

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΥΔΡΙΒΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΝΕΡΟΥ.

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΝΙΚΗΤΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2014

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....</b>	<b>2</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>5</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....</b>	<b>7</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο – Βασικές Αρχές .....</b>	<b>8</b>
1.1  Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .....	8
1.2  Ηλιακή ενέργεια - Χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης .....	9
1.3  Ιστορική αναδρομή των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	11
1.4  Ηλιακή Γεωμετρία.....	13
1.5  Ηλιακές κυψέλες – Βασικές αρχές – Λειτουργία .....	14
<b>Κεφάλαιο 2ο - Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....</b>	<b>17</b>
2.1 Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	17
2.1.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	17
2.1.2 Η επίδραση της Ηλιακής ακτινοβολίας.....	18
2.1.3 Μοντέλα φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	18
2.1.4 Παράγοντες που επηρεάζουν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο .....	21
2.2 Επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φ/β στην ηλεκτρική απόδοση .....	22
2.3 Βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	24
<b>Κεφάλαιο 3ο - Υβριδικά φωτοβολταϊκά Θερμικά Ηλιακά Συστήματα.....</b>	<b>25</b>
3.1 Εισαγωγή .....	25
3.2 Τύποι φωτοβολταϊκών /θερμικών συστημάτων .....	27
3.2.1. Φωτοβολταϊκά / θερμικά συστήματα αέρα.....	27
3.2.2 Φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα νερού .....	28
<b>Κεφάλαιο 4ο - Υβριδικό Φωτοβολταϊκό Θερμικό Σύστημα Νερού .....</b>	<b>32</b>

4.1	Ιστορική αναδρομή για υβριδικό φωτοβολταϊκό θερμικό σύστημα νερού .....	32
4.2	Ανάγκες ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών θερμικών συστημάτων 38	
4.3	Πειραματικά μοντέλα ΦΒ/Θνερού και αέρα.....	39
<b>Κεφάλαιο 5ο – Συμπεράσματα.....</b>		<b>44</b>
5.1	Κάλυψη αναγκών.....	44
5.2	Οικονομική θεώρηση.....	47
5.3	Επίλογος.....	50
<b>Βιβλιογραφία.....</b>		<b>53</b>

## Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1:	Η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το θερινό και το χειμερινό ηλιοστάσιο.....	13
Σχήμα 2:	Σχηματική απεικόνιση ΦΒ/Θ συλλέκτη.....	15
Σχήμα 3:	Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο σε μια ηλιακή κυψέλη.....	16
Σχήμα 4:	Μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	19
Σχήμα 5:	Χαρακτηριστική καμπύλη I-V και I-P του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	21
Σχήμα 6:	Δημιουργία διόδου .....	24
Σχήμα 7:	Μηχανισμός φωτοβολταϊκού φαινομένου.....	24
Σχήμα 8:	Διατομή επίπεδου συλλέκτη.....	29
Σχήμα 9:	Τύποι συλλέκτη φβ/θ νερού .....	31
Σχήμα 10:	Τρεις τρόποι τοποθέτησης του εναλλάκτη νερού.....	40
Σχήμα 11:	Πειραματικά αποτελέσματα θερμικής απόδοσης των τριών τρόπων παραγωγής της θερμότητας με νερό και αέρα.....	43
Σχήμα 12:	Σύγκριση της ημερήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και της παραγωγής ηλιακού ηλεκτρισμού.....	44
Σχήμα 13:	Σύγκριση της ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και της παραγωγής ηλιακού ηλεκτρισμού.....	45
Σχήμα 14 :	Σύγκριση του παραγόμενου θερμικού φορτίου των διαφόρων διατάξεων ΦΒ/Θ συσκευών με τις θερμοσιφωνικές ανάγκες για διαμέρισμα τεσσάρων ατόμων.....	46

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Οι πρότυπες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα (Air Mass) .....	10
Πίνακας 2: Θερμικές ανάγκες που απαιτούνται ανά μήνα για διαμέρισμα τεσσάρων ατόμων .....	46
Πίνακας 3: Κόστος αγοράς κάθε συστήματος .....	48
Πίνακας 4: Ετήσιου κέρδους, ετήσιας απόσβεσης, και τελικού αποτελέσματος .....	49

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Πρακτικά παραδείγματα φβ/θ συστημάτων αέρα .....	28
Εικόνα 2: Πρακτικά παραδείγματα φβ/θ συστημάτων νερού.....	29
Εικόνα 3: Συγκεντρωτικό φβ/θ σύστημα.....	31
Εικόνα 4: Επίπεδοι συλλέκτες .....	32

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή γίνεται λόγος για τα υβριδικά φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα γενικότερα και τα φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα νερού πιο ειδικά. Αφού εξηγούνται οι λόγοι ανάπτυξης τους καθώς και το φωτοβολταϊκό φαινόμενο που διέπει την λειτουργία τους, παρουσιάζονται τα πιο διαδομένα συστήματα για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Επίσης γίνεται εκτενής ιστορική αναδρομή στα συστήματα αυτά μέσω της βιβλιογραφικής αναφοράς καθώς επίσης υπογραμμίζεται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται η απόδοση των συστημάτων αυτών. Αναλύονται οι ανάγκες ανάπτυξης τους και αναφέρονται κάποια πειραματικά μοντέλα. Τέλος, βγαίνουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα όσον αναφορά στην κάλυψη των αναγκών σε συνάρτηση με την ηλεκτρική και θερμική παραγωγή καθώς και ως προς την οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων αυτών.

**Keywords:** ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ηλιακή ενέργεια, φωτοβολταϊκά (ΦΒ), φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα (ΦΒ/Θ), απόδοση.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας κ. Σταθάτο Ηλία, για την καθοδήγησή του και την πολύτιμη συμβολή του σε κάθε φάση της δημιουργίας της. Επίσης θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου, που όλα αυτά τα χρόνια μου συμπαραστέκεται ηθικά και οικονομικά και διαμορφώνει γύρω μου ένα άνετο περιβάλλον, μέσα στο οποίο μπορώ να εργαστώ και να επεκτείνω τις γνώσεις μου.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται εισαγωγικά σχετικά με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, την ηλιακή ακτινοβολία και τα χαρακτηριστικά της στην επιφάνεια της γης. Στη συνέχεια γίνεται ιστορική αναδρομή όσον αφορά στα φωτοβολταϊκά στοιχεία και στην Ηλιακή γεωμετρία, καθώς επίσης αναφέρονται στοιχεία για τις Ηλιακές κυψέλες τις βασικές αρχές και τη λειτουργία τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται λόγος για τα φωτοβολταϊκά συστήματα, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο καθώς και για τους παράγοντες που το επηρεάζουν. Αναλύεται η επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στην ηλεκτρική απόδοση καθώς αναφέρονται και βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Το τρίτο κεφάλαιο ασχολείται με τα φωτοβολταϊκά θερμικά Ηλιακά συστήματα, και αναφέρει τύπους αυτών όπως τα φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα αέρα και τα φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα νερού. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του δεύτερου συστήματος πιο ενδελεχώς.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο, εξάγονται κάποια συμπεράσματα και ως προς την οικονομική θεώρηση του θέματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο – Βασικές Αρχές

### 1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι 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, το μετασχηματισμό 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 (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs, SF<sub>6</sub>) 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). (Νικολακοπούλου, 2012)

## **1.2 Ηλιακή ενέργεια - Χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης**

Πέρα από τη γεωγραφική θέση και το υψόμετρο, η τελική μορφή και η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης, διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες και κυρίως τη θέση του ήλιου στον ουρανό και την περιεκτικότητα της υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Συμβατικά, το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα μέχρι τη στάθμη της θάλασσας, που είναι άμεση συνέπεια της θέσης του ήλιου,

χαρακτηρίζεται από μια κλίμακα μάζας αέρα AM (Air Mass, ονομάζεται επίσης οπτική αέρια μάζα) βαθμονομημένης με την τέμνουσα (το αντίστροφο του συνημίτονου) της ζενιθιακής απόστασης ( $\zeta$ ), δηλαδή της γωνίας ανάμεσα στη θέση του ήλιου και στην κατακόρυφο. Δηλαδή η κλίμακα της μάζας αέρα δείχνει ουσιαστικά πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της.

