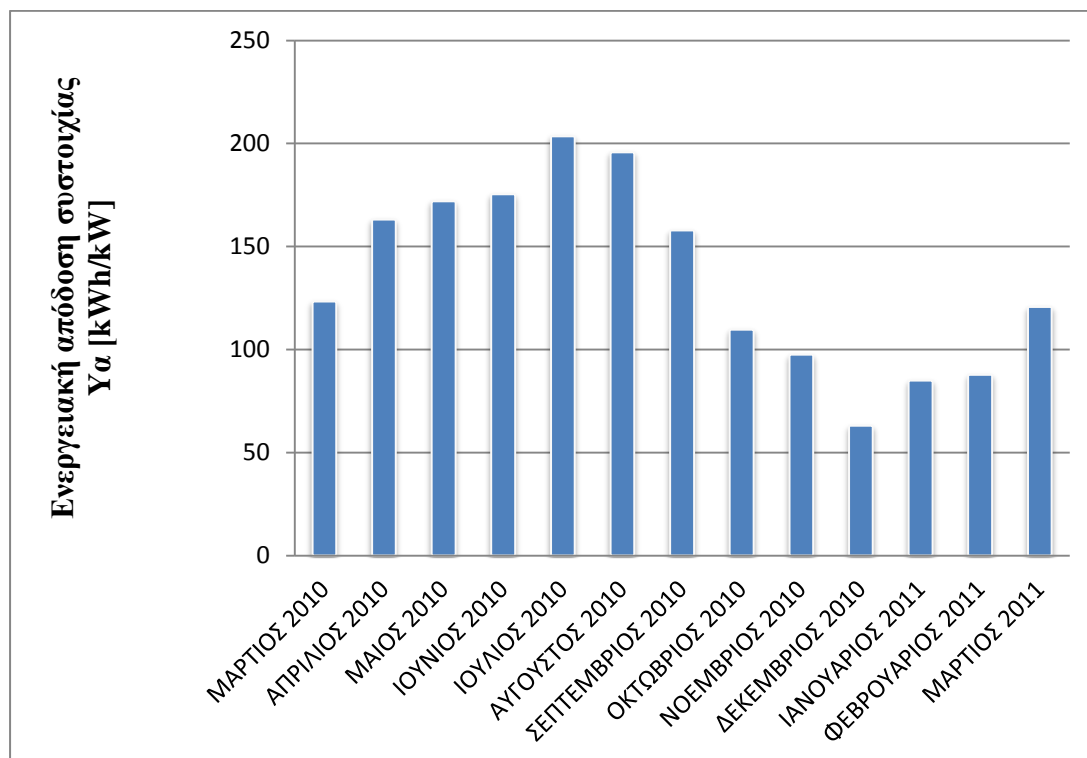
Διάγραμμα 4.18 Παραχθείσα ενέργεια των type A, type B και type C ανά μήνα



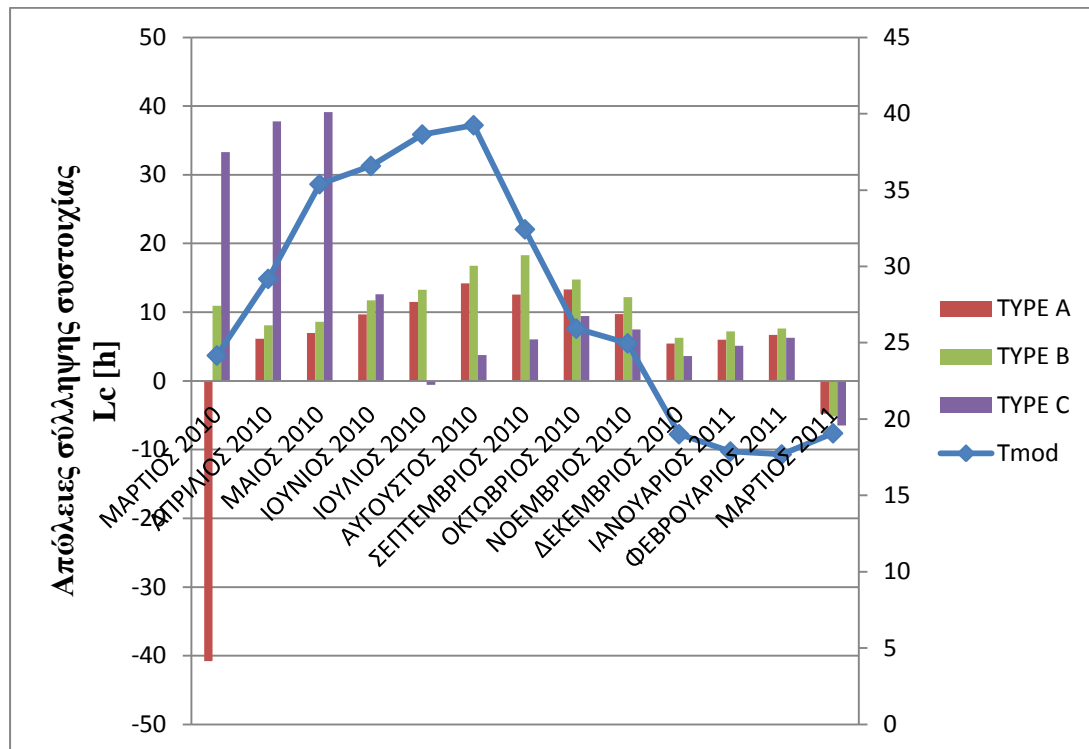
Διάγραμμα 4.19 Ενεργειακή απόδοση συστοιχίας Για των type A,B,C



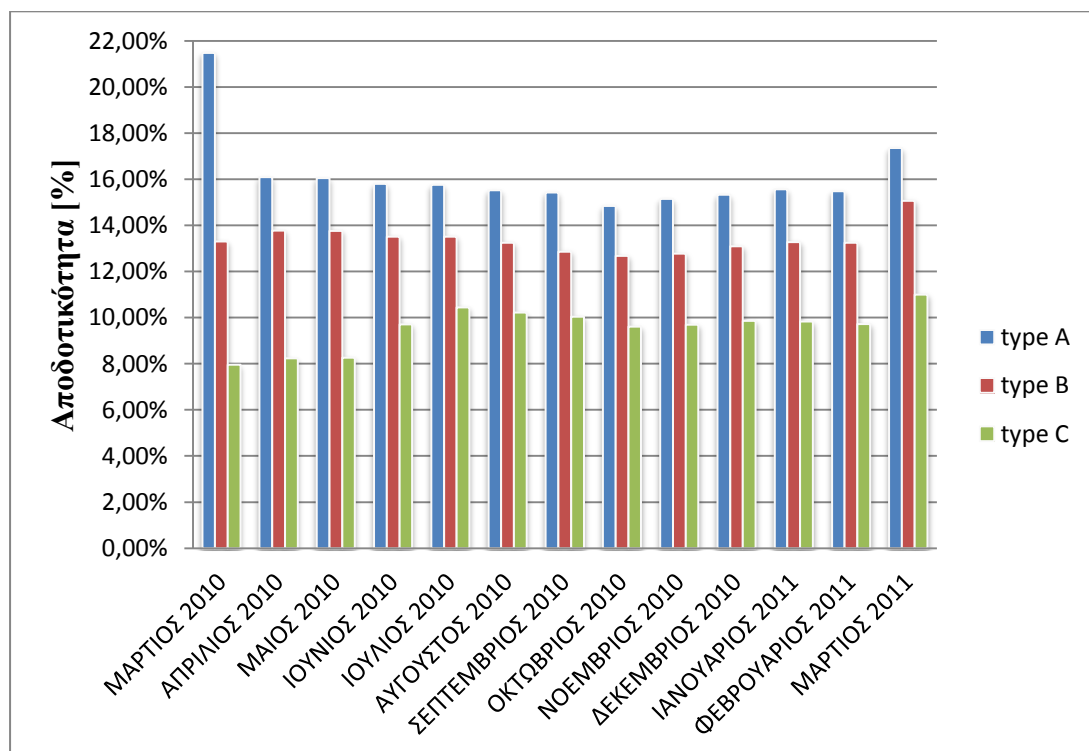
Διάγραμμα 4.20 Ενεργειακή απόδοση συστοιχίας Για του συστήματος



Διάγραμμα 4.21 Απώλειες σύλληψης συστοιχίας L_c [h]



Διάγραμμα 4.22 Αποδοτικότητα των type A, type B και type C ανά μήνα



4.10 Προσομοίωση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών με χρήση του PVsyst

Για την προσομοίωση του φωτοβολταϊκού συστήματος χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 5,41 του προγράμματος PV syst. Το λογισμικό PV syst είναι ένα εργαλείο σχεδιασμού και προσομοίωσης φωτοβολταϊκών διατάξεων του Πανεπιστημίου της Γενεύης. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούν στο γεωγραφική τοποθεσία της εταιρίας, όπως έχουν καταμετρηθεί το 1990.

Πίνακας 4.8 Προσομοίωση της συστοιχίας type A τη χρονική περίοδο από το Μάρτιο του 2010 μέχρι το Μάρτιο του 2011

Μήνες	Y_R [h] (μετρούμενο)	Y_R [h] (προσομοίωση)	E_A [kWh] (μετρούμενο)	E_A [kWh] (προσομοίωση)
Μάρτιος 10	141,04	116,60	1260,15	686,00
Απρίλιος 10	180,32	155,59	1207,21	909,00
Μάιος 10	190,11	181,25	1269,09	1045,00
Ιούνιος 10	186,60	194,86	1226,26	1105,00
Ιούλιος 10	211,58	209,23	1386,69	1167,00
Αύγουστος 10	207,27	207,87	1338,11	1155,00
Σεπτέμβριος 10	170,02	175,25	1091,13	986,00
Οκτώβριος 10	122,14	131,07	754,19	756,00
Νοέμβριος 10	107,23	86,94	675,67	504,00
Δεκέμβριος 10	68,15	72,09	434,51	421,00
Ιανουάριος 11	91,05	90,02	589,47	533,00
Φεβρουάριος 11	94,59	92,02	609,15	543,00
Μάρτιος 11	115,17	116,58	830,91	686,00

Μήνες	Pr % (μετρούμενο)	Pr % (προσομοίωση)	η % (μετρούμενο)	η % (προσομοίωση)
Μάρτιος 10	1,29	0,85	21,48	14,49
Απρίλιος 10	0,97	0,84	16,09	14,38
Μάιος 10	0,96	0,83	16,05	14,18
Ιούνιος 10	0,95	0,82	15,79	13,95
Ιούλιος 10	0,95	0,81	15,75	13,72
Αύγουστος 10	0,93	0,80	15,52	13,66
Σεπτέμβριος 10	0,93	0,81	15,43	13,83
Οκτώβριος 10	0,89	0,83	14,84	14,18
Νοέμβριος 10	0,91	0,84	15,15	14,28
Δεκέμβριος 10	0,92	0,84	15,33	14,39
Ιανουάριος 11	0,93	0,85	15,56	14,58
Φεβρουάριος 11	0,93	0,85	15,48	14,53
Μάρτιος 11	1,04	0,84	17,35	14,49

Πίνακας 4.9 Προσομοίωση της συστοιχίας type B τη χρονική περίοδο από το Μάρτιο του 2010 μέχρι το Μάρτιο του 2011

Μήνες	Y_R [h] (μετρούμενο)	Y_R [h] (προσομοίωση)	E_A [kWh] (μετρούμενο)	E_A [kWh] (προσομοίωση)
Μάρτιος 10	141,04	116,60	874,41	647,00
Απρίλιος 10	180,32	155,59	1157,18	856,00
Μάιος 10	190,11	181,25	1219,68	977,00
Ιούνιος 10	186,60	194,86	1175,13	1026,00
Ιούλιος 10	211,58	209,23	1332,64	1078,00
Αύγουστος 10	207,27	207,87	1280,23	1067,00
Σεπτέμβριος 10	170,02	175,25	1019,42	913,00
Οκτώβριος 10	122,14	131,07	721,59	705,00
Νοέμβριος 10	107,23	86,94	638,67	472,00
Δεκέμβριος 10	68,15	72,09	415,83	396,00
Ιανουάριος 11	91,05	90,02	563,47	504,00
Φεβρουάριος 11	94,59	92,02	584,30	512,00
Μάρτιος 11	115,17	116,58	808,35	647,00

Μήνες	Pr % (μετρούμενο)	Pr % (προσομοίωση)	η % (μετρούμενο)	η % (προσομοίωση)
Μάρτιος 10	0,92	0,83	13,30	12,21
Απρίλιος 10	0,95	0,82	13,77	12,09
Μάιος 10	0,95	0,80	13,77	11,84
Ιούνιος 10	0,94	0,78	13,51	11,58
Ιούλιος 10	0,94	0,77	13,51	11,32
Αύγουστος 10	0,92	0,76	13,25	11,27
Σεπτέμβριος 10	0,89	0,77	12,87	11,44
Οκτώβριος 10	0,88	0,80	12,68	11,82
Νοέμβριος 10	0,89	0,81	12,78	11,95
Δεκέμβριος 10	0,91	0,82	13,09	12,10
Ιανουάριος 11	0,92	0,83	13,27	12,31
Φεβρουάριος 11	0,92	0,83	13,26	12,25
Μάρτιος 11	1,04	0,83	15,06	12,21

Πίνακας 4.10 Προσομοίωση της συστοιχίας type C τη χρονική περίοδο από το Μάρτιο του 2010 μέχρι το Μάρτιο του 2011

Μήνες	Y_R [h] (μετρούμενο)	Y_R [h] (προσομοίωση)	E_A [kWh] (μετρούμενο)	E_A [kWh] (προσομοίωση)
Μάρτιος 10	141,04	116,60	727,11	693,00
Απρίλιος 10	180,32	155,59	962,21	919,00
Μάιος 10	190,11	181,25	1019,18	1061,00
Ιούνιος 10	186,60	194,86	1174,36	1121,00
Ιούλιος 10	211,58	209,23	1432,14	1182,00
Αύγουστος 10	207,27	207,87	1373,56	1164,00
Σεπτέμβριος 10	170,02	175,25	1106,86	989,00
Οκτώβριος 10	122,14	131,07	760,79	752,00
Νοέμβριος 10	107,23	86,94	673,31	496,00
Δεκέμβριος 10	68,15	72,09	435,51	409,00
Ιανουάριος 11	91,05	90,02	579,96	521,00
Φεβρουάριος 11	94,59	92,02	596,16	541,00
Μάρτιος 11	115,17	116,58	820,93	693,00

