

ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΑΣ ΥΒΡΙΔΙΚΗΣ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ / ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ
ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΣΠΥΡΟΣ ΑΡΜΕΝΙΑΚΟΣ, ΓΙΩΡΓΟΣ ΚΟΝΤΟΓΙΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΣΟΥΛΙΩΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία περιλαμβάνει την πειραματική μελέτη ενός υβριδικού φωτοβολταϊκού / θερμικού (PV/T) συστήματος με βεβιασμένη κυκλοφορία νερού για τη θέρμανση νερού χρήσης. Σκοπός της πειραματικής μελέτης είναι ο προσδιορισμός κυρίως της θερμικής απόδοσης του συστήματος. Μελετήθηκε ένα πειραματικό μοντέλο το οποίο κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο και περιλαμβάνει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV panel) κατάλληλα συνδυαζόμενο με εναλλάκτη θερμότητας και γυάλινο κάλυμμα. Η θερμική μονάδα είναι συνδεδεμένη με δοχείο αποθήκευσης νερού για την λειτουργία του συστήματος με εξαναγκασμένη ροή μέσω αντλίας.

Η επιτήρηση και η καθοδήγηση έγινε από τον κ. Εμμανουήλ Σουλιώτη, τον οποίο και ευχαριστούμε για το χρόνο που διέθεσε, την πολύτιμη βοήθεια που μας προσέφερε και τις γνώσεις που μας μετέδωσε πάνω σε ένα πολύ ενδιαφέρον κομμάτι των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Σπύρος Αρμενιάκος

Γιώργος Κοντογιάννης

Πάτρα 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε η μελέτη ενός υβριδικού φωτοβολταϊκού / θερμικού συστήματος. Στο πρώτο κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας που ουσιαστικά είναι η εισαγωγή γίνεται αναφορά στην σημασία που έχουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στον κόσμο και στον άνθρωπο και πως μπορούμε να εκμεταλλευτούμε διάφορους φυσικούς πόρους. Επίσης γίνεται αναφορά στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο και πως αυτό δημιουργείται καθώς επίσης στους ημιαγωγούς. Τέλος, στο πρώτο κεφάλαιο καταγράφονται οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Ένας από αυτούς τους παράγοντες είναι η θερμοκρασία, η οποία επηρεάζει σημαντικά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά στα διάφορα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα, τον τρόπο λειτουργίας τους και τους διάφορους τύπους που μπορούμε να συναντήσουμε στο εμπόριο. Επίσης παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή γι αυτού του είδους συστήματα και το λόγο που δημιουργήθηκαν. Τέλος, σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται διάφορες εργασίες με θέμα τα υβριδικά φωτοβολταϊκά / θερμικά συστήματα. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη του υβριδικού φωτοβολταϊκού/θερμικού συστήματος. Αυτή αποτελείται από από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο με ενσωματωμένη μονάδα απολαβής θερμότητας. Γίνεται αναφορά στα διάφορα όργανα μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία. Το τέταρτο κεφάλαιο αφορά στο σκοπό του πειράματος, την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις πειραματικές δοκιμές είτε με μορφή πινάκων είτε σε μορφή διαγραμμάτων. Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 (ΕΙΣΑΓΩΓΗ)	7
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	7
1.2 Ηλιακή Ενέργεια.....	8
1.2.1 Ηλιακή Γεωμετρία.....	9
1.3 Ηλιακά Συστήματα.....	12
1.3.1 Παθητικά Ηλιακά Συστήματα.....	12
1.3.2 Θερμικά Ηλιακά Συστήματα.....	14
1.3.2.1 Συστήματα φυσικής κυκλοφορίας.....	15
1.3.2.2 Συστήματα βεβιασμένης κυκλοφορίας.....	15
1.4 Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	16
1.4.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	16
1.4.2 Χαρακτηριστικά Ημιαγωγών.....	17
1.4.3 Δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων ημιαγωγών.....	18
1.4.4 Δημιουργία της επαφής (του ηλεκτρικού πεδίου).....	18
1.4.5 Η επίδραση της Ηλιακής ακτινοβολίας.....	18
1.4.6 Μοντέλα φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	19
1.4.7 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	22
1.4.8 Παράγοντες που επηρεάζουν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	23
1.4.9 Επίδραση της θερμοκρασίας στη λειτουργία του φ/β.....	24
1.5 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Απόδοση του Φωτοβολταϊκού.....	26
1.5.1 Βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	28
1.6 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά / Θερμικά Ηλιακά Συστήματα.....	29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 (ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ)

2.1	Εισαγωγή.....	30
2.2	Τύποι Φωτοβολταϊκών / Θερμικών Συστημάτων.....	32
2.2.1	Φωτοβολταϊκά / θερμικά συστήματα αέρα.....	32
2.2.2	Φωτοβολταϊκά / θερμικά συστήματα νερού.....	33
2.3	Ιστορική Αναδρομή των Υβριδικών Φωτοβολταϊκών Συστημάτων Νερού.....	36
2.4	Ιστορική Αναδρομή των Υβριδικών Φωτοβολταϊκών Συστημάτων Αέρα.....	42
2.5	Εργασίες που Έχουν Δημοσιευτεί Από το Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας.....	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 (ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ PV/T ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ)

3.1	Εισαγωγή.....	52
3.2	Περιγραφή του Συστήματος.....	52
3.2.1	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο.....	52
3.2.2	Μονάδα απολαβής θερμότητας.....	54
3.2.3	Γυάλινο διαφανές κάλυμμα.....	55
3.2.4	Δοχείο αποθήκευσης (Storage Tank).....	55
3.2.5	Αντλία βεβιασμένης ροής.....	56
3.3	Μετρητική Διάταξη του Υβριδικού PV/T Συστήματος.....	57
3.3.1	Αυτόνομο καταγραφικό και σύστημα πολυπλεξίας.....	57
3.3.2	Θερμοζεύγη.....	58
3.3.3	Πυρανόμετρο.....	58
3.3.4	Ανεμόμετρο.....	60
3.3.5	Μετρητής ροής υπερήχων.....	61
3.3.6	Συσκευή μέτρησης χαρακτηριστικών καμπυλών φωτοβολταϊκού PVPM.....	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 (ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ)	
4.1 Σκοπός της Πειραματικής Διαδικασίας.....	65
4.2 Μέθοδος Πειραματικής Μελέτης του Υβριδικού PV/T Συστήματος.....	65
4.3 Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών του Υβριδικού PV/T Συστήματος.....	67
4.3.1 Αποτελέσματα της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του υβριδικού PV/T συλλέκτη.....	67
4.3.2 Αποτελέσματα δοκιμών του συστήματος PV/T με δοχείο αποθήκευσης.....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 (ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ)	75
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	77
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	80

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι ενεργειακές πηγές τα αποθέματα των οποίων ανανεώνονται φυσικά, και θεωρούνται ότι είναι πρακτικά ανεξάντλητες. Στις ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές θα βασιστεί η ενεργειακή βιωσιμότητα του πλανήτη για τον 21ο αιώνα και περιλαμβάνονται η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η ενέργεια του νερού, η βιομάζα και η γεωθερμία.

Μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα η ανθρωπότητα χρησιμοποιούσε κυρίως την ενέργεια του νερού, του ανέμου και την βιομάζα (ξύλο). Όμως με την ανακάλυψη των μεγάλων κοιτασμάτων κάρβουνου και πετρελαίου, ο κόσμος στράφηκε αποφασιστικά στη χρήση μη ανανεώσιμων πηγών, κυρίως άνθρακα και υδρογονανθράκων (κάρβουνο, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) και μετά τα μέσα του 20ου αιώνα άρχισε να χρησιμοποιείται και η πυρηνική ενέργεια.

Δύο ήταν οι κρίσιμοι παράγοντες στην αναβίωση του ενδιαφέροντος για τις ΑΠΕ, ξεκινώντας από τα μέσα της δεκαετίας του 1970. Ο πρώτος ήταν το ζήτημα της ενεργειακής ασφάλειας, οι δύο πετρελαϊκές κρίσεις, του 1973 και του 1979-80, οδήγησαν τις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες να αναθεωρήσουν την απόλυτη εξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα, και ιδιαίτερα το πετρέλαιο.

Το δεύτερο στοιχείο που οδήγησε στην ολική επαναφορά των ΑΠΕ ήταν, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, έχει αναχθεί σε προτεραιότητα της Διεθνούς Κοινότητας. Ο ενεργειακός τομέας είναι ο κύριος υπεύθυνος για τη ρύπανση του περιβάλλοντος, καθώς σχεδόν το 95 % της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που συμβάλει στο φαινόμενο θερμοκηπίου και που οδηγεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη οφείλεται στην παραγωγή, τη μετατροπή και τη χρήση των συμβατικών καυσίμων.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης ΑΠΕ είναι τα εξής:

- Συμβολή στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικούς, μη ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους.
- Συμβολή στην άμβλυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς συνεισφέρουν στον περιορισμό της εκπομπής των αερίων του θερμοκηπίου (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆) στην ατμόσφαιρα.
- Συνεισφορά στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, εξαιτίας της γεωγραφικής τους διασποράς, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο και τη συνεπακόλουθη ανακούφιση των συστημάτων υποδομής και τον περιορισμό των απωλειών από τη μεταφορά ενέργειας.
- Δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, με διαφορετικές λύσεις για διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες (για παράδειγμα χρήση ηλιακής ενέργειας για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, χρήση αιολικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή κ.ά.).
- Χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Συνεισφορά στην αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών με τη δημιουργία θέσεων εργασίας και την προσέλκυση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας).

1.2 Ηλιακή Ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας.

Η συνολική ενέργεια στη μονάδα του χρόνου (ισχύς) που προέρχεται από μια πηγή ακτινοβολίας και προσπίπτει σε μια μοναδιαία επιφάνεια, αποτελεί την πυκνότητα ισχύος ή

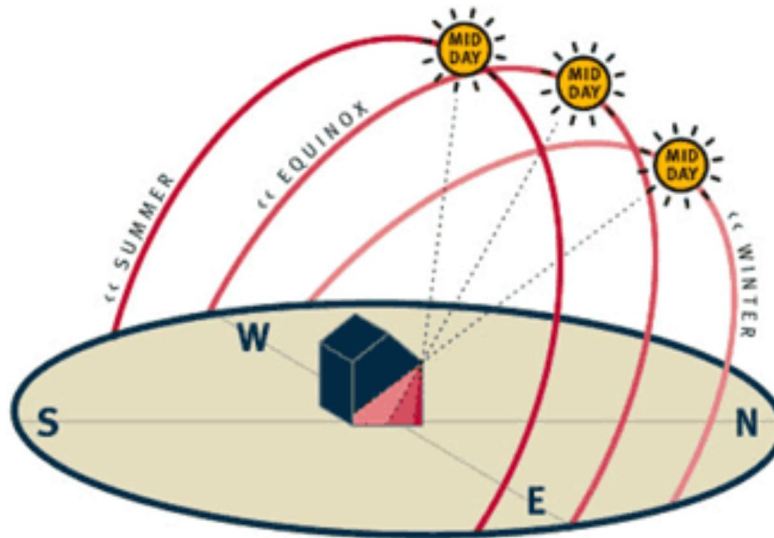
ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και μετράται σε (W/m^2). Συμβολίζεται γενικά με το γράμμα G . Η τιμή της σε ορισμένη ώρα και σημείο στην επιφάνεια της γης εξαρτάται από την θέση του ήλιου στον ουρανό, το υψόμετρο του τόπου αλλά και τις μετεωρολογικές συνθήκες. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του ήλιου υπολογίζεται ότι είναι περίπου 6,000 K. Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο όριο της ατμόσφαιρας της γης είναι περί τα $1,370 \text{ W}/\text{m}^2$ και είναι μειωμένη στην επιφάνεια της γης ($\sim 1,000 \text{ W}/\text{m}^2$) λόγω απορρόφησης και σκέδασής της από την ατμόσφαιρα.

Η θερμοκρασία στην ατμόσφαιρα της Γης είναι περίπου 230 K κατά μέσο όρο και στην επιφάνεια της Γης είναι περίπου 260-300 K, η οποία παραμένει σταθερή εξαιτίας της ακτινοβολίας που αντανακλά πίσω στο διάστημα και αυτής που εκπέμπει. Η συνολικά απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια από την ατμόσφαιρα της Γης, τους ωκεανούς και την επιφάνειά της, στη διάρκεια ενός έτους, είναι 3.85 εκατ. exajoules (EJ) (3.85×10^{18} joules).

1.2.1 Ηλιακή Γεωμετρία

Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση συναρτήσει του χρόνου, της εποχής, των κλιματολογικών συνθηκών, της υγρασίας, κλπ. Επιπλέον, επηρεάζεται σημαντικά και από άλλους παράγοντες όπως από την ρύπανση του περιβάλλοντος και τις ηλιακές κηλίδες.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η τοποθεσία που προσπίπτει η ακτινοβολία. Κατά την διάρκεια ενός έτους, λόγω της περιφοράς της γης γύρω από τον ήλιο, η τοποθεσία λαμβάνει διάφορες θέσεις και έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της απόκλισης δ , δηλαδή της γωνιακής θέσης του ήλιου κατά την ηλιακή μεσημβρία σε σχέση με το ισημερινό επίπεδο και λαμβάνεται θετική προς βορρά (σχήμα 1.1). Οι ακραίες τιμές για το Βόρειο ημισφαίριο είναι $+23.45^\circ$ στις 21 Ιουνίου και -23.45° στις 21 Δεκεμβρίου.



Σχήμα 1.1: Πορεία του Ήλιου

Η κλίση ενός θερμικού συστήματος ή μίας φωτοβολταϊκής διάταξης πρέπει να είναι εντός αυτών των ορίων και ο καλύτερος προσανατολισμός για τα συστήματα αυτά είναι ο νότιος για το βόρειο ημισφαίριο, και ο βόρειος για το νότιο ημισφαίριο. Η βέλτιστη γωνία κλίσης για τα συστήματα αυτά, ως προς την φαινόμενη θέση του ήλιου στον ουρανό μπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις:

$$(Γωνία κλίσης) \beta = (Γεωγραφικό πλάτος) \varphi - (Γωνία Απόκλισης) \delta ,$$

όπου

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \text{ (σε μοίρες)} \quad (1.1)$$

n : ο αριθμός της ημέρας του έτους, $n=1$ για την 1η Ιανουαρίου.

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια, συνίσταται στην άμεση, στην διάχυτη και στην ανακλώμενη ακτινοβολία. Με κατάλληλους δείκτες σε περίπτωση που αναφερόμαστε στη άμεση (b, beam), στη διάχυτη (d, diffuse) ή στην ανακλώμενη (r, reflected) ακτινοβολία συνοδεύουμε το γράμμα G.

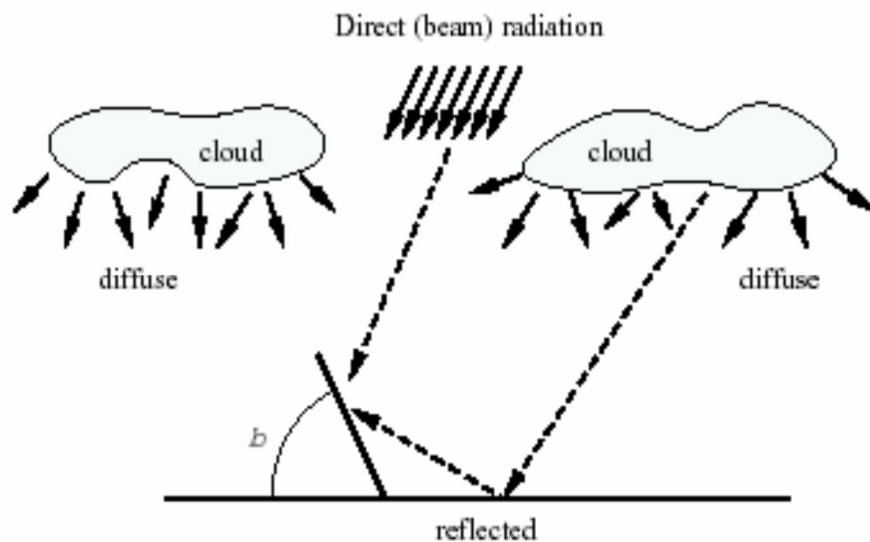
Άμεση ακτινοβολία (G_b), ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης με ελάχιστη ή χωρίς σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια εξαρτάται από την απορρόφηση και διάχυση της ηλιακής

ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα, το ύψος του ήλιου, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, το υψόμετρο του τόπου, την κλίση της επιφάνειας, την απόσταση ήλιου – Γης, την απόκλιση του ήλιου.

Διάχυτη ακτινοβολία (G_d) ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης αφού έχει αλλάξει η διεύθυνσή της από ανάκλαση ή σκέδαση στην ατμόσφαιρα, και από ανάκλαση στην επιφάνεια της Γης. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το ύψος του ήλιου, το υψόμετρο του τόπου, τη λευκαύγεια του εδάφους, το ποσό και το είδος των νεφών, το ποσό και το είδος των σωματιδίων και των αερίων της ατμόσφαιρας.

Ανακλώμενη ακτινοβολία (G_r) φτάνει στο επίπεδο αναφοράς μετά από ανάκλαση σε φυσικές ή τεχνικές επιφάνειες, που υπάρχουν στον περιβάλλοντα χώρο. Έτσι η γνώση της απαιτεί κάθε φορά καλή γνώση της τοπογραφίας του χώρου και του δείκτη ανακλαστικότητας των επιφανειών, που ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία.

Ολική ακτινοβολία (G) ορίζουμε το άθροισμα της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης.



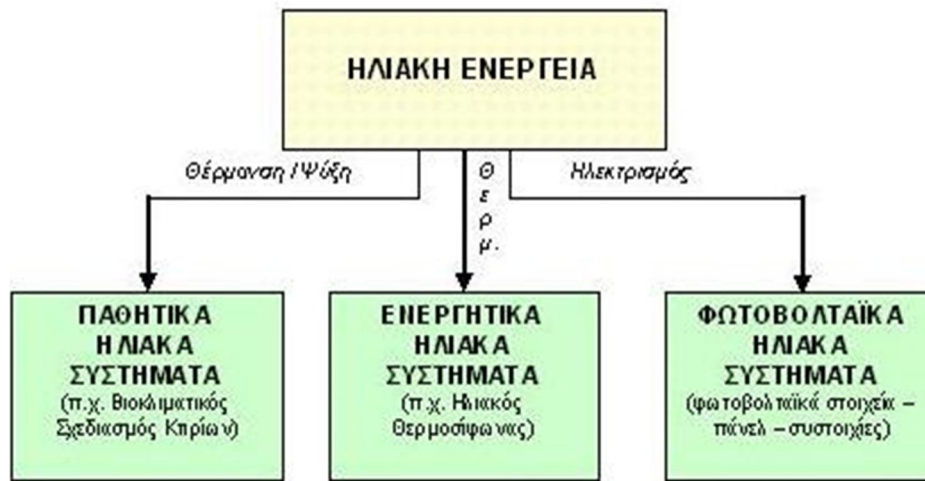
Σχήμα 1.2: Άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία

Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της.

1.3 Ηλιακά Συστήματα

Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα θερμικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα (Σχήμα 3).

Τα παθητικά και τα θερμικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.



Σχήμα 1.3: Μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε διάφορες μορφές.

1.3.1 Παθητικά Ηλιακά Συστήματα

Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης ονομάζουμε τα δομικά στοιχεία του κτιρίου, που, αξιοποιώντας τις αρχές της φυσικής (τους νόμους μεταφοράς θερμότητας) συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, την αποθηκεύουν υπό μορφή θερμότητας και τη διανέμουν στο χώρο. Αναγκαία προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία των παθητικών ηλιακών συστημάτων ώστε να αξιοποιήσουν όσο το δυνατό περισσότερο την ηλιακή ενέργεια, είναι ένας κατάλληλος σχεδιασμός του κτιρίου. Αυτό σημαίνει ότι το κέλυφος πρέπει να επιτρέπει:

- Τη μέγιστη *ηλιακή συλλογή*.
- Τη μέγιστη *θερμοχωρητικότητα*.
- Τις ελάχιστες θερμικές απώλειες.

Η λειτουργία των παθητικών συστημάτων βασίζεται σε 3 μηχανισμούς:

- Στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, κατά το οποίο γίνεται συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και αυτή διατηρείται στο εσωτερικό του κτηρίου έτσι ώστε να θερμαίνει τον χώρο.
- Στη θερμική υστέρηση των υλικών (θερμοχωρητικότητα υλικών).
- Στις αρχές που διέπουν την μετάδοση θερμότητας.

Τα είδη των παθητικών συστημάτων είναι τα εξής:

- Συστήματα άμεσου κέρδους, το πιο απλό σύστημα που αξιοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία για την θέρμανση του κτιρίου και το άμεσο κέρδος μέσω των νότια προσανατολισμένων ανοιγμάτων.
- Συστήματα έμμεσου κέρδους-Ηλιακοί τοίχοι, ανήκουν τα συστήματα που αξιοποιούν έμμεσα τα ηλιακά οφέλη για την θέρμανση κτιρίου. Αυτά τα συστήματα απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κέλυφος και ύστερα επιτρέπουν στην θερμότητα να διεισδύσει στους χώρους διαβίωσης.
- Συστήματα απομονωμένου κέρδους-Θερμοσιφωνικό σύστημα, βρίσκονται εκτός του κτιριακού περιβλήματος. Στα συστήματα απομονωμένου κέρδους η επιφάνεια συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας δεν βρίσκεται σε επαφή με τον χώρο που επιθυμούμε να θερμάνουμε. Μεταξύ αυτής της επιφάνειας και το χώρο διαβίωσης υπάρχει ένας μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας όπως για παράδειγμα ένας ανεμιστήρας.

Στα συστήματα έμμεσου κέρδους περιλαμβάνονται:

- Οι τοίχοι θερμικής αποθήκευσης, που είναι ένας συνδυασμός τοίχου νότιου προσανατολισμού και μια εξωτερική διάφανη επιφάνεια στην εξωτερική πλευρά του τοίχου σε απόσταση συνήθως 10 cm. Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου πρέπει να είναι σκουρόχρωμη ώστε να μεγιστοποιεί την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο τοίχος κατασκευάζεται από υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας για να διασφαλίζει χρονική υστέρηση τουλάχιστον 6 h ώστε η εσωτερική του επιφάνεια να έχει τη μέγιστη θερμοκρασία στην αρχή της νύχτας.

- Οι απλοί τοίχοι μάζας είτε συμπαγείς, είτε αποτελούμενοι από δοχεία που περιέχουν νερό ή υλικά αλλαγής φάσης.
- Οι τοίχοι μάζας Trombe-Michel (θερμοσιφωνικής ροής, με θυρίδες στο πάνω και στο κάτω μέρος τους).

Η χρήση των παθητικών ηλιακών συστημάτων αξιοποιείται κυρίως για ενεργειακά οφέλη κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ για το καλοκαίρι χρησιμοποιούνται απλές τεχνικές δροσισμού όπως ηλιοπροστασία και φυσικός αερισμός.

1.3.2 Θερμικά Ηλιακά Συστήματα

Τα θερμικά ηλιακά συστήματα είναι ενεργητικές ηλιακές εγκαταστάσεις όπου η μεταφορά της συλλεγόμενης ηλιακής θερμότητας πραγματοποιείται με κυκλοφορία θερμικού ρευστού. Η «καρδιά» ενός θερμικού ηλιακού συστήματος είναι ο θερμικός ηλιακός συλλέκτης. Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στη μαύρη, μεταλλική συνήθως, επίπεδη επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη, η οποία απορροφά την ακτινοβολία και θερμαίνεται. Πάνω από την απορροφητική επιφάνεια βρίσκεται ένα διαφανές κάλυμμα, συνήθως από γυαλί ή πλαστικό, που αφήνει τις ακτίνες του ήλιου να περάσουν, αλλά εμποδίζει τη θερμότητα να ξεφύγει (μηχανισμός συναγωγής). Αν κυκλοφορήσει ρευστό σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια, «αποσπάται» ενέργεια και αυτή μεταφέρεται με την μορφή θερμού ρευστού, σε μια θερμομονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης, από όπου θα την πάρουμε όταν τη χρειαστούμε. Τα θερμικά ηλιακά συστήματα χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιούν, το μέγεθός τους, την εφαρμογή για την οποία προορίζονται, το κλίμα της περιοχής κ.α. Τα συστήματα αυτά διαθέτουν μεγάλη ποικιλία στις διατάξεις τους λόγω των διαφορετικών τρόπων που αυτά τα συστήματα προστατεύονται από τον παγετό. Τα θερμικά ηλιακά συστήματα διακρίνονται ανάλογα με την θερμοκρασία αποδοτικής λειτουργίας σε χαμηλής θερμοκρασίας (μέχρι 100 °C), σε ενδιάμεσης θερμοκρασίας (60 °C - 180 °C), σε μέσης θερμοκρασίας (100 °C - 400 °C) και σε υψηλής θερμοκρασίας (πάνω από 400 °C). Στην κατηγορία των θερμικών ηλιακών συστημάτων χαμηλής θερμοκρασίας, το ρευστό απολαβής της θερμότητας είναι το νερό, ο αέρας ή άλλο υγρό. Τα συστήματα μέσω θερμοκρασιών περιλαμβάνουν κάποιο μέσο συγκέντρωσης της ακτινοβολίας (φακούς ή κάτοπτρα). Επίσης, τα θερμικά ηλιακά συστήματα διακρίνονται σε δυο

κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που γίνεται η ροή στο σύστημα, στα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας και στα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας.