Συγκεκριμένα, ως AM1 συμβολίζεται η συνθήκη για τη θέση του ήλιου στην κατακόρυφο, στο ζενίθ, που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Όμοια, ως AM1,5 συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον ήλιο σε γωνία 45ο από το ζενίθ, ως AM2 με τον ήλιο σε γωνία 60οκ.λ.π. Το μηδέν της κλίμακα AM0 συμβολίζει την πλήρη απουσία ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα σε θέση που να απέχει όση είναι η μέση απόσταση της γης από τον ήλιο. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι πυκνότητες της ισχύος και η μέση ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες πρότυπες τιμές της στην κλίμακα αέρα (Air Mass). (Καλαμάρας, 2007)

Τιμή μάζας αέρα	Συμβατικές συνθήκες	Ισχύς ( $W/m^2$ )	Μέση ενέργεια των φωτονίων (eV)
AM0	Στο διάστημα, έξω από την ατμόσφαιρα	1350	1,48
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα	1060	1,32
AM2	Απόσταση του ήλιου 60° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	880	1,38
AM3	Απόσταση του ήλιου 70,5° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα	750	1,21

Πίνακας 1: Οι πρότυπες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα (Air Mass)

### 1.3 Ιστορική αναδρομή των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία, γνωστά ως “φωτοβολταϊκά” ή “Φ/Β”, αποτελούν μια προσέγγιση υψηλής τεχνολογίας για την άμεση μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο όρος “φωτό” προέρχεται από το φως, το δε “βόλτ” οφείλεται στον Ιταλό φυσικό Alessandرو Volta (1745-1827), ένα πρωτοπόρο στη μελέτη του ηλεκτρισμού, ο οποίος εφεύρε τη μπαταρία. Η ανακάλυψη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου αποδίδεται στο Γάλλο φυσικό, Henry Becquerel, ο οποίος δημοσίευσε το 1839 μια εργασία του, όπου περιέγραφε πειράματα που έκανε με μια μπαταρία υγρού, στην διάρκεια των οποίων διαπίστωσε ότι η τάση του συσσωρευτή αύξανε όταν οι πλάκες από υγρό εκτίθενται στο ηλιακό φως.

Έτσι, “φωτοβολταϊκό” στην κυριολεξία σημαίνει “φωτο-ηλεκτρικό”. Εννοιολογικά, στην απλούστερη της μορφή μια Φ/Β διάταξη είναι μία ηλιακά τροφοδοτούμενη μπαταρία, όπου το μόνο αναλώσιμό της είναι το φως που την τροφοδοτεί. Δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη, η λειτουργία είναι φιλική προς το περιβάλλον και εάν η διάταξη προστατεύεται σωστά από την επίδραση του περιβάλλοντος, κανένα τμήμα της δεν υφίσταται φθορά.

Το 1871 οι Adams και Day, περιέγραψαν τις μεταβολές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του σεληνίου όταν αυτό εκτίθεται στο φως. Το σελήνιο είναι ένα μη-μεταλλικό στοιχείο, παρόμοιο με το θείο. Το 1883 ο Charles Edgar Fritts, ηλεκτρολόγος από τη Νέα Υόρκη, κατασκεύασε ένα ηλιακό στοιχείο από σελήνιο το οποίο, σε γενικές γραμμές παρουσίαζε ομοιότητες με τα σημερινά Φ/Β στοιχεία από πυρίτιο. Το ηλιακό στοιχείο ήταν κατασκευασμένο από λεπτά στρώματα σεληνίου με κάλυψη από λεπτά ημιδιαφανή χρυσά σύρματα και φύλο γυαλιού για προστασία. Όμως ο βαθμός απόδοσης ήταν πολύ μικρός.

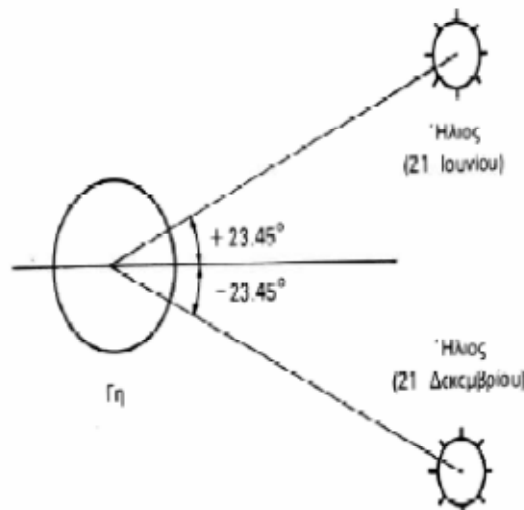
Το 1948, δύο ερευνητές οι Bardeen και Brattain, κατασκεύασαν μια επαναστατική συσκευή με ημιαγωγούς, το transistor. Τα transistor κατασκευάζονται σε καθαρή κρυσταλλική μορφή, όπου εισάγονται προσεκτικά πολύ μικρές ποσότητες προσμίξεων, όπως το βόριο ή ο φωσφόρος (διαδικασία γνωστή ως doping). Οι ημιαγωγοί είναι μη μεταλλικά υλικά όπως, το πυρίτιο, των οποίων οι ηλεκτρικές ιδιότητες βρίσκονται μεταξύ των αγωγών (μικρή αντίσταση στην κίνηση των ηλεκτρονίων) και των μονωτών (μεγάλη αντίσταση στην κίνηση των ηλεκτρονίων).

Η μεγάλη όμως ώθηση προς τις πρακτικές εφαρμογές της φωτοβολταϊκής μετατροπής δόθηκε με την πραγματοποίηση ορισμένων κρίσιμων τεχνολογικών προόδων. Πιο συγκεκριμένα το 1953 στα Bell Telephone Laboratories (BellLabs) του New Jersey των ΗΠΑ, η ομάδα των D. Chapin , C.Fuller και G. Pearson, που ερευνούσαν την επίδραση του φωτός στους ημιαγωγούς, κατασκεύασαν στοιχεία από πυρίτιο με προσμίξεις που ήταν πιο αποδοτικά. Ενώ το 1954 κατάφεραν να κατασκευάσουν ηλιακών στοιχείων σημαντικής απόδοσης (6%) και ακόμα μεγαλύτερης (14%) το 1972. Πάντως, η αξιοπιστία τους είχε ήδη αποδειχθεί πολύ νωρίτερα, όταν τα πρώτα ηλιακά στοιχεία πυριτίου που τοποθετήθηκαν στον τεχνητό ερευνητικό δορυφόρο Vanguard 1, τον Μάρτη του 1958 όχι μόνο πέτυχαν να τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τον πομπό του στην προβλεπόμενη λιγότερη διάρκεια του προγράμματος, αλλά εξακολούθησαν να λειτουργούν χωρίς προβλήματα επί έξι συνολικά χρόνια, και μάλιστα στο πολύ εχθρικό διαστημικό περιβάλλον, με την έντονη κοσμική ακτινοβολία. Έτσι από το 1969 και ύστερα όλοι οι τεχνητοί δορυφόροι και τα άλλα διαστημικά οχήματα, είναι εξοπλισμένα με ηλιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Επειδή το φως του ήλου είναι διαθέσιμο παντού, οι φωτοβολταϊκές διατάξεις έχουν πολλά πρόσθετα οφέλη που τις καθιστούν εφαρμόσιμες και αποδεκτές από όλους τους κατοίκους του πλανήτη. Τα Φ/Β συστήματα είναι πολύσυναρτησιακά, οπότε η ηλεκτροπαραγωγή τους μπορεί τυπικά να προσαρμοστεί σε κάθε εφαρμογή, από καταναλωτικές χρήσεις χαμηλής ισχύος (ρολόγια, μικρούς υπολογιστές χειρός, και φορτιστές μικρών μπαταριών) μέχρι εφαρμογές μεγάλων ενεργειακών απαιτήσεων, όπως η ηλεκτροπαραγωγή σε κεντρικού σταθμούς των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού. Υπάρχει επίσης ένας μικρός αλλά αυξανόμενος αριθμός κτιρίων (οικιακής, εμπορικής και βιομηχανικής χρήσης) με συστοιχίες Φ/Β, οι οποίες καλύπτουν σημαντικό τμήμα των ενεργειακών τους αναγκών. Η απόδοση του καλύτερου ηλιακού στοιχείου από πυρίτιο είναι της τάξης του 24% σε συνθήκες εργαστηρίου. Οι καλύτερες εμπορικά διαθέσιμες Φ/Β μονάδες έχουν ολική απόδοση της τάξης του 16%. (Καλαμάρας, 2007)

## 1.4 Ηλιακή Γεωμετρία

Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας και η φωτονική της σύσταση παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ανάλογα με την ώρα, την εποχή, τις κλιματολογικές συνθήκες και την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία, σε αιωρούμενα σωματίδια και άλλα συστατικά. Επίσης, επηρεάζονται αξιόλογα από άλλους προβλεπόμενους ή απρόβλεπτους παράγοντες, όπως οι ηλιακές κηλίδες και εκρήξεις, η ατμοσφαιρική ρύπανση κ.λ.π. Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια μιας χρονιάς, η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές, σαν αποτέλεσμα της μεταβολήσιτης απόκλισης, δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου, και στο επίπεδο του ισημερινού, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Οι τιμές της απόκλισης του ήλιου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο. Οι ακραίες της τιμές είναι  $+23,45^\circ$  στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο) και  $-23,45^\circ$  στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). (Καλαμάρας, 2007)



Σχήμα 1: Η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το θερινό και το χειμερινό ηλιοστάσιο

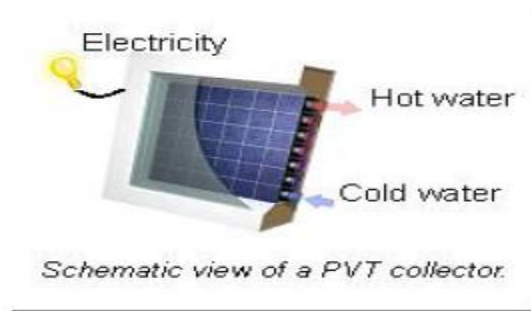
## 1.5 Ηλιακές κυψέλες – Βασικές αρχές – Λειτουργία

Οι **ηλιακές κυψέλες** είναι συσκευές που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια, είτε άμεσα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου, είτε έμμεσα με αρχική μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα ή χημική ενέργεια. Οι πιο κοινές μορφές των ηλιακών κυψελών βασίζονται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο(Φ/Β).