Μήνες	Pr % (μετρούμενο)	Pr % (προσομοίωση)	η % (μετρούμενο)	η % (προσομοίωση)
Μάρτιος 10	0,76	0,88	7,96	9,39
Απρίλιος 10	0,79	0,87	8,23	9,33
Μάιος 10	0,79	0,87	8,27	9,24
Ιούνιος 10	0,93	0,85	9,71	9,08
Ιούλιος 10	1,00	0,84	10,45	8,92
Αύγουστος 10	0,98	0,83	10,23	8,84
Σεπτέμβριος 10	0,96	0,84	10,05	8,91
Οκτώβριος 10	0,92	0,85	9,61	9,06
Νοέμβριος 10	0,93	0,84	9,69	9,02
Δεκέμβριος 10	0,94	0,84	9,86	8,99
Ιανουάριος 11	0,94	0,86	9,83	9,15
Φεβρουάριος 11	0,93	0,87	9,73	9,29
Μάρτιος 11	1,05	0,88	11,00	9,39

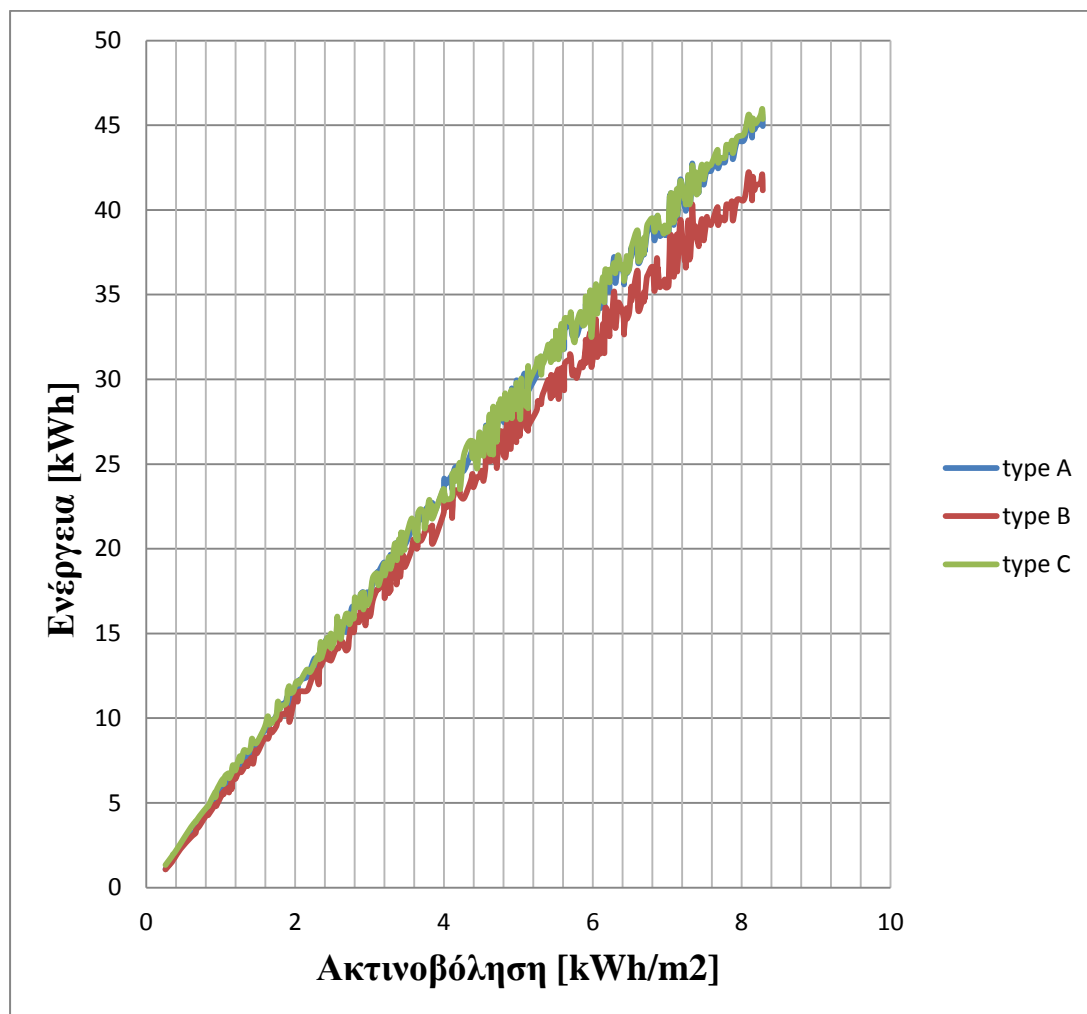
Παρατηρούμε ότι και οι τρεις συστοιχίες παρήγαγαν περισσότερη ενέργεια από αυτήν που αναμενόταν σύμφωνα με την προσομοίωση. Πιο συγκεκριμένα τον Μάρτιο του 2010 οι συστοιχίες type A, type B και type C παρήγαγαν 12672.55, 11790.91, 11662.11 kWh αντίστοιχα, σε αντίθεση με τις τιμές 10496.00, 9800.00 και 10541.00 που υπολογίστηκαν από το PVsyst. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί αν

λάβουμε υπ όψιν ότι τα μετεωρολογικά δεδομένα πάνω στα οποία βασίστηκε η προσομοίωση καταμετρήθηκαν το 1990.

Το παρακάτω διάγραμμα εκφράζει την ενέργεια σε kWh ανά ημέρα που παράχθηκε από τη κάθε συστοιχία για διάφορες τιμές τις ακτινοβολίας. Το διάγραμμα 4.2 που έχει παρουσιαστεί στη παράγραφο 4.4.1, το οποίο όμως αντιστοιχεί σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, εκφράζει την ενεργειακή απόδοση συστοιχίας $Y_A [h]$ για διάφορες τιμές της ακτινοβολίας.

Συγκρίνοντας τα 2 αυτά διαγράμματα, διαπιστώνουμε και από την προσομοίωση ότι πράγματι τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο (*type A*) αποδίδουν πολύ καλύτερα σε υψηλές τιμές τις ακτινοβολίας. Όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων Τελουριούχου Καδμίου (*type C*) διαπιστώνουμε, όπως και από το διάγραμμα 4.2, πως συμπεριφέρονται καλύτερα από τα φωτοβολταϊκά πυριτίου σε όλο το εύρος των ακτινοβολιών.

Διάγραμμα 4.23 Στον κάθετο άξονα αναγράφονται οι τιμές της ενέργειας ανά ημέρα που παράχθηκε από την κάθε συστοιχία και στον οριζόντιο άξονα οι αντίστοιχες μέσες τιμές της ακτινοβολίας.



4.11 Συμπεράσματα

Κάθε μία από τις τεχνολογίες που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία αποδείχτηκε πως μπορεί να αποδώσει καλύτερα κάτω από διαφορετικές μέσες τιμές ημερήσιας απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας όπως συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.11 Κατάταξη των *type A*, *type B* και *type C* στις ιδανικές συνθήκες ακτινοβολίας

Κλάσεις ημερήσιας απορροφούμενης ακτινοβολίας H (kWh/m ²)	Φωτοβολταϊκή τεχνολογία	
0 -2	Πολυκρυσταλλικού πυριτίου (<i>type B</i>)	Τελουριούχου Καδμίου CdTe (<i>type C</i>)
2 -7	Μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο (<i>type A</i>)	

Λαμβάνοντας υπόψη το ιδιαίτερα υψηλό ενεργειακό δυναμικό ηλιακής ακτινοβολίας της χώρας μας, είναι πλέον προφανές ότι τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων CdTe (*type C*) είναι αυτά που θα μπορούσαν να παράγουν ετησίως την περισσότερη ενέργεια ανά εγκατεστημένο kWp σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά πυριτίου. Τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*type B*) λόγω χαμηλού ετήσιου ποσού παραγόμενης ενέργειας δεν μπόρεσαν να ανταγωνιστούν τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο (*type A*) και τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων Τελουριούχου Καδμίου CdTe (*type C*).

Όσον αφορά τα *type A* και τα *type C* παρατηρήθηκε ότι τα ποσά της ενέργειας που παρήγαγαν σε όλη τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές. Ωστόσο, υπάρχουν δύο περίοδοι οι οποίες παρουσίασαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και εξετάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 4.12 Καλοκαιρινή περίοδος - προβάδισμα υπέρ των φωτοβολταϊκών λεπτών υμενίων Τελουριούχου Καδμίου CdTe (*type C*)

	Μάρτιος	Απρίλ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγουστ.	Σεπτέμβριος
<i>type A</i>					2724,80 kWh		
<i>type B</i>							
<i>type C</i>					2805,70 kWh 2,9%↑		

Πίνακας 4.13 Χειμερινή περίοδος - προβάδισμα υπέρ των φωτοβολταϊκών μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο (type A)

Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Ιανουάριος	Φεβρουάρ.	Μάρτιος
			2029,52kWh		
			1,6%↑		
			1997,05 kWh		

Τους μήνες του Ιανουαρίου, του Φεβρουαρίου και του Μαρτίου του 2011, όπως διαπιστώθηκε στην παράγραφο 4.7, τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων *CdTe* (type C) παρουσίασαν ένα μικρό έλλειμμα παραγόμενης ενέργειας σε σχέση με αυτήν που παράχθηκε από τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο το οποίο άγγιζε το 1,6%, που όμως καλύφτηκε από το πλεόνασμα της παραγόμενης ενέργειας που παρατηρήθηκε από τα type C τους θερμούς μήνες του Ιουλίου και του Αυγούστου και το οποίο άγγιζε το 2,9%.

Δυστυχώς δεν μπορούμε να έχουμε ετήσια εικόνα για τα type C εφόσον τους πρώτους μήνες υπολειτουργούσαν, αλλά την περίοδο από τον Ιούλιο του 2010 μέχρι και τον Μάρτιο του 2011 τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων *CdTe* (type C) παρήγαγαν 0,9% και 5,6% περισσότερη ενέργεια από τα type A και type B αντιστοίχως.

Μεταξύ των φωτοβολταϊκών πυριτίου, τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο (type A) παρήγαγαν ετησίως 12672,54 kWh σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (type B) που παρήγαγαν 11790,90 kWh, δηλαδή περίπου 7% περισσότερη ετήσια παραγόμενη ενέργεια.

Επιπλέον, παρατηρήσαμε στην παράγραφο 4.4 πως τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων *CdTe* (type C) σε όλο το εύρος των ακτινοβολιών αλλά κυρίως στις υψηλές ακτινοβολίες που χαρακτηρίζουν τη χώρα μας, παρουσίασαν ιδιαίτερα χαμηλές απώλειες σύλληψης συστοιχίας $L_c [h]$, ιδιαίτερα υψηλό λόγο απόδοσης $Pr[\%]$ και αποδοτικότητα η οποία προσέγγιζε περισσότερο από τα type A και type B την ονομαστική της τιμή.

Επίσης, στην παράγραφο 4.5 διαπιστώθηκε πως η μέγιστη παρατηρούμενη ισχύς που σημειώθηκε κάθε μήνα για τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων *CdTe* (type C) προσέγγιζε περισσότερο την ονομαστική της τιμή από αυτήν που μετρήθηκε για φωτοβολταϊκά πυριτίου.

Ένα άλλο στοιχείο που αποδεικνύει την υπεροχή των φωτοβολταϊκών λεπτών υμενίων *CdTe* (type C) και ειδικότερα σε ημερομηνίες με υψηλές τιμές της θερμοκρασίας είναι ο χαμηλός θερμοκρασιακός συντελεστής $T_c = - 0,25 \%/^{\circ}\text{C}$. Τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, η απόκλιση που σημειώνεται ανάμεσα στην μέγιστη μετρούμενη ισχύ και στην ονομαστική ισχύ, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας στην επιφάνεια του κυττάρου, γίνεται κυρίως αισθητή στα φωτοβολταϊκά

πολυκρυσταλλικού πυριτίου, ενώ τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων *CdTe* (*type C*) είναι αυτά που πλησιάζουν περισσότερο την ονομαστική τιμή της ισχύος.

Επίσης, στην παράγραφο 4.3 διαπιστώθηκε πως σε μέρες όπου παρατηρήθηκε όμοιο ποσό απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας αλλά ταυτόχρονα διαφορετικές θερμοκρασίες, τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων *CdTe* (*type C*) ήταν τα μόνα των οποίων ο λόγος απόδοσης *Pr* όχι μόνο δεν μειώθηκε στις ημερομηνίες με υψηλές θερμοκρασίες, αλλά παρουσίασε βελτίωση. Επίσης, τα *type C* ήταν τα μόνα των οποίων οι απώλειες σύλληψης συστοιχίας L_c , στις ημερομηνίες με υψηλές θερμοκρασίες, έπαιρναν ιδιαίτερα χαμηλές τιμές.

Συνεπώς τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων Τελουριούχου Καδμίου (*type C*), εκτός από την περισσότερη ενέργεια που παρήγαγαν ετησίως, συμπεριφέρθηκαν καλύτερα από τα φωτοβολταϊκά πυριτίου και ως προς τις δυνατότητές τους, εφόσον πλησίασαν περισσότερο τις ονομαστικές τους τιμές της απόδοσης και της μέγιστης παρατηρούμενης ισχύος. Αυτή η εικόνα αποδεικνύει την υπεροχή των φωτοβολταϊκών Τελουριούχου Καδμίου, τουλάχιστον αν λάβουμε υπόψη τα μετεωρολογικά δεδομένα της χώρας μας η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλη ηλιοφάνεια.

Όσον αφορά τώρα τα φωτοβολταϊκά πυριτίου, τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*type B*) παρουσίασαν καλύτερη εικόνα από τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο (*type A*) μόνο σε ημερομηνίες όπου παρατηρήθηκε συνολικά απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία μικρότερη από 1.91 kWh/m^2 και στις οποίες αντιστοιχεί χαμηλή μέση τιμή ακτινοβολίας, όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 4.11.

Αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει ένα αρνητικό στοιχείο για τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*type B*), αν λάβουμε υπόψη την υψηλή ηλιοφάνεια της χώρας μας και το γεγονός πως οι ημερομηνίες αυτές είναι ελάχιστες ετησίως για τα μετεωρολογικά δεδομένα της Ελλάδας, μεμονωμένες σε κάποιους χειμερινούς μήνες. Για το λόγο αυτό διαπιστώσαμε πως σε κανένα μήνα δεν παρήγαγαν μεγαλύτερο ποσό ενέργειας από αυτό των φωτοβολταϊκών μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο (*type A*). Ωστόσο, σε γεωγραφικές τοποθεσίες όπου παρατηρούνται έντονα καιρικά φαινόμενα και έντονη νεφοκάλυψη τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*type B*) θα ήταν δυνατό να παράγουν μεγαλύτερο ποσό ενέργειας.