1.3.2.1 Συστήματα φυσικής κυκλοφορίας

Στα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας ο όρος «φυσική κυκλοφορία» χρησιμοποιείται γιατί το σύστημα αυτό δεν χρειάζεται κανένα μηχανισμό ώστε να παρέχει την επιπλέον ενέργεια όταν αποθηκεύει και μεταφέρει ηλιακή ενέργεια στο δοχείο αποθήκευσης. Υπάρχουν δύο κατηγορίες τέτοιων συστημάτων:

- Η πρώτη κατηγορία είναι οι συμπαγείς θερμαντήρες νερού ή ολοκληρωμένα συστήματα συλλέκτη-αποθήκευσης τα οποία αποτελούνται από μία ή περισσότερες δεξαμενές αποθήκευσης και τοποθετούνται σε ένα θερμομονωμένο περίβλημα με τη διαφανή πλευρά να είναι προσανατολισμένη προς τον ήλιο. Τα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας είναι καλύτερα και προτιμότερα από τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας διότι έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, συντηρούνται εύκολα και οικονομικά και θεωρούνται πιο προσιτά.
- Η δεύτερη κατηγορία είναι τα θερμοσιφωνικά συστήματα, τα οποία είναι κυρίως συστήματα με συστήματα με ρευστό απολαβής της θερμότητας το νερό. Τα θερμοσιφωνικά συστήματα στηρίζονται στη φυσική κυκλοφορία του νερού στους συλλέκτες και τη δεξαμενή, η οποία είναι τοποθετημένη πάνω από το συλλέκτη. Το νερό θερμαίνεται στον ηλιακό συλλέκτη, γίνεται ελαφρύτερο (η πυκνότητά του ελαττώνεται) και ανέρχεται προς τη δεξαμενή αποθήκευσης. Το ψυχρότερο νερό της δεξαμενής, ρέει με τη βοήθεια σωληνώσεων στο κατώτερο σημείο του συλλέκτη προκαλώντας κυκλοφορία σε όλο το σύστημα.

1.3.2.2 Συστήματα βεβιασμένης κυκλοφορίας

Τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (ή Κεντρικά Θερμικά Ηλιακά Συστήματα) λειτουργούν χρησιμοποιώντας βαλβίδες, ηλεκτρικές αντλίες και συστήματα ελέγχου ώστε να μπορούν να κυκλοφορούν το νερό και τα άλλα ρευστά μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται μέσα στους συλλέκτες. Αυτό το σύστημα δεν έχει συγκεκριμένους περιορισμούς τοποθέτησης σχετικώς με την απόσταση μεταξύ δεξαμενής και του ηλιακού συστήματος. Τα συστήματα αυτά είναι πιο σύνθετα συστήματα, αλλά με καλύτερη αισθητική

ένταξη, πλήρη έλεγχο της εγκατάστασης με απλό τρόπο, πολλές δυνατότητες εφαρμογών και πολλές δυνατότητες εγκατάστασης σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του κτιρίου.

Τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας νερού ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- Στα ανοιχτού κυκλώματος, στα οποία χρησιμοποιούνται κυκλοφορητές έτσι ώστε να κυκλοφορεί το νερό χρήσης στους συλλέκτες. Ο διαφορικός θερμοστάτης θέτει σε λειτουργία τον κυκλοφορητή όταν η θερμοκρασία του νερού στην κορυφή του συλλέκτη είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία στο πυθμένα της δεξαμενής αποθήκευσης. Βαλβίδα αντεπιστροφής εμποδίζει την αντίστροφη ροή του νερού και την απώλεια θερμότητας από τον συλλέκτη κατά την νύχτα. Η βοηθητική πηγή ενέργειας μπορεί να βρίσκεται στο σωλήνα εξόδου από την δεξαμενή με την μορφή θερμαντήρα εν σειρά χωρίς αποθηκευτική ικανότητα.
- Στα συστήματα κλειστού κυκλώματος, τα οποία περιλαμβάνουν αντιπηκτικό υγρό κύκλωμα ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος παγώματος του συλλέκτη κατά τον χειμώνα αλλά και να περιορίζεται η διάβρωση από την συνεχή ροή του νερού του δικτύου ύδρευσης. Οι εναλλάκτες θερμότητας μπορεί να βρίσκονται μέσα στην δεξαμενή.

1.4 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Με τον γενικό όρο φωτοβολταϊκά χαρακτηρίζονται οι διατάξεις μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και πρόκειται για ηλεκτρογεννήτριες που συγκροτούνται από συστοιχία φωτοβολταϊκών κυττάρων σε επίπεδη διάταξη, που έχουν ως βάση λειτουργίας το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

1.4.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζεται στις βασικές ιδιότητες των ημιαγωγίμων υλικών σε ατομικό επίπεδο. Όταν το φως προσπίπτει σε μια επιφάνεια είτε ανακλάται, είτε την διαπερνά (διαπερατότητα) είτε απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας. Η απορρόφηση του φωτός ουσιαστικά σημαίνει την μετατροπή του σε μια άλλη μορφή ενέργειας (σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας) η οποία συνήθως είναι η θερμότητα. Παρόλα αυτά όμως υπάρχουν κάποια υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να

μετατρέπουν την ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων (πακέτα ενέργειας) σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα υλικά είναι οι ημιαγωγοί και σε αυτά οφείλεται επίσης η τεράστια τεχνολογική πρόοδος που έχει συντελεστεί στον τομέα της ηλεκτρονικής και συνεπακόλουθα στον ευρύτερο χώρο της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών.

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

1.4.2 Χαρακτηριστικά Ημιαγωγών

Το χαρακτηριστικό στοιχείο ενός ημιαγωγού που το διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα υλικά είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων ενός ατόμου που βρίσκεται στην εξωτερική του στοιβάδα (σθένους). Ο περισσότερο γνωστός ημιαγωγός είναι το πυρίτιο (Si) για αυτό και θα επικεντρωθούμε σε αυτό.

Το πυρίτιο έχει ατομικό αριθμό 14 και έχει στην εξωτερική του στοιβάδα 4 ηλεκτρόνια. Όλα τα άτομα που έχουν λιγότερα η περισσότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα (είναι "γενικά" συμπληρωμένη με 8 e) "ψάχνουν" άλλα άτομα με τα οποία μπορούν να ανταλλάξουν ηλεκτρόνια ή να "μοιρασθούν" κάποια με σκοπό τελικά να αποκτήσουν συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα σθένους.

Σε αυτήν την τάση οφείλεται και η κρυσταλλική δομή του πυριτίου αφού όταν συνυπάρχουν πολλά άτομα μαζί διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συνεισφέρουν ηλεκτρόνια με όλα τα γειτονικά τους άτομα και τελικά με αυτόν τον τρόπο να αποκτούν μια συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα και κρυσταλλική δομή. Αυτή είναι και η καθοριστική ιδιότητα που έχουν τα κρυσταλλικά υλικά.

Στην κρυσταλλική του μορφή όμως το πυρίτιο είναι σταθερό. Δεν έχει ανάγκη ούτε να προσθέσει ούτε να διώξει ηλεκτρόνια κάτι που ουσιαστικά του δίνει ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πολύ κοντά σε αυτά ενός μονωτή αφού δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια για την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό του.

1.4.3 Δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων ημιαγωγών

Τις ημιαγωγές ιδιότητες του το πυρίτιο τις αποκτά με τεχνικό τρόπο. Αυτό πρακτικά γίνεται με την πρόσμειξη με άλλα στοιχεία τα οποία είτε έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο είτε ένα λιγότερο στην στοιβάδα σθένους των. Αυτή η πρόσμειξη τελικά κάνει τον κρύσταλλο δεκτικό είτε σε θετικά φορτία (υλικό τύπου p) είτε σε αρνητικά φορτία (υλικό τύπου n).

Για να φτιαχτεί λοιπόν ένας ημιαγωγός τύπου n ή αλλιώς ένας αρνητικά φορτισμένος κρύσταλλος πυριτίου θα πρέπει να γίνει πρόσμειξη ενός υλικού με 5e στην εξωτερική του στοιβάδα όπως για παράδειγμα το Αρσενικό (As). Αντίστοιχα για να δημιουργήσουμε έναν ημιαγωγό τύπου p η αλλιώς θετικά φορτισμένος κρύσταλλος πυριτίου χρειάζεται να γίνει πρόσμειξη στον κρύσταλλο κάποιου υλικού όπως το βόριο (B) που έχει 3e στην εξωτερική του στοιβάδα.

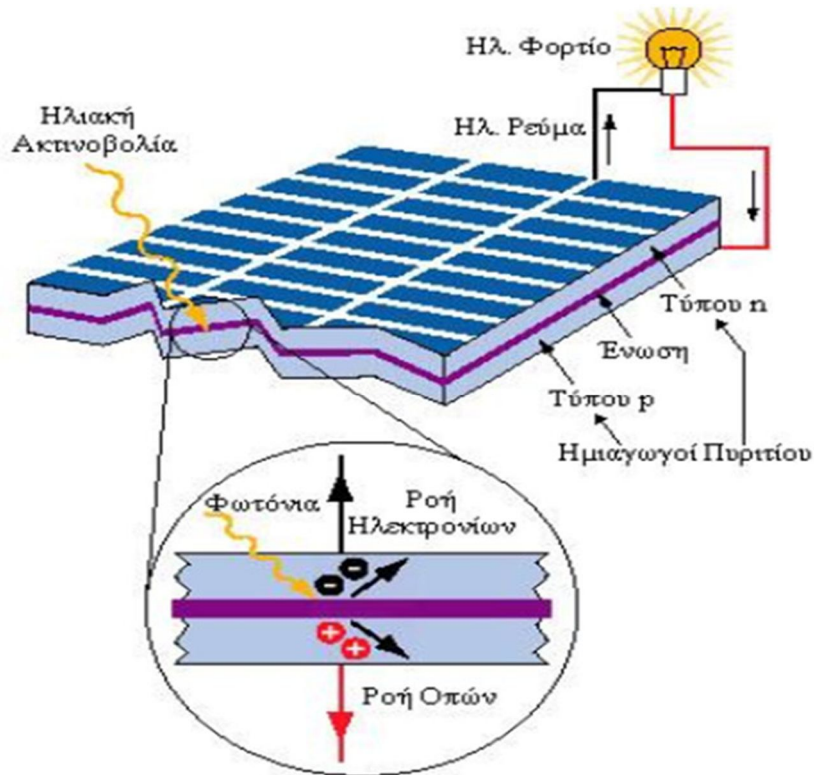
1.4.4 Δημιουργία της επαφής (του ηλεκτρικού πεδίου)

Εάν φέρουμε σε επαφή δύο κομμάτια πυριτίου τύπου n και τύπου p το ένα απέναντι από το άλλο δημιουργείται μια δίοδος η αλλιώς ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή των δύο υλικών το οποίο επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση μόνο. Τα επιπλέον ηλεκτρόνια της επαφής n έλκονται από τις «οπές» τις επαφής p. Αυτό το ζευγάρι των δύο υλικών είναι το δομικό στοιχείο του φωτοβολταϊκού κελιού και η βάση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

1.4.5 Η επίδραση της Ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία έρχεται με την μορφή πακέτων ενέργειας ή φωτονίων. Τα φωτόνια όταν προσπίπτουν σε μια διάταξη φβ κελιού περνούν αδιατάραχτα την επαφή τύπου n και χτυπούν τα άτομα της περιοχής τύπου p. Τα ηλεκτρόνια της περιοχής τύπου p αρχίζουν και κινούνται μεταξύ των οπών ώσπου τελικά φτάνουν στην περιοχή της διόδου όπου και έλκονται πλέον από το θετικό πεδίο της εκεί περιοχής. Αφού ξεπεράσουν το ενεργειακό χάσμα αυτής της περιοχής μετά είναι αδύνατον να επιστρέψουν. Στο τμήμα της επαφής n πλέον έχουμε μια περίσσεια ηλεκτρονίων που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε. Αυτή η περίσσεια των ηλεκτρονίων μπορεί να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα εάν τοποθετήσουμε μια διάταξη όπως ένας μεταλλικός

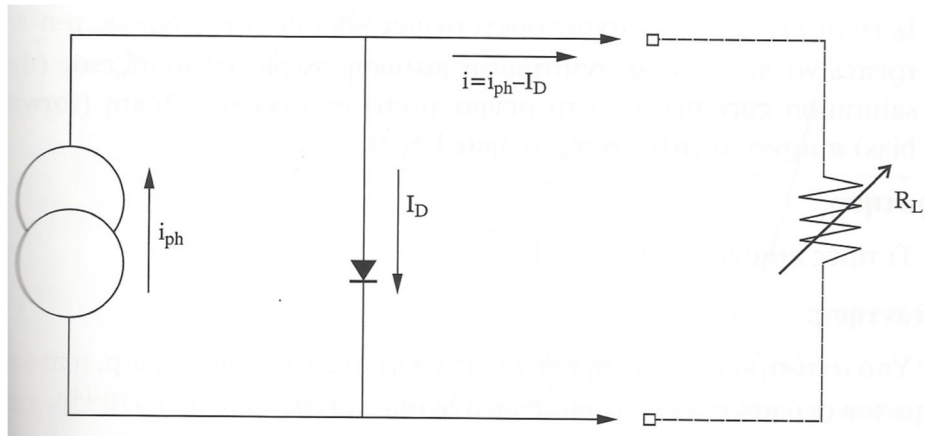
αγωγός στο πάνω μέρος της επαφής n και στο κάτω της επαφής p και ένα φορτίο ενδιάμεσα με τέτοιο τρόπο ώστε να κλείσει ένας αγωγίμος δρόμος για το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται (Σχήμα 1.4). Αυτή είναι απλοποιημένα η γενική αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου.



Σχήμα 1.4: Σχηματική διάταξη του φωτοβολταϊκού φαινομένου (google image)

1.4.6 Μοντέλα φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το πιο γνωστό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του τρόπου λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, είναι το απλοποιημένο κύκλωμα που περιέχει μία δίοδο και απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.5: Απλοποιημένο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου (Καπλάνης, Μηχανική των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων, 2004)

Το σημαντικότερο στοιχείο του παραπάνω κυκλώματος είναι η ιδανική πηγή ρεύματος έντασης, της οποίας το φωτορεύμα I_{ph} είναι ανάλογο της ηλιακής ακτινοβολίας. Το ρεύμα της διόδου I_D δίνεται από τη σχέση:

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{qV_D}{KT}} - 1 \right) \quad (1.2),$$

όπου I_0 είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου, V_d είναι η τάση στα άκρα της διόδου, K είναι η σταθερά του Boltzmann, T είναι η απόλυτη θερμοκρασία και q το φορτίο του ηλεκτρονίου. Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή και ως εξίσωση του Shockley.

Η αντίσταση R_L εκφράζει το ηλεκτρικό φορτίο. Αναλύοντας το παραπάνω κύκλωμα που αντιπροσωπεύει τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου εξάγεται η εξίσωση:

$$I_{ph} = I_D + I \quad (1.3)$$

Στη συνέχεια εφαρμόζοντας το νόμο των τάσεων Kirchoff και αντικαθιστώντας το ρεύμα της διόδου I_d από τη σχέση (1.2), προκύπτει η εξίσωση που δίνει το ρεύμα I που διαρρέει το στοιχείο:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{qV_D}{KT}} - 1 \right) \quad (1.4)$$

Όταν στο κύκλωμα του σχήματος 1.5 έχουμε βραχυκύκλωμα (short circuit), τότε η αντίσταση $R_L \rightarrow 0$ και τότε $I = I_{sc}$. Με βάση τη σχέση (1.4) όταν τεθεί σε αυτήν $V = V_{sc} = 0$ (λόγω βραχυκυκλώματος), λαμβάνουμε:

$$I = I_{sc} = I_{ph} \quad (1.5)$$

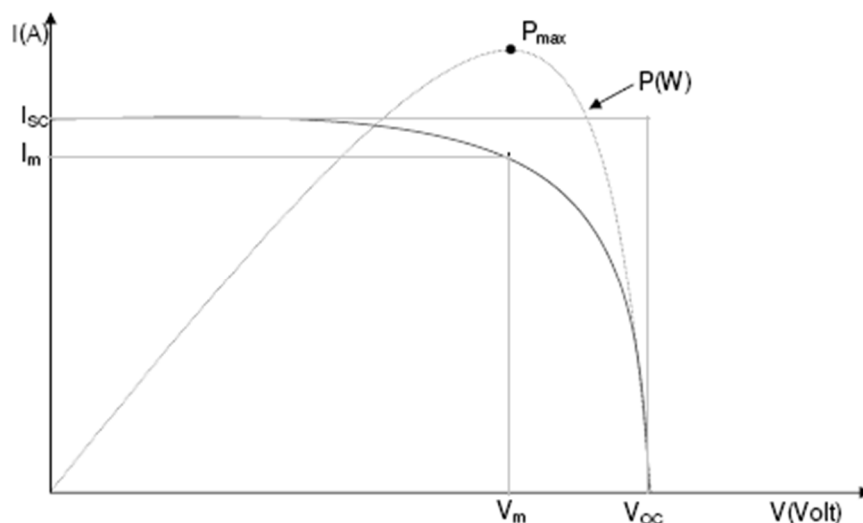
Αντίθετα, στην περίπτωση ανοιχτού κυκλώματος (open circuit), τότε η αντίσταση $R_L \rightarrow \infty$ και συνεπώς:

$$V = V_{oc}, I = I_{oc} = 0 \quad (1.6)$$

Θέτοντας στην σχέση (1.4) $I = 0$ για την περίπτωση του ανοιχτού κυκλώματος προκύπτει:

$$I_{ph} = I_o \left[e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{K \cdot T}} - 1 \right] \quad (1.7)$$

Στο σχήμα 1.6 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ($I-V$) του φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχήμα 1.6: Χαρακτηριστική καμπύλη $I-V$ και $I-P$ του φωτοβολταϊκού στοιχείου

1.4.7 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων

Στην χαρακτηριστική καμπύλη $I-V$ υπάρχει ένα σημείο (V_m, I_m) στο οποίο η ισχύς λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της (σχήμα 2.2). Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύος (maximum power point, MPP). Η μέγιστη ισχύ των φωτοβολταϊκών στοιχείων δίνεται από τη σχέση:

$$P_m = I_m V_m \quad (1.8)$$

Η μέγιστη ισχύς $P_m = I_m V_m$ δίνεται από τους κατασκευαστές μετρημένη υπό ειδικές σταθερές συνθήκες (Standard Test Condition, STC), οι οποίες αντιστοιχούν σε ακτινοβολία 1000 W/m^2 , τιμή αέριας μάζας $AM=1.5$ και θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ο παράγοντας πλήρωσης FF (fill factor). Ο παράγοντας αυτός δίνεται από το λόγο των εμβαδών του μέγιστου ορθογωνίου που μπορεί να εγγραφεί στην χαρακτηριστική καμπύλη $I-V$, προς το εμβαδό του ορθογωνίου που ορίζεται από τις τιμές V_{oc} και I_{sc} (σχήμα 2.2). Η αριθμητική του τιμή υπολογίζεται από το πηλίκο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύς P_L προς το γινόμενο του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} και δίνεται από τη σχέση:

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1.9)$$

Τέλος, η πιο βασική παράμετρος για την αξιολόγηση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η ενεργειακή τους απόδοση n . Η απόδοση n εξαρτάται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , την τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} και το συντελεστή πλήρωσης FF και ισούται με το λόγο της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος του φωτοβολταϊκού στοιχείου, προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανά μονάδα επιφανεΐας. Τότε ο συντελεστής απόδοσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$n = \frac{P_m}{G \cdot A} = \frac{I_m V_m}{G \cdot A} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{G \cdot A} \quad (1.10),$$

όπου G η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια A του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

1.4.8 Παράγοντες που επηρεάζουν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο δεν χρησιμοποιείται όλη η περιοχή του φάσματος αλλά μέρος αυτής. Το κριτήριο είναι $h\nu > E_g$ για να απορροφηθεί η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια και να δημιουργηθεί το ζεύγος ηλεκτρονίου - οπής. Το ποσοστό των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρονίων υπολογίζεται από το ηλιακό φάσμα και στο κρυσταλλικό πυρίτιο το ενεργειακό κριτήριο ικανοποιείται μόνο από το 77 % περίπου της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Συμπεραίνουν λοιπόν πως ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται σημαντικά από την ποιότητα της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι μια δέσμη ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει την παραγωγή λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με άλλη δέσμη ίσης ισχύος, αλλά πλουσιότερης σε φωτόνια με ευνοϊκότερη ενέργεια για τον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο.

Συνεχίζοντας θα πρέπει να αναφερθεί το πρόβλημα της ανακλαστικότητας. Ειδικά ο κρύσταλλος του πυριτίου χαρακτηρίζεται από ανακλαστικότητα $\rho = 0.3$ με αποτέλεσμα ένα σημαντικό ποσοστό φωτονίων με κατάλληλη ενέργεια να ανακλώνται από την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Το πρόβλημα, αντιμετωπίζεται με τη χρήση αντανακλαστικών επικαλύψεων. Το άριστο βάθος της επαφής ρ -η εξαρτάται από παράγοντες όπως η ευκινησία και ο χρόνος ζωής των φορέων, η αντίσταση της επαφής προς την πλευρά της επιφάνειας όπου υπάρχει το ηλεκτρόδιο συλλογής των φορέων, και κυρίως από την περιοχή του κρυστάλλου στην οποία απορροφούνται τα περισσότερα φωτόνια για να δώσουν ζεύγη ηλεκτρονίου - οπής.

Καθώς τα ηλεκτρόνια απορροφούν την ενέργεια της ακτινοβολίας $h\nu$, περνούν στις κατώτερες ενεργειακές στάθμες της ζώνης αγωγιμότητας με αποτέλεσμα η πλεονάζουσα ενέργεια ($h\nu - E_g$) να μετατρέπεται σε θερμότητα. Σύμφωνα με το ηλιακό φάσμα, για το πυρίτιο, η ενεργειακή αυτή απώλεια αντιστοιχεί στο 33% της ενέργειας της ακτινοβολίας. Συνεπώς πολύ σημαντικό ρόλο στην απόδοση των στοιχείων παίζει η τιμή του ενεργειακού διάκενου των ημιαγωγών. Οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μμετατροπής της ηλιακής ενέργειας μπορούν

να επιτευχθούν σε φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με τιμή ενεργειακού χάσματος 1.1-1.5 eV.

Σημαντικό κριτήριο αποτελεί το είδος του ενεργειακού διάκενου του ημιαγωγού, αν πρόκειται δηλαδή για άμεσο ή έμμεσο. Τα φωτόνια απορροφώνται ευκολότερα στους ημιαγωγούς άμεσου ενεργειακού διάκενου, έτσι ώστε το στοιχείο να μην χρειάζεται μεγάλο πάχος και να γίνεται με αυτόν τον τρόπο εξοικονόμηση υλικού. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) από το οποίο αρκεί στρώμα πάχους 1 μm για να απορροφηθεί το 80% των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό του διάκενο (1.43 eV).

Αντίθετα, το πυρίτιο το οποίο χαρακτηρίζεται ως έμμεσος ημιαγωγός χρειάζεται στρώμα πάχους 100 μm . Στην περίπτωση της επαφής μεταξύ δύο διαφορετικών ημιαγωγών ιδιαίτερη σημασία έχει το ταίριασμα των κρυσταλλικών πλεγμάτων ώστε να υπάρχει καλή επαφή. Τελειώνοντας, ως κριτήρια αξιολόγησης των ημιαγωγών, αλλά και των υπολοίπων υλικών κατασκευής των ηλιακών στοιχείων, θα πρέπει να αναφερθούν το κόστος παραγωγής, η σταθερότητα τους στην επίδραση των εξωτερικών συνθηκών και κυρίως της υγρασίας και της θερμότητας, η τοξικότητα των διαφόρων συστατικών και το ειδικό βάρος.

1.4.9 Επίδραση της θερμοκρασίας στη λειτουργία του φ/β.

Η θερμοκρασία λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού καθορίζεται από μια ενεργειακή ισορροπία. 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. Η ενεργειακή ισορροπία σε μια μοναδιαία περιοχή ενός φωτοβολταϊκού το οποίο ψύχεται λόγω θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον, μπορεί να γραφεί ως:

$$(\tau\alpha) \cdot G_T = n_c \cdot G_T + U_L \cdot (T_c + T_a) \quad (1.11),$$

όπου τ είναι η διαπερατότητα του διαφανούς καλύμματος που είναι τοποθετημένο πάνω στα στοιχεία, α είναι το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια των στοιχείων η οποία και απορροφάται, G_T είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία, η_c είναι η απόδοση του φωτοβολταϊκού στο να μετατρέπει την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και T_c η θερμοκρασία λειτουργίας των στοιχείων. Αυτή η απόδοση κυμαίνεται από μηδέν ως τη μέγιστη ηλεκτρική απόδοση, ανάλογα με το πόσο κοντά βρίσκεται σε συνθήκες μέγιστης ισχύς. Ο συντελεστής απωλειών U_L περιλαμβάνει θερμικές απώλειες από τη φωτιζόμενη πλευρά και από τη μη φωτιζόμενη πλευρά του φωτοβολταϊκού προς το περιβάλλον.

Η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας των στοιχείων (NOCT) καθορίζεται από τη θερμοκρασία που φθάνουν τα φωτοβολταϊκά όταν τοποθετούνται με τον κανονικό τρόπο και σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 800 W/m^2 , σε ταχύτητα αέρα 1 m/sec , σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $20 \text{ }^\circ\text{C}$, και χωρίς φορτίο, $n_c = 0$.