Όταν το φως του ήλιου προσπίπτει σε μία κυψέλη παράγεται συνεχές ρεύμα και, θέτοντας ένα ηλεκτρικό φορτίο από την άλλη, το ρεύμα αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί. Πάντως, δεν μπορεί να μετατραπεί όλο το φως σε ηλεκτρισμό, καθώς οι Φ/Β κυψέλες χρησιμοποιούν κυρίως το ορατό φως. Μεγάλο μέρος της ηλιακής ενέργειας κείται στην υπέρυθη ή θερμή και την υπεριώδη ακτινοβολία, γεγονός που εξηγεί τις χαμηλές τιμές των θεωρητικών αποδοτικότητας μετατροπής. (Καλαμάρας, 2007)

Τα **υβριδικά ΦΒ/Θ** συστήματα αποτελούνται από φωτοβολταϊκά πλαίσια με ενσωματωμένη θερμική μονάδα απολαβής της θερμότητας όπου κυκλοφορεί το εργαζόμενο μέσο. Με τη χρήση της θερμότητας που παράγεται στο ΦΒ, η συσκευή ΦΒ/Θ δεν παράγει μόνο ηλεκτρική, αλλά και θερμική ενέργεια.

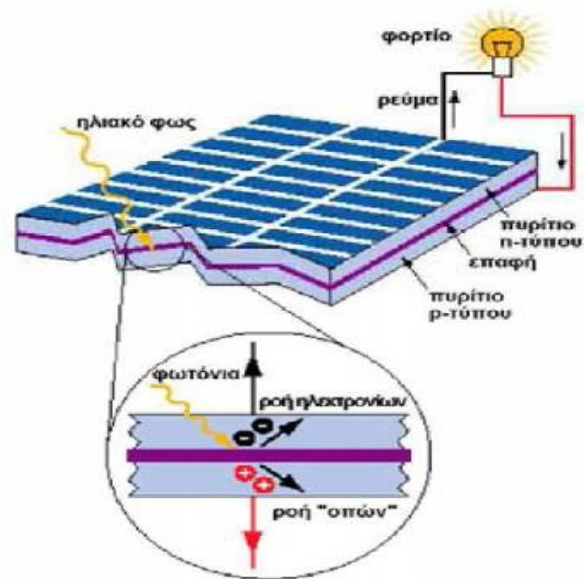
Ένας κοινός ΦΒ/Θ συλλέκτης είναι εφοδιασμένος με ΦΒ στοιχεία που συνδέονται με μία απορροφητική πλάκα (Σχήμα 2). Σκοπός της απορροφητικής πλάκας είναι διπλός. Πρώτον, για την ψύξη των ΦΒ, βελτιώνοντας την ηλεκτρική του απόδοση και, δεύτερον, να συλλέγει τη θερμική ενέργεια που παράγεται. Η θερμότητα που συλλέγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες εφαρμογές, όπως ζέσταμα νερού για οικιακή χρήση ή για βιομηχανικούς σκοπούς σε βιομηχανίες τροφίμων και κλωστοϋφαντουργίας. (Ζαπίτης, 2010)



Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση ΦΒ/Θ συλλέκτη

Όσον αφορά **στη λειτουργία των ηλιακών κυψελών**, τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι με τη μορφή ενός δίσκου (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι, δημιουργείται όσο διαρκεί η ακτινοβολία μια περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωση p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού της πεδίου.

Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Συνεπώς, αν κατασκευαστεί ένα κύκλωμα όπως αυτό του σχήματος είναι δυνατόν να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς από τις κυψέλες αφού τα ελεύθερα ηλεκτρόνια πρέπει να διέλθουν μέσω του φορτίου για τον επανασυνδυασμό τους με τις θετικές οπές.



Σχήμα 3: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο σε μια ηλιακή κυψέλη

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Η ποσότητα της διαθέσιμης ισχύος από μια Φ/Β συσκευή καθορίζεται

από:

- Τον τύπο και την επιφάνεια του υλικού.
- Την ένταση του ηλιακού φωτός (έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία)
- Και το μήκος κύματος του ηλιακού φωτός

Ο λόγος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από μία ηλιακή κυψέλη προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι γνωστός ως αποδοτικότητα της κυψέλης. (Καλαμάρας, 2007)



## **Κεφάλαιο 2ο - Φωτοβολταϊκά Συστήματα**

### **2.1 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.

#### **2.1.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο**

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζεται στις βασικές ιδιότητες των ημιαγώγιμων 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.

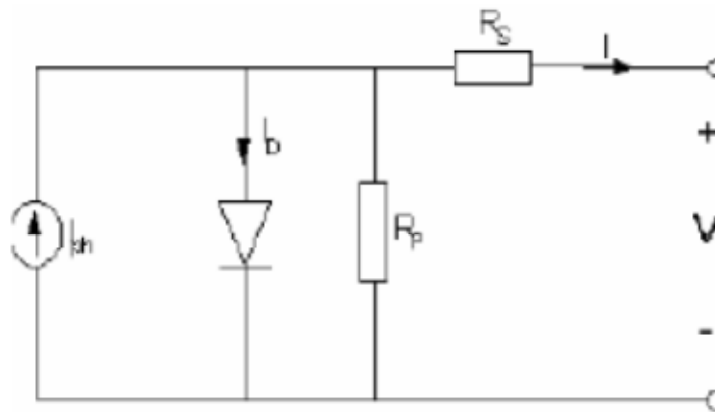
### **2.1.2 Η επίδραση της Ηλιακής ακτινοβολίας**

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. Αυτή είναι απλοποιημένα η γενική αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

### **2.1.3 Μοντέλα φωτοβολταϊκών στοιχείων**

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



Σχήμα 4: Μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου

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:

$$I_d = I_0 \cdot \left( e^{\frac{eV_d}{mKT}} - 1 \right)$$

όπου  $I_0$  είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου,  $V_d$  είναι η τάση στα άκρα της διόδου,  $m$  είναι ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου,  $K$  είναι η σταθερά του Boltzmann,  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία και  $e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου.

Η παράλληλη αντίσταση  $R_p$  εκφράζει τις απώλειες του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ενώ η σε σειρά αντίσταση  $R_s$  εκφράζει τις πρόσθετες απώλειες του φωτοβολταϊκού στοιχείου όταν σε αυτό συνδεθεί κάποιο φορτίο. Αναλύοντας το παραπάνω κύκλωμα που αντιπροσωπεύει τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου εξάγεται η εξίσωση:

$$I_{ph} = I_d + I_p + I$$

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

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{e(V+R_s I)}{mKT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

Κάνοντας τις εξής παραδοχές:

- Η επίδραση της  $R_p$  είναι αμελητέα
- Το  $I_{ph}$  είναι ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης και

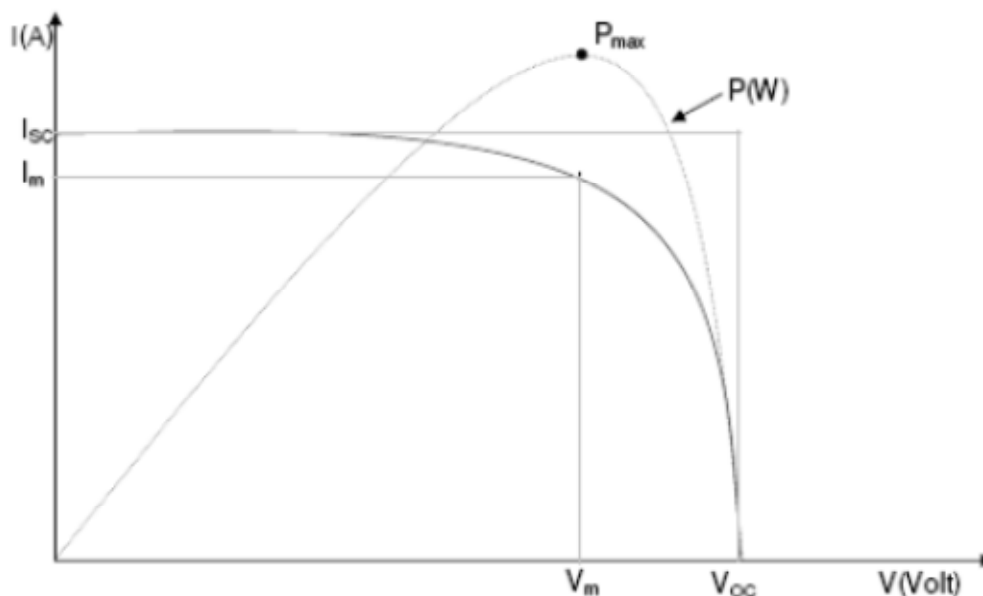
$$\bullet \quad e^{\frac{e(V+R_s I)}{mKT}} = 1$$

Τελικά το ρεύμα που διαρρέει το στοιχείο δίνεται από τον τύπο:

$$I = I_{sc} \left[ 1 - e^{\frac{V - V_{oc} + IR_s}{V_t}} \right]$$

όπου  $V_t = mKT / e$

Στο σχήμα 5 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V του στοιχείου. Όπως φαίνεται από το σχήμα, το ρεύμα για το οποίο έχουμε  $V=0$  ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ ), ενώ η τάση για την οποία ισχύει  $I=0$  ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$ .