Επίσης, στην παράγραφο 4.4.2 παρατηρήθηκε πως για υψηλές τιμές ακτινοβολίας τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*type B*) αποκλίνουν περισσότερο από την ονομαστική τους τιμή της αποδοτικότητας σε σχέση με την αντίστοιχη απόκλιση που παρουσιάζουν τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο (*type A*), ενώ τα τελευταία αποκλίνουν περισσότερο στις χαμηλές τιμές ακτινοβολίας. Στην παράγραφο 4.5 διαπιστώσαμε πως τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*type B*) παρουσίασαν ετησίως μεγαλύτερη απόκλιση ανάμεσα στην μετρούμενη και την ονομαστική μέγιστη ισχύ, η οποία μάλιστα κορυφώθηκε τους θερμούς μήνες του Ιουλίου και Αυγούστου. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί αν λάβουμε υπόψη τον υψηλό θερμοκρασιακό συντελεστή των *type B* και αποτελεί ένα

ακόμα στοιχείο που αποδεικνύει την υπεροχή των φωτοβολταϊκών μονοκρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο (*type A*) σε υψηλές τιμές ακτινοβολίας.

Κεφάλαιο 5

Σύστημα παρακολούθησης Solar Log

5.1 Εισαγωγή

Αφού λάβει χώρα η εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι ιδιαίτερα σημαντικό ο κάτοχός του να μπορεί να έχει πρόσβαση στη παρακολούθηση της λειτουργίας του, όποτε το θεωρήσει σκόπιμο. Στο πλαίσιο αυτού του προβλήματος, παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο ένα σύστημα παρακολούθησης φωτοβολταϊκών συστημάτων μέχρι 30 kWp, το οποίο είναι εφοδιασμένο με ειδικό λογισμικό διαδικτυακών εφαρμογών. Το Solar Log, γερμανικής προέλευσης της εταιρείας Solare Datensysteme, είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για κάθε μηχανικό, εφόσον επεξεργάζεται δεδομένα από τους συλλέκτες, δημιουργεί ιστοσελίδες, αναλαμβάνει την αποστολή πληροφοριών σε ηλεκτρονικές διευθύνσεις και γενικότερα παρέχει κάθε δυνατότητα που είναι απαραίτητη για την σωστή παρακολούθηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.



Εικόνα 5.1 Solar log 200/500/1000

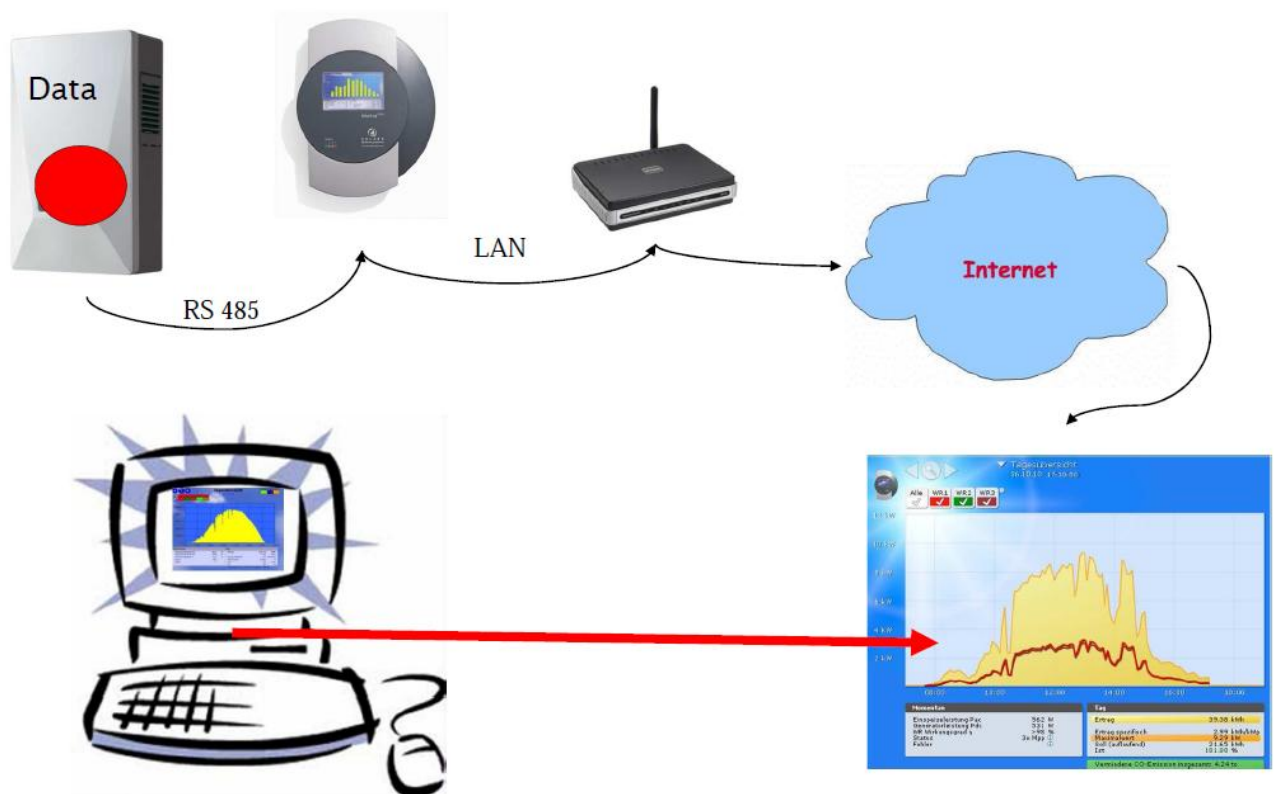
Κεφάλαιο 5 Σύστημα παρακολούθησης Solar Log

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η παρακολούθηση φωτοβολταϊκών συστημάτων μέσω του Solar Log.

- Συνεχής επιτήρηση του φωτοβολταϊκού συστήματος
- Αποθήκευση δεδομένων για την αξιολόγηση
- Έγκαιρη αναγνώριση σφαλμάτων λειτουργίας
- Δωρεάν επεξεργασία δεδομένων και γραφική απεικόνιση στο διαδίκτυο
- Διάγνωση και διαμόρφωση της εγκατάστασης με κάθε Η/Υ
- Καταγραφή των ενεργειακών αποδόσεων

5.2 Συνδεσμολογία του Solar Log

Το Solar Log συνδέεται με τον καταγραφέα δεδομένων του φωτοβολταϊκού συστήματος, έτσι ώστε να μπορεί να ανακτήσει τα δεδομένα για να τα επεξεργαστεί και έπειτα συνδέεται με το διαδίκτυο μέσω ασύρματου δικτύου (LAN), ώστε οι πληροφορίες να είναι διαθέσιμες σε συγκεκριμένους χρήστες.

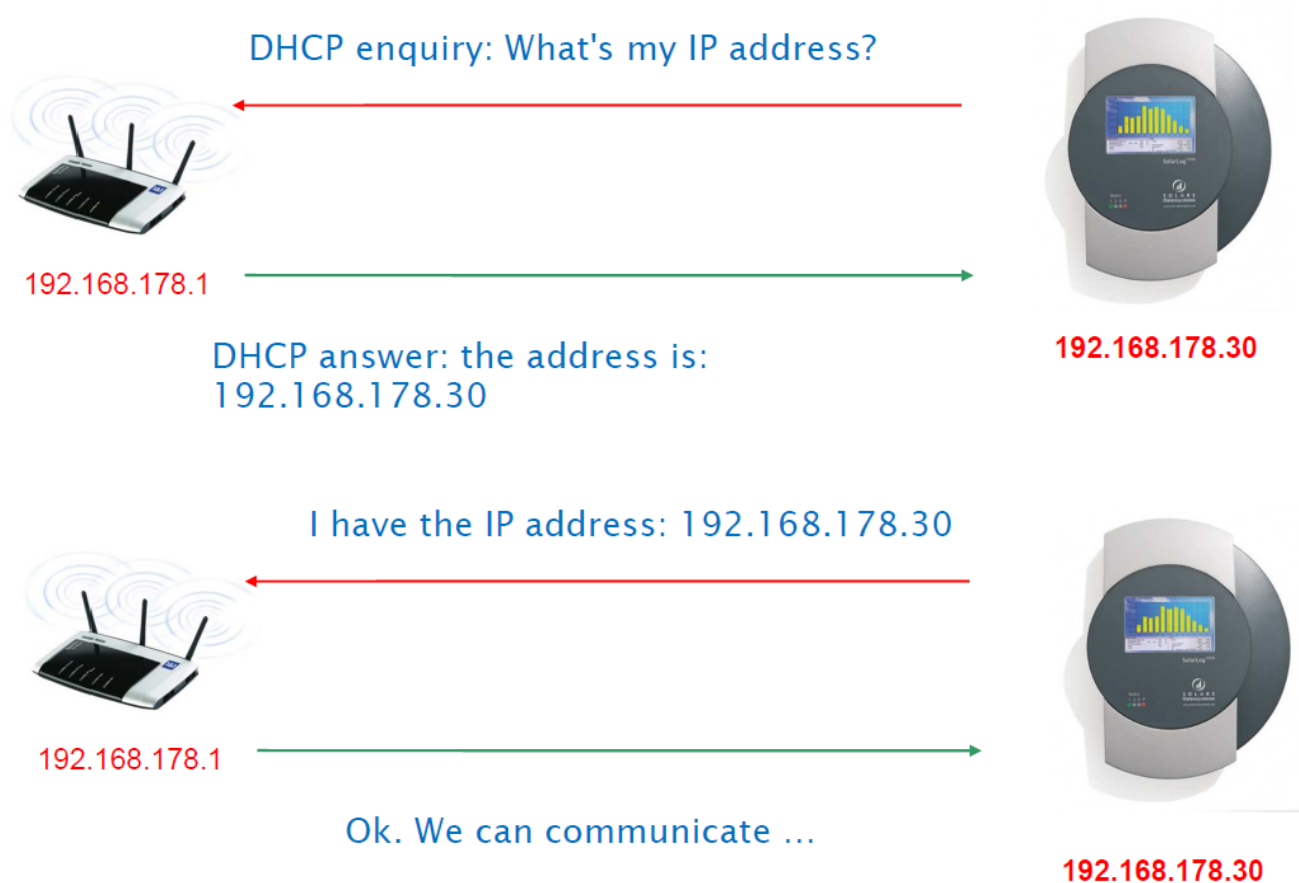


Εικόνα 5.2 Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης του Solar Log

5.2.1 Σύνδεση του Solar Log με το router

Το router είναι το εργαλείο το οποίο αναλαμβάνει να ανεβάσει κάθε πληροφορία στο διαδίκτυο. Η σύνδεση του Solar Log και του router επιτυγχάνεται, όταν το τελευταίο προσδιορίσει την διεύθυνση IP του Solar Log, η οποία θα είναι τέτοια ώστε να μπορεί να αναγνωριστεί από το router. Πιο συγκεκριμένα, όταν ενεργοποιηθούν οι δύο συσκευές, το router αναλαμβάνει να στείλει στο Solar Log μία διεύθυνση IP. Οι διευθύνσεις IP αποτελούνται από τέσσερα *blocks* αριθμών και έχουν τη μορφή 192.168.178.

Αν υποθέσουμε λοιπόν πως η διεύθυνση IP του router είναι 192.168.178.1, θα λάβει χώρα η παρακάτω διαδικασία:



Εικόνα 5.3 Επικοινωνία του Solar Log με το router

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η σύνδεση του router όχι μόνο με το Solar Log αλλά και με κάθε είδους συσκευή όπως web camera, notebook ή απλώς υπολογιστής.

Κεφάλαιο 5 Σύστημα παρακολούθησης Solar Log

Ενώ συσκευές οι οποίες έχουν διαφορετική διεύθυνση IP δεν θα μπορέσουν να γίνουν αποδεκτές από το router.



Εικόνα 5.4 Αποδοχή ορισμένων συσκευών από Solar Log

Προκειμένου λοιπόν να εγκατασταθεί η σύνδεση των δύο συσκευών, πρέπει πρώτα να μάθουμε την IP διεύθυνση του router του υπολογιστή. Αυτό γίνεται με την επιλογή "run" από το μενού επιλογών της επιφάνειας εργασίας.

```
C:\WINNT\system32\cmd.exe
Microsoft Windows 2000 [Version 5.00.2195]
(C) Copyright 1985-2000 Microsoft Corp.

C:\Dokumente und Einstellungen\Administrator>ipconfig

Windows 2000-IP-Konfiguration

Ethernetadapter "LAN-Verbindung":

    Verbindungsspezifisches DNS-Suffix:
    IP-Adresse. . . . . : 192.168.178.38
    Subnetzmaske. . . . . : 255.255.255.0
    Standardgateway . . . . . : 192.168.178.1

C:\Dokumente und Einstellungen\Administrator>_
```

Labels and arrows pointing to the screenshot:

- ipconfig >>CR (points to the command)
- IP address of the computer (points to 192.168.178.38)
- Subnet mask (points to 255.255.255.0)
- IP address of the router (points to 192.168.178.1)

Εικόνα 5.5 Εύρεση της διεύθυνσης IP του υπολογιστή και του router

Κεφάλαιο 5 Σύστημα παρακολούθησης Solar Log

Έπειτα, με την πληκτρολόγηση των εντολών "cmd" μέσα στην μπάρα αναζήτησης και "ipconfig" στο περιβάλλον των DOS εμφανίζονται οι διευθύνσεις IP του υπολογιστή και του router. Οι διευθύνσεις μπορούν έπειτα να εισαχθούν άμεσα στο Solar Log. Με τη διαδικασία αυτή εγκαθίσταται η σύνδεση μεταξύ του router και του Solar Log.

5.3 Φόρμα εγγραφής

Επίσης παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα, δίνοντας τα στοιχεία του, να ενημερώνεται με κάθε πληροφορία απαραίτητη για τη λειτουργία του Solar Log, καθώς και για σχετικά νέα. Παρακάτω φαίνεται η φόρμα των στοιχείων που πρέπει να συμπληρωθούν από το χρήστη.

Registration
Solar-Log™ WEB „Classic - 2nd Edition“

Plant data
Serial Number Solar-Log™: [Where can I find the serial?](#)
Publicly visible: Yes No [What does this mean?](#)

Location data
Title:
First name:
Last name:
Company*:
Street / house no.:
Postcode:
Town:
Country:
State:

Contact information
Email address:
Telephone*:
Mobile phone*:
Fax*:

Terms & Privacy Policy
Please confirm that you have read and agree our [Terms](#) and the [Privacy Policy](#).
 I have read and agree the [Terms](#).