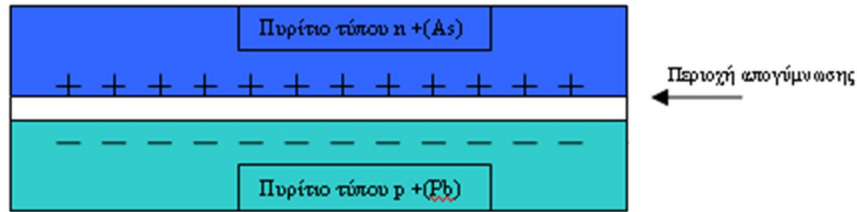
Μετρήσεις της θερμοκρασίας των στοιχείων, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να καθορίσουν το $\tau\alpha / U_L$,

$$\tau \cdot \alpha / U_L = (T_{c,NOCT} - T_a) / G_{T,NOCT} \quad (1.12)$$

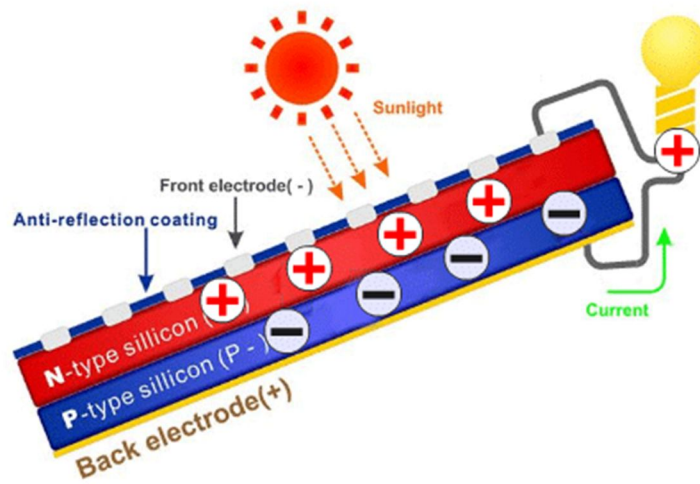
Η θερμοκρασία σε άλλες συνθήκες, όπου υποθέτουμε ότι το $\tau\alpha / U_L$, να είναι σταθερό, βρίσκεται από την σχέση

$$T_c = T_a + (G_T \cdot \tau\alpha / U_L) \cdot (1 - n_c / \tau \cdot \alpha) \quad (1.13)$$

Ο τελευταίος όρος $\tau\alpha$ στην εξίσωση δεν είναι γενικά γνωστός και χωρίς σημαντικό σφάλμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την τιμή 0.9, επειδή ο όρος $\eta_c / \tau\alpha$ είναι μικρός σε σχέση με τη μονάδα.



Σχήμα 1.7: Δημιουργία διόδου (google image)



Σχήμα 1.8: Μηχανισμός φωτοβολταϊκού φαινομένου (google image)

1.5 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Απόδοση του Φωτοβολταϊκού

- **Παράγον ή συντελεστής γήρανσης $n_{\gamma,m}$**

Αφορά στη μείωση της απόδοσης των ΦΒ πλαισίων στο χρόνο ζωής τους και εκφράζεται συνήθως με το ποσοστό γήρανσης ανά έτος χρήσης. Προσδιορίζει την ελάττωση της απόδοσής τους άρα και της ισχύος αιχμής και οφείλεται κυρίως σε υπερθερμάνσεις των ΦΒ κυψελών που καταστρέφουν την δομή του υλικού τους.

- **Οπτικές απώλειες**

Αποτελούν όλες εκείνες τις απώλειες που καθορίζονται από την απόκλιση της απόδοσης σε σχέση με τις πρότυπες συνθήκες, λόγω των παρακάτω αιτιών:

- Διαφοροποίηση ανακλαστικότητας ΦΒ πλαισίου σε σχέση με την αντίστοιχη σε STC.
 - Επίδραση διαφοροποίησης φάσματος ακτινοβολίας σε σχέση με το AM 1.5 (STC)
 - Απώλειες διαφοροποίησης της πόλωσής
 - Απώλειες χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας
 - Καθαρότητα όψεως του φβ πλαισίου.
- **Θερμοκρασία φωτοβολταϊκής κυψέλης**

Περιγράφει τη διαφοροποίηση της απόδοσης του ΦΒ πλαισίου, λόγω της διαφορετικής θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης σε σχέση με την θερμοκρασία της στις πρότυπες συνθήκες (STC) και δίνεται από την ίδια σχέση που χρησιμοποιείται στην περίπτωση μεμονωμένου ΦΒ στοιχείου:

$$n_T = 1 + \gamma_{mp} (\theta_c - \theta_{STC}), \text{όπου} \quad (1.14)$$

γ_{mp} :ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος του ΦΒ στοιχείου

θ_c :θερμοκρασία κυψέλης θεωρούμενη ίδια για όλες τις κυψέλες.

Μια αναλυτική έκφραση για την εξάρτηση της θερμοκρασίας της φβ κυψέλης από τις συνθήκες περιβάλλοντος, είναι:

$$\theta_c = \theta_a + \frac{G_T}{G_{STC}} (T_1 e^{B \cdot w_s} + T_2 + \Delta\theta), \text{όπου} \quad (1.15)$$

θ_a :η θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα

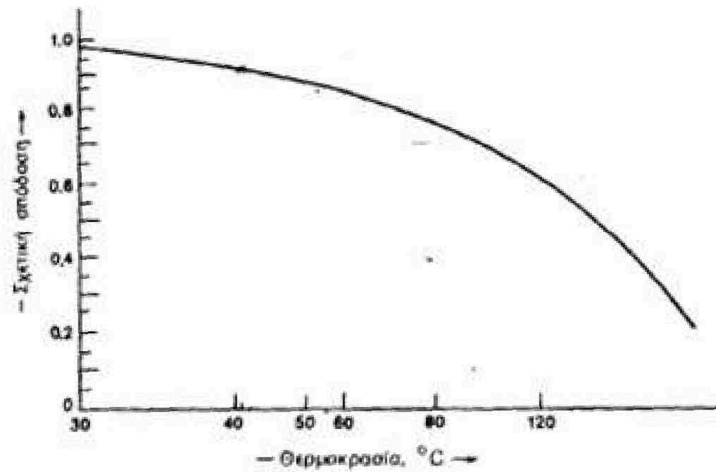
G_T :η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του ΦΒ πλαισίου

B : εμπειρικός συντελεστής

w_s : η ταχύτητα του ανέμου

T_1, T_2 :εμπειρικοί συντελεστές που υπολογίζονται βάση τις οριακές τιμές της θερμοκρασίας της κυψέλης σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες ανέμου αντίστοιχα

$\Delta\theta$: η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της κυψέλης και της πίσω επιφάνειας του ΦΒ πλαισίου.



Σχήμα 1.9: Μεταβολή της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων συναρτήσει της θερμοκρασίας (google image)

- **Συντελεστής απωλειών στη δίοδο αντεπιστροφής**

Περιγράφει τις απώλειες που προέρχονται από την δίοδο αντεπιστροφής που τοποθετείται για να αποτρέπεται η εκφόρτιση του συσσωρευτή διαμέσου της ΦΒ συστοιχίας όταν αυτή δεν φωτίζεται.

1.5.1 Βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να κατασκευαστούν με διάφορους τρόπους και με διαφορετικά υλικά. Ανάλογα με την τεχνολογία κατασκευής τους, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να διακριθούν σε ομάδες. Το πιο διαδεδομένο υλικό κατασκευής είναι το πυρίτιο (Silicon), επειδή έχει τα πιο επιθυμητά αποτελέσματα για τα φωτοβολταϊκά κύτταρα. Έτσι, κατασκευάζονται φωτοβολταϊκά κύτταρα από μονό-κρυσταλλικό ή πολύ-κρυσταλλικό πυρίτιο, όπως και από άμορφο πυρίτιο.

Φωτοβολταϊκά κύτταρα όμως κατασκευάζονται και από συνδυασμούς άλλων υλικών, όπως γαλλίου-Αρσενίου (GaAs), καδμίου-τελλουρίου (CdTe) και χαλκού-ινδίου-δισεληνίου (CuInSe₂ ή CIS). Έτσι, παρέχεται μια ποικιλία φωτοβολταϊκών που διαφέρουν τόσο σε κόστος, όσο και σε βαθμό απόδοσης.

1.6 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά / Θερμικά Ηλιακά Συστήματα

Με τον όρο φωτοβολταϊκά/θερμικά ηλιακά συστήματα αναφερόμαστε στα υβριδικά συστήματα που παράγουν ηλεκτρική και θερμική ισχύ και από την ηλιακή ακτινοβολία, ενσωματώνοντας τεχνολογίες τόσο από τον τομέα των φωτοβολταϊκών όσο από τον τομέα των θερμικών ηλιακών συστημάτων (ΘΗΣ).

Στις συσκευές αυτές έχει ενσωματωθεί κάποιο σύστημα απαγωγής/ανάκτησης θερμότητας από φωτοβολταϊκά πλαίσια. Τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια μετατρέπουν μόνο ένα μικρό ποσοστό από την ηλιακή ακτινοβολία που απορροφούν σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα και συνεπώς μεταδίδεται στο περιβάλλον. Μια λύση για την αξιοποίηση της απώλειας είναι η απαγωγή αυτής μέσω της ροής ενός ρευστού (συνήθως νερό ή αέρας) και η μεταφορά της σε κάποια κατανάλωση.

ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ / ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

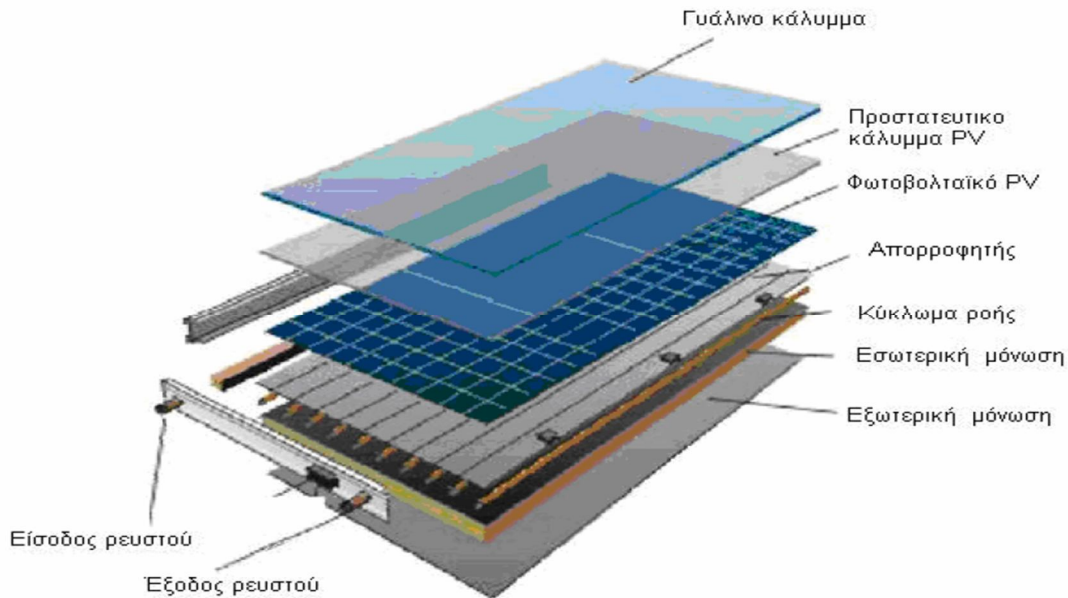
2.1 Εισαγωγή

Το μεγαλύτερο μέρος της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τα φωτοβολταϊκά (ΦΒ) κύτταρα δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό αλλά σε θερμότητα, η οποία συντελεί στην αύξηση της θερμοκρασίας τους με συνέπεια την μείωση της ηλεκτρικής τους απόδοσης. Η φυσική ψύξη των ΦΒ συστημάτων με συναγωγή και τον αέρα δεν επαρκεί για την μείωση της θερμοκρασίας σε ικανοποιητικό βαθμό.

Η ανάκτηση της θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια βοηθά όχι μόνο στη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας τους αλλά μπορεί και να αξιοποιηθεί αυξάνοντας τη συνολική ενεργειακή τους απόδοση. Τα ηλιακά συστήματα που έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν τόσο ηλεκτρική όσο και θερμική ενέργεια είναι τα υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά (ΦΒ/Θ ή PV/T) συστήματα, τα οποία αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια και έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται σε ορισμένες εφαρμογές.

Τα υβριδικά ΦΒ/Θ συστήματα, λοιπόν, συνίστανται από φωτοβολταϊκά πλαίσια με ενσωματωμένη θερμική μονάδα απολαβής της θερμότητας του ΦΒ, όπου ένα κυκλοφορούν ρευστό χαμηλότερης θερμοκρασίας από αυτής του φωτοβολταϊκού θερμαίνεται ψύχοντας το.

Το ρευστό απολαβής της θερμότητας δεν χρησιμοποιείται μόνο για την ψύξη του φωτοβολταϊκού αλλά και για άλλες πρακτικές εφαρμογές. Το ρευστό μπορεί να είναι είτε υγρό είτε αέρας. Στις υβριδικές συσκευές αυτές, τα ΦΒ πλαίσια και οι θερμικές μονάδες αποτελούν ενιαίες συσκευές και μπορούν να μετατρέπουν την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία ταυτόχρονα σε ηλεκτρισμό και θερμότητα και κατά συνέπεια έχουν μεγαλύτερη ολική αποδιδόμενη ενέργεια σε σχέση με τα απλά φωτοβολταϊκά πλαίσια.



Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση τυπικού υβριδικού φβ/θ συστήματος

Με την σημερινή τεχνολογία των υβριδικών φβ/θ συσκευών η συνολική απόδοση είναι μικρότερη από αυτή δύο ξεχωριστών συσκευών (ΦΒ και θερμική) για την περίπτωση ανύψωσης της θερμοκρασίας του νερού σε επαρκή επίπεδα πρακτικής χρήσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμική απόδοση μιας μονάδας απαγωγής θερμότητας ενσωματωμένη σε ένα φβ/θ σύστημα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη απόδοσης μιας συμβατικής μονάδας μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα, ενώ η ηλεκτρική απόδοση του υβριδικού φωτοβολταϊκού θερμικού συστήματος είναι ίδια σε σχέση με την αντίστοιχη ενός απλού φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Ωστόσο στην περίπτωση του υβριδικού φβ/θ συστήματος οι δύο αποδόσεις, ηλεκτρική και θερμική, προέρχονται από την ίδια περιοχή. Με τον τρόπο αυτό, μπορούμε να μειώσουμε αισθητά την επιφάνεια εγκατάστασης για την παροχή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και να επιτύχουμε πιο αισθητικά αποδεκτό αποτέλεσμα στο σημείο εφαρμογής από ότι θα είχαμε εγκαθιστώντας ξεχωριστά ένα θερμικό και ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

Όσον αφορά την ενέργεια, έχει γίνει σαφές ότι για τις περισσότερες εφαρμογές η θερμική απόδοση είναι αισθητά υψηλότερη από την ηλεκτρική απόδοση. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι ένα συμβατικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο παράγει μια μεγάλη ποσότητα ανεκμετάλλευτης θερμότητας. Η συλλογή και αξιοποίηση αυτής της θερμότητας μπορεί να μειώσει σημαντικά το χρόνο απόσβεσης μιας τέτοιας εγκατάστασης.

2.2 Τύποι Υβριδικών Φωτοβολταϊκών / Θερμικών Συστημάτων

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι φβ/θ συστημάτων και κατατάσσονται ανάλογα με το κυκλοφορούν ρευστό που χρησιμοποιείται έτσι ώστε να γίνει η συλλογή και αξιοποίηση της θερμότητας. Το ρευστό μπορεί να είναι είτε το νερό, οπότε τα ΦΒ/Θ ονομάζονται ΦΒ/Θ υγρού ή νερού, είτε ο αέρας, οπότε ονομάζονται ΦΒ/Θ αέρα.

2.2.1 Φωτοβολταϊκά / θερμικά συστήματα αέρα

Τα συστήματα αυτά συνδυάζουν την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και τη θέρμανση αέρα. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο και πίσω από αυτό υπάρχει ένας αεραγωγός, από όπου κυκλοφορεί αέρας. Με τη διάταξη αυτή, επιτυγχάνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και επιπλέον θερμική ενέργεια, η οποία διαφορετικά θα μεταδιδόταν στο περιβάλλον. Έτσι, με συστήματα απαγωγής της θερμότητας, τους απορροφητές - εναλλάκτες, πάγεται θερμότητα από το φωτοβολταϊκό και μεταφέρεται στον αέρα που διέρχεται από το πίσω μέρος, όπου και θερμαίνεται.

Τα συστήματα αυτά είναι σχεδιασμένα για να χρησιμοποιούν κυρίως απευθείας τον ζεστό αέρα για θέρμανση χώρου και για περιοχές όπου η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμαίνεται μεταξύ 15 και 25 °C. Ακόμα, μπορεί να χρησιμοποιήσουν τον ζεστό αέρα για ξήρανση γεωργικών προϊόντων καθώς και για προθέρμανση αέρα θέρμανσης σε χώρους μεγάλου όγκου (εμπορικά καταστήματα, αθλητικές εγκαταστάσεις, σχολεία κ.α.). Η εφαρμογή των υβριδικών φωτοβολταϊκών / θερμικών συστημάτων αέρα είναι περιορισμένη, ιδιαίτερα το καλοκαίρι που περισσότερη θερμότητα είναι διαθέσιμη.

Επίσης έχουν αναπτυχθεί υβριδικά φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα με εγκατάσταση επιπλέον διαφανούς γυάλινου καλύμματος έτσι ώστε το σύστημα να έχει λιγότερες θερμικές απώλειες, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.

Υπάρχουν, βέβαια κάποια τεχνικά προβλήματα που δημιουργούνται στην λειτουργία του συστήματος. Η μεγάλη ροή αέρα που απαιτείται για μια ικανοποιητική θερμική απόδοση του συστήματος, αντιστοιχεί σε μεγάλο σύστημα σωληνώσεων με μεγάλη διάμετρο, η οποία προκαλεί θόρυβο και αυξάνει το κόστος του συστήματος.

Λόγω του υψηλού κόστους τους και των περιορισμένων εφαρμογών, τα φβ/θ αέρα έχουν μέχρι τώρα μικρή εφαρμογή (1.5 %), ωστόσο, εκτιμάται ότι η ζήτηση για τα συστήματα αυτά θα αυξηθεί στο μέλλον καθώς πραγματοποιούνται έρευνες για την επίλυση διαφόρων τεχνικά προβλημάτων του συστήματος, με την προοπτική η εφαρμογή των φβ/θ συστημάτων να αναπτυχθεί αρκετά.



Εικόνα 2.2: Πρακτικά παραδείγματα φβ/θ συστημάτων αέρα.

Η εφαρμογή των υβριδικών φβ/θ συστημάτων αέρα έχει κάποια πλεονεκτήματα, όπως ότι δεν υπάρχει ψύξη ή βρασμός του ρευστού στον συλλέκτη και εάν υπάρξει μια μικρή διαρροή στο σύστημα αυτό, δεν προκαλείται μεγάλη υλική ζημιά.

Ενώ στα μειονεκτήματα του συστήματος περιλαμβάνονται η χαμηλή θερμοχωρητικότητα και η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του αέρα που συντελούν στην χαμηλή ικανότητα μεταφοράς θερμότητας του συστήματος.

2.2.2 Φωτοβολταϊκά / θερμικά συστήματα νερού

Τα φωτοβολταϊκά / θερμικά συστήματα νερού είναι παρόμοια με τους συμβατικούς θερμικούς συλλέκτες νερού. Αποτελούνται από το φωτοβολταϊκό και σε θερμική επαφή μαζί του είναι ο απορροφητής, που μπορεί να αποτελείται από ένα σύστημα σωληνώσεων (συνήθως παράλληλων μεταξύ τους).

Η τεχνολογία των υβριδικών φβ/θ συστημάτων, λοιπόν, αναπτύχθηκε έχοντας ως βάση την υφιστάμενη τεχνολογία των ηλιακών θερμικών συλλεκτών και ενσωματώνοντας στην επιφάνεια του απορροφητή ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

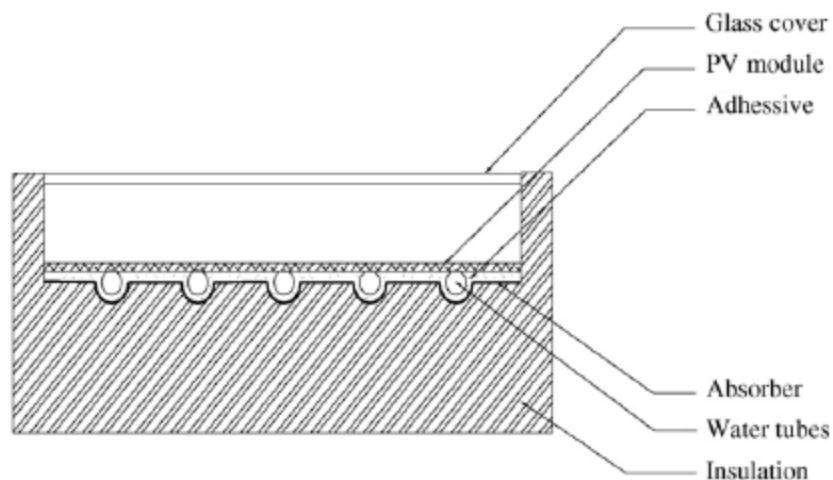
Η απαγωγή θερμότητας με κυκλοφορία νερού θεωρείται πιο πρακτική στις περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη από τους 20 °C, επειδή η θερμοκρασία του νερού του δικτύου είναι κάτω από τους 20 °C σχεδόν όλο το χρόνο. Γενικά, τα ΦΒ/Θ συστήματα νερού είναι πιο ελκυστικά λόγω της φύσης του ρευστού που επιτρέπει αποτελεσματικότερη μετάδοση της θερμότητας.



Εικόνα 2.3: Πρακτικά παραδείγματα φβ/θ συστημάτων νερού.

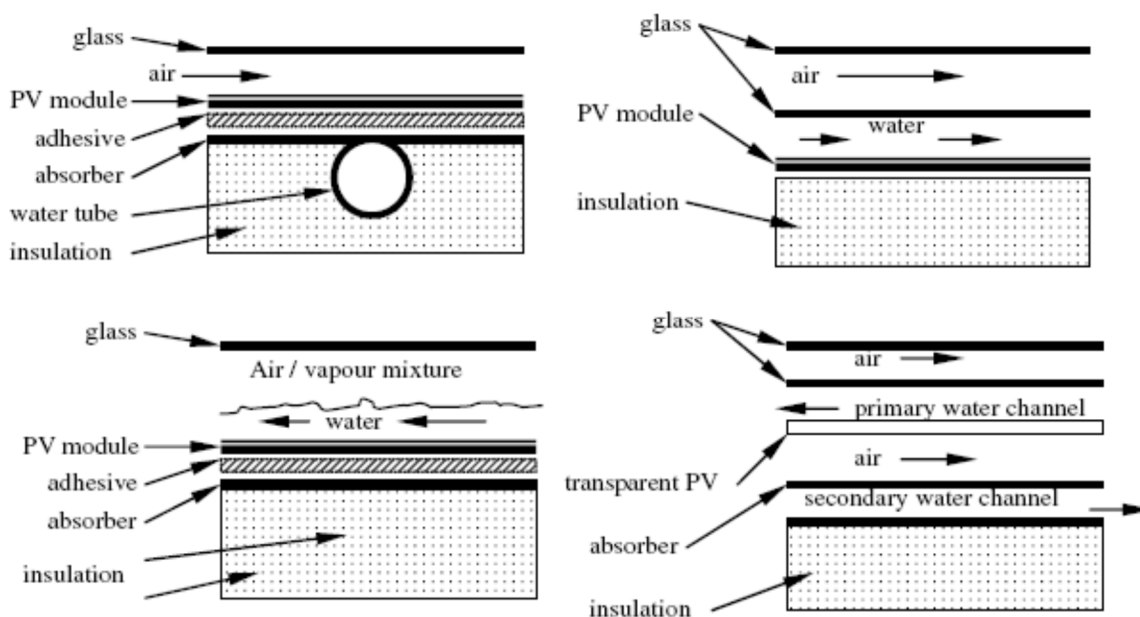
Οι τύποι των φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων νερού είναι:

- Οι **επίπεδοι συλλέκτες** (flat-plate collectors ή sheet-and tube PVT-collectors) είναι οι πιο διαδεδομένοι και παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Η κύρια διαφορά όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1 που ακολουθεί είναι ότι η απορροφητική πλάκα είναι σε θερμική επαφή με την κάτω επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου.



Σχήμα 2.1: Διατομή επίπεδου συλλέκτη.

- **Οι συλλέκτες ΦΒ/Θ με κανάλια** (channel PVT-collectors) φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα. Αυτού του τύπου οι συλλέκτες υπόκεινται σε περιορισμούς όσον αναφορά τον τύπο του υγρού που θα χρησιμοποιηθεί. Το φάσμα απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από το υγρό που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι αρκετά διαφορετικό από το φάσμα απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από το φωτοβολταϊκό. Το μειονέκτημα αυτού του τύπου είναι ότι εάν χρησιμοποιηθεί αρκετά πλατύ κανάλι, το γυάλινο κάλυμμα θα πρέπει να είναι μεγάλο και αρκετά παχύ για να αντέξει την πίεση του υγρού.
- **Οι ελεύθερης ροής ΦΒ/Θ συλλέκτες** (free flow PVT collectors). Σε αυτούς τους συλλέκτες η ροή του νερού γίνεται πάνω από τον απορροφητή χωρίς περιορισμό όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Σε σύγκριση με τους συλλέκτες ΦΒ/Θ με κανάλια εδώ δεν έχουμε το επιπλέον γυάλινο κάλυμμα. Κατά συνέπεια το κόστος υλικών μειώνεται, ενώ επιπρόσθετα το πρόβλημα αντοχής του επιπλέον γυαλιού εξαλείφεται. Στον αντίποδα το μειονέκτημα του είναι οι αυξημένες θερμικές απώλειες λόγω εξάτμισης.