Σχήμα 5: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V και I-P του φωτοβολταϊκού στοιχείου

#### 2.1.4 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. Συμπεραίνουνε 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  $\rho$ -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 επιπλέον 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 μετατροπής της ηλιακής ενέργειας μπορούν να επιτευχθούν σε φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με τιμή ενεργειακού διάκενου 1.1-1.5 eV.

Αντίθετα, το πυρίτιο το οποίο χαρακτηρίζεται ως έμμεσος ημιαγωγός χρειάζεται στρώμα πάχους 100  $\mu\text{m}$ . 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.

## **2.2 Επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φ/β στην ηλεκτρική απόδοση**

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:

$$\tau \cdot \alpha \cdot G_T = \eta_c \cdot G_T + U_L \cdot (T_c + T_a)$$

όπου  $\tau$  είναι η διαπερατότητα του διαφανούς καλύμματος που είναι τοποθετημένο πάνω στα στοιχεία,  $\alpha$  είναι το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια των στοιχείων η οποία και απορροφάται,  $G_T$  είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία,  $\eta_c$  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  $800 \text{ W/m}^2$ , σε ταχύτητα αέρα  $1 \text{ m/sec}$ , σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , και χωρίς φορτίο,  $\eta_c = 0$ .

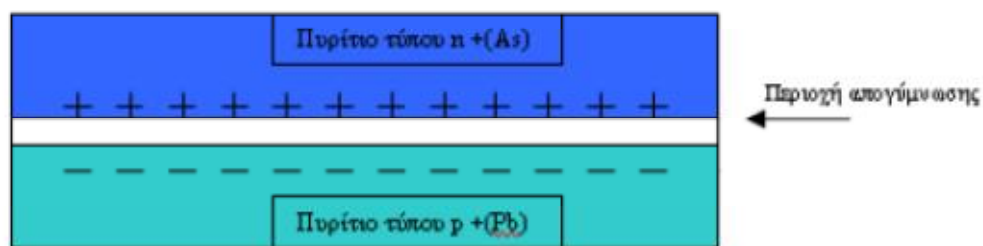
Μετρήσεις της θερμοκρασίας των στοιχείων, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να καθορίσουν το  $T_a / U_L$ ,

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

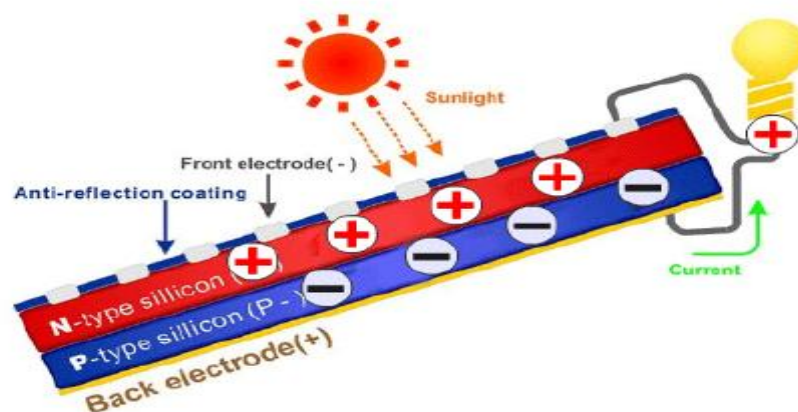
Η θερμοκρασία σε άλλες συνθήκες, όπου υποθέτουμε ότι το  $\tau_a / U_L$ , να είναι σταθερό, βρίσκεται από την σχέση

$$T_c = T_a + (G_T \cdot \tau_a / U_L) \cdot (1 - \eta_c / \tau \cdot \alpha)$$

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



Σχήμα 6: Δημιουργία διόδου



Σχήμα 7: Μηχανισμός φωτοβολταϊκού φαινομένου

### 2.3 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 (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS). Έτσι, παρέχεται μια ποικιλία φωτοβολταϊκών που διαφέρουν τόσο σε κόστος, όσο και σε βαθμό απόδοσης.

## **Κεφάλαιο 3ο - Υβριδικά φωτοβολταϊκά Θερμικά Ηλιακά Συστήματα**

### **3.1 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 τελευταία 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.

Με την σημερινή τεχνολογία των (φβ/θ) συσκευών η συνολική απόδοση είναι μικρότερη από αυτή δύο ξεχωριστών συσκευών (ΦΒ και θερμική) για την περίπτωση ανύψωσης του νερού στο επίπεδο πρακτικής χρήσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμική απόδοση μιας μονάδας παραγωγής 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 ελαφρώς χαμηλότερη από 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 περιοχή 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 συγκομιδή αυτής της θερμότητας έχει τη

δυνατότητα να μειώσει σημαντικά τον χρόνο απόσβεσης τόσο από οικονομικής όσο και από ενεργειακής πλευράς.

### **3.2 Τύποι φωτοβολταϊκών /θερμικών συστημάτων**

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι φβ/θ συστημάτων και κατατάσσονται ανάλογα με το κυκλοφορούν ρευστό που χρησιμοποιείται έτσι ώστε να γίνει η ανάκτηση 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.

#### **3.2.1. Φωτοβολταϊκά / θερμικά συστήματα αέρα**

Τα συστήματα αυτά συνδυάζουν την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και την θέρμανση αέρα. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο και πίσω από αυτό υπάρχει ένας αεραγωγός, από όπου κυκλοφορεί αέρας. Με την 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, απάγεται 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 χώρες όπου η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμαίνεται μεταξύ 15 και 25 ° C. Ακόμα, μπορεί να χρησιμοποιήσουν τον ζεστό αέρα για ζήρανση 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 γυάλινο επίστρωμα 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 να επιλύσουν διάφορα τεχνικά προβλήματα του συστήματος, με την προοπτική η εφαρμογή των φβ/θ συστημάτων να αναπτυχθεί αρκετά στο μέλλον.



**Εικόνα 1: 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 συντελούν στην χαμηλή ικανότητα μεταφοράς θερμότητας του συστήματος και στο ότι υπάρχουν υψηλές θερμικές απώλειες σε περίπτωση διαρροής του ρευστού.

### **3.2.2 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 (ελικοειδή ή παράλληλα 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.

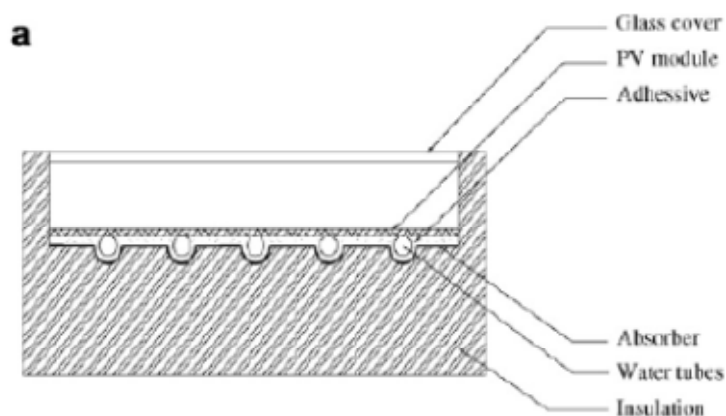
Η απαγωγή θερμότητας με κυκλοφορία νερού θεωρείται πιο πρακτική στις περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη από τους  $200^{\circ}\text{C}$ , επειδή η θερμοκρασία του νερού του δικτύου είναι κάτω από τους  $200^{\circ}\text{C}$  σχεδόν όλο το χρόνο. Γενικά, τα ΦΒ/Θ συστήματα νερού είναι πιο ελκυστικά λόγω της φύσης του ρευστού που επιτρέπει καλύτερη εξαγωγή της θερμότητας.