Please enter the keyword contained in the image on the left one.
 [Why this check?](#)

* optional information

Εικόνα 5.6 Φόρμα εγγραφής του χρήστη

5.4 Διαγράμματα που αφορούν την λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος από το Solar Log

Αφού αναγνωρισθεί το Solar Log από το router, ο χρήστης πρέπει να εισάγει μέσω του υπολογιστή κάθε πληροφορία της ηλιακής εγκατάστασης που είναι απαραίτητη, προκειμένου να κατασκευαστούν από το Solar Log τα αντίστοιχα διαγράμματα.

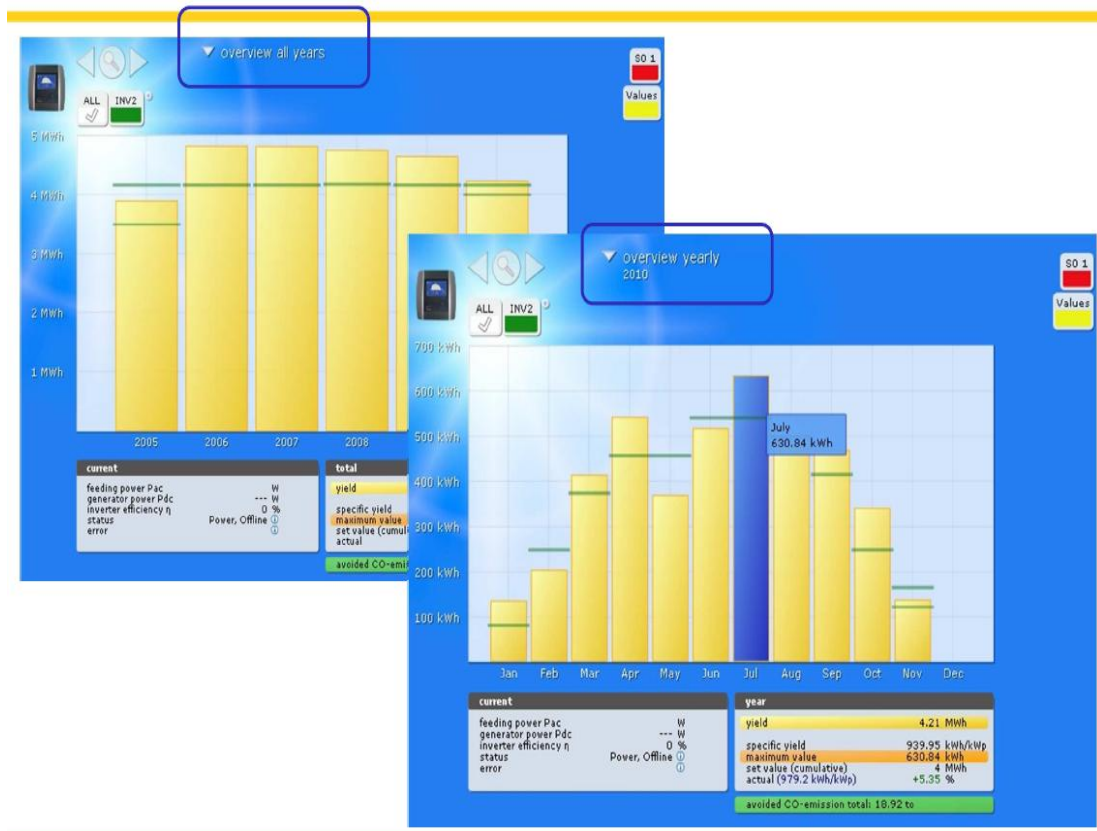
Τα δεδομένα που πρέπει να καταχωρηθούν προσδιορίζουν τον αριθμό, το όνομα και το serial number των αντιστροφών, την μέγιστη ισχύ για την οποία είναι κατασκευασμένοι να λειτουργούν, την διάταξή τους (υπάρχει επιλογή η οποία ξεχωρίζει τους αντιστροφείς ανά ομάδες συλλεκτών οι οποίες και αξιολογούνται ξεχωριστά), την διάταξη των φωτοβολταϊκών, την εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος και τις ετήσιες και μηνιαίες αναμενόμενες τιμές της ενεργειακής απόδοσης συστοιχίας $Y_A [kWh/kW]$ ώστε να γίνει και η σύγκριση με τις πραγματικές.

Τα διαγράμματα που κατασκευάζονται αφορούν κυρίως την ενέργεια που πάει στο δίκτυο και την ενεργειακή απόδοση των συστοιχιών, παρέχοντας στο χρήστη την δυνατότητα να έχει άμεση πρόσβαση στην παρακολούθηση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος από όπου και αν βρίσκεται.

Στην εικόνα 5.9 βλέπουμε διαγράμματα του Solar Log που αφορούν την ενέργεια που προσδίδεται στο ηλεκτρικό δίκτυο σε ετήσια και μηνιαία κλίμακα. Επίσης, υπολογίζεται κάτω δεξιά η συνολική ενέργεια που παράχθηκε από το σύστημα σε όλη την εξεταζόμενη περίοδο, η μέγιστη ενέργεια που μετρήθηκε, η ενεργειακή απόδοση των συστοιχιών όλης της εξεταζόμενης περιόδου, η αναμενόμενη ενέργεια που έχει καταχωρηθεί από το χρήστη καθώς και η απόκλιση αυτής από αυτήν που μετρήθηκε. Στην εικόνα 5.8 παρατηρούμε την δυνατότητα του Solar Log να παρουσιάζει στο ίδιο διάγραμμα την ενέργεια που παράχθηκε από διαφορετικούς αντιστροφείς.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στην εικόνα 5.11 από την οποία μπορούμε να ανιχνεύσουμε τυχόν δυσλειτουργίες των αντιστροφών, υπολειτουργία των συλλεκτών ή ακόμα και τυχαία περιστατικά σκίασης.

Κεφάλαιο 5 Σύστημα παρακολούθησης Solar Log

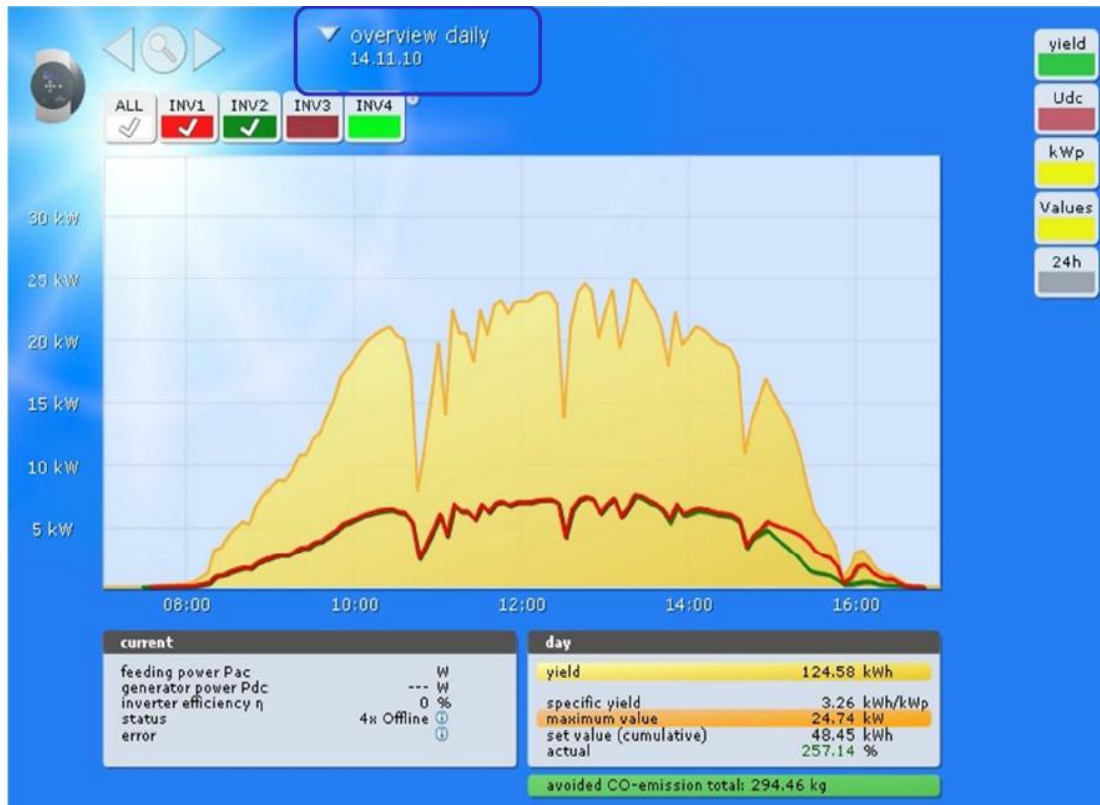


Εικόνα 5.7



Εικόνα 5.8

Κεφάλαιο 5 Σύστημα παρακολούθησης Solar Log



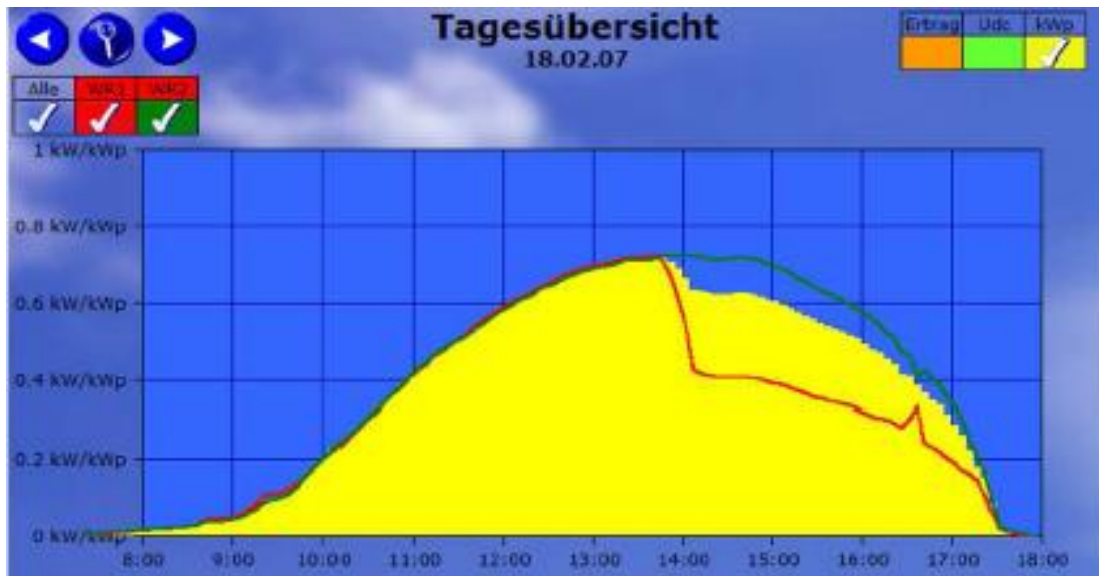
Εικόνα 5.9



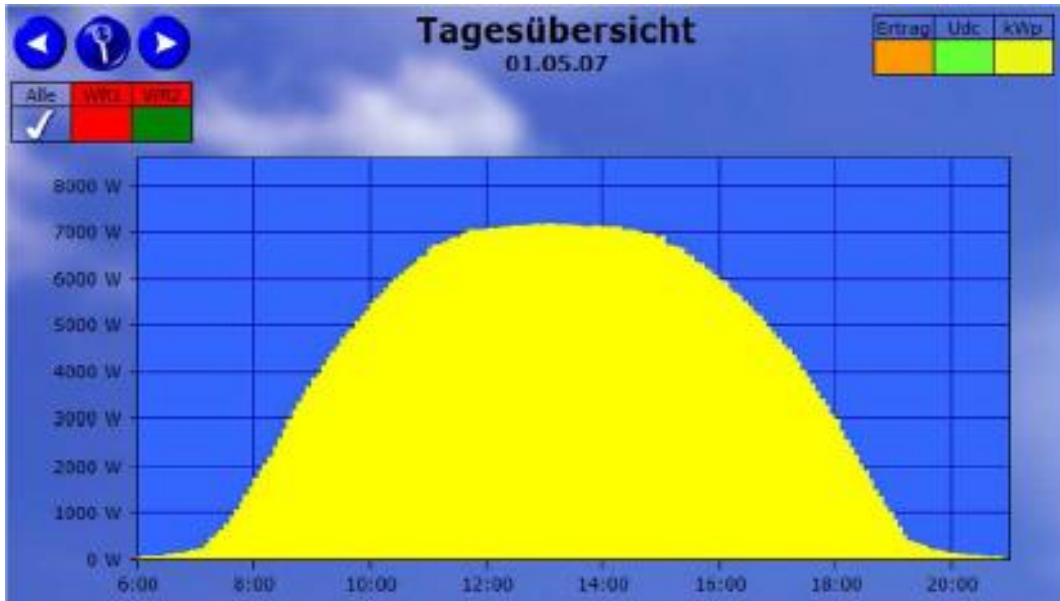
Εικόνα 5.10



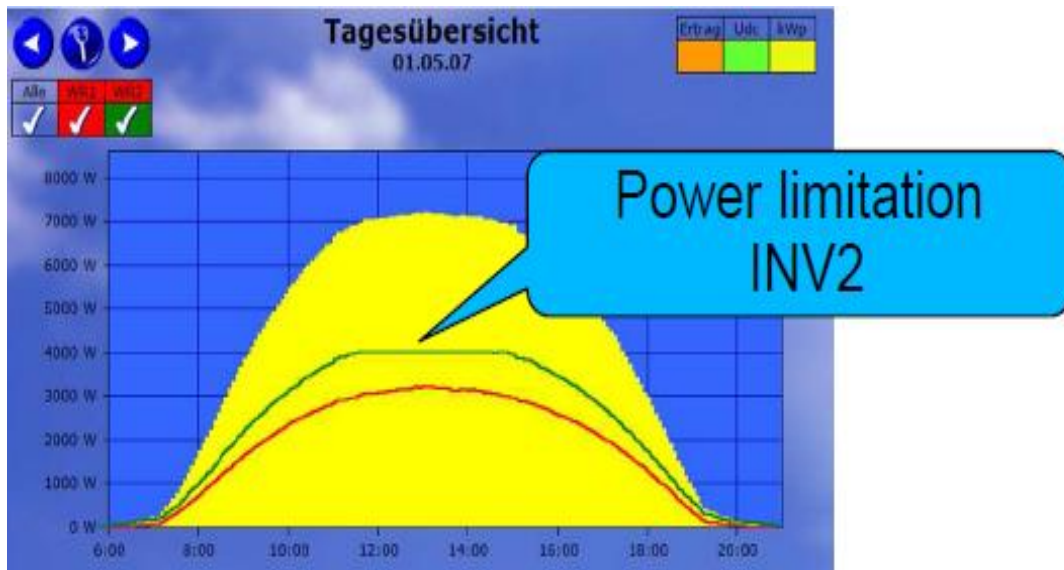
Εικόνα 5.11



Εικόνα 5.12



Εικόνα 5.13



Εικόνα 5.14

5.5 Το περιβάλλον Solar-Log WEB

Το Solar-Log WEB είναι ένα κατάλληλο λογισμικό κατασκευής ιστοσελίδων, οι οποίες περιέχουν κάθε πληροφορία που είναι απαραίτητη για την άμεση αξιολόγηση και παρακολούθηση του φωτοβολταϊκού συστήματος. Σκοπός του Solar-Log WEB είναι να παρέχει στον χρήστη την δυνατότητα ολοκληρωμένης και άμεσης επιτήρησης του φωτοβολταϊκού συστήματος από κάθε μέρος του κόσμου μέσω του διαδικτύου.