Σχήμα 2.2: Τύποι συλλέκτη φβ/θ νερού.

- **ΦΒ/Θ συγκεντρωτικών συλλεκτών.** Για την αντιμετώπιση του υψηλού κόστους των ηλιακών στοιχείων και για την αύξηση της απόδοσης τους έχουν αναπτυχθεί τα συγκεντρωτικά συστήματα. Στα συγκεντρωτικά συστήματα, η αύξηση της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά κύτταρα έχει ως συνέπεια και την αύξηση της θερμοκρασίας τους, άρα και την μείωση της απόδοσης τους. Στις περιπτώσεις αυτές η ψύξη των φβ κυττάρων είναι αναγκαία και για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί τα υβριδικά συγκεντρωτικά φβ/θ συστήματα.



Εικόνα 2.4: Συγκεντρωτικό φβ/θ σύστημα

2.3 Ιστορική Αναδρομή των Υβριδικών Φωτοβολταϊκών / Θερμικών Συστημάτων Νερού

Η συμβολή του εργαστηρίου του πανεπιστημίου της Πάτρας στον τομέα των υβριδικών φωτοβολταϊκών / θερμικών συστημάτων είναι σημαντική. Πολλές εργασίες προπτυχιακού και μεταπτυχιακού επιπέδου έχουν πραγματοποιηθεί στο χώρο του εργαστηρίου μας καθώς και διδακτορικές διατριβές συμβάλλοντας σημαντικά στην νέα γνώση των φβ/θ συστημάτων και εξελίσσοντας τον τομέα αυτό.

Ενώ οι ηλιακοί συλλέκτες ήταν γνωστοί από τον 19ο αιώνα, τα φβ στοιχεία αναπτύχθηκαν κατά τη δεκαετία του 1950, για χρήση κυρίως στο διάστημα. Ωστόσο, μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973, όπου η τιμή του πετρελαίου είχε μεγάλη αύξηση, η έρευνα για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναπτύχθηκε ραγδαία και ήταν η αρχή για να ξεκινήσει η έρευνα για τα φβ/θ.

Η πρώτη εργασία πάνω στα φβ/θ με επίπεδους συλλέκτες έγινε από τον Martin Wolf, το 1976. Το συμπέρασμά της έρευνας ήταν ότι αυτό το είδος συστήματος είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτό.

Η έρευνα για τα ΦΒ/Θ νερού συνεχίστηκε από διάφορες ομάδες και επιστήμονες. Μία από αυτές τις ομάδες ήταν από το MIT και τον καθηγητή Boer, που το 1978 εγκατέστησε 13 συλλέκτες ΦΒ/Θ (νερού) στο σπίτι του. Το ίδιο έτος, στο εργαστήριο Lincoln του MIT κατάφεραν να αποκτήσουν τρεις πρωτότυπους επίπεδους συλλέκτες ΦΒ/Θ κανονικών διαστάσεων. Αυτοί οι τρεις συλλέκτες κατασκευάστηκαν από την ARCO (η ARCO κατασκεύασε και ΦΒ/Θ και νερού και αέρα) και την Spectrolab (η Spectrolab κατασκεύασε ΦΒ/Θ μόνο αέρα).

Κατά την διάρκεια των ετών 1974-1978 πραγματοποιήθηκαν έρευνες με θέμα τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά στο πανεπιστήμιο της πολιτείας της Αριζόνα, περιλαμβάνοντας ενεργή ψύξη σε φβ/θ συγκεντρωτήρες με ιδιαίτερη εστίαση στην μοντελοποίηση για εφαρμογή στο πρόγραμμα TRNSYS. Οι Kern και Russel (1978) παρουσίασαν τον σχεδιασμό και την απόδοση ενός φβ/θ συστήματος που ψύχεται από νερό και αέρα, ενώ η Hendrie (1979) και ο Florschuetz (1979) περιέλαβαν στις εργασίες τους μοντέλα υβριδικών φβ/θ συστημάτων. Το 1980 στο εργαστήριο Sandia πραγματοποιήθηκαν έρευνες για να διαπιστωθεί η επίδραση της θερμικής διαβάθμισης στην ηλεκτρική απόδοση.

Παρότι οι περισσότερες έρευνες γίνονταν στην Αμερική, κάποιες ερευνητικές προσπάθειες γίνονταν και σε ορισμένα άλλα μέρη του κόσμου. Στην Ιαπωνία, η Sharp κατασκεύασε δύο πρωτότυπους επίπεδους φβ/θ συλλέκτες. Στην Γερμανία, η Karl, μαζί με την AEG-Telefunken, ανέπτυξαν και δοκίμασαν φωτοβολταϊκό από κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) με γυάλινο κάλυμμα. Διάφορες μελέτες πάνω στα συγκεντρωτικά φβ/θ συστήματα έγιναν επίσης και στη Γαλλία.

Αριθμητική μέθοδος πρόβλεψης της απόδοσης του φβ/θ συστήματος αναπτύχθηκε από τον Raghuraman το 198, ακόμα προσομοιώσεις στον υπολογιστή μελετήθηκαν από τον Cox και Raghuraman το 1985, ο Lalovic πρότεινε ένα χαμηλού κόστους φβ/θ σύστημα αποτελούμενο από διάφανα κύτταρα άμορφου πυριτίου, παρουσιάστηκαν αποτελέσματα από την εφαρμογή ενός φβ/θ συστήματος αέρα από τον Loferski το 1988.

Στην Ολλανδία, οι έρευνες πάνω στα ΦΒ/Θ συστήματα ξεκίνησαν το 1989 στο ίδρυμα TNO σε συνεργασία με το ίδρυμα HES, όπου επιπλέον βαρύτητα δόθηκε στη μελέτη συστημάτων ΦΒ/Θ χωρίς κάλυμμα για εφαρμογές θερμικών αντλιών. Οι Bhargava (1991),

Prakash (1994), Garg και Agarwal (1995) παρουσίασαν από τις ίδιες πτυχές το φβ/θ σύστημα νερού και οι Sorian (1996), Garg και Agarwal (1997) παρουσίασαν μια ποικιλία αποτελεσμάτων σχετικά με την επίδραση του σχεδιασμού και των παραμέτρων λειτουργίας του φβ/θ συστήματος στην απόδοση αυτού.

Μια άλλη σημαντική προσπάθεια έγινε στο πανεπιστήμιο του Αϊτχοφεν όπου δόθηκε διδακτορική διατριβή (1994-1998), και επικεντρώθηκε στην μελέτη των ΦΒ/Θ συστημάτων με γυάλινο κάλυμμα. Το 1999, η εταιρία Ecofys, το ίδρυμα TNO και το πανεπιστήμιο του Αϊντχόφεν (EUT) έκανε σε συνεργασία μία έρευνα για τις τεχνολογίες και την αγορά των φβ/θ συστημάτων. Το ίδιο έτος, η έρευνα πάνω στα φβ/θ συστήματα του πανεπιστημίου του Αϊτχοφεν μεταφέρθηκε στο κέντρο ενεργειακή έρευνας της Ολλανδία (Energy Research Centre of the Netherlands -ECN). Στο ECN έγινε σημαντική δουλειά πάνω στο σχεδιασμό των διαφόρων συστημάτων .

Στη Γερμανία, οι κατασκευαστές Zenith, Solarwerk και Solarwatt ανέπτυξαν ένα πρωτότυπο ΦΒ/Θ συλλέκτη στη δεκαετία του 90, αλλά δυστυχώς δεν κατέστη δυνατή η εμπορική εκμετάλλευση αυτού του συλλέκτη.

Λόγω της εύκολης κατασκευής και λειτουργίας τα υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα που χρησιμοποιούν αέρα για την απαγωγή της θερμότητας έχουν μελετηθεί εκτενώς, κυρίως ως εναλλακτική και οικονομική λύση στην ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε κτίρια. Μελετώντας τις παραπάνω εργασίες, παρουσιάστηκαν αποτελέσματα από φβ/θ σύστημα με βελτιωμένη ανάκτηση θερμότητας με αέρα από τους Ricaud και Roubeau (1994) και στην συνέχεια έγινε το ίδιο από τον Yang (1994) για ενσωματωμένο σε οροφή αερόψυκτο φωτοβολταϊκό.

Όσον αφορά κτίρια με ενσωματωμένα σ' αυτά φβ/θ συστήματα οι Posnansky (1994), Ossenbrink (1994) και Moshfegh (1995) περιέλαβαν στις εργασίες τους εκτιμήσεις και αποτελέσματα για τα συστήματα αυτά. Αργότερα οι Brinkworth (1997), Moshfegh και Sandberg (1998), Schröer et al. (1998), Brinkworth (2000), καθώς επίσης και Brinkworth (2000) παρουσίασαν μελέτες με τον σχεδιασμό και τις αποδόσεις όσον αφορά κτίρια στα οποία έχουν εφαρμοστεί υβριδικά φβ/θ συστήματα αέρα. Επιπλέον, το έργο του Eicker (2000), το οποίο έδωσε αποτελέσματα από την παρακολούθηση ενός κτιρίου ενσωματωμένο με φβ και φβ/θ συστήματα που λειτούργησαν κατά την διάρκεια του χειμώνα για θέρμανση χώρου και κατά την

διάρκεια του καλοκαιριού για ενεργή ψύξη ακόμα ο Bazilian (2001) εκτίμησε την πρακτική χρήση διάφορων φβ/θ συστημάτων με ανάκτηση θερμότητας μέσω του αέρα στο κτιριακό περιβάλλον.

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε κτίρια τείνει να γίνει ένας τομέας ευρύτατης εφαρμογής και τα έργα των Lee (2001), Chow (2003) και Ito και Miura (2003) δίνουν ενδιαφέροντα αποτελέσματα μοντέλων φωτοβολταϊκών κυττάρων που ψύχονται με αέρα. Τα προηγούμενα χρόνια, τα έργα στον τομέα αυτό περιλάμβαναν μελέτες σε πολυλειτουργικά αεριζόμενα φωτοβολταϊκά με ηλιακούς συλλέκτες αέρα (Cartmell 2004), σε αεριζόμενες φβ προσόψεις κτιρίων (Infield 2004, Guivarch και Peurportier 2006, Charron και Athienitis 2006). Παρά των βελτιώσεων, εμπορικές εφαρμογές των φβ/θ αέρα είναι ακόμα περιορισμένες, αλλά αναμένεται να γίνουν περισσότερες στο μέλλον όπου πολλές προσόψεις κτιρίων και επικλινείς στέγες, θα καλύπτονται από φωτοβολταϊκά.

Τα φβ/θ νερού είναι πιο ακριβά από τα αντίστοιχα συστήματα αέρα λόγω του επιπλέον κόστους της θερμικής μονάδας με τους σωλήνες για την κυκλοφορία του νερού. Από την άλλη πλευρά το νερό από το δίκτυο δεν υπερβαίνει συχνά τους 20 °C και ο αέρας περιβάλλοντος είναι συνήθως σε υψηλότερη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού στις χώρες με χαμηλό γεωγραφικό πλάτος και η απαγωγή θερμότητας με νερό έχει περισσότερη πρακτική αξία σε αυτές τις τοποθεσίες, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια όλων των εποχών. Τα φβ/θ συστήματα υγρού έχουν μελετηθεί λιγότερο από τα αντίστοιχα αέρα και την πρώτη περίοδο μελέτης φβ/θ συστημάτων ασχολήθηκαν οι Bergene and Lovvik (1995) με λεπτομερή ανάλυση στα φβ/θ συστήματα υγρού, ο Elazari (1998) μελέτησε τον σχεδιασμό, την απόδοση και τις οικονομικές πτυχές του εμπορικού τύπου φβ/θ νερού, οι Hausler και Rogash (2000) μελέτησαν την λανθάνουσα θερμότητα που αποθηκεύεται στο φβ/θ σύστημα και ο Καλογήρου (2001) εξήγαγε αποτελέσματα για φβ/θ συστήματα νερού με την βοήθεια του προγράμματος TRNSYS. Αργότερα ο Huang (2001) παρουσίασε ένα φβ/θ σύστημα με αποθήκευση του ζεστού νερού και το 2002 οι Sandness και Rekstad έδωσαν αποτελέσματα για φβ/θ συλλέκτες με απορροφητή με πολυμερή υλικά.

Ο συνδυασμός των συσκευών συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας με φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι η πιο βιώσιμη μέθοδος για να μειωθεί το κόστος του συστήματος, αντικαθίστανται έτσι τα ακριβά κύτταρα με φθινό σύστημα συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα

συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση από τα συμβατικά, αλλά αυτό μπορεί να επιτευχθεί με αποδοτικό τρόπο κρατώντας την θερμοκρασία του φβ πλαισίου όσο το δυνατό χαμηλότερη. Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούν ανακλαστικές και διαθλαστικές οπτικές συσκευές και χαρακτηρίζονται από τον γεωμετρικό λόγο συγκέντρωσης τους (CR). Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα με $CR > 2.5$ πρέπει να χρησιμοποιούν σύστημα παρακολούθησης του ήλιου, ενώ για τα συστήματα με $CR < 2.5$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακίνητα συγκεντρωτικές συσκευές (Winston, 1974). Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια του απορροφητή και η αύξηση της θερμοκρασίας αυτού είναι τα δύο σημαντικά προβλήματα που επιδρούν αρνητικά στην ηλεκτρική απόδοση. Η ομοιόμορφη διανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φβ και η κατάλληλη επιλογή ψύξης οδηγούν σε ένα αποδοτικό σύστημα και σε υψηλή ηλεκτρική απόδοση. Οι φβ/θ απορροφητές μπορούν να συνδυαστούν με συσκευές χαμηλής, μεσαίας και υψηλής συγκέντρωσης, αλλά τα φβ/θ συστήματα χαμηλής συγκέντρωσης ως τώρα έχουν αναπτυχθεί. Ανακλαστήρες χαμηλής συγκέντρωσης, είτε επίπεδοι όπως παρουσιάστηκαν από τους Sharan (1985), Al Baali (1986), και Garg (1991) είτε παραβολικοί όπως προτάθηκαν από τους Garg και Adhikari (1999), Brogren (2000), Karlsson (2001), Brogren (2002) και Othman (2005) προτείνονται για την αύξηση της θερμικής αλλά και της ηλεκτρικής απόδοσης του συστήματος. Σχετικά με τα συστήματα μεσαίας συγκέντρωσης, ερευνήθηκαν φβ/θ συστήματα με γραμμικούς παραβολικούς ανακλαστήρες (Coventy, 2005) ή γραμμικούς ανακλαστήρες Fresnel (Rosell 2005).

Δυναμικά 3 διαστάσεων και σε σταθερή κατάσταση 3 διαστάσεων, 2 διαστάσεων και 1 διάστασης μοντέλα πρότυπων φβ/θ με ανάκτηση θερμότητας με νερό έχουν μελετηθεί από τον Zondag (2002), καθώς και συστήματα με κυκλοφορία νερού σε κανάλια σε επαφή με φβ πλαίσια έχουν προταθεί (2003). Ακόμα έχουν προταθεί και οικιακά φβ/θ συστήματα (Coventry και Lovegrove, 2003), έχει γίνει μελέτη για την απόδοση και οικονομική ανάλυση αποτελέσματα σε φ/θ σύστημα σε στέγη (Bakker 2005), και η θεωρητική προσέγγιση για οικιακή θέρμανση και ψύξη με φβ/θ συλλέκτες (Vokas, 2006) και αποτελέσματα της αξιολόγησης της απόδοσης (Tiwari και Sodha, 2006). Οι έρευνες αυτές έδειξαν ότι οι φβ/θ συλλέκτες νερού μπορούν να αντικαταστήσουν τους θερμικούς συλλέκτες για εφαρμογές ζεστού νερού σε οικίες και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, αλλά ακόμα δεν είναι αρκετά οικονομική εφαρμογή και για αυτό τον λόγο έχουν μικρό μερίδιο στην αγορά.

Μελετήθηκαν οι οικονομικές πτυχές του φβ/θ συστήματος από τον Leenders (2000) και η περιβαλλοντική επίπτωση του φβ χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής (LCD) στο πανεπιστήμιο της Ρώμης “La Sapienza”.

Ο Frankl (2000) παρουσίασε τα LCD αποτελέσματα σε σύγκριση με τα φβ/θ συστήματα με τυπικά φβ και θερμικούς συλλέκτες, επιβεβαιώνοντας έτσι το περιβαλλοντικό πλεονέκτημα του φβ/θ συστήματος συγκριτικά με το απλό φβ πλαίσιο (μικρότερος χρόνος απολαβής θερμότητας).

Στην Δανία, ένα πρόγραμμα έρευνας πάνω στα φβ/θ συστήματα εκπονήθηκε από τις εταιρίες Batec που κατασκευάζουν ηλιακούς συλλέκτες, την Racell που κατασκευάζει φβ συστήματα, και την εταιρία συμβούλων Esbensen Consulting engineers. Τα συστήματα αυτά δοκιμάστηκαν και εγκαταστάθηκαν το 2000. Όμως, λόγω της μικρής δυναμικής της δανέζικης αγοράς ανανεώσιμων ενεργειών, η Batec αποφάσισε να τερματίσει την εμπλοκή της με την ανάπτυξη ΦΒ/Θ, ενώ η Racell συνέχισε την προσπάθεια της προς αυτή την κατεύθυνση.

Σημαντική δουλειά πάνω στα ΦΒ/Θ συστήματα έχει γίνει και στο πανεπιστήμιο της Πάτρας. Οι έρευνες αυτές αφορούν τις πειραματικές μελέτες με φβ/θ συστήματα νερού και αέρα, με ή χωρίς γυάλινο κάλυμμα και με ή χωρίς διάχυτο ανακλαστήρα. Η οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων αυτών αποτελεί αντικείμενο πολλών μελετών του Πανεπιστημίου της Πάτρας μεταξύ των οποίων και σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο Κύπρου.

Στο Ισραήλ, αναπτύχθηκε ένας εμπορικός συλλέκτης φβ/θ, με έμφαση στην προσπάθεια να μειωθεί η υπερθέρμανση των ΦΒ που είναι ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα στην έρημο του Ισραήλ. Το χειμώνα του 1991/1992 ένα τέτοιο φβ/θ σύστημα εγκαταστάθηκε στο Κλίλ, μια μικρή πόλη του Ισραήλ. Οι φβ/θ συλλέκτες αρχικά κατασκευάζονταν από την εταιρία Chromagen, όμως από το 2002 και μετά η παραγωγή πήγε στην εταιρία Millennium Electric.

Τα προγράμματα για την ανάπτυξη των φβ/θ συστημάτων στο Χόνγκ Κόνγκ (City University of Hong Kong), έχει ο καθηγητής Chow, ο οποίος δημιούργησε ένα δυναμικό μοντέλο για τους ΦΒ/Θ συλλέκτες όπου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόδοσης των θερμοσιφωνικών συστημάτων. Στο πανεπιστήμιο τεχνολογικό της Κίνας (University of Science and Technology of China) έκαναν ανάλυση ευαισθησίας των συστημάτων αυτών. Τέλος στην Αμερική τα κυριότερα προγράμματα έγιναν από τις εταιρίες Power Light and SDA.

2.4 Ιστορική Αναδρομή των Υβριδικών Φωτοβολταϊκών / Θερμικών Συστημάτων Αέρα

Η πρώτη εφαρμογή ΦΒ/Θ αέρα έγινε το 1973/1974 από τον καθηγητή Boer σε ένα σπίτι μέσα στο πανεπιστήμιο Ντέλαγουερ (University of Delaware). Ο καθηγητής Boer μέχρι εκείνη τη στιγμή έχει ασχοληθεί πάνω στα απλά ΦΒ έχοντας κάνει πολλές μελέτες και πειράματα πάνω σε αυτά. Τα ΦΒ/Θ αέρα εγκαταστάθηκαν στην ταράτσα και στην πρόσοψη το σπιτιού, ενώ 4 από τους 24 συλλέκτες της οροφής είχαν φβ κύτταρα από CdS/Cu₂S.

Μετά την πρωτότυπη δουλειά του καθηγητή Boer πάνω στα ΦΒ/Θ συστήματα αέρα, στα τέλη της δεκαετίας του 70 και στις αρχές του 80, αυτοί που ακολούθησαν στην έρευνα για φβ/θ αέρα ήταν η ομάδα της Hendrie, καθώς και στο εργαστήριο Sandia και στο Brown University. Όπως έχει ήδη αναφερθεί το 1978 τα εργαστήρια του MIT Lincoln και του Sandia απέκτησαν σε συνεργασία δύο επίπεδους πρωτότυπους φβ/θ συλλέκτες αέρα κατασκευασμένοι από τις εταιρίες ARCO και Spectrolab. Οι φβ/θ συλλέκτες της πρώτης γενιάς λόγω της ανεπαρκούς επίδοσης τους ακολουθήθηκαν από αυτούς της δεύτερης γενιάς με ορισμένες προτεινόμενες καινοτόμες ιδέες που αναπτύχθηκαν στα εργαστήρια του MIT, που όμως λόγω της περικοπής των κονδυλίων δεν πρόλαβαν να δοκιμαστούν. Στο εργαστήριο Sandia, μελετήθηκε η επίδραση της θερμικής υποβάθμισης στην ηλεκτρική απόδοση.

Στην Ιαπωνία, ο Ito και ο Miura έκαναν μετρήσεις πάνω σε μερικώς διάφανο φωτοβολταϊκά συστήματα τοποθετημένα στο πάνω μέρος των συλλεκτών αέρα χωρίς γυάλινο κάλυμμα. Αυτό το σχέδιο προτιμήθηκε έναντι του σχεδίου όπου ο αέρας βρισκόταν στον ενδιάμεσο χώρο ανάμεσα στο φωτοβολταϊκό και το επάνω κάλυμμα, λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας που παρουσιάζεται στο τελευταίο. Η θερμική απόδοση ήταν της τάξης του 40%, με φανερή εξάρτηση από την ταχύτητα του ανέμου. Το 1994, ο ΦΒ/Θ συλλέκτης αέρα Carthel, αναπτύχθηκε από τη γαλλική εταιρία Cythelia .

Η Γερμανική εταιρία Grammer Solar σε συνεργασία με την δανέζικη εταιρία Aidt Miljo ανέπτυξαν ένα ΦΒ/Θ συλλέκτη, με ένα μικρό φωτοβολταϊκό ποσοστό. Σε αυτό τον τύπο συστήματος μόνο ένα μικρό μέρος του απορροφητή καλύπτεται από φωτοβολταϊκά απλώς για να καλύπτει την ενέργεια που καταναλώνει ο ανεμιστήρας. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται κυρίως σε αυτόνομες εφαρμογές πανδοχείων για αφύγρανση. Επιπλέον η εταιρία Grammer Solar ανέπτυξε και έβγαλε στην αγορά ΦΒ/Θ συλλέκτη αέρα όπου ο απορροφητής είναι τελείως

καλυμμένος με φωτοβολταϊκά. Το πρώτο πρόγραμμα επίδειξης έγινε το 1996 (για προθέρμανση αέρα αερισμού εγκατάστασης βαψίματος στη Νυρεμβέργη).

Στον Καναδά, οι εταιρίες Conserval Engineering, Bechtel και CANMET ανέπτυξαν σε συνεργασία το ΦΒ σύστημα SOLARWALL. Το σύστημα αυτό εξετάστηκε πειραματικά όσον αφορά την θερμική και ηλεκτρική του απόδοση πριν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές .

Στην Αμερική, στο πανεπιστήμιο του Μαϊάμι (University of Miami), ο ερευνητής Sorpan έκανε τη διδακτορική του διατριβή πάνω σε ένα ΦΒ/Θ συλλέκτη αέρα διπλού περάσματος, ο οποίο συνέχισε αυτή τη δουλειά στο πανεπιστήμιο της Μαλαισίας (University Kebangsaan Malaysia). Επιπλέον ερεύνησε και το ΦΒ/Θ συλλέκτη αέρα διπλού περάσματος χαμηλής συγκέντρωσης.

Στην Αίγυπτο, ο μελετητής Hegazy προκειμένου να συγκρίνει τους διάφορους τύπους των ΦΒ/Θ συστημάτων αέρα έκανε μια μελέτη με ένα πρόγραμμα εξομοίωσης, σε φβ/θ συλλέκτη διπλού περάσματος.

Τέλος, μια παραμετρική δουλειά του Tiwari και του Sodha έγινε πάνω σε φβ/θ συστήματα με και χωρίς γυάλινο κάλυμμα. Οι δύο ερευνητές βρήκαν ότι το γυάλινο κάλυμμα σχεδόν διπλασιάζει την ωφέλιμη θερμική ενέργεια ενώ η ηλεκτρική ενέργεια πέφτει από το 10% στο 9%, παράλληλα ο Prakash έκανε μια αριθμητική μελέτη στις επιδράσεις της σκόνης και της ροής στο φβ/θ συλλέκτη .