Εικόνα 2: Πρακτικά παραδείγματα φβ/θ συστημάτων νερού

Οι τύποι των φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων νερού είναι:

1. **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 8 που ακολουθεί είναι ότι η απορροφητική πλάκα είναι σε θερμική επαφή με την κάτω επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

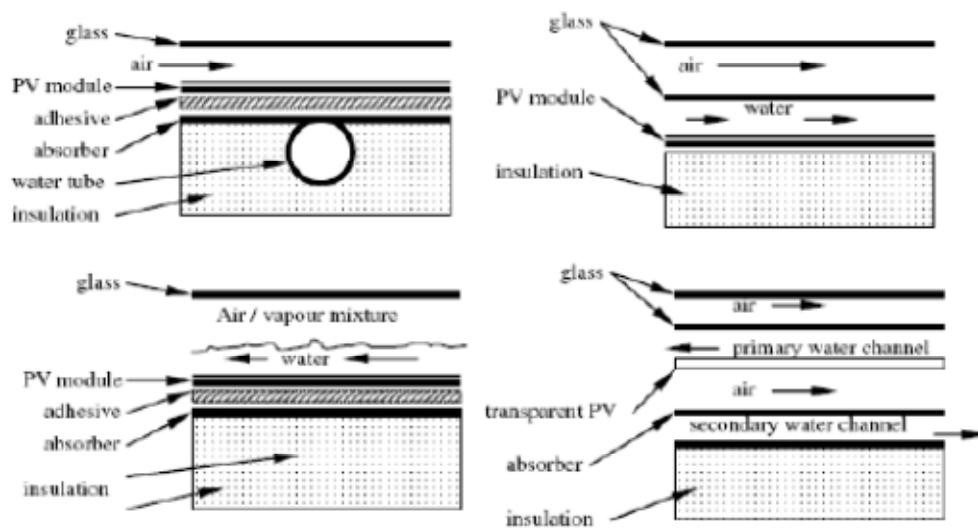


Σχήμα 8: Διατομή επίπεδου συλλέκτη

2. **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 απορροφητικό φάσμα του υγρού που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι αρκετά διαφορετικό από το απορροφητικό φάσμα του φωτοβολταϊκού ώστε να επιτρέπει στο φωτοβολταϊκό να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία. 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 νερού.
  
3. **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 στην φωτογραφία που ακολουθεί. Σε σύγκριση με τους συλλέκτες ΦΒ/Θ με κανάλια εδώ δεν έχουμε το επιπλέον γυάλινο κάλυμμα. Κατά συνέπεια η αντανάκλαση και 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.
  
4. **Οι 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. (Νικολακοπούλου, 2010)



Εικόνα 3: Συγκεντροτικό φβ/θ σύστημα



Σχήμα 9: Τύποι συλλέκτη φβ/θ νερού



Εικόνα 4: Επίπεδοι συλλέκτες

## **Κεφάλαιο 4ο - Υβριδικό Φωτοβολταϊκό Θερμικό Σύστημα Νερού**

### **4.1 Ιστορική αναδρομή για υβριδικό φωτοβολταϊκό θερμικό σύστημα νερού**

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/Θσυγκεντρωτές 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), Schröder 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 πολυ λειτουργικά αεριζόμενα φωτοβολταϊκά με ηλιακούς συλλέκτες αέρα (Cartmell 2004), σε αεριζόμενες φβ προσόψεις κτιρίων (Infield 2004, Guiavarch και Peuportier 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 Lovnik (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 λόγο συγκέντρωσης τους (CR). Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα με CR2.5 πρέπει να χρησιμοποιούν σύστημα παρακολούθησης του ήλιου, ενώ για τα συστήματα με CR2.5 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 and Adhikari (1999), Brogren (2000), Karlsson (2001), Brogren (2002) and 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 (Coventry, 2005) ή γραμμικούς ανακλαστήρες Fresnel (Rosell 2005).

Δυναμικά 3 διαστάσεων και σε σταθερή κατάσταση 3 διαστάσεων, 2 διαστάσεων και 1διάστασης μοντέλα πρότυπων ΦΒ/Θμε 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 and 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

and Sodha, 2006). Οι έρευνες αυτές έδειξαν ότι οι ΦΒ/Θσυλλέκτες 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/Θσυστήματος 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/Θσυστήματα με τυπικά ΦΒ και θερμικούς συλλέκτες, επιβεβαιώνοντας έτσι το περιβαλλοντικό πλεονέκτημα του ΦΒ/Θσυστήματος συγκριτικά με το απλόΦΒ πλαίσιο (μικρότερος χρόνος απολαβής θερμότητας).

Στην Δανία, ένα πρόγραμμα έρευνας πάνω στα ΦΒ/Θσυστήματα 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/Θσυστήματα νερού καιαέρα, 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 κατασκευαζόντουσαν 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. (Νικολακοπούλου, 2010)

## **4.2 Ανάγκες ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών θερμικών συστημάτων**

Η ανάπτυξη των ΦΒ/θ συστημάτων δεν έγινε μόνο για τεχνικούς λόγους αλλά και για οικονομικούς. Είναι αυτονόητο ότι μειώνοντας την θερμοκρασία λειτουργίας των κελιών αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης και άρα το εκτόπισμα του την αγορά δηλαδή η εμπορική του ικανότητα. Η ανάπτυξη των διαφόρων τεχνολογιών είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την οικονομική τους δυναμική. Συμφωνά με μελέτες που έγιναν από το EPFL (Ecole Polytechnique de Lausanne) στην Ελβετία έδειξαν ότι είναι απαραίτητη η σκέψη για τις θερμικές εφαρμογές. Η προοπτική εφαρμογής υβριδικών ΦΒ/Θ συσκευών θα έχει θετική συμβολή στην ευρύτερη αγορά των ΦΒ συστημάτων και είναι πιθανόν ένας άλλος τρόπος για τη διεύρυνση της αξιοποίησης των ΦΒ, τα οποία θα έχουν την ευκαιρία να χρησιμοποιηθούν μέσω των υβριδικών ΦΒ/Θ συσκευών χωρίς την ανάγκη μεγάλης επιδότησης. Συμφωνά με μελέτες που έχουν γίνει φαίνεται ότι η ενσωμάτωση των μονάδων απαγωγής θερμότητας στα ΦΒ μειώνουν σημαντικά τον χρόνο απόσβεσης της επένδυσης. Χαρακτηρίστηκε αναφέρεται από τους Τρυπαναγνωστόπουλο, Τσελέπη, Σουλιώτη και Τούνι, σύμφωνα με μερευνά που κάνανε, ότι η ενσωμάτωση μιας μονάδας απαγωγής θερμότητας μπορεί να μειώσει τον χρόνο απόσβεσης έως και 2,5 φορές εάν αυτή ενσωματωθεί σε φωτοβολταϊκό σύστημα πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si) και έως 4,5 στην περίπτωση που αυτή ενσωματωθεί σε φωτοβολταϊκό σύστημα άμορφου πυριτίου (a-Si). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si) έχουν σχεδόν το διπλάσιο κόστος ανά επιφάνεια ανοίγματος σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα άμορφου πυριτίου (a-Si). Ένα εύρημα από την ίδια μελέτη που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι ενώ η χρήση του διάχυτου ανακλαστήρα αυξάνει την ηλεκτρική και θερμική απόδοση επιδρά ελάχιστα στο

χρόνο απόσβεσης της επένδυσης. Επιπλέον όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία με την χρήση υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος (ΦΒ/Θ) η απόδοση του συστήματος αυξάνει σημαντικά ενώ το κόστος της συνολικά παραγόμενης ενέργειας αναμένεται να είναι χαμηλότερο κατά αντιστοιχία με το κόστος της παραγόμενης ενέργειας ενός απλού ΦΒ.

Συνεπώς τα πλεονεκτήματα των υβριδικών συστημάτων (ΦΒ/Θ) είναι τα ακόλουθα:

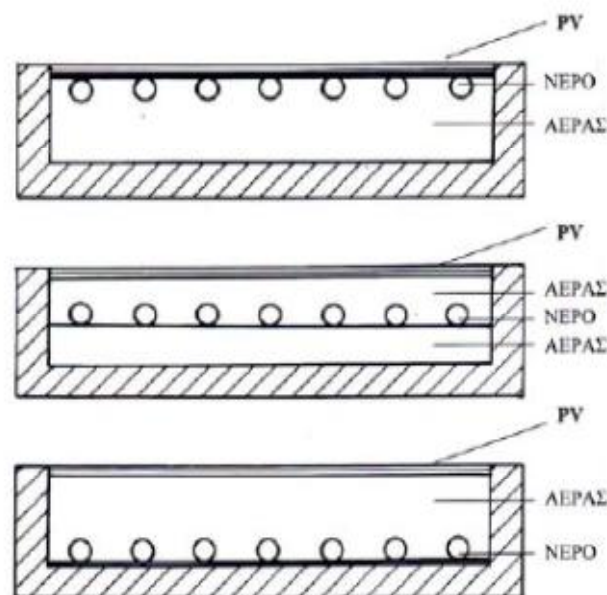
- Μείωση κόστους: Το κόστος ενός (ΦΒ/Θ) συστήματος είναι σχεδόν 25% λιγότερο από τα ξεχωριστά συστήματα ΦΒ και θερμικού συστήματος. Ενώ η ενσωμάτωση του συστήματος στο κτήριο επιτρέπει την μείωση του κόστους (κατασκευής του κτηρίου) αντικαθιστώντας στοιχεία της κατασκευής με τα ΦΒ.
- Η παραγωγή ενέργεια αυξάνεται ανά μονάδα επιφανείας.
- Αισθητική (Καλαμάρας, 2007)

### **4.3 Πειραματικά μοντέλα ΦΒ/Θ νερού και αέρα**

Η σχεδίαση των προτεινόμενων υβριδικών συστημάτων ΦΒ/Θ με την διπλή λειτουργία απαγωγής της θερμότητας βασίζεται στην βέλτιστη αξιοποίηση των δύο ρευστών απολαβής της θερμότητας ως προς τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τις κλιματολογικές συνθήκες. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση χώρων με αέρα τον χειμώνα και για υποβοήθηση φυσικού αερισμού το καλοκαίρι ή για θέρμανση νερού σε κατοικίες, πολυκατοικίες, ξενοδοχεία, νοσοκομεία κ.λ.π. Επίσης οι ίδιες συσκευές έχουν την δυνατότητα να θερμάνουν αέρα για την κάλυψη θερμικών αναγκών χώρων τον χειμώνα και θέρμανση νερού όλη την υπόλοιπη περίοδο, που δεν απαιτείται θέρμανση του χώρου. Με την διπλή αυτή χρήση γίνεται αξιοποίηση του αέρα περιβάλλοντος τον χειμώνα (χαμηλή θερμοκρασία) για ψύξη του φβ και επίτευξη υψηλής ηλεκτρικής απόδοσης και του

νερού την υπόλοιπη περίοδο του έτους (χαμηλότερη θερμοκρασία αυτής του αέρα περιβάλλοντος) για την διατήρηση ικανοποιητικής απόδοσης του φβ πλαισίου.