Οι ιστοσελίδες απευθύνονται σε συγκεκριμένους χρήστες-πελάτες και τους διασφαλίζουν την παρακολούθηση και τον έλεγχο των παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος, την αποθήκευση και ανάκτηση στατιστικών και ιστορικών στοιχείων, την αξιολόγηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών καθώς και την ομαλή και ασφαλή λειτουργία του συστήματος, εφόσον το λογισμικό αναλαμβάνει να στείλει μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου κάθε ενημέρωση σχετικά με την τυχόν διακοπή λειτουργίας των αντιστροφών ή υπολειτουργίας των συλλεκτών.

Το Solar-Log WEB διαθέτει ειδικές εφαρμογές, εφοδιασμένες με μοντέρνα γραφικά και μεγάλη ποικιλία συναρτήσεων, με τις οποίες ο χρήστης κατασκευάζει τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.4. Επίσης, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει αν ο πελάτης θα έχει πρόσβαση μονάχα στην απευθείας λειτουργία της ηλιακής εγκατάστασης ή σε κάθε ημερομηνία ξεχωριστά, καθώς και ποια διαγράμματα θα είναι διαθέσιμα στον κάθε πελάτη, δημιουργώντας ιστοσελίδες με διαφορετικές δυνατότητες. Το Solar-Log WEB επίσης συνεργάζεται με την εταιρία Google, παρέχοντας την δυνατότητα άμεσης προβολής της τοποθεσίας των ηλιακών συλλεκτών στο χάρτη. Οι ιστοσελίδες μπορούν να κατασκευαστούν με 2 τρόπους, υπάρχει εφαρμογή η οποία παρέχει στον χρήστη μία έτοιμη δομή σελίδας, δίνοντας του την δυνατότητα να δημιουργήσει μια ιστοσελίδα μέσα σε λίγα βήματα, ενώ μία άλλη εφαρμογή παρέχει σε όσους γνωρίζουν, την δυνατότητα διαμόρφωσης της ιστοσελίδας μέσω κώδικα HTML.

Βιβλιογραφία

INTEPNET

- [1] <http://www.tnth.gr/sciencerelated/59-applications/560-photovoltaika>
- [2] http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/D2_Hmiagogoi_2.pdf
- [3] http://encyclobeamia.solarbotics.net/articles/solar_cell.html
- [4] <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>
- [5] <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/fill-factor>
- [6] <http://pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/source-material>
- [7] http://www.selasenergy.gr/solutions_autonomous.php
- [8] <http://www.hyperionee.gr/photovoltaic-advantages/>
- [9] <http://inhabitat.com/tag/photovoltaic-cells/>
- [10] <http://www.greekarchitects.gr/gr/home>
- [11] <http://www.builditsolar.com/Projects/WaterPumping/waterpumping.htm>
- [12] <http://www.selasenergy.gr>
- [13] http://imarinakiss.webs.com/solar_geometry.pdf
- [14] <http://www.ntua.gr/arch/geometry/postgrad/Geometry6GR.pdf>
- [15] http://energybysun.blogspot.com/2010/10/blog-post_9549.html
- [16] <http://www.eng.auth.gr/IHT/Proc8th/034.doc>
- [17] http://www.manolas.gr/tables/pdf/ft_03.pdf
- [18] <http://www.earthpower.gr/solar-power-cells/energy-systems.html>
- [19] http://www.solarshop-europe.net/solar-components/solarmodules/sanyo_hip-215nkhe1_m_671.html
- [20] http://www.solarshop-europe.net/solar-components/solarmodules/first-solar_fs-262_m_198.html
- [21] <http://www.arcmansolar.com/products/27.aspx?cid=7-12-11>
- [22] Sunny SensorBox® product brochure found at:
<http://www.sma.de/en/products.html>
- [23] SMA Technical Information, Version 2.0, Measurement Accuracy, Energy values and efficiency for PV Inverter Sunny Boy and Sunny Mini Central found at:
<http://www.sma.de/en/products.html>
- [24] http://ikaros.teipir.gr/phyche/Subjects/Varsamis/ergastiria/askisi_1.pdf
- [25] <http://en.wikipedia.org/wiki/Athens>
- [26] http://en.wikipedia.org/wiki/Beaufort_scale

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

- [1] Ioannis Klonaris, "Performance evaluation of different PV technologies and Operation & Maintenance planning of grid-connected PV power stations", KTH MSc thesis in conjunction with Phoenix Solar Greece, Stockholm, (Sweden 2010)
- [2] Protogeropoulos C., Klonaris I., Petrocheilos C., Claritos I., Martinac I., "Performance evaluation of different PV technologies in a grid connected pilot project in Greece", 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6-10 September, Valencia, Spain, p 2, (2010)
- [3] George Makrides et al., "Potential of photovoltaic systems in countries with high solar irradiation", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, (2009)
- [4] Bastian Zinsser, Matthew Norton, George Makrides, George E. Georgiou, Markus Schubert, Jurgen H. Wermer, "Error sources in outdoor performance evaluation of photovoltaic systems", Department of Electrical and Computer Engineering, University of Cyprus, (2010)
- [5] Emmanuel Kymakis, Sofoklis Kalykakis, Thales M. Papazoglou, "Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete", Energy Conversion and Management, Vol. 50, p. 433-438, (2009)
- [6] Zheng-Guo Piao et al. "Performance Assessment of 3kW Grid-Connected PV Systems in Korea", Department of Electrical Engineering, Chosun University, Korea, (2009)
- [7] M. Bachler, "Grid connected systems in Europe – looking into the future", 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa Hawaii, p 2290, (2006)
- [8] A.J Carr, T.L. Pryor, "A comparison of the performance of different PV modules types in temperate climates", Solar Energy, Vol. 76, p. 285-294, (2004)
- [9] Akhmad K., Kitamura A., Yamamoto F., Okamoto H., Takakura H., Hamakawa Y., "Outdoor performance of a-Si and p-Si modules", Solar Energy Materials and Solar cells, vol 46, p. 209-218, (1997)
- [10] Lund C.P., Luczac K., Pryor T., Comish J.C.L., Jennings P.J., Knipe P., Ahjum F., "Field and laboratory studies of the stability of amorphous silicon solar cells and modules", Renewable Energy, Vol 22, p. 287-294, (2001)
- [11] Miekie W., "Hot climate performance comparison between poly-crystalline and amorphous silicon cells connected to an utility mini-grid", 36th Annual Conference of the Australia and New Zealand Solar energy Society, Christchurch, New Zealand, p. 464-470, (1998)
- [12] Christian N. Jardine, Gavin J. Conibeer and Kevin Lane, "Direct Comparison of Eleven PV Technologies at Two Locations in Northern and Southern Europe", Environmental Change Institute, University of Oxford, p. 3-4, (2001)
- [13] Falk Antony, Christian Dürschner, Karl-Heinz Remmers, "Photovoltaics for Professionals", Solarpraxis AG, Berlin, (2007)
- [14] Stefan Mau, Thomas Krametz, Wolfgang Jahna, Hubert Fechner, "Quality Testing for PV modules according to standards and performance control for supporting manufacturing", Arsenal Research, Business Unit, Renewable Energy Technologies, Vienna, Austria, presented at the 19th EUPVSEC, 7-11 June, (2004)
- [15] George Makrides, Bastian Zinsser, George E. Georgiou, "Performance Assessment of different photovoltaic systems under identical field conditions of high irradiation", Department of Electrical and Computer Engineering, University of Cyprus, (2006)

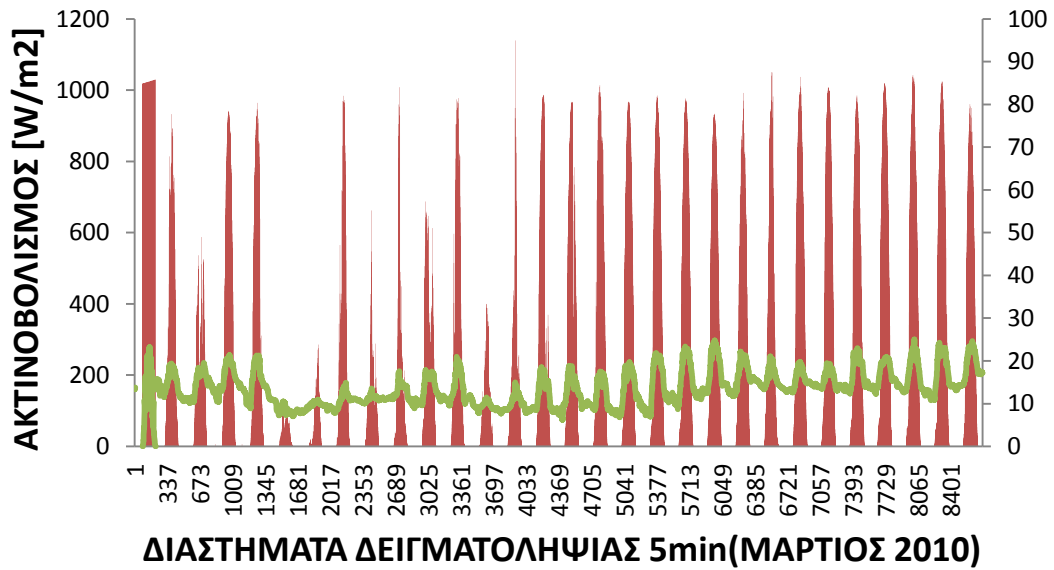
BIBΛΙΑ

- [1] S.O. Kasap, "Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων" , Παπασωτηρίου, p. 703 -709, Αθήνα, (2004)
- [2] Ηλίας Ζουμπούλης, Σταύρος Μαλτέζος, Μανώλης Φωκίτης, Γιάννης Θεοδόνης, Βλάσης Λυκοδήμος, Ευάγγελος Χρύσου, Λιάνα Δρακάκη, Λίνα Αναστασοπούλου, Θανάσης Κοντός, Παύλος Μωυσίδης, "Εργαστηριακές ασκήσεις φυσικής συμπεκνωμένης ύλης", Αθήνα, p. 32-35, (2005)
- [3] Δ. Τσουκαλάς, "Τεχνολογία Μικροσυστημάτων", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, (2007)
- [4] Handbook for Solar Photovoltaic (PV) Systems, Energy Market Authority & Building and Construction Authority, Singapore 2009, ISBN 978-981-08-4462-2.
- [5] International Electrotechnical Commission, International Standard IEC 61724: "Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange and analysis", First edition, IEC (1998)
- [6] Εγχειρίδιο λειτουργίας του μετρητικού συστήματος : "Solar-Log"

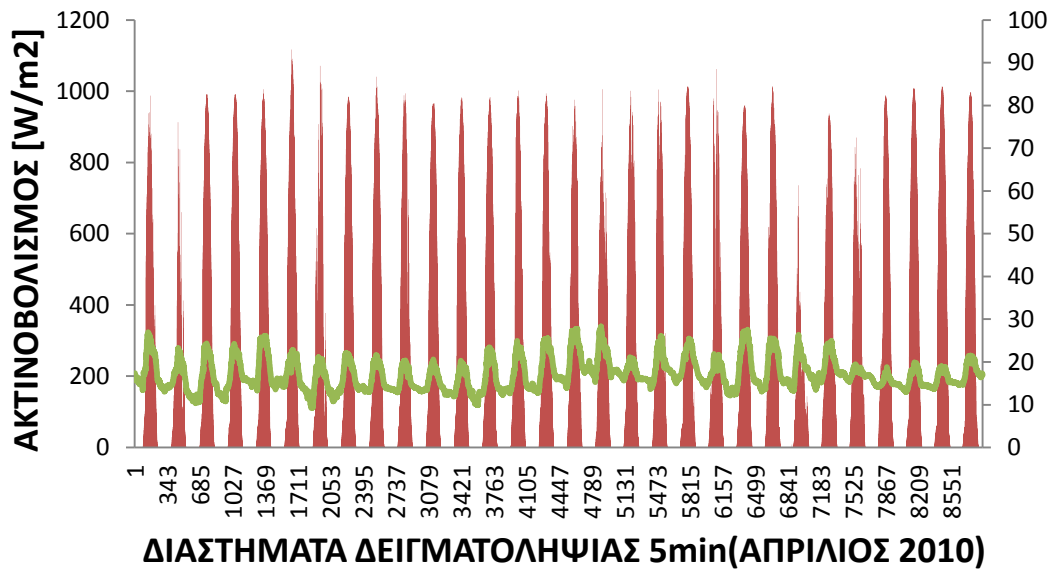
Παράρτημα διαγραμμάτων

Στο Παράρτημα αυτό είναι διαθέσιμα όλα τα διαγράμματα που αφορούν τις μετρήσεις από τους αισθητήρες περιβάλλοντος δίνοντας μία σαφή εικόνα για τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής. Οι αισθητήρες περιβάλλοντος, όπως έχει αναφερθεί στη παράγραφο 3.5.2, είναι τοποθετημένοι πάνω στο Sunny Sensor box και δίνουν πληροφορίες για την θερμοκρασία περιβάλλοντος, τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του κυττάρου, την ηλιακή ακτινοβολία καθώς και για την ταχύτητα του ανέμου. Θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνουν κοινά διαγράμματα για τον ακτινοβολισμό και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος καθώς επίσης και για την θερμοκρασία στην επιφάνεια του κυττάρου και την ταχύτητα του ανέμου, έτσι ώστε να φανεί η εξάρτηση αυτών των παραμέτρων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι ημερομηνίες όπου παρατηρήθηκαν ισχυροί άνεμοι παρουσιάστηκε μεγάλη πτώση στην θερμοκρασία της επιφάνειας του κυττάρου. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί αν σκεφτούμε πως η μετακίνηση του αέρα απομακρύνει την θερμότητα από την επιφάνεια των κυττάρων, κάτι το οποίο συμβάλλει θετικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών.