Στο πανεπιστήμιο της Πάτρας έχουν γίνει εκτενείς έρευνες πάνω στα φβ/θ συστήματα νερού και αέρα με και χωρίς γυάλινο κάλυμμα. Τη βέλτιστη απόδοση βρέθηκε να την έχει το φβ σύστημα που έρχεται σε απευθείας επαφή με την επιφάνεια και τις σωλήνες του απορροφητή, ενώ μια ροή αέρα από τον χώρο που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του απορροφητή μπορεί να δώσει ζεστό αέρα. Επιπλέον, η θερμική βελτιστοποίηση του ΦΒ/Θ συλλέκτη αέρα, βάζοντας ένα λεπτό έλασμα μελετήθηκε και πειραματικά και αριθμητικά. Αλλά όλα αυτά θα τα δούμε πιο αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

2.5 Εργασίες που Έχουν Δημοσιευτεί Από το Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας

Το Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών έχει πραγματοποιήσει ένα σημαντικό ερευνητικό έργο στα υβριδικά φωτοβολταϊκά /θερμικά συστήματα και έχει δημοσιεύσει ένα μεγάλο αριθμό εργασιών που αφορούν την μελέτη αυτών των συστημάτων. Ένα μέρος αυτών των εργασιών, που αναφέρονται παρακάτω περιληπτικά, χρησιμοποιήθηκαν για την διεκπεραίωση αυτής της εργασίας και αφορούν την υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα θέρμανσης νερού και αέρα, κυρίως τα συστήματα θέρμανσης νερού, που αποτελούν και το αντικείμενο αυτής της εργασίας. Οι εργασίες είναι:

Y.Tripanagnostopoulos, P.Yianoulis and D.Patrikios (March 1996) ”**Colored solar thermal and hybrid PV-TC systems for aesthetic sensitive applications**” 4th European Conference on Architecture

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η θερμική απόδοση επίπεδων θερμικών συλλεκτών με συλλεκτικές επιφάνειες με διαφορετική βαφή η καθεμία, όπως μαύρη, σκούρα κόκκινη και μπλε. Ακόμα μελετήθηκε η ηλεκτρική και θερμική απόδοση ενός υβριδικού συστήματος PV-TC, για την εγκατάσταση αυτών σε κτίρια που απαιτείται αρχιτεκτονική αρμονία.

Y.Tripanagnostopoulos, P.Yianoulis and D.Patrikios (May-August 1996)” **Hybrid PV-TC solar systems**” Renewable Energy, Volume 8, Issues 1-4, Pages 505-508

Στην εργασία αυτή μελετάται η λειτουργία των υβριδικών φωτοβολταϊκών –θερμικών ηλιακών συστημάτων για την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας και παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα του συστήματος αυτού. Για την βελτίωση της συνολική απόδοσης του συστήματος, προτείνεται η χρήση μιας πρόσθετης τοποθέτησης υαλοπινάκων, ενός συμπληρωματικού διάχυτου ανακλαστήρα, ή και των δύο, που δίνουν την δυνατότητα για την δημιουργία υβριδικών ηλιακών συστημάτων PV-TC με μεγαλύτερη ενεργειακή δυνατότητα.

Y.Tripanagnostopoulos, Th. Nousia, M. Souliotis **”Low cost improvements to building integrated air cooled hybrid PV-Thermal systems”** Proc.16th European PV Solar Energy Conf. pp 1874-1877 , Glasgow, U.K. 1-5 May (2000).

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η βελτίωση της λειτουργίας υβριδικών συστημάτων θέρμανσης, τα οποία πρόκειται να εγκατασταθούν σε κτίρια, για την αύξηση της απόδοσής τους. Οι βελτιώσεις που προτάθηκαν είναι χαμηλού κόστους, όπως η χρήση αέρα για ψύξη

Y.Tripanagnostopoulos, Th. Nousia, M. Souliotis and P. Yianoulis (March 2002) **“Hybrid photovoltaic/thermal solar systems”** Solar Energy, Volume 72, Issue 3, Pages 217-234

Η εργασία αυτή είναι η βασική εργασία που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο μας με θέμα τα υβριδικά φβ/θ συστήματα. Ως μέσο απολαβής της θερμότητας χρησιμοποιήθηκε το νερό και ο αέρας. Τα πειράματα για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής και της θερμικής απόδοσης έγιναν σε σταθερές συνθήκες (steady state). Έγινε ακόμα χρήση διάχυτου κατόπτρου, ως συγκεντρωτικό μέσο, για την αύξηση της αποδιδόμενης ενέργειας του συστήματος και το σύστημα παρακολούθηθηκε κατά την διάρκεια της ημέρας.

S. Tselepis and Y. Tripanagnostopoulos **”Economic analysis of hybrid photovoltaic / thermal solar systems and comparison with standard PV modules”** .Presented in Int. Conf. PV in Europe, Rome ,Italy, 7-11 Oct. pp. 856-859(2002)

Στην εργασία αυτή, γίνεται μια οικονομική ανάλυση υβριδικών συστημάτων σε σύγκριση με τις αυτόνομες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, μιας τα υβριδικά συστήματα είναι υψηλότερου κόστους, αφού αποτελούνται από φωτοβολταϊκά και θερμικούς συλλέκτες. Με την χρήση ενός λογισμικού προγράμματος, υπολογίστηκε σε ωριαία βάση η ετήσια ενεργειακή παραγωγή των διαφορετικών συστημάτων, προκειμένου να αξιολογηθούν τα οφέλη για τους χρήστες των υβριδικών φβ/θ συστημάτων. Επιπλέον για τον υπολογισμό της οικονομικής ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν η ενέργεια, η παραγωγή και οι εκτιμώμενες δαπάνες των συστημάτων και υπολογίστηκε έτσι ο χρόνος επιστροφής των δαπανών για κάθε σύστημα.

Y.Tripanagnostopoulos, S. Tselepis, M. Souliotis, J.K. Tonui. **“Design aspects of hybrid PVT/AIR solar systems”** Presented in 19th Eur. PV Solar Energy Conf. Paris 7-11 June (2004)

Στην εργασία αυτή ,παρουσιάζεται ο σχεδιασμός υβριδικών φβ/θ συστημάτων για την εφαρμογή τους σε κτίρια κατοικιών, ξενοδοχεία, κ.λπ., και έχουν σαν στόχο την παροχή ηλεκτρικής ενέργεια και ζεστού νερού. Η μελέτη στρέφεται στα μικρά μεγέθους φβ/θ συστήματα θέρμανσης νερού που μπορούν να εφαρμοστούν σε κατοικίες ή ξενοδοχεία αντί των θερμοσιφωνικών συστημάτων. Επιπλέον, μελετάται η εφαρμογή ενός συμπληρωματικού διάχυτου ανακλαστήρα, ο οποίος αυξάνει την ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του υβριδικού συστήματος και υπερνικά την μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης λόγω των οπτικών απωλειών από την πρόσθετη τοποθέτηση γυάλινου καλύμματος.

Y.Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, S. Tselepis, V. Dimitriou, Th. Makris. **“Design and performance aspects for low concentration photovoltaics”** In CD Proc. 20th European PV Solar Energy Conf. Barcelona 6-10 June (2005).

Στην εργασία αυτή μελετάται η σχεδίαση και η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρού λόγου συγκέντρωσης. Μελετήθηκε η επίδραση της οπτικής και θερμικής απόδοσης αυτών των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην ηλεκτρική παραγωγή. Τα πειράματα επιβεβαιώνουν ότι η ανομοιόμορφη κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φβ μειώνει την ηλεκτρική απόδοσή τους. Αυτή η επίδραση μπορεί να υπερνικηθεί συνδυάζοντας τα φωτοβολταϊκά με συσκευές χαμηλής συγκέντρωσης που επιτυγχάνουν την ομοιόμορφη κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των ηλιακών κυττάρων. Ο πιο απλός και χαμηλού κόστους τρόπος για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο είναι να εφαρμοστούν διάχυτοι ανακλαστήρες αντί των κατόπτρων.

Y.Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, R. Battisti and A. Corrado **“Energy, Cost and LCA Results of PV and Hybrid PV/T Solar Systems”** Prog. Photovolt : Res. Appl. 2005 13: 235-250

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται και μελετώνται φωτοβολταϊκά συστήματα και μοντέλα υβριδικών φβ/θ ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού, με την χρήση βελτιωμένων διατάξεων χαμηλού κόστους, όπως γυάλινο κάλυμμα και διάχυτος ανακλαστήρας, ως προς την θερμική και ηλεκτρική τους απόδοση. Επίσης παρουσιάζεται η ετήσια ενεργειακή παραγωγή υπό τις καιρικές συνθήκες, για εγκατάσταση των συστημάτων σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο, καθώς και το κόστος των μερών των πειραματικών συστημάτων και ο χρόνος επιστροφής των δαπανών. Τέλος, παρουσιάζεται μια περιβαλλοντική εκτίμηση των συστημάτων με την χρήση λογισμικού προγράμματος ως προς την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου και την χρήση πρώτης ύλης.

Y.Tripanagnostopoulos. **“Cost effective designs for building integrated PV/T solar systems”**
Presented in 21st European PV Solar Energy Conf. Dresden, Germany 4-6 Sep (2006)

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται νέα σχέδια των φβ/θ ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού σε συνδυασμό με τους συνήθεις ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες (STC). Οι συλλέκτες φβ/θ συνδέονται με το χαμηλότερο και πιο κρύο μέρος μιας δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας, η οποία αποτελεί μέρος ενός ηλιακού θερμοσιφωνικού συλλέκτη (FPTU) ή ενός ολοκληρωμένου συλλέκτη. Από αυτό τον συνδυασμό, το φβ/θ σύστημα λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες, επομένως έχει την μέγιστη θερμική και ηλεκτρική απόδοση και συμβάλλει στην προθέρμανση του νερού του δοχείου αποθήκευσης. Επιπλέον, το σύστημα FPTU ή ολοκληρωμένου συλλέκτη λειτουργεί πιο αποτελεσματικά στις υψηλότερες θερμοκρασίες από το σύστημα φβ/θ που επιτυγχάνει την προθέρμανση του νερού της εγκατάστασης. Επίσης, για την αύξηση της ηλεκτρικής και θερμικής παραγωγής από το σύστημα φβ/θ, προτείνεται η τοποθέτηση κατοπτρικών ή διάχυτων ανακλαστήρων.

Y.Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, R. Battisti and A. Corrado(2006) **”Performance, Cost and Life-cycle Assessment Study of Hybrid PVT/AIR Solar Systems”** Prog. Photovolt: Res. Appl.2006 14: 65-76

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται και μελετώνται τρία μοντέλα υβριδικών φβ/θ ηλιακών συστημάτων θέρμανσης αέρα, ως προς την θερμική και ηλεκτρική τους απόδοση, με την χρήση βελτιωτικών διατάξεων χαμηλού κόστους όπως γυάλινο κάλυμμα και λεπτό μεταλλικό φύλλο στο εξωτερικό του αεραγωγού. Παρουσιάζεται μια ενεργειακή εκτίμηση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας κατά των φωτοβολταϊκών και των υβριδικών συστημάτων θέρμανσης αέρα με τις βελτιωτικές διατάξεις, κατά την διάρκεια του έτους καθώς και μια περιβαλλοντική εκτίμηση ως προς την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου με την χρήση λογισμικού και η οικονομική ανάλυση των συστημάτων αυτών.

S.A. kalogirou and Y.Tripanagnostopoulos (November 2006) **” Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production”** Energy Conversion and Management, Volume 47, Issues 18-19, Pages 3368-3382.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης με την χρήση του προγράμματος TRNSYS για τα υβριδικά ηλιακά συστήματα φβ/θ συστήματα θέρμανσης νερού. Τα μοντέλα που αποτελούνται από μια θερμική και μια φωτοβολταϊκή μονάδα κατασκευάστηκαν από πολυκρυσταλλικό και άμορφο πυρίτιο όσον αφορά το φωτοβολταϊκό μέρος και συνδυάστηκαν με τις μονάδες ανάκτησης της θερμότητας και συγκρίθηκαν με τα συστήματα φβ/θ που μελετήθηκαν σε τρία διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη, τη Λευκωσία (35°), την Αθήνα (38°) και το Μάντισον (43°) και έγινε μια ενεργειακή και οικονομική εκτίμηση για την εγκατάσταση αυτών των συστημάτων.

Y.Tripanagnostopoulos. **“Linear Fresnel lenses with photovoltaics for the cost effective electricity generation and solar control of buildings”**. Proc. Int. Conference ICSC-4, El Escorial, Spain, 12-14 March, (2007)

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ο συνδυασμός γραμμικών φακών Fresnel με φωτοβολταϊκά για μια πιο οικονομική χρήση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και για φωτισμό και θέρμανση των χώρων, αφού το 60%-80% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από το φωτοβολταϊκό και το υπόλοιπο μέρος κατανέμεται στον εσωτερικό χώρο.

J.K. Tonui and Y.Tripanagnostopoulos (April 2007) **“Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements”** Solar Energy, Volume 81, Issues 4, Pages 498-511

Στη εργασία αυτή μελετήθηκε ένα υβριδικό φβ/θ σύστημα αέρα με εξαναγκασμένη ροή του αέρα ως προς την αύξηση της απόδοσης του με την χρήση δύο τροποποιημένων εναλλακτών για την εξαγωγή της θερμότητας και ψύξη του φβ. Επίσης αναπτύχθηκε ένα θεωρητικό μοντέλο για να μελετηθεί η επίδραση της ροής του αέρα, διαμέσου των αεραγωγών και του μήκους τους στην συνολική απόδοση του συστήματος, που επιβεβαιώνει τα πειραματικά αποτελέσματα.

J.K Tonui and Y.Tripanagnostopoulos (April 2007) **Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation**

Στην εργασία αυτή με την χρήση εξαναγκασμένης και φυσικής ροής του αέρα μελετάται η βελτίωση της γενικής απόδοσης του υβριδικού αερόψυκτου φβ/θ συλλέκτη με την χρήση ενός λεπτού επίπεδου μεταλλικού φύλλου στη μέση του αεραγωγού ή πτερυγίων στο πίσω μέρος του, για την αύξηση μεταφοράς θερμότητας από την επιφάνεια του φβ στο ρευστό. Ακόμα συγκρίνονται οι θερμικές αποδόσεις των τροποποιημένων συστημάτων με εκείνες του χαρακτηριστικού συστήματος φβ/θ αέρα.

S.A Kalogirou and Y.Tripanagnostopoulos (June 2007) **“Industrial application of PV/T Solar energy systems”**

Στην εργασία αυτή μελετάται η εγκατάσταση υβριδικών φβ/θ συστημάτων θέρμανσης νερού σε βιομηχανίες, που οι ενεργειακές απαιτήσεις σε θερμότητα και ηλεκτρισμό είναι μεγάλες, με την χρήση του προγράμματος προσομοίωσης TRNSYS. Οι μελέτες έγιναν στην περιοχή της Λευκωσίας (35°), της Αθήνας (38°) και του Μάντισον (43°). Το προς μελέτη πειραματικό υβριδικό σύστημα αποτελείται από 300 m² επιφάνειας και δοχείο αποθήκευσης της θερμότητας σε μορφή ζεστού νερού 10 m³. Το παραπάνω σύστημα μελετήθηκε στην περιοχή των θερμοκρασιών 60-80°C και έγινε για δύο τύπους φωτοβολταϊκών, πολυκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου.

J.K. Tonui and Y. Tripanagnostopoulos (20 July 2007) **"Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation"** Solar Energy, Volume 82, Issue 1, January 2008, Pages 1-12

Στην εργασία αυτή μελετάται η αύξηση της γενικής απόδοσης του υβριδικού φβ/θ συστήματος αέρα, με την χρήση δύο μεθόδων χαμηλού κόστους για την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας και της ψύξης του φωτοβολταϊκού, σε λειτουργία με φυσική ροή του αέρα διαμέσου των καναλιών. Η πρώτη μέθοδος είναι η χρήση ενός λεπτού επίπεδου μεταλλικού φύλλου στη μέση του αεραγωγού και η άλλη η χρήση πτερυγίων στο πίσω μέρος του, για την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας από το φβ στο ρευστό. Ακόμα αναπτύχθηκε ένα θεωρητικό μοντέλο του συστήματος αυτού το οποίο είναι σύμφωνο με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Y.Tripanagnostopoulos and A. Pliopoulou. **“Improved designs for low concentration photovoltaics”** Int Conf. 22nd PVSEC, Milan, Italy, 3-7 Sep (2007)

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα στα φωτοβολταϊκά χαμηλής συγκέντρωσης, ανάλογα με τις γωνίες πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων, τον τύπο και τη γεωμετρία του συγκεντρωτικού μέσου. Από τα πειράματα αποδείχθηκε ότι η πρόσθετη ηλιακή ακτινοβολία στα φβ κύτταρα αυξάνει τη θερμοκρασία τους, μειώνοντας έτσι την ηλεκτρική

τους απόδοση, που καθιστά απαραίτητη την χρήση μιας μονάδας ανάκτησης της θερμότητας και ψύξης. Έτσι προτείνονται νέα σχέδια φβ/θ συλλεκτών ανάλογα με την γεωμετρία των συγκεντρωτικών συστημάτων και το ρευστό απολαβής της θερμότητας. Τα νέα συστήματα χαμηλής συγκέντρωσης είναι βασισμένα στην χρήση της ανομοιόμορφης κατανομής της συγκεντρωτικής ηλιακής ακτινοβολίας.

Υ. Tripanagnostopoulos (September 2007) **” Aspects and improvements of hybrid photovoltaic /thermal solar energy systems”** Solar Energy, Volume 81, Issue 9, Pages 1117-1131.

Σε αυτή την εργασία μελετάται ένας νέος τύπος φβ/θ συλλέκτη με διπλή λειτουργία εξαγωγής θερμότητας, είτε με κυκλοφορία νερού είτε με την κυκλοφορία αέρα που αποτελεί στην ουσία τον συνδυασμό ενός υβριδικού συστήματος θέρμανσης νερού με ένα υβριδικό σύστημα αέρα. Τα πειραματικά αυτά μοντέλα, διπλής απαγωγής, μελετήθηκαν σε συνδυασμό με τις τροποποιήσεις χαμηλού κόστους για την βελτίωση εξαγωγής της θερμότητας μέσω του αέρα, που έχουν γίνει σε προηγούμενη εργασία. Το σύστημα αυτό συνδυάστηκε ακόμα και με διάχυτους ανακλαστήρες επιτυγχάνοντας έτσι μια σημαντική αύξηση στη θερμική και ηλεκτρική ενεργειακή παραγωγή.

Υ. Tripanagnostopoulos, M. Souliotis, T. Makris and P. Georgostathis (June 2007) **«Design and performance of hybrid PV/T solar water heaters»**.

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκε η λειτουργία υβριδικού φβ/θ ηλιακού συστήματος θέρμανσης νερού, που είναι ένα σύστημα ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, κάτι που επιτυγχάνεται μέσω της ενός εναλλάκτη, για την απολαβή της θερμότητας και ψύξης του φωτοβολταϊκού ακόμα χρησιμοποιήθηκε ανακλαστήρας για την βελτίωση του συστήματος.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ PV/T ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η περιγραφή του υβριδικού φωτοβολταϊκού θερμικού συστήματος νερού που μελετήθηκε και η περιγραφή των μετρητικών συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα.

3.2 Περιγραφή του Συστήματος

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό / θερμικό σύστημα αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο με ενσωματωμένη μονάδα απολαβής θερμότητας, όπου ένα κυκλοφορούν ρευστό θερμαίνεται, ψύχοντας ταυτόχρονα το φωτοβολταϊκό (εικόνα 3.1). Για την μελέτη του φβ/θ στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ένα πειραματικό μοντέλο που περιλαμβάνει το υβριδικό φωτοβολταϊκό/θερμικό πλαίσιο (PV/T panel) με γυάλινο κάλυμμα. Η θερμική μονάδα είναι συνδεδεμένη με δοχείο αποθήκευσης νερού για την λειτουργία του συστήματος με εξαναγκασμένη ροή με την σύνδεση σε αυτό μιας αντλίας.

3.2.1 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματικά διάταξη ήταν ένα φωτοβολταϊκό πολυκρυσταλλικού πυριτίου της εταιρίας Energy Solutions με την εμπορική ονομασία ES636/Q, ονομαστικής ισχύος 120 W στα 1000 W/m² στους 25 °C. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει διαστάσεις 1490 mm × 670 mm × 46 mm συνολικού εμβαδού $A_{tot} = 0.99 \text{ m}^2$ και αποτελείται από 36 φωτοβολταϊκά στοιχεία με εμβαδό συλλεκτικής επιφάνειας $A_{col} = 0.88 \text{ m}^2$. Επίσης κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών η παραγόμενη από το φωτοβολταϊκό ηλεκτρική ενέργεια καταναλωνόταν σε φορτίο συνολικής αντίστασης $R = 3 \Omega$.



Εικόνα 3.1: Πειραματική διάταξη του Υβριδικού θερμικού συστήματος.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του πλαισίου

Ονομαστική μέγιστη ισχύς εξόδου (P_{max})	120 W (+3%-0%)
Ονομαστική μέγιστη τάση	16.5 V
Ονομαστικό μέγιστο ρεύμα	7.49 A
Τάση ανοιχτού κυκλώματος	21.9 V
Ρεύμα βραχυκυκλώσεως	8.08 A
Μέγιστη τάση συστήματος	880 V
Απόκλιση τάσεως ανοιχτού κυκλώματος	-0.35 V
Απόκλιση ρεύματος βραχυκυκλώσεως	+0.07

Πίνακας 3.1: Ηλεκτρική απόδοση σε πρότυπες καταστάσεις δοκιμής (STC)

Για την εκτίμηση της θερμικής συμπεριφοράς του φ/β σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας τοποθετήθηκαν σύνολα τέσσερα θερμοζεύγη, δύο στην μπροστινή επιφάνεια και δύο στην πίσω επιφάνεια.

3.2.2 Μονάδα απολαβής θερμότητας

Η μονάδα αυτή, αποτελείται από έναν εναλλάκτη θερμότητας που τοποθετήθηκε στην πίσω επιφάνεια του φ/β πλαισίου (εικόνα 3.2). Η θερμική μονάδα κατασκευάστηκε στο εργαστήριο από φύλλο χαλκού πάχους $d_1 = 0.4 \text{ mm}$ και σωλήνα χαλκού εξωτερικής και εσωτερικής διαμέτρου $R = 9.6 \text{ mm}$ και $r = 9.1 \text{ mm}$ αντίστοιχα.

Επιπλέον στον απορροφητή τοποθετήθηκαν συνολικά τέσσερα θερμοζεύγη, δύο στην μπροστινή επιφάνεια και δύο στην πίσω επιφάνεια, για την μέτρηση της θερμικής του συμπεριφοράς στις διάφορες διατάξεις και καταστάσεις λειτουργίας. Το φωτοβολταϊκό/θερμικό πλαίσιο καλύπτεται στην πίσω πλευρά του και περιμετρικά με θερμομονωτικό υλικό πάχους $d_2 = 4 \text{ cm}$ με σκοπό την μείωση των θερμικών απωλειών της διάταξης. Τέλος στο σύστημα η πίσω επιφάνειά του καλύφθηκε εξωτερικά με λαμαρίνα πάχους $d_3 = 5 \text{ mm}$ για την προστασία του από τις καιρικές συνθήκες.



Εικόνα 3.2: Εναλλάκτης θερμότητας

3.2.3 Γυάλινο διαφανές κάλυμμα

Για την καλύτερη λειτουργία του συστήματος, όσον αφορά την θερμική του απόδοση, για τον περιορισμό θερμικών απωλειών τοποθετήθηκε στην μπροστινή επιφάνεια του φωτοβολταϊκού /θερμικού πλαισίου (PV/T panel) γυάλινο κάλυμμα. Αρχικά μελετήθηκε η ηλεκτρική και θερμική απόδοση του υβριδικού συστήματος, με ένα απλό γυάλινο κάλυμμα του εμπορίου πάχους $d_4 = 4 \text{ mm}$ και έπειτα τοποθετήθηκε γυάλινο κάλυμμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο $d_5 = 5 \text{ mm}$ για την μέγιστη απολαβή της ηλιακής ακτινοβολίας. Το λευκό γυάλινο κάλυμμα έχει μεγαλύτερη διαπερατότητα και λιγότερη ανακλαστικότητα από το απλό.

3.2.4 Δοχείο αποθήκευσης (Storage Tank)

Για την αποθήκευση του ζεστού νερού και για την εκτέλεση του κύκλου βεβιασμένης κυκλοφορίας, χρησιμοποιήθηκε ένα μεταλλικό κυλινδρικό δοχείο χωρητικότητας 30 λίτρων και διαστάσεων 64 cm x 24.5 cm καλυμμένο με μονωτικό υλικό πάχους $d_6 = 5 \text{ cm}$. Εξωτερικά αυτού μονώθηκε όλο το δοχείο με υαλοβάμβακα για την θωράκιση του από τις καιρικές συνθήκες και για την επιπλέον θερμική μόνωση (εικόνα 3.3). Επιπλέον για την εκτίμηση της συμπεριφοράς και της διαστρωμάτωσης των θερμοκρασιών του νερού εντός του δοχείου αποθήκευσης χρησιμοποιήθηκαν δύο εμβαπτιζόμενα θερμοζεύγη στη μέση και κοντά στο κέντρο του δοχείου.