Η βασική υβριδική συσκευή ΦΒ/Θ(PV/T) θέρμανσης νερού και αέρα που αποτελεί αντικείμενο πειραματικής μελέτης αποτελείται από φβ πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si), διάταξη θερμικού εναλλάκτη κυκλοφορίας νερού, αποτελούμενο από φύλλα χαλκού με συγκολλημένους πάνω σ' αυτό χάλκινους σωλήνες και από αεραγωγό στην πίσω επιφάνεια του φβ πλαισίου για την κυκλοφορία του προς θέρμανση αέρα. Ο εναλλάκτης νερού βρίσκεται εντός του χώρου του αεραγωγού και η συσκευή θερμομονώνεται εξωτερικά για να περιοριστούν οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον.



Σχήμα 10: Τρεις τρόποι τοποθέτησης του εναλλάκτη νερού

Δοκιμάστηκαν τρεις τρόποι τοποθέτησης του εναλλάκτη θερμότητας του νερού εντός του αεραγωγού (Σχ.10) για να επιλεγθεί ο πλέον κατάλληλος για την συνέχιση της πειραματικής μελέτης. Στην πρώτη διεύθυνση (MODE A) ο εναλλάκτης νερού τοποθετήθηκε στην πίσω επιφάνεια του φβ, στην δεύτερη (MODE B) στο μέσον του αεραγωγού και στην τρίτη (MODE C) στην απέναντι επιφάνεια του αεραγωγού. Αν



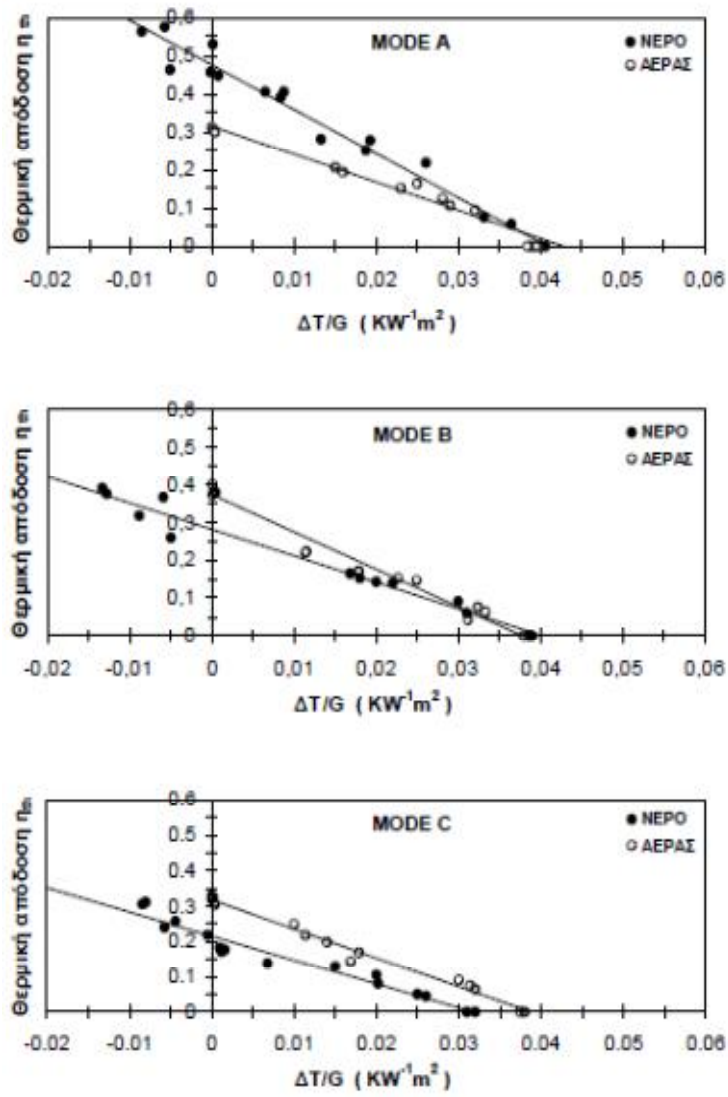
και πιο πρακτική διευθέτηση είναι η τρίτη, η πρώτη βρέθηκε πιο αποδοτική στην θέρμανση του νερού και η δεύτερη στην θέρμανση του αέρα. Θεωρήθηκε έτσι ως πιο αποδοτική συνολικά η πρώτη διευθέτηση, αλλά επιδιώχθηκε να βελτιωθεί λίγο η απόδοση της συσκευής στην θέρμανση του αέρα με την αύξηση της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας του αέρα εντός του αεραγωγού.

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για τους τρεις προαναφερθέντες τρόπους διευθέτησης. Στα διαγράμματα αυτά δείχνονται τα πειραματικά σημεία της θερμικής απόδοσης της συσκευής PV/T για τους τρεις διαφορετικούς τρόπους απαγωγής της θερμότητας με νερό ( $\eta_{th/w}$ ) ή με αέρα ( $\eta_{th/a}$ ) σε συνάρτηση του λόγου  $\Delta T/G$ . Η θερμική απόδοση  $\eta_{th}$  υπολογίζεται από την σχέση  $\eta_{th} = C_m \rho (T_0 - T_i) / A_a G$  και ο λόγος  $\Delta T/G$  από την σχέση  $\Delta T/G = (T_i - T_a) / G$ . Τα μεγέθη που υπεισέρχονται στις σχέσεις αυτές είναι:

$M$  η ροή μάζας του ρευστού και  $C_p$  η ειδική θερμότητα του,  $T_i$  και  $T_0$  η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του ρευστού,  $T_a$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $G$  η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και  $A_a$  η επιφάνεια ανοίγματος του φβ πλαισίου. Σε όλα τα πειράματα το φβ συνδεόταν με φορτίο για την κατανάλωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης έγινε μέτρηση της ηλεκτρικής απόδοσης σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φβ. Η ηλεκτρική απόδοση υπολογίστηκε από την σχέση  $\eta_{el} = I_m V_m / A_a G$ , όπου  $I_m$ ,  $V_m$  το ρεύμα και η τάση για τη συνθήκη λειτουργίας του φβ στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Οι θερμοκρασίες μετρώνται με θερμοζεύγη τύπου T (Cu-CuNi), η ηλιακή ακτινοβολία με πυρανόμετρο Kipp&Zonen, η ροή του νερού ογκομετρικά και η ροή του αέρα με ανεμόμετρο Lutron AM-4204. Οι πειραματικές δοκιμές γίνονται για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου των ρευστών, με ελάχιστη για το νερό την θερμοκρασία νερού από το δίκτυο ύδρευσης και για τον αέρα τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος. Στα πειράματα με την απαγωγή θερμότητας με νερό η ροή μάζας του ήταν  $m_w = 0.02 \text{ kgs}^{-1}$  ενώ για την κυκλοφορία αέρα ήταν  $m_a = 0.006 \text{ kgs}^{-1}$ . Στην πρώτη διευθέτηση (MODE A) η θερμική απόδοση για το νερό εκτιμήθηκε πολύ καλή ενώ για τον αέρα ικανοποιητική με περιθώρια βελτίωσης. (Τρυπαναγνωστόπουλος, κ.α, 2011)





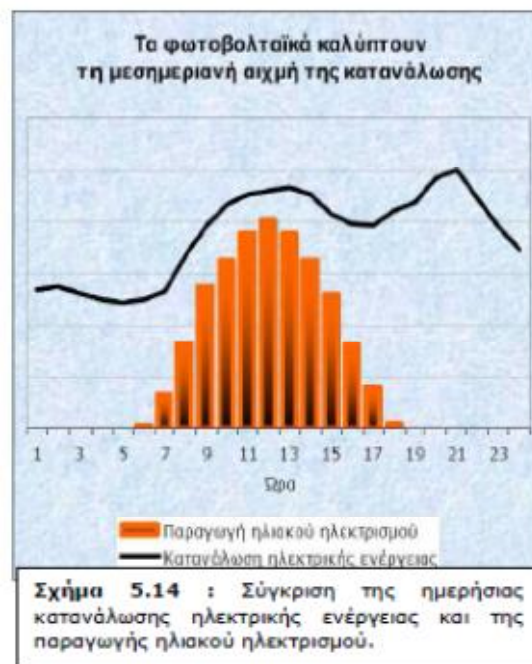
Σχήμα 11: Πειραματικά αποτελέσματα θερμικής απόδοσης των τριών τρόπων απαγωγής της θερμότητας με νερό και αέρα