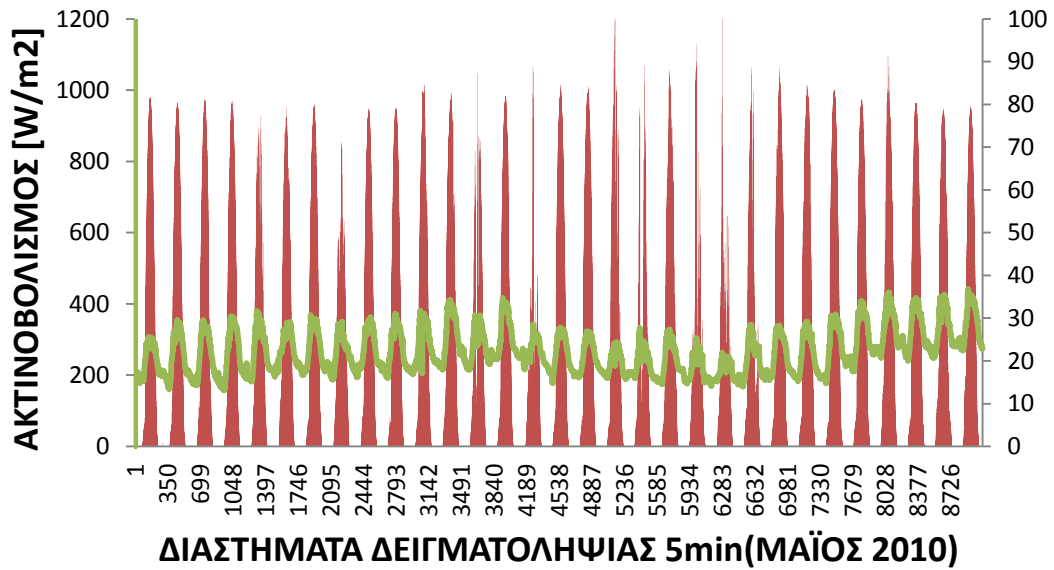
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΣΜΟΣ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ °C



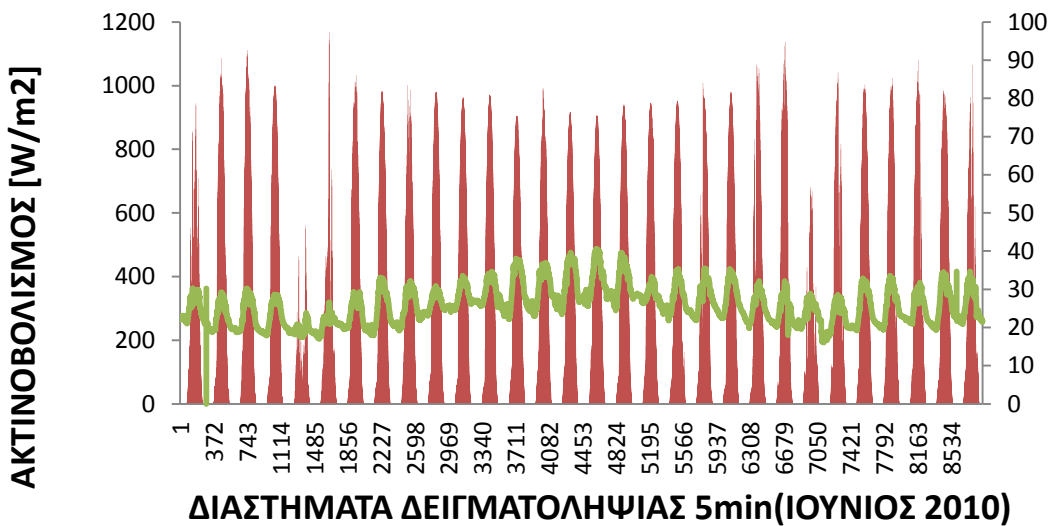
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΣΜΟΣ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ °C



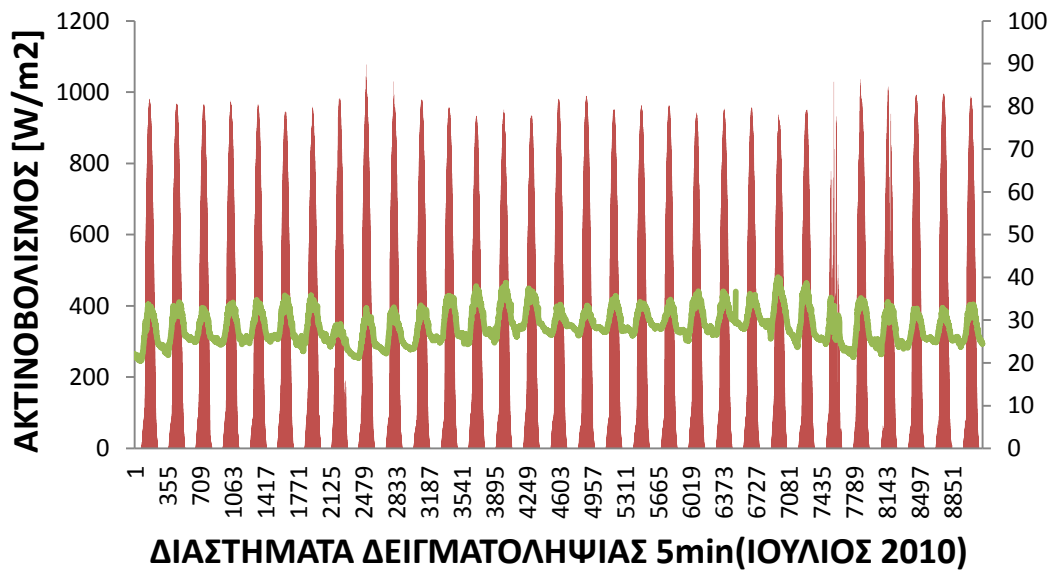
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΣΜΟΣ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ °C



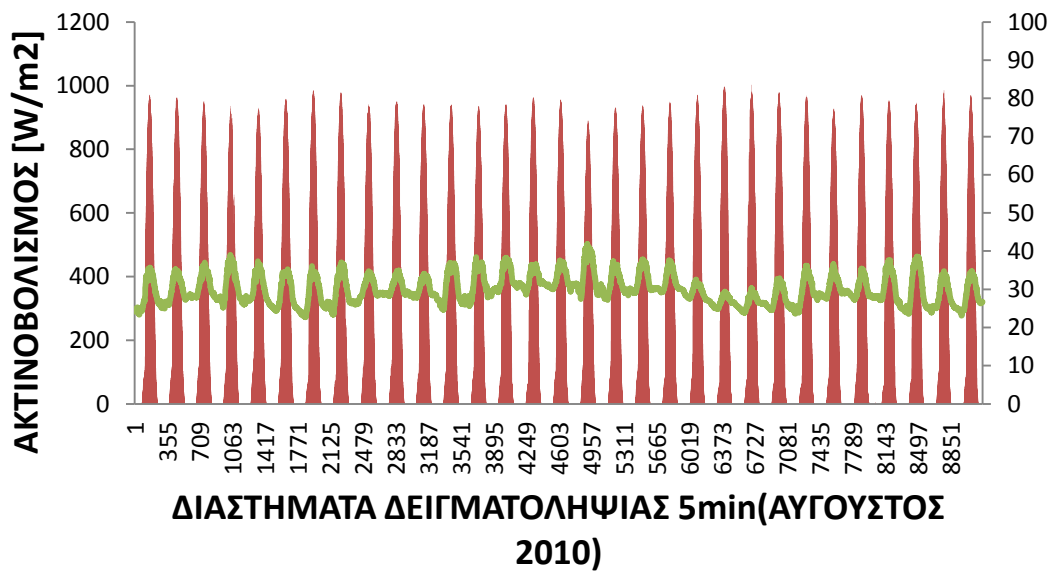
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΣΜΟΣ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ °C



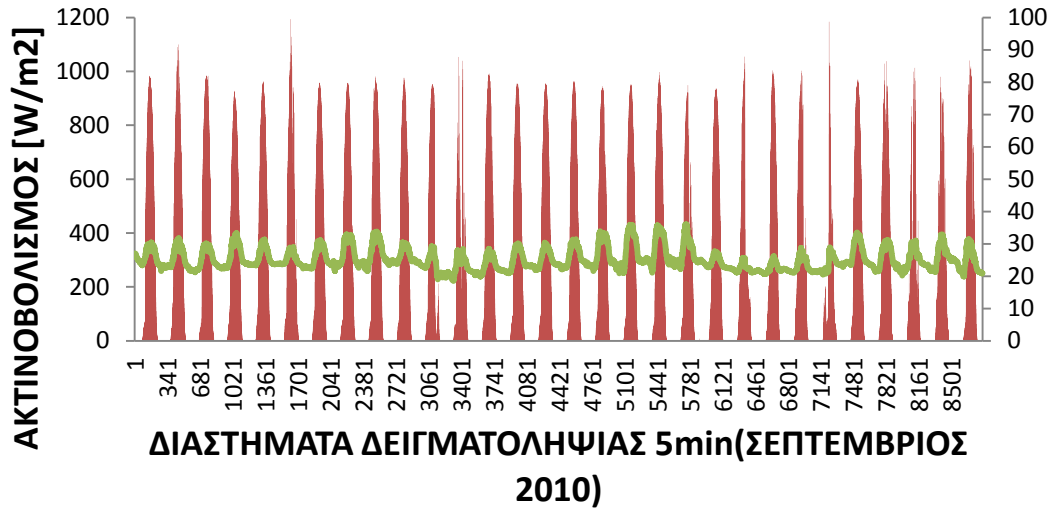
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΣΜΟΣ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



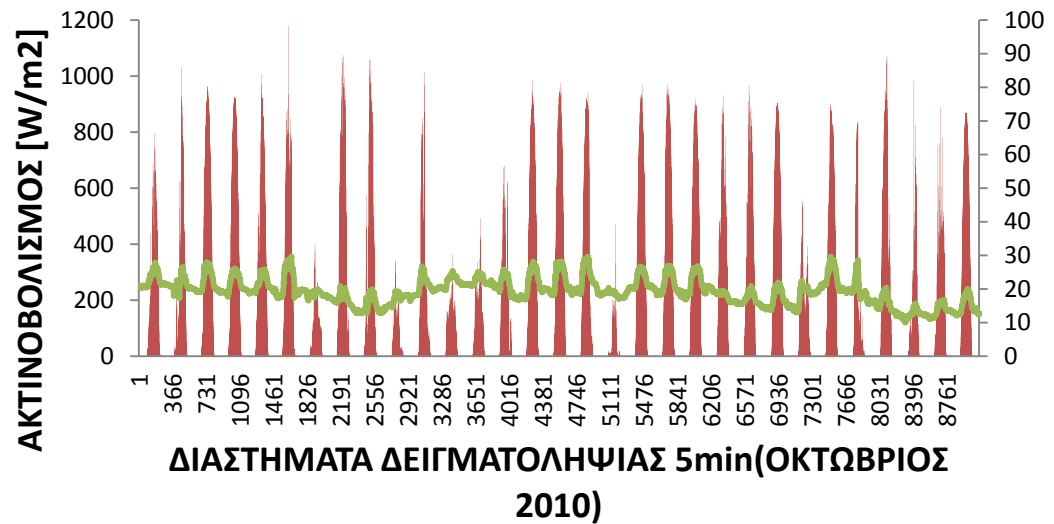
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΣΜΟΣ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



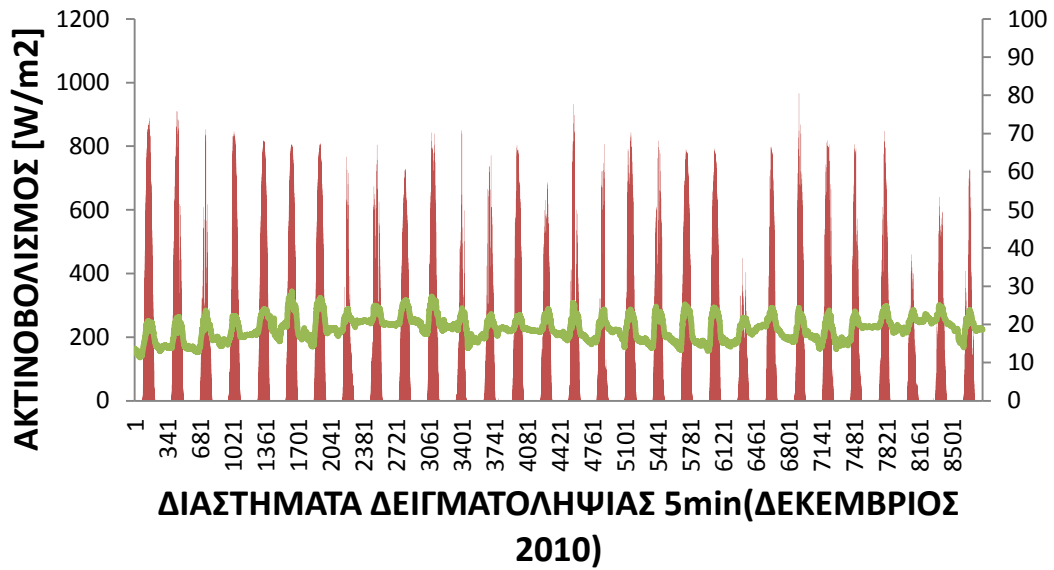
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΣΜΟΣ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ °C