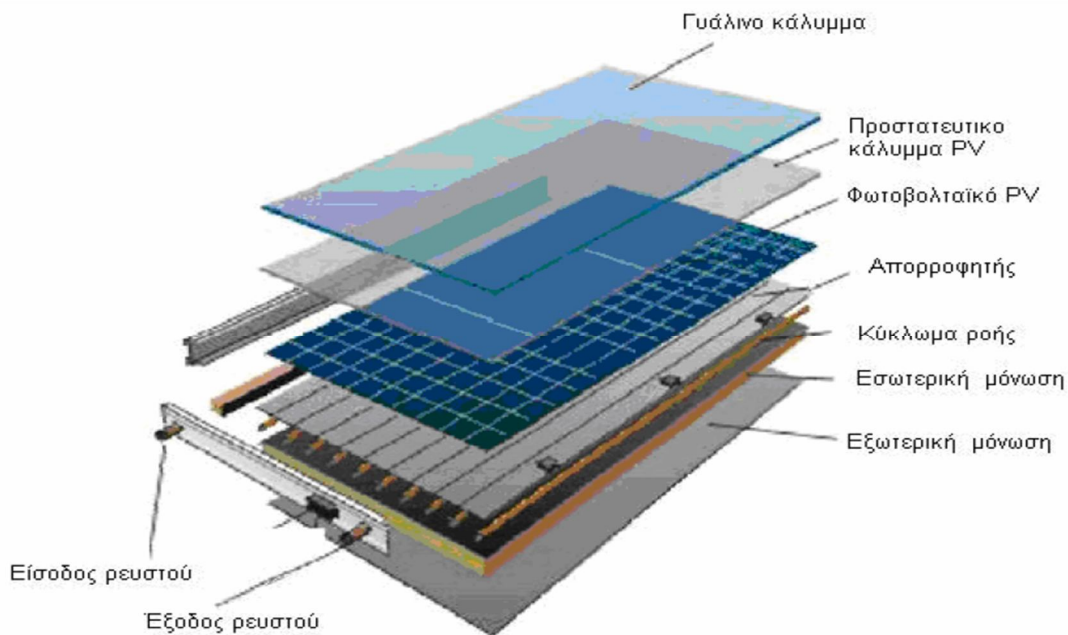


Εικόνα 3.3: Θερμικά μονωμένο κυλινδρικό δοχείο αποθήκευσης νερού

3.2.5 Αντλία βεβιασμένης ροής

Για την λειτουργία του συστήματος με βεβιασμένη ροή δημιουργήθηκε μέσω βανών παράκαμψη στο κύκλωμα της θερμοσιφωνικής ροής και συνδέθηκε αντλία η οποία παρέχει σταθερή και βεβιασμένη ροή του ρευστού στο κύκλωμα ροής. Η αντλία λειτουργούσε με την τάση δικτύου.

Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 3.4) παρουσιάζεται μια τυπική η διάταξη υβριδικού φωτοβολταϊκού / θερμικού συλλέκτη.



Εικόνα 3.4: Υβριδικός φωτοβολταϊκός / θερμικός συλλέκτης νερού (google image)

3.3 Μετρητική Διάταξη του Υβριδικού PV/T Συστήματος

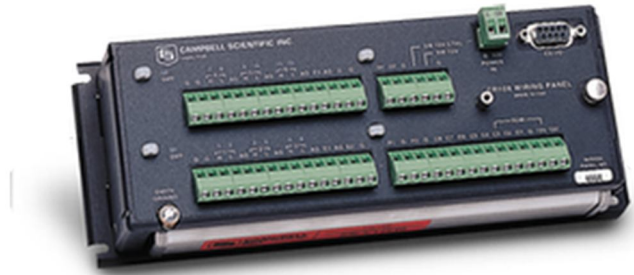
Για την λήψη των πειραματικών δεδομένων του PV/T είχαν εγκατασταθεί ορισμένες μετρητικές διατάξεις και όργανα που αναλύονται παρακάτω:

3.3.1 Αυτόνομο καταγραφικό και σύστημα πολυπλεξίας

Για την καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων των διαφόρων παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε ένα αυτόματο καταγραφικό (data logger) της εταιρίας Campbell Scientific Instrument με την εμπορική ονομασία CR 10X (εικόνα 3.5). Το μοντέλο αυτό διαθέτει 12 αναλογικές εισόδους (ή 6 διαφορικές) με resolution 13 bit, δύο παλμικές εισόδους, τρεις εξόδους διέγερσης αισθητήρων (για αισθητήρες που απαιτούν κάποια τάση για να παράγουν σήμα) και οκτώ ψηφιακές θύρες I/O. Επίσης, έχει ρολόι πραγματικού χρόνου με ακρίβεια της τάξης του $\pm 1-2$ λεπτών/μήνα.

Ο CR 10X μπορεί να προγραμματιστεί ώστε να μετρά τόσο μετεωρολογικές παραμέτρους όσο ηλεκτρονικές παραμέτρους με περίοδο από δέκατα του δευτερολέπτου έως μέχρι πολλές ώρες. Παράλληλα ο καταγραφικός δεδομένων έχει την δυνατότητα να πραγματοποιεί μέσω ενσωματωμένων συναρτήσεων στατιστική ανάλυση από τα μετρούμενα μεγέθη όπως μέσες τιμές κάποιας χρονικής περιόδου, μέσες ωριαίες τιμές, τυπικές αποκλίσεις κ.α. Εκτός από τις μετρήσεις των αισθητήρων το καταγραφικό αποθηκεύει τις τιμές πέντε ακόμα παραμέτρων. Αυτές είναι ο κώδικας διαχωρισμού των τιμών, η κωδική ονομασία του συστήματος, το έτος, την Ιουλιανή ημερομηνία και την ώρα.

Η μνήμη του CR 10X είναι τύπου EEPROM για το λειτουργικό σύστημα και SRAM για την αποθήκευση των δεδομένων. Το αυτόματο καταγραφικό διαθέτει εσωτερική μνήμη 128 KB SRAM και 128 KB FLASH CR 10X (EEPROM) με δυνατότητα επέκτασης της μνήμης από μονάδες FLASH με χωρητικότητες 2 MB 4 MB 16 MB. Σε περίπτωση διακοπής της τροφοδοσίας οι μνήμες EEPROM και SRAM δεν χάνουν τις αποθηκευμένες τιμές καθώς αντλούν την απαιτούμενη ενέργεια από ανεξάρτητη μπαταρία λιθίου, η οποία έχει διάρκεια ζωής τεσσάρων ετών. Ο CR 10X υποστηρίζει κάθε είδους επικοινωνία συμπεριλαμβανόμενης της δορυφορικής ζεύξης και της ζεύξης μέσω ραδιοδικτύου. Ο πιο κοινός τρόπος επικοινωνίας είναι η σύνδεση του με έναν υπολογιστή μέσω της θύρας RS 232 και του interface SC929 της Campbell Scientific.



Εικόνα 3.5: Καταγραφέας δεδομένων CR10X.

3.3.2 Θερμοζεύγη

Για την εκτίμηση της θερμικής συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας τοποθετήθηκαν συνολικά τέσσερα θερμοζεύγη, δύο στην μπροστινή επιφάνεια και δύο στην πίσω επιφάνεια. Ακόμα χρησιμοποιήθηκαν θερμοζεύγη για την μέτρηση θερμοκρασίας της εισόδου, εξόδου του νερού, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος καθώς και της θερμοκρασίας της επιφάνειας του γυαλιού.

Τα θερμοζεύγη που χρησιμοποιήθηκαν είναι θερμοζεύγη τύπου T, το είδος τους είναι χαλκός/κονσταντάνη (99,9% Cu / 55% Cu + 45% Ni), το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο λειτουργούν σωστά είναι από -250 °C έως 400 °C με ακρίβεια ± 2 °C και η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία είναι αυτή των 500 °C. Τα θερμοζεύγη αυτά παράγουν στα άκρα τους τάση της κλίμακας 42 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

3.3.3 Πυρανόμετρο

Το πυρανόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της ολικής ακτινοβολίας είναι της εταιρίας Kipp & Zonen με την κωδική ονομασία CMP 3 (εικόνα 3.6). Ο αισθητήρας του πυρανομέτρου είναι μια θερμοστήλη καλυμμένη με μαύρη επίστρωση. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στον αισθητήρα απορροφάται από τη μαύρη επίστρωση και μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία μεταφέρεται στη θερμοστήλη και τη διεγείρει, με αποτέλεσμα να παράγεται μια διαφορά δυναμικού ανάλογη με την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η παραγόμενη διαφορά δυναμικού περνάει ως είσοδος στο καταγραφικό, όπου μεταφράζεται σε τιμές ακτινοβολίας.

Το αισθητήριο σύστημα του πυρανομέτρου περιβάλλεται από ένα γυάλινο θόλο πάχους 4 mm, ο οποίος το προστατεύει από τις επιδράσεις του περιβάλλοντος, ενώ ταυτόχρονα αποκόπτει και την ηλιακή ακτινοβολία με μήκος κύματος μεγαλύτερο από 2800 nm. Στο κάτω μέρος της βάσης του πυρανομέτρου υπάρχει ενσωματωμένο ένα απλό σύστημα ρύθμισης της κλίσης του. Επίσης, μαζί με το πυρανόμετρο περιλαμβάνεται θωρακισμένο καλώδιο μήκους 10 μέτρων, ώστε να εξασφαλίζεται η μικρότερη δυνατή παρουσία θορύβου κατά τη μέτρηση. Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του.

Φασματική περιοχή	300 έως 2800 nm
Ευαισθησία	5 έως 20 Mv /W/m ²
Χρόνος απόκρισης	18 sec
Κατευθυντήριο σφάλμα (στις 80° με ακτίνα 1000 W/m ²)	< 20%
Εξάρτηση από την θερμοκρασία (-10°C έως +40°C)	< 5%
Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας	-40°C έως +80°C
Μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία	2000 W/m ²
Οπτικό πεδίο	180°

Πίνακας 3.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά πυρανομέτρου CMP 3.



Εικόνα 3.6: Πυρανόμετρο CMP 3 της εταιρίας Kipp & Zonen.

3.3.4 Ανεμόμετρο

Για την μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιήθηκε ένα ανεμόμετρο τύπου κυπέλλου της εταιρίας VECTOR με την κωδική ονομασία A100LK (εικόνα 3.7). Το ανεμόμετρο ήταν βαθμολογημένο και η καταγραφή της ταχύτητας του ανέμου γινόταν με απευθείας μετατροπή της συχνότητας ηλεκτρικών παλμών σε ταχύτητα ανέμου μέσω κατάλληλου συντελεστή μετατροπής. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι καταλληλότερο για εφαρμογές χαμηλής ισχύος στις οποίες απαιτείται ανεμόμετρο που παρέχει ένα παλμό/ συχνότητα εξόδου, ενώ παράλληλα καταναλώνει λίγο ρεύμα και λειτουργεί με χαμηλή παροχή των 5V. Τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 3.3).

Ταχύτητες λειτουργίας	0.2m/s έως 75+ m/s (146Kts)
Θερμοκρασία λειτουργίας	-30° έως 70°C
Τάση λειτουργίας	4.75V έως 28V DC
Κατανάλωση λειτουργίας	max 1.3mA
Σήμα εξόδου	παλμικό (0V/4V)
A100LK	10Hz ανά Knot

Πίνακας 3.3: Λειτουργικά χαρακτηριστικά ανεμομέτρου A100LK της εταιρίας Vector.



Εικόνα 3.7: Ανεμόμετρο A100LK της εταιρίας Vector.

3.3.5 Μετρητής ροής υπερήχων

Για την μέτρηση της ροής του νερού διαμέσου των σωληνώσεων της πειραματικής μας διάταξης, όταν τέθηκε σε εξαναγκασμένη κυκλοφορία χρησιμοποιήθηκε ένας μετρητής ροής με υπέρηχους της εταιρείας KATRONIC με κωδικό όνομα KATflow 230 (εικόνα 3.8).

Οι μετρητές ροής KATflow λειτουργεί με την μέθοδο μέτρησης του χρόνου διέλευσης των υπερήχων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αρχή ότι τα κύματα ήχου που ταξιδεύουν με την φορά με την ροή του υγρού κινούνται πιο γρήγορα από αυτά που ταξιδεύουν αντίθετα της ροής.

Η τελική διαφορά στο χρόνο διέλευσης είναι ανάλογη της ταχύτητας ροής του υγρού και τα συνέπεια ανάλογη της ογκομετρικής ροής. Οι υπερηχητικοί αισθητήρες του ροοστάτη τοποθετούνται στην εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα και χρησιμοποιούνται ώστε να παράγουν και να λαμβάνουν παλμούς. Το υγρό που ρέει στο εσωτερικό του σωλήνα προκαλεί διαφορές στα σήματα υπερήχων, οι οποίες αξιολογούνται από τον μετρητή ροής και έτσι προσδιορίζονται με ακρίβεια η ροή του υγρού.

Τα προηγμένα ηλεκτρονικά συστήματα του ροοστάτη έχουν την δυνατότητα προσαρμογής του στις ενδεχόμενες αλλαγές στο προφίλ της ροής και της μέσης θερμοκρασίας έτσι ώστε να προσφέρει αξιόπιστες μετρήσεις κάθε στιγμή.

Το μοντέλο KATflow 230 είναι ένας φορητός ροοστάτης υπερήχων δύο καναλιών για μη επεμβατική και μη παρεμβατική μέτρηση ροής υγρών και για υγροποιημένα αέρια σε πλήρως γεμάτους σωλήνες. Το μοντέλο αυτό παρέχεται με ένα εσωτερικό καταγραφέα δεδομένων και λογισμικό για καταγραφή και λήψη των τιμών των μετρήσεων ροής. Ακόμα, το μοντέλο αυτό μπορεί να είναι εξοπλισμένο με ένα ειδικό όργανο μέτρησης πάχους των τοιχωμάτων. Χάρης στο ευφυή μενού του οργάνου αυτό μπορεί να δεχθεί όλες τις επιλογές και οι αισθητήρες του να εγκατασταθούν σωστά πολύ γρήγορα.

Το μοντέλο KATflow 230 έχει δύο μετρητικά κανάλια που επιτρέπουν στο όργανο να παρακολουθεί δύο σωλήνες ταυτόχρονα ή εναλλακτικά να παρακολουθεί μόνο ένα σωλήνα τοποθετώντας τους αισθητήρες με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να έχουμε ακόμα πιο ακριβή μέτρηση της ροής. Στον παρακάτω πίνακα (πίνακα 3.4) φαίνονται τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά:

Διαμέτρους σωλήνων: 10 mm έως 3.000 mm (3 m)
Για καθαρά, βρώμικα και τα αεριούχα υγρά
Θερμοκρασίες : -30 ° C έως +200 ° C
Αμφίδρομης μέτρησης της ροής
Ακρίβεια: ± 0,5% (ταχύτητα)
Λειτουργία της μπαταρίας: Έως και 24 ώρες
Εσωτερικός καταγραφέας δεδομένων για 100.000 μετρήσεις
Αμφίδρομος αθροιστής
Διαγνωστικές λειτουργίες
Παροχή δεδομένων μέσω RS 232 ή USB καλωδίου
Μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο
Στιβαρό περίβλημα με προστατευτικό καουτσούκ

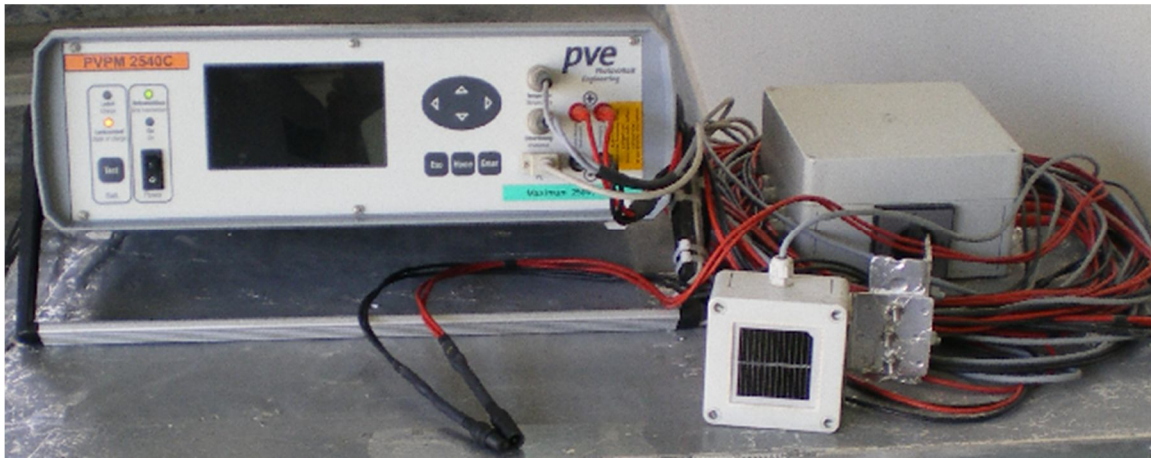
Πίνακας 3.4: Λειτουργικά χαρακτηριστικά ροόμετρου KAT flow 230.



Εικόνα 3.8: Ροόμετρο KAT flow 230

3.3.6 Συσκευή μέτρησης χαρακτηριστικών καμπυλών φωτοβολταϊκού PVPM

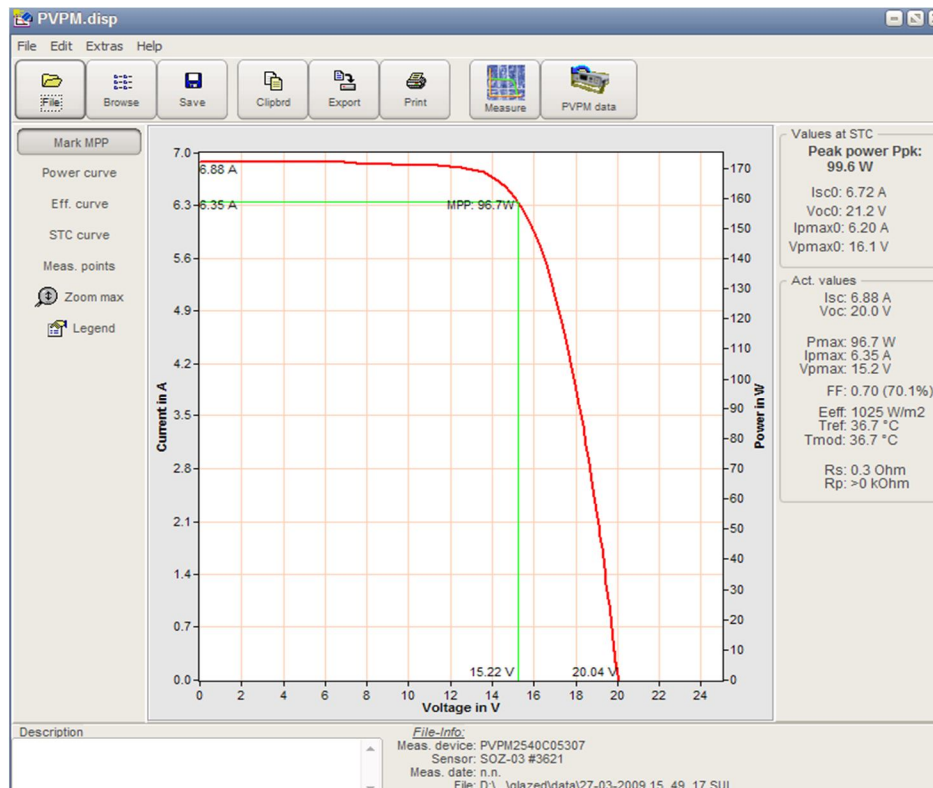
Η συσκευή αυτή έχει την δυνατότητα της μέτρησης και της σχεδίασης των χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας (I-V) του φωτοβολταϊκού. Είναι της εταιρίας PV-Engineering GmbH με την κωδική ονομασία PVPM 2540C (εικόνα 3.9).



Εικόνα 3.9: PVPM 2540C

Σε κάθε ϕ/β η μέγιστη ισχύς $P_m = I_m V_m$ δίνεται από τους κατασκευαστές μετρημένη υπό ειδικές σταθερές συνθήκες (Standard Test Condition, STC), οι οποίες αντιστοιχούν σε ακτινοβολία 1000 W/m^2 , τιμή αέριας μάζας $AM = 1.5$ και θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Είναι σπάνια η φυσική εμφάνιση των STC, οπότε οι κατασκευαστές μελετούν τα ϕ/β σε συνθήκες εργαστηρίου. Η συσκευή PVPM έχει την δυνατότητα μετατροπής των δεδομένων των μετρήσεων σε φυσικό περιβάλλον σε STC, έτσι δίνει αποτελέσματα για την μέγιστη ισχύ που παράγει το ϕ/β σε συνθήκες από $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ έως $+120 \text{ }^\circ\text{C}$ και για προσπίπτουσα ακτινοβολία από 0 W/m^2 έως 1300 W/m^2 . Επίσης από τα δεδομένα που συλλέγει υπολογίζει το μέγιστο σημείου ισχύς (maximum power point, MPP), καθώς και την τάση του μέγιστου σημείου ισχύς V_{pmax} και το ρεύμα αυτού I_{pmax} , την σε σειρά αντίσταση R_s , την παράλληλη αντίσταση R_p , τον παράγοντα πλήρωσης FF (fill factor) και τέλος την προσπίπτουσα ακτινοβολία E_{eff} . Μπορεί να συνδεθεί, μέσω του

λογισμικού προγράμματος που παρέχει η εταιρία (εικόνα 3.10), με υπολογιστή και να προγραμματιστεί να καταγράφει τα δεδομένα με την επιθυμητή συχνότητα. Επίσης μπορεί να προβάλει τα δεδομένα και τις χαρακτηριστικές σε μία LCD οθόνη που έχει ενσωματωμένη η συσκευή.



Εικόνα 3.10: Λογισμικό πρόγραμμα της συσκευής PVPM

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

4.1 Σκοπός της Πειραματικής Διαδικασίας

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται η περιγραφή της εγκατάστασης και της λειτουργίας της μονάδας παραγωγής ενέργειας την οποία διαπραγματεύεται η παρούσα εργασία. Παράλληλα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της εγκατάστασης.

Κύριος στόχος της πειραματικής διαδικασίας είναι τόσο ο προσδιορισμός της μέγιστης θερμοκρασίας του νερού αποθήκευσης και όσο και ο προσδιορισμός της μέγιστης θερμικής απόδοσης του συστήματος. Πρέπει να τονιστεί ότι στα πλαίσια υλοποίησης της παρούσας Πτυχιακής εργασίας δεν κρίθηκε αναγκαία η μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του συστήματος παράλληλα με τη θερμική του συμπεριφορά, καθώς σκοπός ήταν η επίτευξη ικανοποιητικής θερμοκρασίας του δοχείου αποθήκευσης. Το σύστημα μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας λειτουργεί με εξαναγκασμένη ροή του ρευστού απολαβής της θερμότητας, με τη βοήθεια αντλίας.

Ακόμα, ο προσδιορισμός της βέλτιστης αυτής αναλογίας θα αναζητηθεί στην διάταξη όταν αυτή λειτουργεί και με θερμοσιφωνική ροή.

4.2 Μέθοδος Πειραματικής Μελέτης του Υβριδικού PV/T Συστήματος

Στη παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η μέθοδος της πειραματικής μελέτης του υβριδικού φωτοβολταϊκού / θερμικού συστήματος με στόχο τον προσδιορισμό της συνολικής απόδοσης του συστήματος συλλέκτη - αποθήκη θερμότητας.

Η μελέτη όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο σημείο της εργασίας αυτής έχει γίνει για την διάταξη όταν η τελευταία λειτουργεί με βεβιασμένη ροή, όταν δηλαδή στο σύστημα είναι συνδεδεμένη αντλία.

Επιπλέον εξετάζονται τα διαγράμματα μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού εντός του δοχείου αποθήκευσης για πολύωρη λειτουργία του υβριδικού φβ/θ συστήματος χωρίς απομάστευση του νερού, με σκοπό τον καθορισμό της μέγιστης μέσης θερμοκρασίας του νερού και τον προσδιορισμό της μέγιστης μέσης θερμικής απόδοσης της θερμικής συσκευής.

Η μέθοδος της πειραματικής μελέτης της παρούσας εργασίας έχει εφαρμοστεί και παλιότερα σε διάφορες πειραματικές διατάξεις στο Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών με δημοσίευση των αποτελεσμάτων σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά.

Ο πειραματικός προσδιορισμός της ημερήσιας απόδοσης της συσκευής πραγματοποιείται με τη μέθοδο της μέγιστης ωφέλιμης απόδοσης (Maximum Useful Efficiency, MUE) όπως προτείνεται από τον Faïman. Κατά τη μέθοδο, MUE, η ηλιακή συσκευή δοκιμάζεται σε εξωτερικές συνθήκες λειτουργίας με υπολογισμό της μέγιστης ημερήσιας απόδοσης, η , ως εξής:

Σε μια αρχική χρονική στιγμή t_i , μετράται η τοπική μέση αρχική θερμοκρασία του νερού που βρίσκεται στο δοχείο της συσκευής, $T_{i,m}$. Η συσκευή στη συνέχεια αφήνεται να λειτουργήσει χωρίς απομάστευση νερού μέχρι κάποια άλλη χρονική στιγμή, t_f , στην οποία η τοπική μέση τελική θερμοκρασία του νερού $T_{f,m}$ έχει φτάσει στη μέγιστη τιμή της. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της συσκευής, μετράται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας G που προσπίπτει στην επιφάνεια ανοίγματος της ηλιακής συσκευής καθώς και η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a . Κατά το χρονικό αυτό διάστημα Δt υπολογίζεται η ωφέλιμη ενέργεια που αποθηκεύτηκε στη συσκευή καθώς και η συνολική προσπίπτουσα σε αυτήν ηλιακή ακτινοβολία. Ο λόγος της ωφέλιμης ενέργειας προς τη συνολικά προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια ισούται με τη μέγιστη ημερήσια απόδοση της συσκευής. Αν λάβουμε υπόψη μας και το λόγο της διαφοράς της μέσης θερμοκρασίας του νερού μείον τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{a,m}$) προς τη μέση ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας $\Delta T_m / G_m$ ($\Delta T_m / G_m = [(T_{i,m} + T_{f,m}) / 2 - T_{a,m}] / G_m$) στο ίδιο χρονικό διάστημα Δt , έχουμε ένα πειραματικό ζεύγος τιμών. Επαναλαμβάνοντας πολλές φορές τη διαδικασία αυτή για διαφορετικές τιμές της μέσης θερμοκρασίας του νερού της συσκευής και της έντασης της ακτινοβολίας, χαράσσεται η καμπύλη της μέγιστης ημερήσιας απόδοσης σε γραμμική προσέγγιση με την παράμετρο $\Delta T_m / G_m$.