## Κεφάλαιο 5ο – Συμπεράσματα

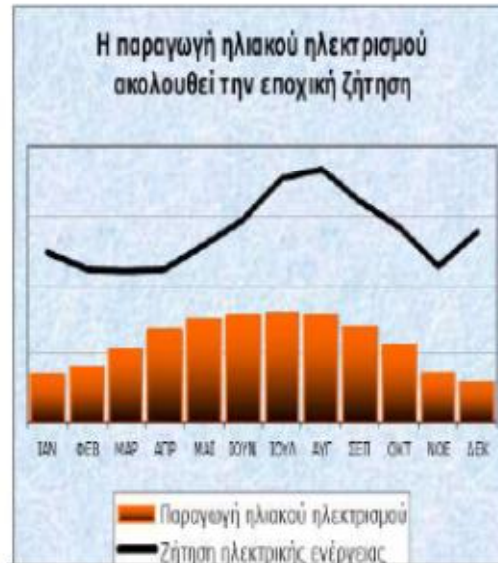
### 5.1 Κάλυψη αναγκών

Γενικά η μέγιστη παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού συμπίπτει χρονικά με τις ημερήσιες αιχμές της ζήτησης (ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες) βοηθώντας την εξομάλυνση των αιχμών του φορτίου, στην αποφυγή black out και στη μείωση του συνολικού κόστους ηλεκτροπαραγωγής δεδομένου ότι η κάλυψη αυτών των αιχμών είναι ιδιαίτερα δαπανηρή.

Από τα ακόλουθα σχήματα φαίνεται ότι τα φωτοβολταϊκά μπορούν να καλύψουν ένα μεγάλο μέρος της μεσημεριανής αιχμής, ενώ και η παραγωγή του ηλιακού ηλεκτρισμού κατά κύριο λόγο ακολουθεί την εποχιακή ζήτηση.



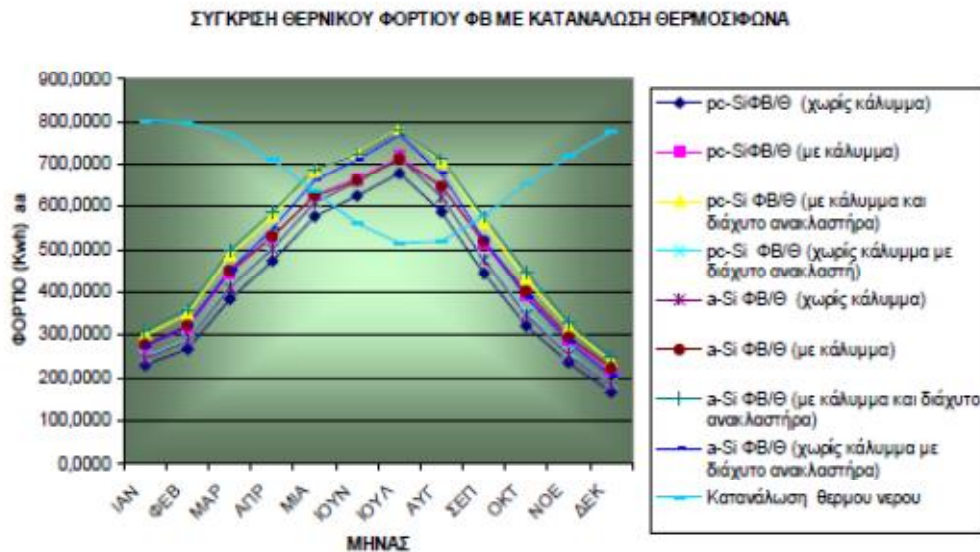
Σχήμα 12: Σύγκριση της ημερήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και της παραγωγής ηλιακού ηλεκτρισμού



**Σχήμα 13: Σύγκριση της ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και της παραγωγής ηλιακού ηλεκτρισμού**

Όσον αναφορά τις περιπτώσεις που εξετάζουμε μπορώ να χρησιμοποιήσω την ενεργεία για να καλύψω ανάγκες όπως ο φωτισμός με λάμπες εξοικονόμησης και χρήσης ηλεκτρονικών συσκευών (υπολογιστές, ηχητικά συστήματα, ψυγεία, τηλεοράσεις και τηλεπικοινωνίες). Για λόγους απόδοσης και οικονομίας δεν συνίσταται η χρήση της ηλεκτρικής ενεργείας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία για την τροφοδότηση θερμικών ηλεκτρικών συσκευών όπως οι κουζίνες, οι θερμοσίφωνες ή θερμοσυσσωρευτές. Για αυτές τις καταναλώσεις υπάρχουν οικονομικότερες λύσεις.

Όσο αναφορά την εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας έχουμε το ακόλουθο γράφημα όπου παρουσιάζεται η απαιτούμενη θερμική κατανάλωση σε σχέση με την παραγόμενη θερμική ενεργεία για όλους τους μήνες του έτους.



**Σχήμα 14 :** Σύγκριση του παραγόμενου θερμικού φορτίου των διαφόρων διατάξεων ΦΒ/Θ συσκευών με τις θερμοσιφωνικές ανάγκες για διαμέρισμα τεσσάρων ατόμων

Ο υπολογισμός της θερμικής κατανάλωσης έγινε θεωρώντας ότι κάθε άτομο χρειάζεται 40lt ζεστού νερού ανά ημέρα θερμοκρασία 60 °C .Οπότε για 4 άτομα που είναι η περίπτωση που εξετάζουμε χρειάζονται ημερησίως 120lt ζεστού νερού. Έτσι γνωρίζοντας την ειδική

θερμότητα του νερού  $(c_p = 4,181 \frac{KJ}{Kg \cdot K})$  και την θερμοκρασιακή ανύψωση (από την θερμοκρασία εισόδου του νερού στον εναλλάκτη ως τους 60 °C ), και θεωρώντας ότι ο συντελεστής απόδοσης είναι  $\eta = 0,8$  βρίσκεται ότι η θερμότητα που καταναλώνεται για την θέρμανση του νερού στους 60 °C. Ως θερμοκρασία εισόδου του νερού στον εναλλάκτη λήφθηκε η μέση θερμοκρασία του νερού ανά ημέρα. Τα αποτελέσματα της θερμότητας που καταναλώνεται ανά μήνα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΜΗΝΕΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ( Kwh)	801,7	796,8	769,4	711,4	633,9	561,3	516,2	519,4	577,5	653,3	719,4	774,3

**Πίνακας 2:** Θερμικές ανάγκες που απαιτούνται ανά μήνα για διαμέρισμα τεσσάρων ατόμων

Δεδομένου ότι οι συνολικές θερμικές ανάγκες ανά έτος σύμφωνα με τις παραδοχές που έγιναν είναι της τάξεως των 8034, 6Kwh εύκολα γίνεται αντιληπτό συγκρίνοντας με τα ετήσια θερμικά αποτελέσματα από του διάφορους τύπους των ΦΒ/Θ συσκευών ότι δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν συνολικά οι ανάγκες. Αυτό σημαίνει ότι θα απαιτηθεί είτε να χρησιμοποιηθεί και κάποιος ηλεκτρικός θερμοσίφωνας είτε να χρησιμοποιηθεί επιπλέον θερμικός συλλέκτης. Ένα άλλο σημείο που παρατηρείται και είναι προφανές και αναμενόμενο είναι ότι τους μήνες (Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο), όπου η θερμικές ανάγκες είναι χαμηλές και παράλληλα η ηλιακή ακτινοβολία υψηλή, οι θερμικές ανάγκες μπορούν να καλυφθούν από τα υπό εξέταση συστήματα. Ενώ στις περισσότερες των περιπτώσεων έχουμε και περίσσειμα. Τους μήνες Απρίλιο και Οκτώβριο οριακά και σε ορισμένες μονό περιπτώσεις καλύπτονται οι ανάγκες (για τα συστήματα με κάλυμμα και διάχυτο ανακλαστήρα). Για να αποφανθούμε αν συμφέρει η χρήση αυτών των συστημάτων θα πρέπει να γίνει τεχνοοικονομική μελέτη. Καθώς τα τεχνικά στοιχεία από τους υπολογισμούς που έγιναν παρουσιάστηκαν παραπάνω αυτό που απομένει είναι η οικονομική θεώρηση των συστημάτων. Έτσι στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται η οικονομική θεώρηση των συστημάτων αυτών.

## 5.2 Οικονομική θεώρηση

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει μια προσπάθει να δειχτεί κατά πόσον αυτά τα συστήματα αποτελούν μια ανταγωνιστική λύση για την ενεργειακή παραγωγή. Ουσιαστικά θα υπολογιστεί το ποσό της απόσβεση (χρήματα που πρέπει να καταβληθούν) και του ποσού που εξοικονομείται λόγω της χρήση των συστημάτων (χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις που έγιναν για τη θερμική και την ηλεκτρική ενέργεια) και συγκρίνοντας τα θα φανεί αν είναι συμφέρουσα η χρήση τους. Οι τιμές των συστημάτων που θα μελετηθούν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Οι τιμές αυτές αναφέρονται σε συστήματα  $4m^2$  και δεξαμενής χωρητικότητας 200lt. Γνωρίζοντας το κόστος κτήσης του κάθε συστήματος μπορεί να προσδιοριστεί η μηνιαία απόσβεση της επένδυσης και άρα η ετήσια απόσβεση για ένα χρονικό ορίζοντα της τάξης των 10 ετών με επιτόκιο 8% (επιλέχθηκε αυθαίρετα θεωρώντας ότι αντικατοπτρίζει την σημερινή κατάσταση της αγοράς).