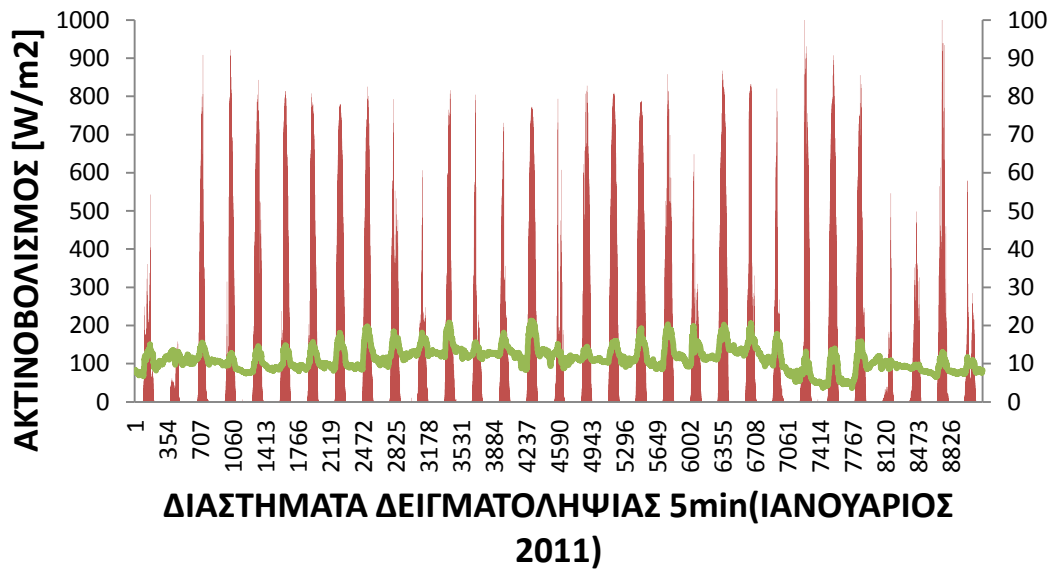
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΣΜΟΣ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ °C



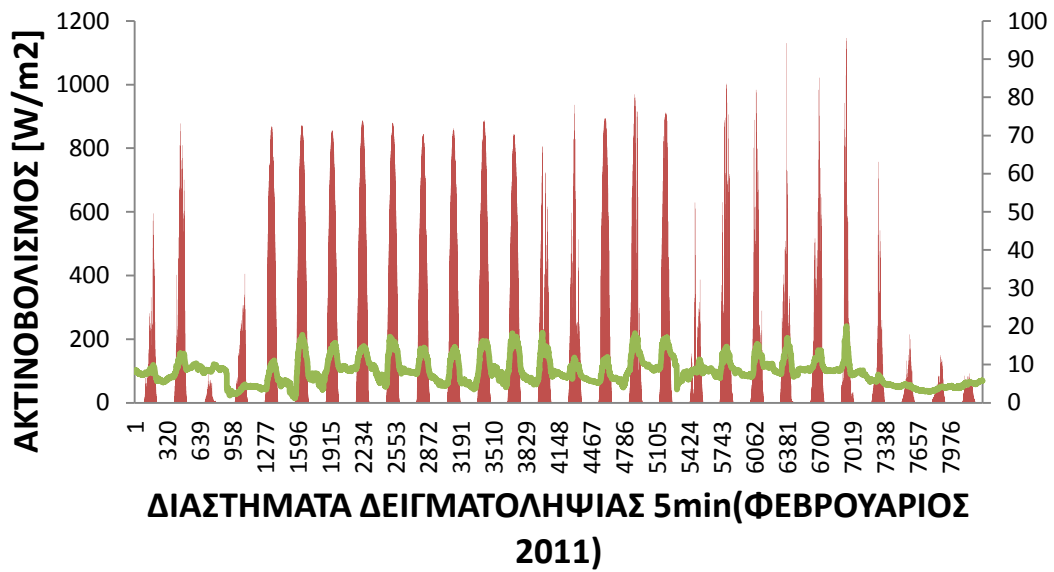
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΣΜΟΣ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ °C



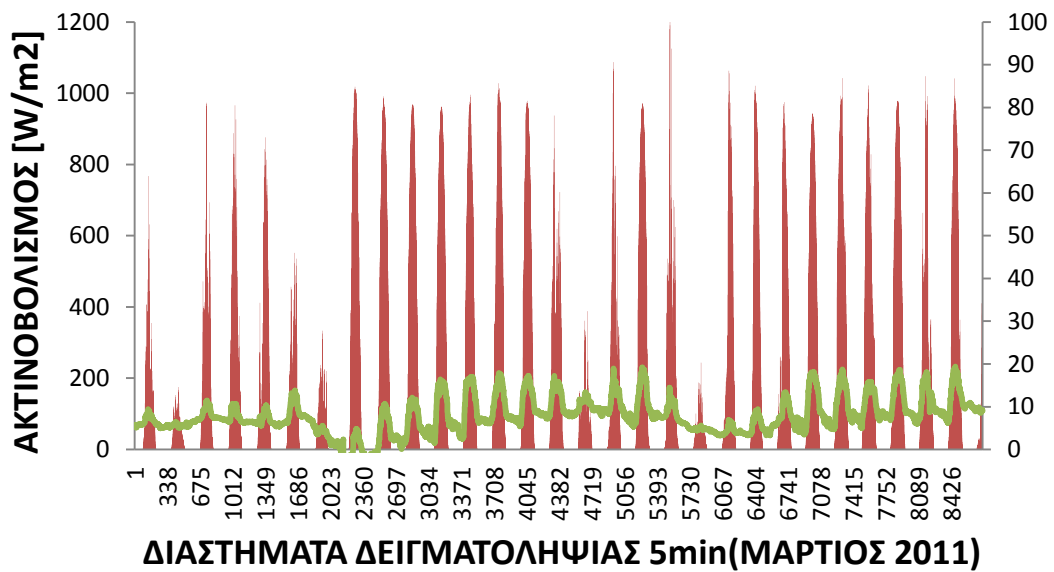
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΣΜΟΣ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ °C



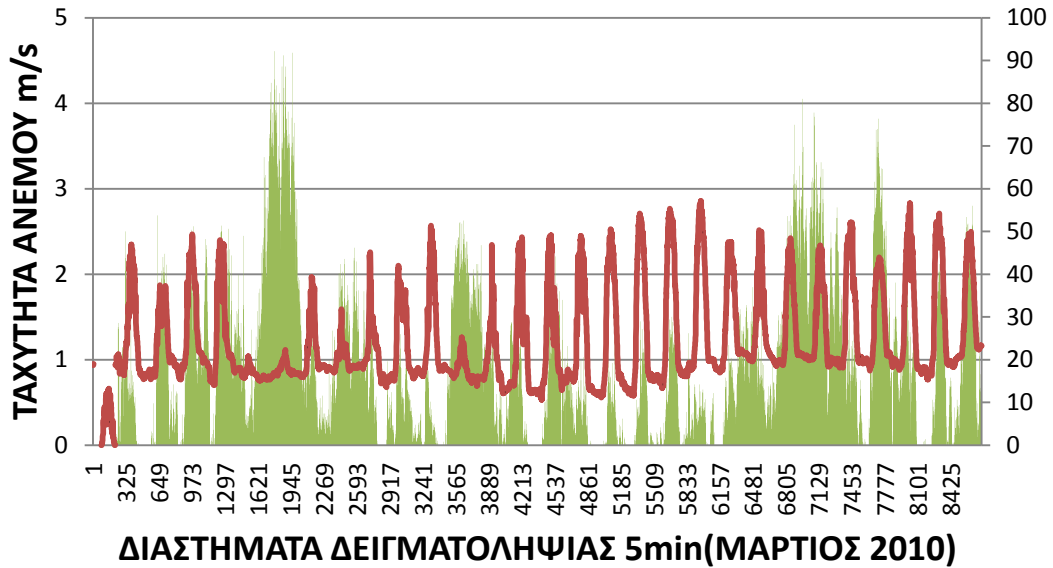
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΣΜΟΣ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ °C



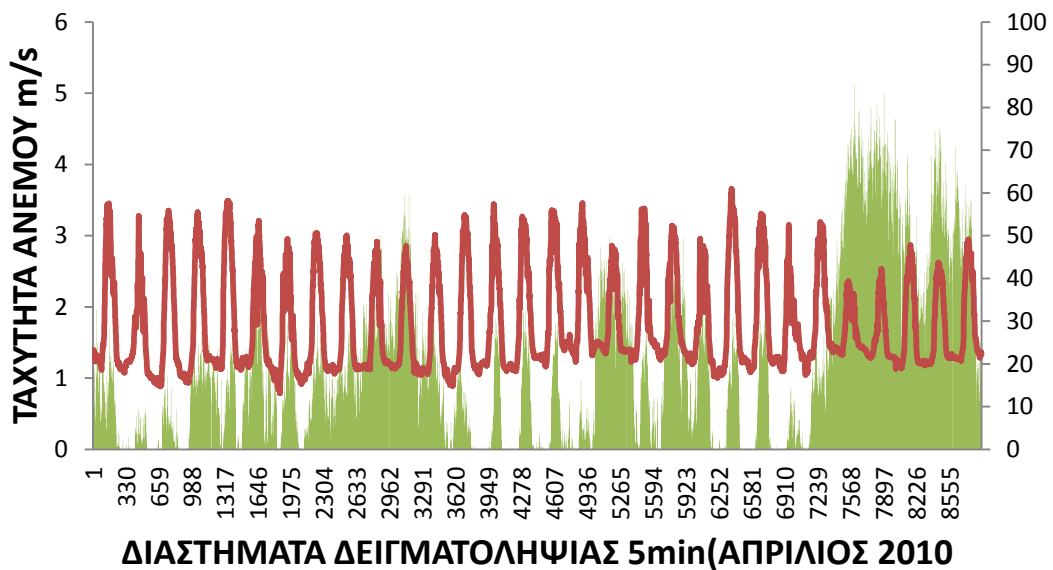
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΗΣΗ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ °C



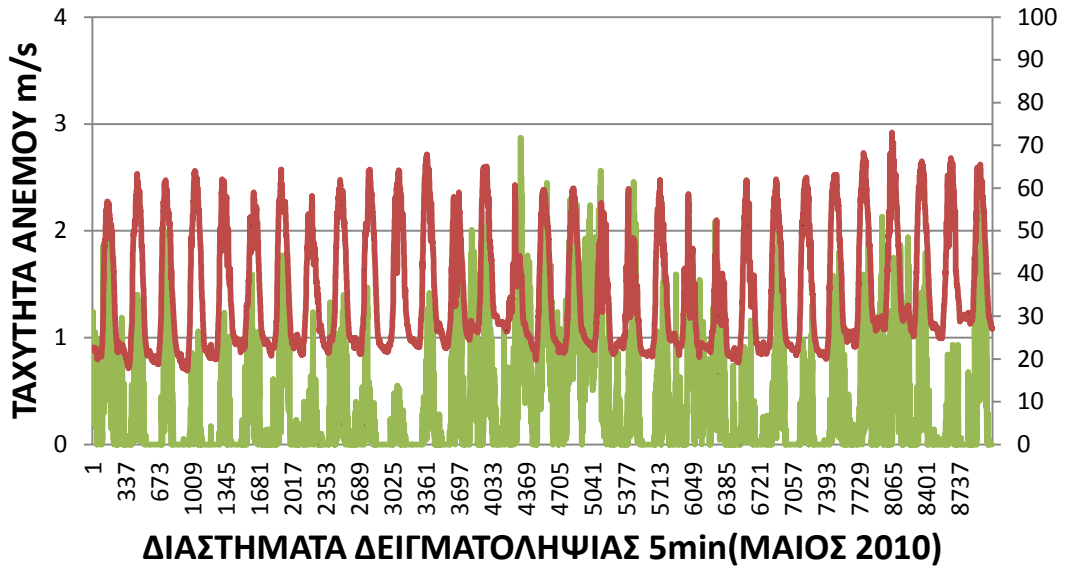
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΥΤΤΑΡΟΥ °C



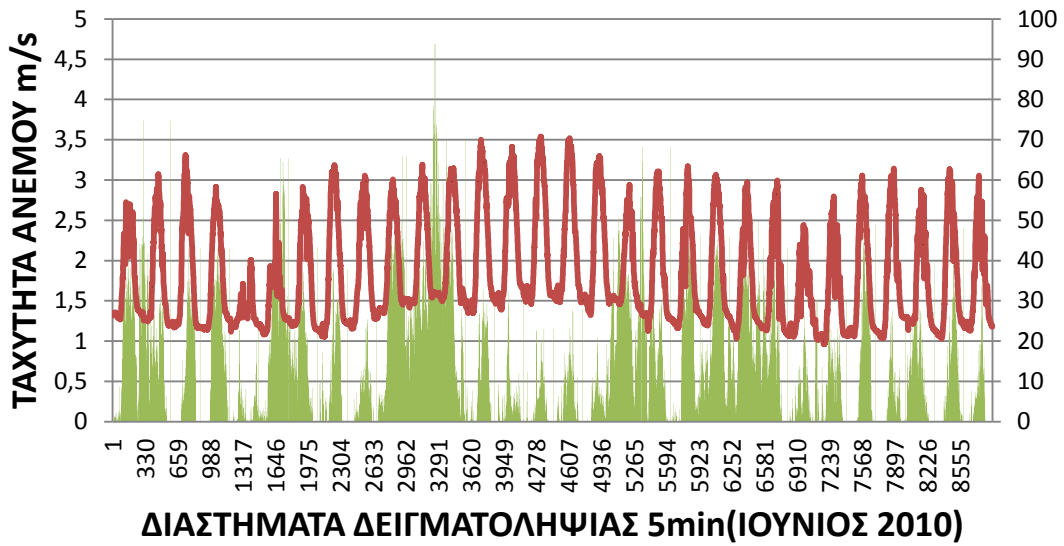
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΥΤΤΑΡΟΥ °C



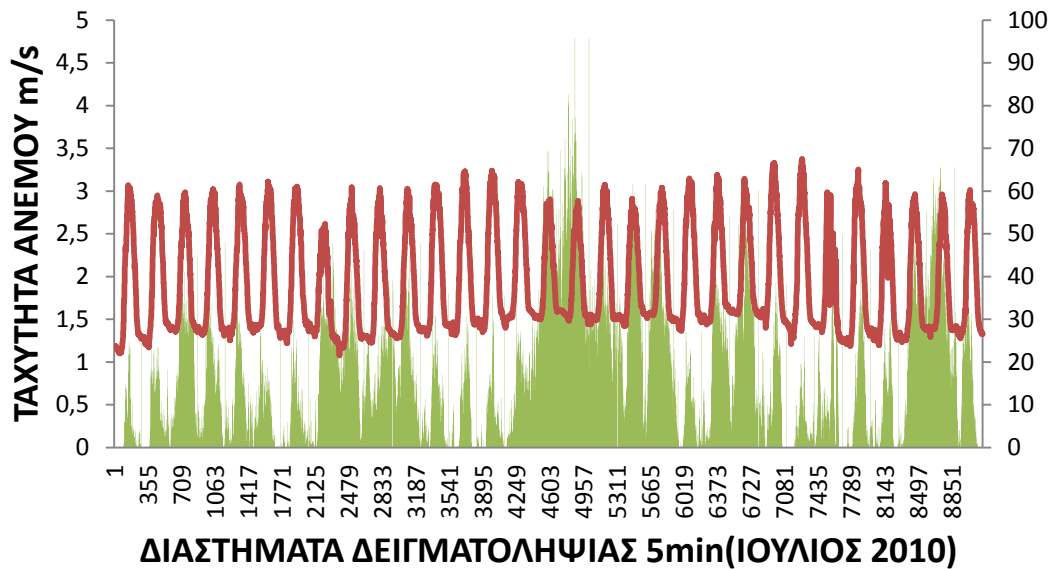
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΥΤΤΑΡΟΥ °C



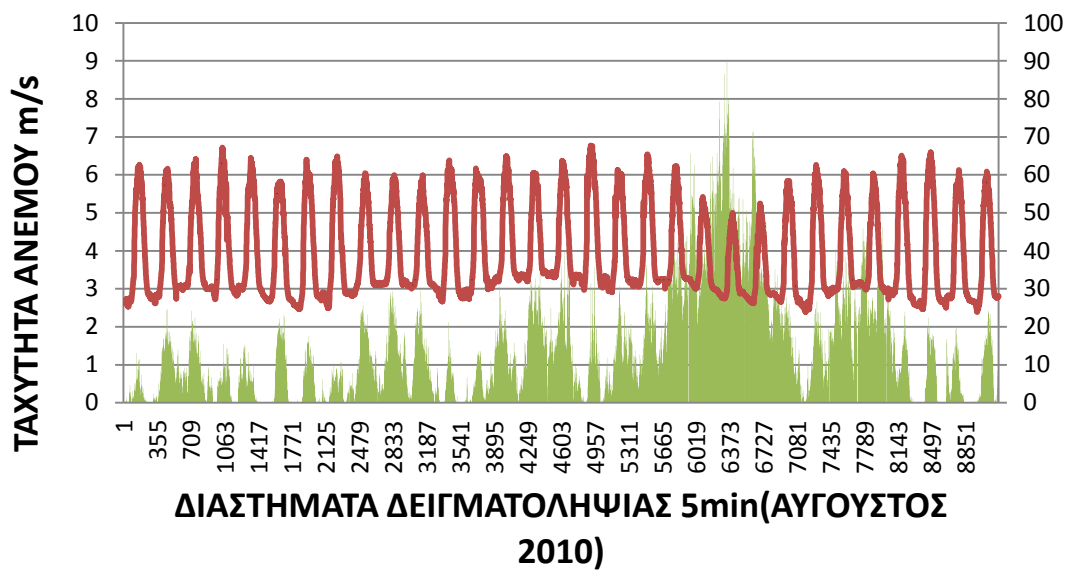
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΥΤΤΑΡΟΥ °C



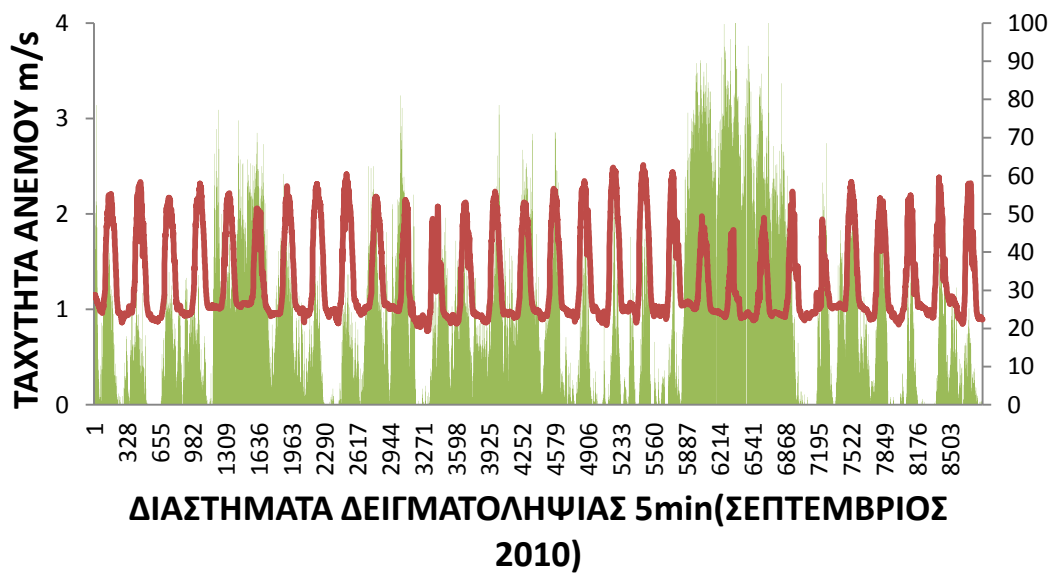
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΥΤΤΑΡΟΥ



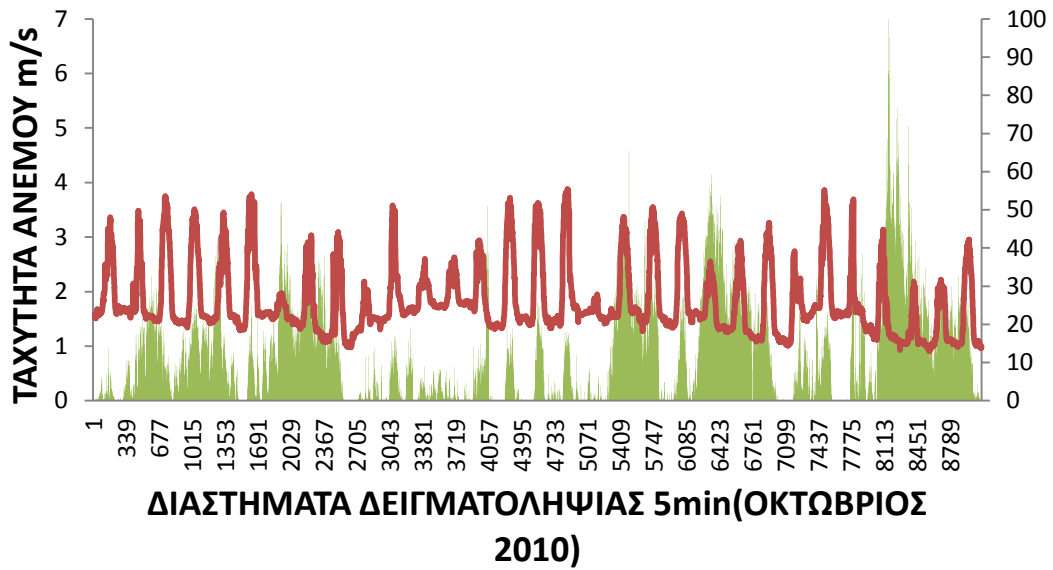
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΥΤΤΑΡΟΥ



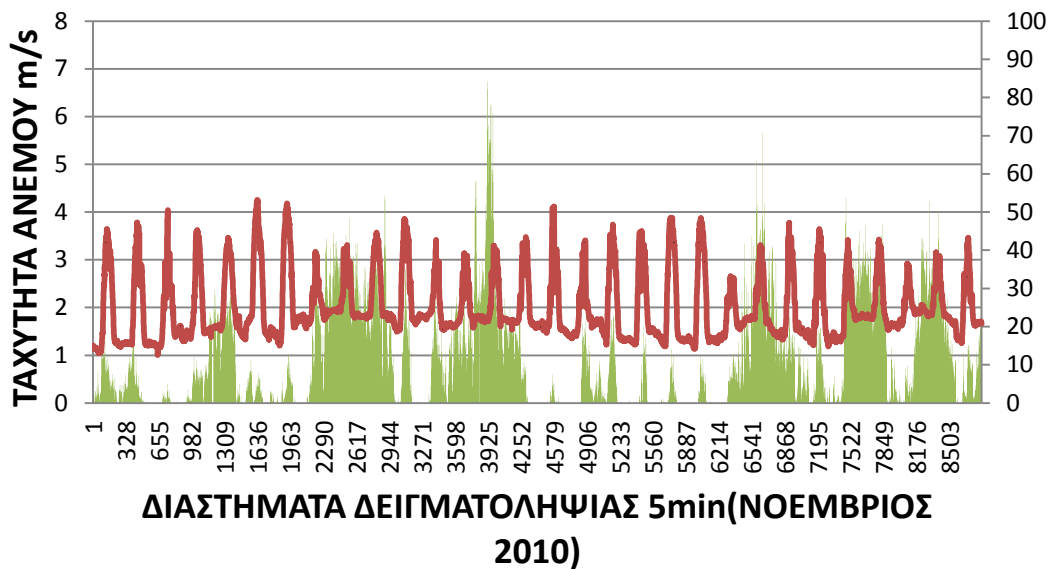
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΥΤΤΑΡΟΥ °C



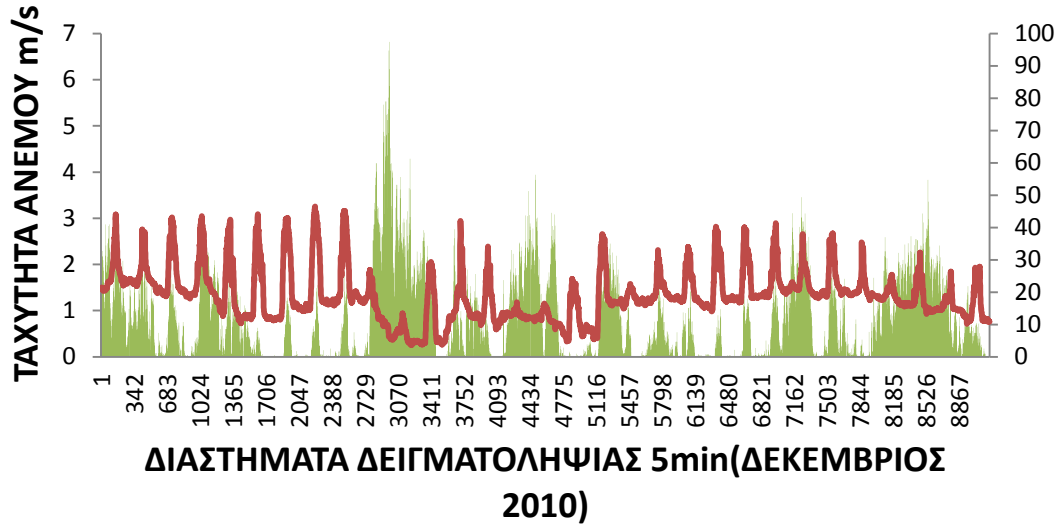
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΥΤΤΑΡΟΥ °C



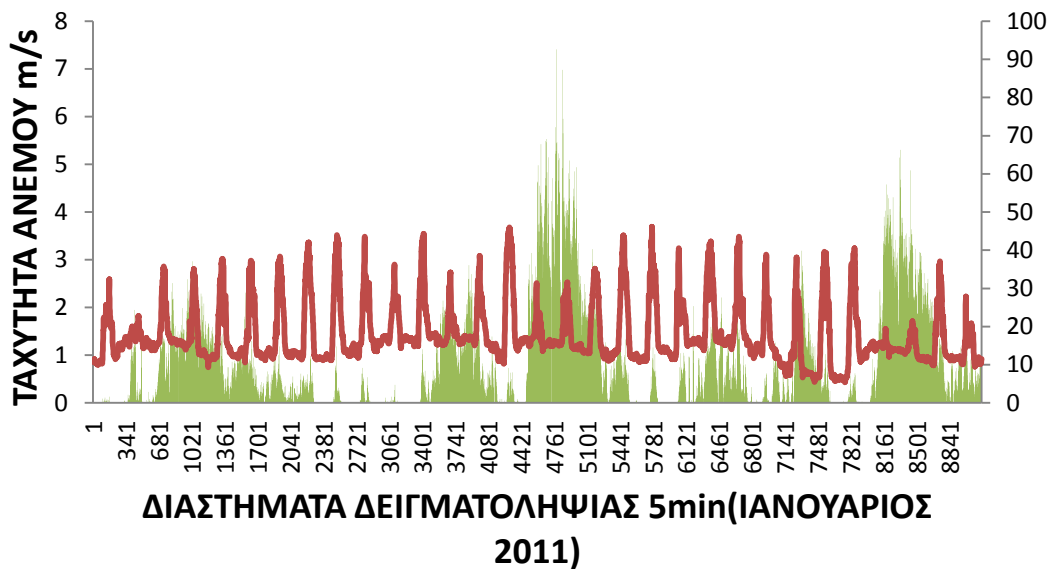
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΥΤΤΑΡΟΥ °C



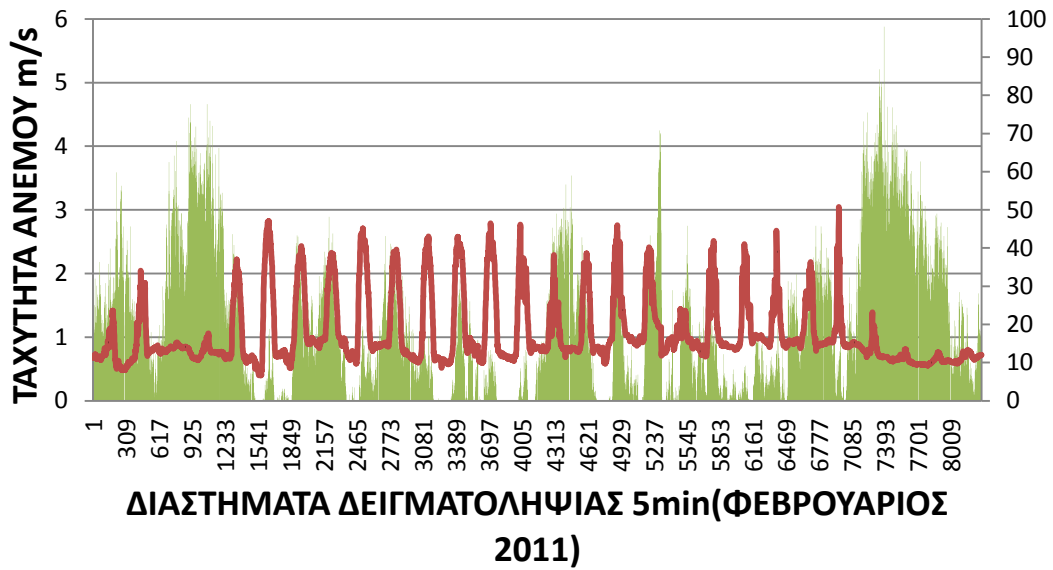
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΥΤΤΑΡΟΥ °C



ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΥΤΤΑΡΟΥ °C



ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΥΤΤΑΡΟΥ °C



ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΥΤΤΑΡΟΥ °C