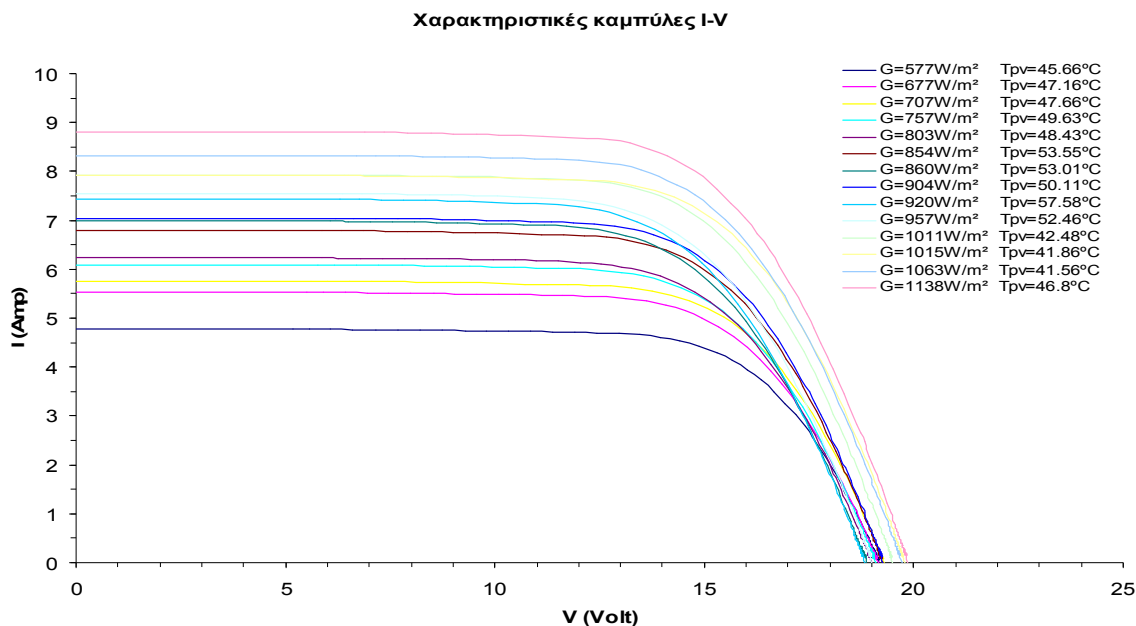
Τα μετρούμενα μεγέθη που απαιτούνται για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας απόδοσης η_d είναι η τοπική μέση θερμοκρασία του νερού $T_{i,m}$ τη χρονική στιγμή της έναρξης του πειράματος t_i η τοπική μέση θερμοκρασία του νερού $T_{f,m}$ τη χρονική στιγμή τέλους της ημερήσιας λειτουργίας της συσκευής t_f καθώς και η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας G που προσπίπτει στο άνοιγμα της συσκευής καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, προκειμένου να υπολογιστούν οι αντίστοιχες χρονικές μέσες τιμές $T_{a,m}$ και G_m . Η συνεχής καταγραφή της θερμοκρασίας του νερού T_w , της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_a και της ηλιακής ακτινοβολίας G κατά τη διάρκεια όλου του πειράματος και του πνέοντος ανέμου, μας δίνει τη δυνατότητα να παρακολουθούμε την απόκριση της συσκευής στις μεταβολές των εξωτερικών συνθηκών και την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη λειτουργία της. Επίδραση στη διακύμανση των πειραματικών μετρήσεων των συστημάτων φβ/θ, έχει ο πνέων άνεμος καθώς και το ποσοστό νέφωσης. Για μεγάλες τιμές της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου ($v_w > 5 \text{ ms}^{-1}$), οι θερμικές απώλειες αυξάνουν, ενώ το υψηλό ποσοστό νέφωσης μειώνει την θερμική απόδοση του φβ/θ συστήματος.

4.3 Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών του Υβριδικού PV/T Συστήματος

Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών για το υβριδικό PV/T σύστημα περιλαμβάνουν αρχικά την αποτύπωση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του υβριδικού θερμικού συλλέκτη (PV/T) χωρίς την εγκατάσταση του δοχείου αποθήκευσης. Στη συνέχεια, με την τοποθέτηση του δοχείου αποθήκευσης του νερού χρήσης, μελετήθηκε η θερμική συμπεριφορά του υβριδικού συστήματος PV/T με αποθήκη θερμότητας.

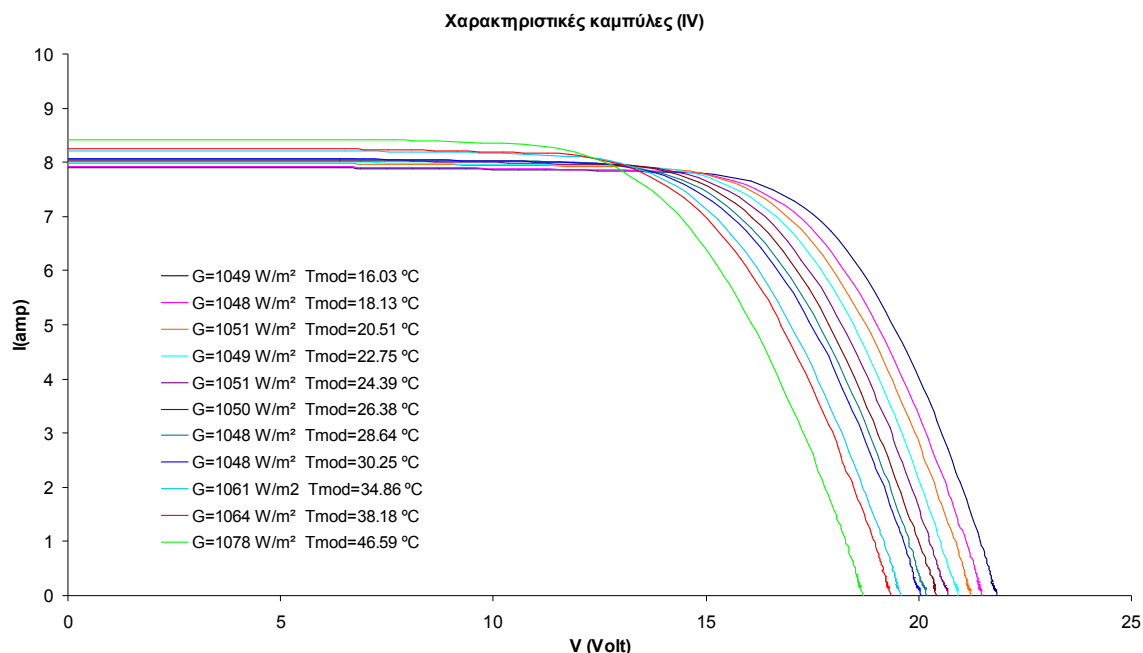
4.3.1 Αποτελέσματα της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του υβριδικού PV/T συλλέκτη

Η ηλεκτρική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού πλαισίου από τη θερμοκρασία είναι γνωστή, καθώς αυτή ελαττώνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Πρέπει να τονιστεί ότι η ηλεκτρική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών πλαισίων σχετίζεται με την τεχνολογία κατασκευής τους. Στα σχήματα 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται οι μεταβολές των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο για διάφορες τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας λειτουργίας του.



Σχήμα 4.1: Εξάρτηση της ηλεκτρικής απόδοσης από την θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου

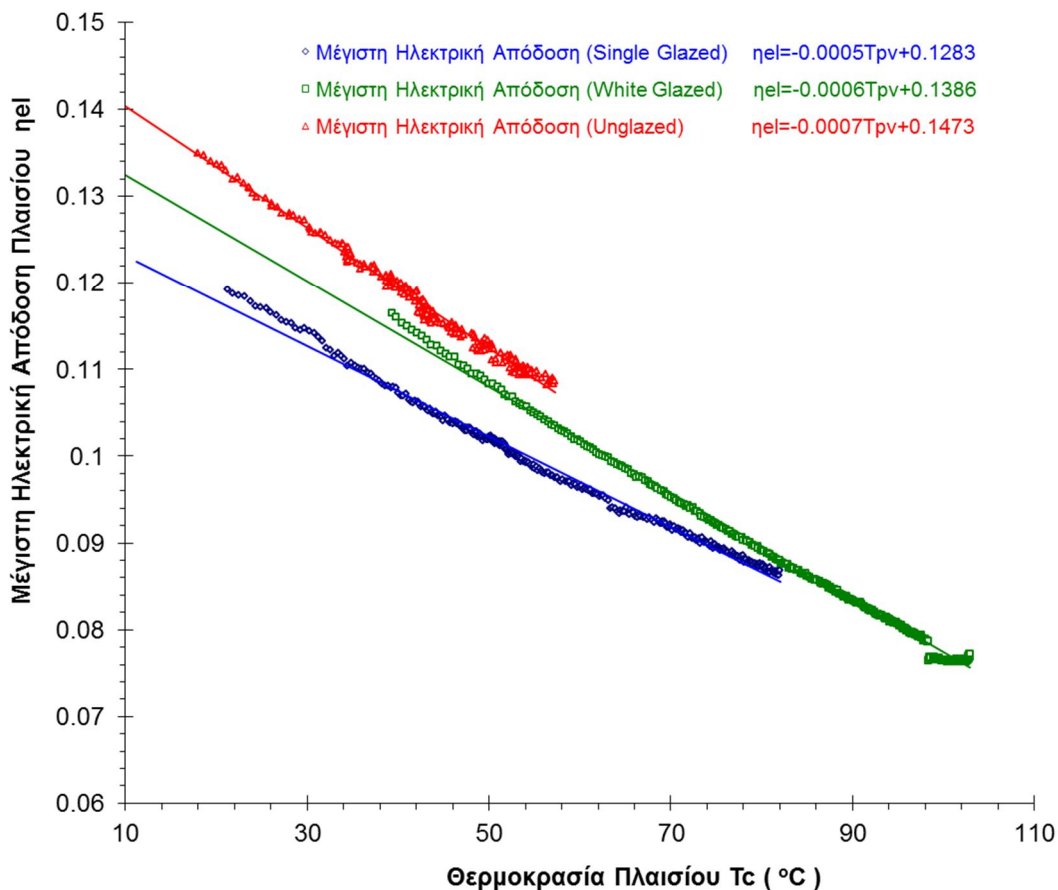
Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές καμπύλες I-V του φωτοβολταϊκού πλαισίου για διαφορετικές τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και για θερμοκρασίες λειτουργίας του μεταξύ 41 °C και 57 °C. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V ελήφθησαν με το PVPM 2540C , όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σύμφωνα με τα διαγράμματα αυτά διαπιστώνεται μεγάλη διακύμανση στην ηλεκτρική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού πλαισίου, καθώς η ένταση του ρεύματος ελαττώνεται αισθητά εξαιτίας της μείωσης της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνειά του. Η τάση ανοικτού κυκλώματος δεν σημείωσε μεγάλη διακύμανση καθώς η μεταβολή της θερμοκρασίας δεν ήταν ιδιαίτερος σημαντική. Πρέπει να τονιστεί ότι οι εν λόγω πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικές ημέρες λειτουργίας του πλαισίου και κατά τη διάρκεια διαφορετικών χρονικών στιγμών, όπου η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ήταν διαφορετική. Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές καμπύλες I-V του φωτοβολταϊκού πλαισίου για σχεδόν σταθερές τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (τιμές μεταξύ 1048 και 1078 W/m²) και μεταβαλλόμενες τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (τιμές μεταξύ 16 και 47 °C). Διαπιστώνεται ότι η ένταση του ρεύματος παραμένει σχεδόν σταθερή ενώ η τάση ανοικτού κυκλώματος μεταβάλλεται σημαντικά. Συγκεκριμένα η τάση ανοικτού κυκλώματος ελαττώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού.



Σχήμα 4.2: Εξάρτηση της ηλεκτρικής απόδοσης από την θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Οι παραπάνω χαρακτηριστικές καμπύλες ελήφθησαν για το υβριδικό φωτοβολταϊκό / Θερμικό συλλέκτη με και χωρίς τη λειτουργία της αντλίας και χωρίς τη χρήση επιπλέον διαφανούς καλύμματος. Πειραματικές δοκιμές σε παρόμοιες συνθήκες λειτουργίας για ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου ελήφθησαν και στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη διαφανών γυάλινων καλυμμάτων, ένα απλό γυάλινο κάλυμμα χαμηλής τιμής της διαπερατότητας ($\tau_r = 0.86$, σε κάθετη πρόσπτωση) και ένα διαφανές γυάλινο κάλυμμα με υψηλή τιμή διαπερατότητας ($\tau_r = 0.93$, σε κάθετη πρόσπτωση). Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζονται αποτελέσματα της διακύμανσης της ηλεκτρικής απόδοσης του υβριδικού φωτοβολταϊκού / θερμικού συλλέκτη σε συνάρτηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του για τις περιπτώσεις χωρίς τη χρήση επιπλέον διαφανούς καλύμματος και για τις περιπτώσεις χρήσης επιπλέον διαφανών καλυμμάτων χαμηλής και υψηλής διαπερατότητας. Σύμφωνα με τα διαγράμματα αυτά διαπιστώνεται ότι η ηλεκτρική απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου ελαττώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία λειτουργίας του. Επιπλέον διαπιστώνεται ότι η χρήση των διαφανών καλυμμάτων για συγκεκριμένες θερμοκρασίες λειτουργίας οδηγεί σε μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης του υβριδικού /θερμικού συλλέκτη, καθώς η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται εξαιτίας της παρουσίας διαφανών διαθλαστικών μέσων

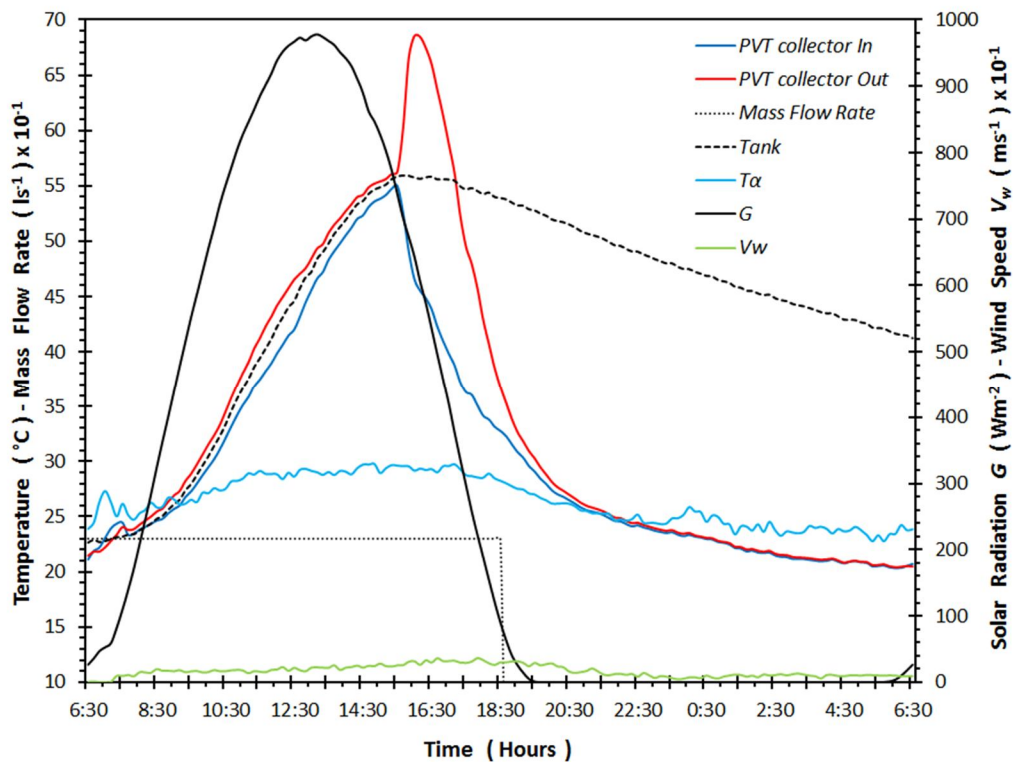
(γυάλινα καλύμματα). Για το διαφανές γυάλινο κάλυμμα με χαμηλή διαπερατότητα η ηλεκτρική απόδοση παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες τιμές της ηλεκτρικής απόδοσης για τις άλλες δύο περιπτώσεις. Οι ηλεκτρικές αποδόσεις του υβριδικού φωτοβολταϊκού /θερμικού συλλέκτη με χρήση διαφανούς καλύμματος με υψηλή διαπερατότητα παρουσιάζουν τιμές που κυμαίνονται μεταξύ των ηλεκτρικών αποδόσεων για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο χωρίς διαφανές κάλυμμα και του υβριδικού φωτοβολταϊκού /θερμικού συλλέκτη με διαφανές κάλυμμα χαμηλής διαπερατότητας. Τέλος, σημειώνεται ότι οι θερμοκρασίες λειτουργίας του πλαισίου που παρατηρήθηκαν στην περίπτωση χρήσης διαφανούς καλύμματος με υψηλή διαπερατότητα υπήρξαν υψηλότερες των υπολοίπων περιπτώσεων, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία που διαπερνά το διαφανές κάλυμμα και τελικά προσπίπτει (και μέρος αυτής απορροφάται) στην επιφάνεια του πλαισίου είναι μεγαλύτερη.



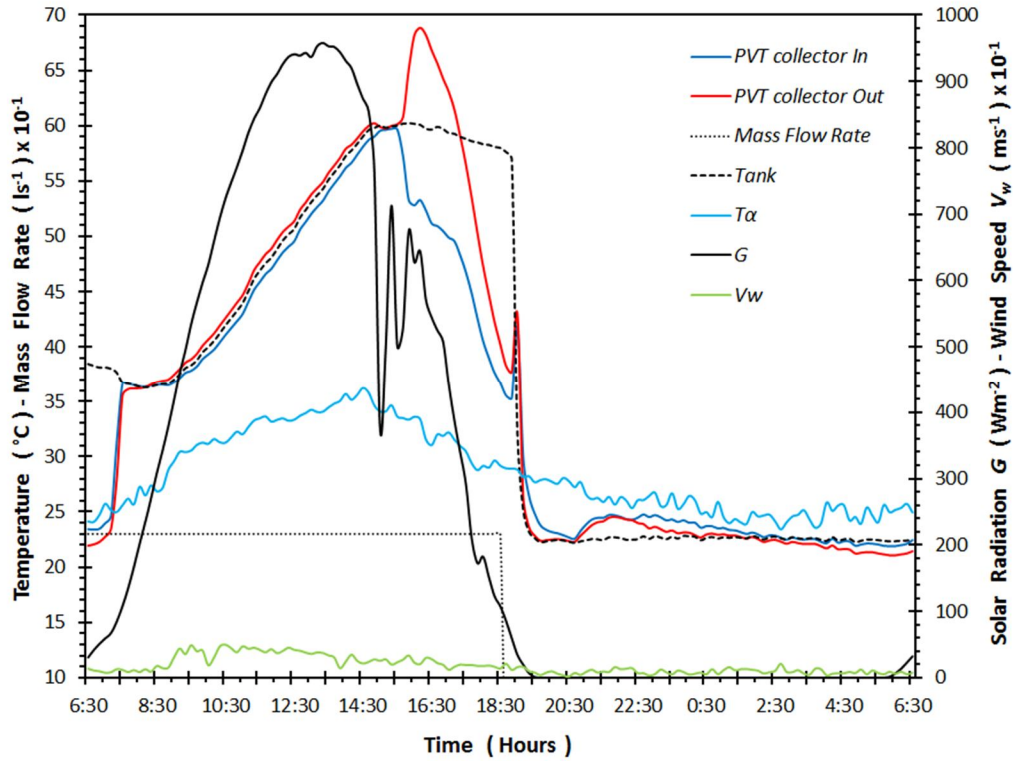
Σχήμα 4.3: Εξάρτηση της ηλεκτρικής απόδοσης από την θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου

4.3.2 Αποτελέσματα δοκιμών του συστήματος PV/T με δοχείο αποθήκευσης

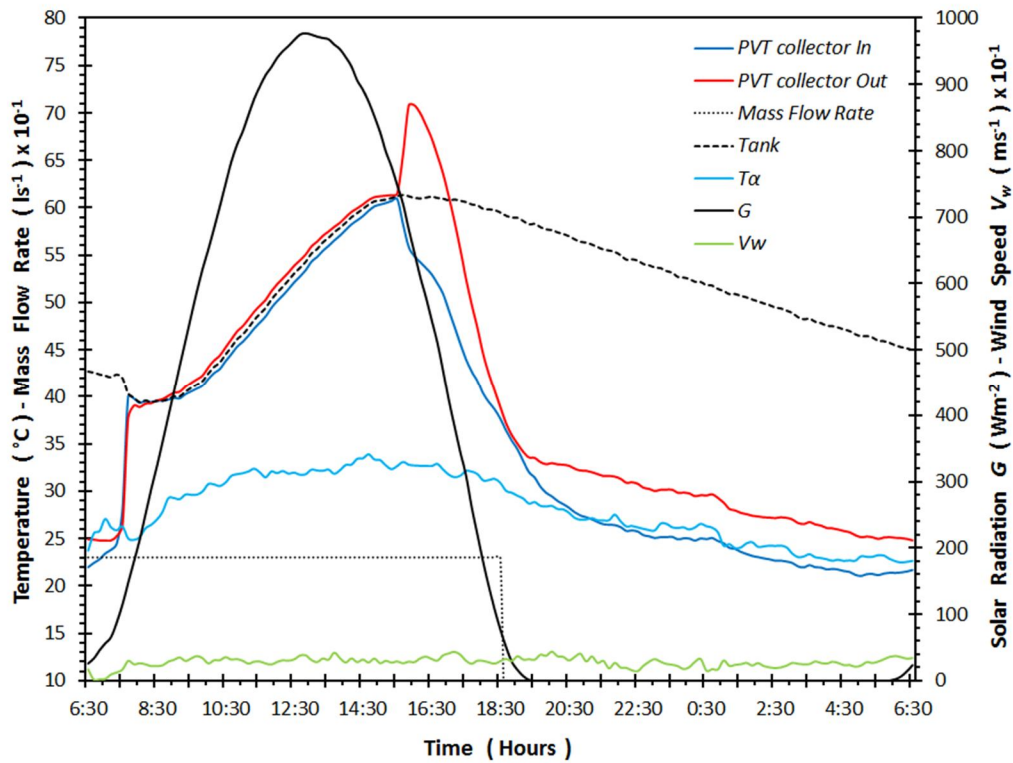
Η πειραματική διαδικασία ολοκληρώθηκε με τις δοκιμές του υβριδικού φωτοβολταϊκού / θερμικού συστήματος με το δοχείο αποθήκευσης για βεβαιωμένη κυκλοφορία του ρευστού απολαβής. Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών του εν λόγω συστήματος η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια καταναλωνόταν σε ένα ηλεκτρικό φορτίο αντίστασης 3 Ω. Στα σχήματα 4.4 έως 4.7 παρουσιάζονται οι μεταβολές διαφόρων φυσικών μετρούμενων παραμέτρων στη διάρκεια της λειτουργίας του PV/T συστήματος κάτω από πραγματικές συνθήκες, σύμφωνα με την περιγραφή που έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά διαπιστώνεται αρχικά ότι η θερμοκρασία του νερού αποθήκευσης κυμαίνεται σε επίπεδα κατά τα οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι τουλάχιστον ικανοποιητικά, καθώς η επιτεύξιμη θερμοκρασία υπερβαίνει την τιμή που θεωρείται αποδεκτή για συστήματα θέρμανσης νερού για οικιακές εφαρμογές. Αυτό παρατηρείται ακόμα και στην περίπτωση που η θερμοκρασία εκκίνησης του συστήματος είναι χαμηλή (25 °C, Σχ. 4.4). Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η θερμοκρασία εκκίνησης του συστήματος βρίσκεται σε υψηλότερες τιμές, η τελική μέγιστη θερμοκρασία του νερού αποθήκευσης υπερβαίνει τους 60 °C (Σχ. 4.5 έως 4.7).



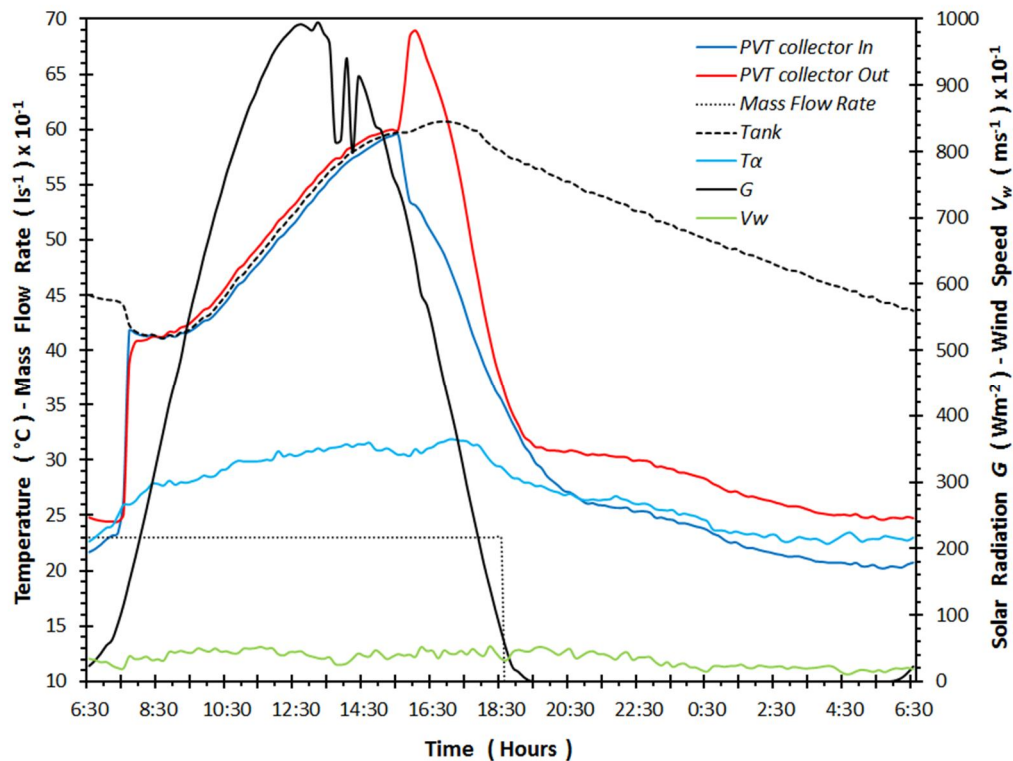
Σχήμα 4.4: Διακύμανση της θερμοκρασίας εντός του δοχείου αποθήκευσης στη διάρκεια ημερήσιας λειτουργίας της συσκευής για αρχική θερμοκρασία 25 °C



Σχήμα 4.5: Διακόμανση της θερμοκρασίας εντός του δοχείου αποθήκευσης στη διάρκεια ημερήσιας λειτουργίας της συσκευής για αρχική θερμοκρασία 35 °C

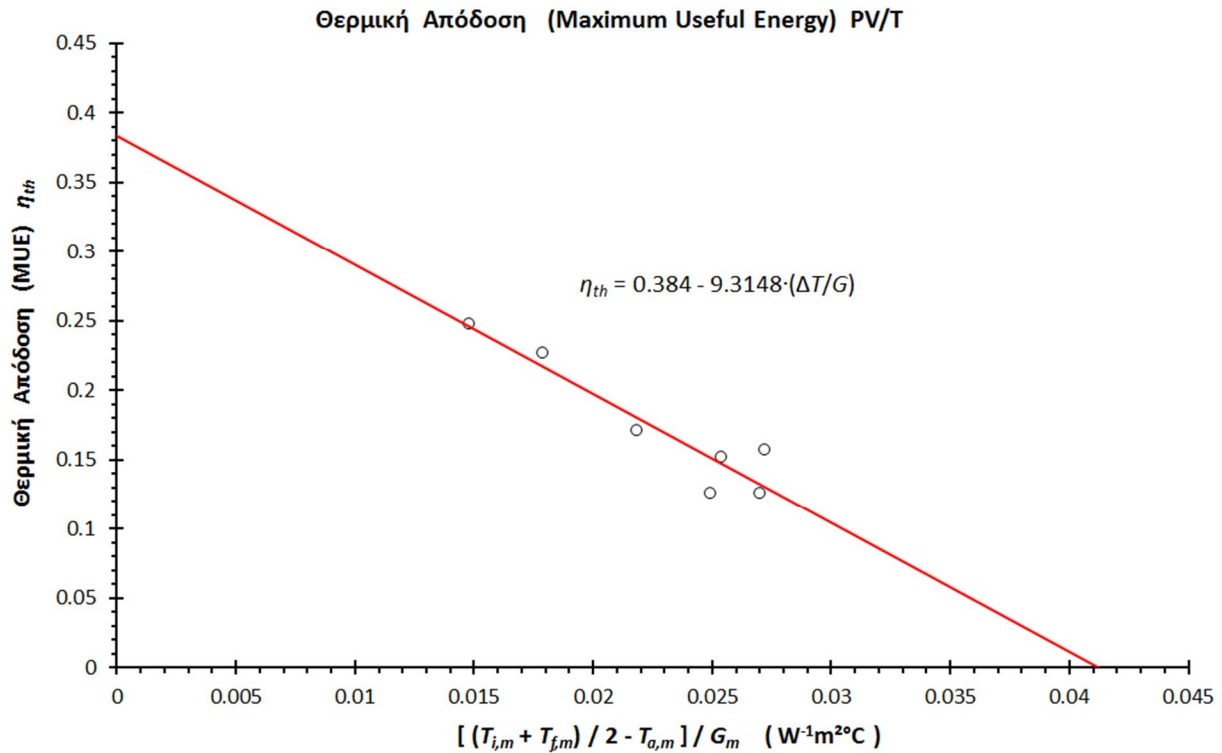


Σχήμα 4.6: Διακόμανση της θερμοκρασίας εντός του δοχείου αποθήκευσης στη διάρκεια ημερήσιας λειτουργίας της συσκευής για αρχική θερμοκρασία 40 °C



Σχήμα 4.7: Διακύμανση της θερμοκρασίας εντός του δοχείου αποθήκευσης στη διάρκεια ημερήσιας λειτουργίας της συσκευής για αρχική θερμοκρασία μεγαλύτερη των 40 °C

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών σε συνεχόμενες αλλά και διαφορετικές ημέρες λειτουργίας της συσκευής υπολογίστηκε η μέση μέγιστη θερμική απόδοση του συστήματος, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Πρέπει να τονιστεί ότι επιλέχθηκε να καταγραφούν αποτελέσματα του υβριδικού PV/T συστήματος με τη χρήση του διαφανούς καλύμματος υψηλής διαπερατότητας. Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέγιστης μέσης θερμικής απόδοσης του συστήματος συλλέκτη –αποθήκης θερμότητας για δεδομένες συνθήκες λειτουργίας του. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά διαπιστώνεται αρχικά ότι συγκριτικά με την απόδοση που παρουσιάζουν τα ηλιακά θερμικά συστήματα βεβιασμένης κυκλοφορίας ρευστού, για παρόμοιες παροχές μάζας ρευστού απολαβής, οι τιμές της απόδοσης του συστήματος κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα. Αυτό οφείλεται σε περιορισμούς της θερμικής απολαβής θερμότητας από το ρευστό απολαβής, σύμφωνα με τη φυσική διεργασία κατά τη μετάδοση θερμότητας, αρχικά, από την επιφάνεια του πλαισίου στο, τελικά, δοχείο αποθήκευσης. Για τις εφαρμογές που προορίζεται το υβριδικό PV/T σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ότι η απόδοσή του κρίνεται ικανοποιητική. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που μετρήθηκαν για τα εν λόγω πειράματα.



Σχήμα 4.8: Καμπύλη μεταβολής της θερμικής απόδοσης η_{th} (Maximum Useful Energy) συναρτήσει του $\Delta T / G_m$

T_{i,m}	T_{f,m}	T_{a,m}	G_m	ΔT/ΔG	n_{th}
36.28	60.24	32.59	718.25	0.02182	0.1712
22.65	55.94	27.75	646.13	0.01787	0.2266
38.76	60.93	29.31	754.77	0.02721	0.1573
21.99	57.35	30.4	627.41	0.01478	0.2479
39.4	61.34	31.17	756.1	0.02539	0.1521
41.09	60.74	30.14	768.98	0.02702	0.1259
41.53	59.2	29.36	842.21	0.02494	0.126

Πίνακας 4.1: Πειραματικών Αποτελεσμάτων για τον υπολογισμό της μέγιστης ωφέλιμης Θερμικής Απόδοσης της ηλιακής συσκευής

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσα από την διαδρομή για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, ξεκινώντας από τη βασική βιβλιογραφία στην πρώτη επαφή με αυτό το γνωστικό αντικείμενο, ακολούθως με τα επιστημονικά άρθρα για την εμβάθυνση και τέλος από τις επαφές που πραγματοποιήθηκαν με επιστήμονες που δραστηριοποιούνται στον κλάδο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έγινε κατανοητό πως οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης ορυκτών πόρων αλλά συγχρόνως και η αύξηση ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών της ανθρωπότητας οδήγησαν την επιστημονική κοινότητα σε νέες τεχνολογίες εκμετάλλευσης πλέον των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Μία από τις τεχνολογίες αυτές είναι και το αντικείμενο μελέτης της εργασίας αυτής ,τα υβριδικά φωτοβολταϊκά / θερμικά συστήματα νερού παρότι, στην παρούσα φάση υπάρχει επιφυλακτικότητα ως προς την ευρύτερη εξάπλωση τους, στο μέλλον θα αποτελέσουν σίγουρα μια λύση για την λεγόμενη πράσινη ενέργεια. Η συνεχής βελτίωση των βαθμών απόδοσης τους καθώς και η σταδιακή μείωση του κόστους τους, λόγω της συνεχούς ανάπτυξης της τεχνολογία κατασκευής των ημιαγωγών των φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθιστά την τεχνολογία αυτή πολλά υποσχόμενη για το μέλλον. Τα πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων έναντι των χωριστών συστημάτων (φωτοβολταϊκά και θερμικοί συλλέκτες) για την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι η δυνατότητα εγκατάστασης τους σε αστικό περιβάλλον, ο μικρός τους όγκος, η δυνατότητα τους για ενσωμάτωση σε κτήρια υπό μορφή δομικών στοιχείων και οι αισθητικές λύσεις που παρέχουν. Το σημαντικότερο όμως πλεονέκτημά τους είναι ότι το γεγονός πως στον ίδιο διαθέσιμο χώρο μπορούμε να πετύχουμε την συμπαραγωγή θερμότητας υπό μορφή ζεστού νερού και ηλεκτρισμού σε συνολικά επίπεδα αποδόσεων που πλησιάζουν σχεδόν το άθροισμα των αποδόσεων των χωριστών συστημάτων.

Με το πέρας της διπλωματικής αυτής εργασίας, καταλήξαμε σε μια σειρά από αποτελέσματα, τα οποία συνοψίζονται στα εξής:

Στο υβριδικό φωτοβολταϊκό / θερμικό σύστημα που κατασκευάστηκε - συναρμολογήθηκε και μελετήθηκε η θερμική απόδοση, για λειτουργία σε σταθερές συνθήκες, χωρίς γυάλινο διαφανές κάλυμμα είναι 34% και αυξάνεται κατά 28% με την προσθήκη καλύμματος και καταλήγει στην τελική τιμή του 47.5%. Στην περίπτωση που τοποθετείται γυάλινο διαφανές κάλυμμα με υψηλή διαπερατότητα η αντίστοιχη θερμική απόδοση του συστήματος φτάνει στην τιμή 49%, δηλαδή αυξάνεται κατά 31% κάτι που είναι αρκετά ικανοποιητικό. Οι τιμές αυτές αφορούν μέσες θερμοκρασίες λειτουργίας του συστήματος.

Η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος, μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Αν λάβουμε ως θερμοκρασία αναφοράς τους 25 °C, τότε για λειτουργία χωρίς γυάλινο κάλυμμα είναι 14.73% ενώ τοποθετώντας κάλυμμα μειώνεται και γίνεται 12.83%. με το κάλυμμα με τα καλύτερα οπτικά χαρακτηριστικά (υψηλή διαπερατότητα) μειώνεται σημαντικά λιγότερο και γίνεται 13.86%.

Όπως φαίνεται από τα πειραματικά αποτελέσματα το βασικό πρόβλημα με τα υβριδικά φωτοβολταϊκά / θερμικά συστήματα, είναι ότι προσπαθώντας να επιτευχθεί περισσότερη θερμότητα σε υψηλότερη θερμοκρασία, λαμβάνεται λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια, λόγω της τοποθέτησης του γυάλινου καλύμματος. Τοποθετώντας όμως γυάλινο διαφανές κάλυμμα με υψηλή τιμή διαπερατότητας η μέση ηλεκτρική απόδοση ελαττώνεται μόνο κατά 6%, σε σχέση με το σύστημα χωρίς κάλυμμα, για το κοινό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας των δύο συστημάτων.

Από τις τιμές που δόθηκαν παραπάνω για την θερμική απόδοση φαίνεται πως η συσκευή που μελετήθηκε είναι ικανοποιητικά αποδοτική στο εύρος των θερμοκρασιών για το οποίο προορίζεται, για χρήση δηλαδή ζεστού νερού (40-60°C) καθώς παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας θερμού νερού στο δοχείο αποθήκευσης για όλες τις αρχικές θερμοκρασίες του νερού εντός του δοχείου αποθήκευσης. Το σύστημα μελετήθηκε για αρχικές θερμοκρασίες 25 °C, 35 °C, 40 °C και πάνω από 40 °C και σε όλες τις περιπτώσεις η θερμοκρασία του θερμού νερού στο δοχείο αποθήκευσης έφτασε σε θερμοκρασίες κοντά στους 60 °C.

Ακόμα παρατηρήθηκε πως για την δεδομένη αναλογία όγκου θερμού νερού στο δοχείο αποθήκευσης προς την συλλεκτική επιφάνεια, η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος κυμαίνεται σε υψηλότερα επίπεδα συγκριτικά με ένα απλό φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πρόγραμμα λειτουργίας του Data Logger

:{CR10X}

;

*Table 1 Program

01: 30 Execution Interval (seconds)

1: Temp (107) (P11)

1: 1 Reps

2: 1 SE Channel

3: 3 Excite all reps w/E3

4: 33 Loc [Ref]

5: 1.0 Mult

6: 0.0 Offset

2: Volt (Diff) (P2)

1: 1 Reps

2: 33 25 mV 50 Hz Rejection Range

3: 5 DIFF Channel

4: 34 Loc [Pyrano]

5: 91.14 Mult

6: 0.0 Offset

3: Pulse (P3)

1: 1 Reps

2: 1 Pulse Channel 1

3: 21 Low Level AC, Output Hz

4: 35 Loc [Anemo]

5: 0.8081 Multiplier

6: 0.0 Offset

4: Do (P86)

1: 41 Set Port 1 High

5: Beginning of Loop (P87)

1: 0 Delay

2: 16 Loop Count

6: Do (P86)

1: 72 Pulse Port 2

7: Step Loop Index (P90)

1: 2 Step

8: Thermocouple Temp (DIFF) (P14)

1: 2 Reps

2: 32 7.5 mV 50 Hz Rejection Range

3: 2 DIFF Channel

4: 1 Type T (Copper-Constantan)

5: 33 Ref Temp (Deg. C) Loc [Ref]

6: 1 -- Loc [T1_1]

7: 1 Mult

8: 0.0 Offset

9: End (P95)

10: Do (P86)

1: 51 Set Port 1 Low

11: If time is (P92)

- 1: 0 Minutes (Seconds --) into a
- 2: 10 Interval (same units as above)
- 3: 10 Set Output Flag High (Flag 0)

12: Average (P71)^18022

- 1: 35 Reps
- 2: 1 Loc [T1_1]

13: Serial Out (P96)

- 1: 41 Printer ASCII/1200 Baud

14: Real Time (P77)^15586

- 1: 0110 Day,Hour/Minute (midnight = 0000)

End Program

*Table 2 Program

- 02: 0.0000 Execution Interval (seconds)

*Table 3 Subroutines

End Program

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Σ.Ν.Καπλάνης ΗΠΠΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΙ Ηλιακή Μηχανική Εκδόσεις ΙΩΝ

Σ.Ν.Καπλάνης ΗΠΠΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΙΙ Μηχανική των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων (Τεχνολογία, Μελέτες, Εφαρμογές) Εκδόσεις ΙΩΝ

T.N. Anderson a, M. Duke a, G.L. Morrison b, J.K. Carson (2009) Performance of a building integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) solar collector Solar Energy 83 445–455

Al-Baali A. A. (1986) Improving the power of a solar panel by cooling and light concentrating. Solar and Wind Technology 3, 241–245.

Bergene T. and Lovvik O. M. (1995) Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. Solar Energy 55, 453 –462.

Bhargava A. K., Garg H. P. and Agarwal R. K. (1991) Study of a hybrid solar system – solar air heater combined with solar cells. Energy Convers. Mgmt. 31, 471–479.

Brogren M., Ronnelid M. and Karlson B. (2000) PV–Thermal hybrid low concentrating CPC module. In Proc. 16th European PV Solar Energy Conf., Glasgow, UK. Vol. III, 2121–2124.

Charalambous P.G., Maidment G.G., Kalogirou S.A., Yiakoumetti K. (2007) Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review. Applied Thermal Engineering 27, 275–286

Christian Cristofari, Gilles Notton , Jean Louis Canaletti (2009) Thermal behavior of a copolymer PV/Th solar system in low flow rate conditions Solar Energy 83 1123–1138

Chow T.T. (2003) Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. Solar Energy 75, 143–152

Chow T.T., He W., Ji J. (2007) An experimental study of facade-integrated photovoltaic/water-heating system Applied Thermal Engineering 27, 37–45

Chow T.T., He W., Ji J., (2006) Performance evaluation of photovoltaic–thermosyphon system for subtropical climate application. Solar Energy 78, 591–601

Garg H. P. and Adhikari R. S. (1997) Conventional hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) air heating collectors: steady-state simulation. Renewable Energy 11, 363–385.

Garg H. P. and Adhikari R. S. (1999) Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs. Int. J. Energy Res. 23, 1295–1304.

Garg H. P., Agarwal R. K. and Bhargava A. K. (1991) The effect of plane booster reflectors on the performance of a solar air heater with solar cells suitable for a solar dryer. Energy Convers. Mgmt. 32, 543–554.

- Garg H.P., Agarwal R.K. and Joshi J.C. (1994) Experimental study on a hybrid photovoltaic – thermal solar water heater and its performance predictions Energy Convers. Mgmt Vol. 35, No. 7, pp. 621-633
- Guiavarch Alain, Peupartier Bruno (2006) Photovoltaic collectors efficiency according to their integration in buildings. Solar Energy 80, 65–77
- Hammad M.A. (1994) Experimental study of the performance of a solar thermal- photovoltaic intergrated system. Renewahh, Energy Vol. 4, No. 8, pp 897-905
- Hauser T. and Rogash H. (2000) Latent heat storage on photovoltaics. In Proc. 16th European PV Solar Energy Conf. Glasgow, U.K. Vol. III, 2265–2267
- He Wei, Chow Tin-Tai, Ji Jie, Lu Jianping, Pei Gang, Chan Lok-shun (2006) Hybrid photovoltaic and thermal solar-collector designed for natural circulation of water. Applied Energy 83, 199–210
- Hendrie S. D. (1979) Evaluation of combined photovoltaic/ thermal collectors. In Proc. ISES Int. Congress, Atlanta, USA, Vol. 3, 1865–1869
- Huang B.J., Lin T.H., Hung W.C. and Sun F.S. (2001) Performance evaluation of solar photovoltaic/ thermal systems. Solar Energy Vol. 70, No. 5, pp. 443–448
- Ji Jie Lu Jian-Ping, Chow Tin-Tai, He Wei, Gang Pei (2007) A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation Applied Energy 84, 222–237
- Jones D. and Underwood C.P. (2001) A thermal model for photovoltaic systems Solar Energy Vol. 70, No. 4, pp. 349–359
- Kalogirou S.A. and Tripanagnostopoulos Y. (June 2007) Industrial application of PV/T solar energy systems Applied Thermal Engineering, Volume 27, Issues 8-9, Pages 1259- 1270
- Kalogirou S.A. and Tripanagnostopoulos Y. (November 2006) Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production Energy Conversion and Management, Volume 47, Issues 18-19, Pages 3368-3382
- Kern Jr. E. C. and Russell M. C. (1978) Combined photo-voltaic and thermal hybrid collector systems. In Proc. 13th IEEE Photovoltaic Specialists, Washington DC, USA, 1153–1157
- Krauter S., Hanitsch R.(1996) Actual optical and thermal performance of PV-modules Solar Energy Materials and Solar Cells 41/42, 557-574
- Kribus Abraham , Kaftori Daniel, Mittelman Gur, Hirshfeld Amir (2006) A miniature concentrating photovoltaic and thermal system. Energy Conversion and Management 47, 3582–3590

Kumar Ram and Garg H.P. (1994) Study of a photovoltaic- thermal system- thermosyphonic solar water heater combined with solar cells. *Energy Convers. Mgmt* Vol. 35, No. 7, pp. 605-620

Lamberski T.J., 1984. "Electrical design guidelines for photovoltaic/thermal systems" 17th IEEE

Lalovic B. (1986) A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector. *Solar Cells* 19, 131–138

Loferski J. J., Ahmad J. M. and Pandey A. (1988) Performance of photovoltaic cells incorporated into unique hybrid photovoltaic/thermal panels of a 2.8 KW residential solar energy conversion system. In *Proc. of the 1988 Annual Meeting, American Solar Energy Society, Cambridge, Massachusetts*, 427–432

Nagano K., Mochida T., Shimakura K., Murashita K., Takeda S. (2003) Development of thermal-photovoltaic hybrid exterior wallboards incorporating PV cells in and their winter performances *Solar Energy Materials & Solar Cells* 77, 265–282

Prakash J. (1994) Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/ water. *Energy Convers. Mgmt.* 35, 967–972

Rockendorf Gunter, Sillmann Roland, Podlowski Lars (1999) PV- Hybrid and thermoelectric collectors. *Solar Energy* Vol. 67, Nos. 4–6, pp. 227–237

Rosell J.I., Vallverdu X., Lecho M.A., Ibanez M. (2005) Design and simulation of a low concentrating photovoltaic/thermal system. *Energy Conversion and Management* 46, 3034–3046

Sandnes Bjornar and Rekstad John. (2002) A photovoltaic / thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. *Solar Energy* Vol. 72, No. 1, pp. 63–73, 2002

Segal Akiba, Epstein Michael, Yogev Amnon (2004) Hybrid concentrated photovoltaic and thermal power conversion at different spectral bands. *Solar Energy* 76, 591–601

Smith D.R., biringer K.L., Pritchard D.A., 1978. "Combined photovoltaic thermal collector testing"

Sopian K., Liu H. T., Kakac S. and Veziroglu T. N. (1996) Performance of a hybrid photovoltaic thermal solar collector. In *Proc. ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exhibition, Atlanta, USA, AES Vol. 36, 341–346*

Sopian K., Liu H. T., Yigit K. S., Kakac S. and Veziroglu T. N. (1995) An investigation into the performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector. In *Proc. ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exhibition, San Francisco, USA, AES Vol. 35, 89–94*

Swapnil Dubey, G.N. Tiwari (2008) Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater *Issue 7, 602-612*

Swapnil Dubey, G.N. Tiwari (2009) Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid air collector Applied Energy Vol. 86, 697–705

Takashima T., Tanaka T., Doi T., Kamoshida J., Tani T. and Horigome T. (1994) New proposal for photovoltaic–thermal solar energy utilization method. Solar Energy 52, 241–245

Tiwari Arvind, Sodha M.S. (2006) Performance evaluation of solar PV/T system: An experimental validation. Solar Energy 80,751–759

Tonui J.K. and Tripanagnostopoulos Y. (April 2007) Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements Solar Energy, Volume 81, Issue 4, Pages 498-511

Tonui J.K. and Tripanagnostopoulos Y. (April 2007) Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation Renewable Energy, Volume 32, Issue 4, Pages 623-637

Tonui J.K. and Tripanagnostopoulos Y. (20 July 2007) Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation Solar Energy, In Press, Corrected Proof

Tripanagnostopoulos Y. (2006) Cost effective designs for building integrated PV/T solar systems Presented in 21st European PV Solar Energy Conf. Dresden, Germany 4-6 Sep

Tripanagnostopoulos Y. (2007) Linear fresnel lenses with photovoltaics for cost effective electricity generation and solar control of buildings”. Proc. Int. Conference ICSC-4, El Escorial, Spain, 12-14 March

Tripanagnostopoulos Y. (September 2007) Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems Solar Energy, Volume 81, Issue 9, Pages 1117-1131

Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th. and Souliotis. (2000) M. Low cost improvements to building integrated air cooled hybrid PV-Thermal systems Proc. 16th European PV Solar Energy Conf. pp.1874-1877, Glasgow, U.K. 1-5 May

Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M. and Yianoulis P. (March 2002) Hybrid photovoltaic/thermal solar systems Solar Energy, Volume 72, Issue 3Pages 217-234

Tripanagnostopoulos Y., Souliotis M., Tselepis S., Dimitriou V., Makris Th. (2005) Design and performance aspects for low concentration photovoltaics” In CD Proc. 20th European PV Solar Energy Conf. Barcelona 6-10 June

Tripanagnostopoulos Y., Tselepis , Souliotis M., Tonui J.K. (2004) Design aspects of hybrid PVT/AIR solar systems. Presented in 19th Eur. PV Solar Energy Conf. Paris 7–11 June

Tripanagnostopoulos Y., Yianoulis P. and Patrikios D. (1996) Hybrid PV–TC solar systems. In Proc. of Int. Conf. WREC IV, Denver, USA, 505–508.

Tripanagnostopoulos Y. and Iliopoulou A. (Sep 2007). Improved designs for low concentration photovoltaics” Int Conf. 22nd PVSEC, Milan, Italy, 3-7

Tselepis S. and Tripanagnostopoulos Y.. (2002). Economic analysis of hybrid photovoltaic/thermal solar systems and comparison with standard PV modules. Presented in Int. Conf. PV in Europe, Rome, Italy, pp. 856 – 859

Vorobiev Yu., Gonzalez-Hernandez J., Vorobiev P., Bulat L. (2006) Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion. Solar Energy 80, 170–176

Wolf M., (1976). Performance analyses fo combined heating and photovoltaic power systems for residences , Energy Conversion Vol 16, 79-90

Zakharchenko R., Licea-Jimenez L., Perez-Garcia S.A., Vorobiev P., Dehesa-Carrascoc U. (2004) Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system. Solar Energy Materials & Solar Cells 82, 253–261

H.A. Zondag (2008) Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 891–959