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΚΟΣΤΟΣ (€/σύστημα)
pc-Si ΦΒ/Θ (χωρίς κάλυμμα)	4.400
pc-Si ΦΒ/Θ (με κάλυμμα)	4.800
pc-Si ΦΒ/Θ (χωρίς κάλυμμα με διάχυτο ανακλαστήρα)	4.600
pc-Si ΦΒ/Θ (με κάλυμμα και διάχυτο ανακλαστήρα)	5.000
a-Si ΦΒ/Θ (χωρίς κάλυμμα)	3.200
a-Si ΦΒ/Θ (με κάλυμμα)	3.600
a-Si ΦΒ/Θ (χωρίς κάλυμμα με διάχυτο ανακλαστήρα)	3.400
a-Si ΦΒ/Θ (με κάλυμμα και διάχυτο ανακλαστήρα)	3.800

Πίνακας 3: Κόστος αγοράς κάθε συστήματος

Ο υπολογισμός της μηνιαίας απόσβεσης για κάθε σύστημα έγινε στο Excel. Η μελέτη έγινε υπολογίζοντας το ετήσιο κέρδος από την χρήση των συστημάτων θεωρώντας ότι η τιμή της KWh ώρας που πληρώνουμε στη ΔΕΗ είναι 0,112967. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς που κάναμε υπολογίσαμε το κέρδος (σε ευρώ) που έχουμε από τα συστήματα εκμεταλλευόμενοι όλη την ηλεκτρική ενέργεια. Στην περίπτωση της θερμικής ενέργειας υπολογίστηκε το κέρδος (σε ευρώ) θεωρώντας ότι γίνεται εκμετάλλευση όλης της θερμικής ενέργειας μόνο τους μήνες που οι θερμικές ανάγκες για την κατοικία των τεσσάρων ατόμων ήταν μεγαλύτερες από την παραγόμενη θερμική ενέργεια από τα συστήματα (δηλαδή τους χειμερινούς μήνες). Ενώ για τους καλοκαιρινούς μήνες όπου η θερμική παραγωγή από τα συστήματα είναι μεγαλύτερη από τις θερμικές ανάγκες υπολογίστηκε ως θερμικών αναγκών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται πινακοποιημένα στον ακόλουθο πίνακα.



ΣΥΣΤΗΜΑ	ΕΤΗΣΙΟ ΚΕΡΔΟΣ (€)	ΕΤΗΣΙΑ ΑΠΟΣΒΕΣΗ (€)	ΤΕΛΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ (€)
pc-Si ΦΒ/θ (χωρίς κάλυμμα)	468,58	640,61	-172,03
pc-Si ΦΒ/θ (με κάλυμμα)	680,14	698,85	-18,71
pc-Si ΦΒ/θ (χωρίς κάλυμμα με διάχυτο ανακλαστήρα)	502,33	669,73	-167,39
pc-Si ΦΒ/θ (με κάλυμμα και διάχυτο ανακλαστήρα)	505,85	727,97	-222,12
a-Si ΦΒ/θ (χωρίς κάλυμμα)	426,49	669,73	-243,24
a-Si ΦΒ/θ (με κάλυμμα)	455,41	524,14	-68,73
a-Si ΦΒ/θ (χωρίς κάλυμμα με διάχυτο ανακλαστήρα)	460,15	465,90	-5,75
a-Si ΦΒ/θ (με κάλυμμα και διάχυτο ανακλαστήρα)	431,33	553,25	-121,92

Πίνακας 4: Ετήσιου κέρδους, ετήσιας απόσβεσης, και τελικού αποτελέσματος

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι τα συστήματα αυτά θεωρώντας δεκαετή περίοδο απόσβεση και ότι η τιμή KWhώρας ισούται με 0,112967 δεν συμφέρουν για χρήση. Βλέπουμε δηλαδή ότι το ισοζύγιο είναι αρκετά ελλειμματικό (πλην μιας περιπτώσεως που είναι αρνητικό αλλά οριακά). Εδώ πρέπει να παρατηρηθεί ότι δεδομένου ότι η τιμή της KWhώρας αυξάνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα δεν θα αργήσει ο καιρός που θα επέλθει ισορροπία και τα συστήματα αυτά θα είναι άκρως ανταγωνιστικά. Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που εξετάσαμε θεωρήσαμε απόσβεση τα 10 χρόνια. Η επιλογή αυτή έγινε διότι τα συστήματα αυτά έχουν διάρκεια ζωής 15-20 κατά συνέπεια τα 5 έως 10 χρόνια για την απόδοση μιας τέτοιας επένδυσης θεωρούνται ικανοποιητικά. Έτσι αν θέλαμε να τα εξετάσουμε τι θα συμβεί σε οριακές καταστάσεις τα νούμερα που θα προέκυπταν θα ήταν σαφώς καλύτερα. Τέλος πρέπει να επισημανθεί ότι δεν θεωρήθηκε ποσό επιχορήγησης παρότι η επιχορήγηση τέτοιων εγκαταστάσεων είναι μια πολύ διαδεδομένη τακτική στο εξωτερικό. Κλείνοντας πρέπει να αναφερθεί ότι αυτά τα συστήματα έχουν μηδαμινές εκπομπές βλαβερών αερίων κατά την παραγωγή της ενέργειας γεγονός που αποτελεί έναν παράγοντα παράπλευρη εξοικονόμηση ενέργειας που και αυτό δεν

λήφθηκε υπόψη. Το περιβάλλον έχει βρεθεί στο επίκεντρο της διεθνούς ανησυχίας κατά συνέπεια η εναρμόνιση με τα διεθνή πρότυπα όσον αναφορά τις εκπομπές αερίων στοιχίζει για όσους θέλουν να παράγουν ενέργεια με συμβατικούς τρόπους είτε υπό την μορφή προστίμου λόγω της υπέρβασης των ορίων είτε υπό την μορφή πρόληψης (εγκατάσταση φίλτρων και τεχνολογιών και διεργασιών λιγότερο ρυπογόνων) για την αποφυγή των προστίμων. (Καλαμάρας, 2007)

### 5.3 Επίλογος

Οι τεχνολογίες για την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ειδικά τα φωτοβολταϊκά θερμικά(ΦΒ/Θ) συστήματα παρότι, στην παρούσα φάση υπήρχε 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 των τιμών τους, λόγω της συνεχής ανάπτυξης της τεχνολογία κατασκευής των ημιαγωγών των (ΦΒ) στοιχείων, έχει στέψει το ενδιαφέρον προς τα συστήματα αυτά. Τα πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων έναντι των άλλων συστημάτων για την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δηλαδή η δυνατότητα εγκατάστασης τους σε αστικό περιβάλλον, ο μικρός τους όγκος, η δυνατότητα τους ενσωμάτωση σε κτήρια υπό μορφή δομικών στοιχείων και οι αισθητικές λύσεις που παρέχουν δίνουν την αίσθηση της υπεροχής και προβάλλουν ως οι μελλοντικοί ηγέτες στην αγορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Δεδομένου ότι στην Ελλάδα τα τελευταία 30 χρόνια έχει αναπτυχθεί μια σημαντική αγορά ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού οικιακής χρήσης το ενδεχόμενο αντικατάσταση των θερμοσιφωνικών συστημάτων με αυτά τα συστήματα είναι μεγάλο. Εξετάζοντας τα φωτοβολταϊκά θερμικά (ΦΒ/Θ) συστήματα μέσα από τις δημοσιεύσεις προέκυψε ότι υπάρχουν πολλά τέτοια συστήματα που διαφοροποιούνται ανάλογα με τις διατάξεις των συστημάτων αυτών, τον τύπο της μονάδας απαγωγής της θερμότητας, το ρευστό που χρησιμοποιούν για την απαγωγή της θερμότητας και τον τύπο του ημιαγωγού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Με βάση διάφορες διατάξεις των ΦΒ/Θ συστημάτων που εξετάστηκαν προέκυψαν ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα αναφορικά με τα υπό εξέταση συστήματα.

1. Με τη χρήση γυάλινου καλύμματος έχουμε μείωση της ετήσια ηλεκτρικής απολαβής και αύξησης της ετήσιας θερμικής απολαβής.
2. Η χρήση του διάχυτου ανακλαστήρα προκαλεί αύξηση της ετήσιας ηλεκτρική και θερμικής απολαβής.
3. Η αύξηση της ετήσιας ηλεκτρική και θερμικής απολαβής με τη χρήση του διάχυτου ανακλαστήρα είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ημιαγωγό άμορφου πυριτίου.
4. Οι φωτοβολταϊκές θερμικές (ΦΒ/Θ) συσκευές που χρησιμοποιούν στοιχεία από ημιαγωγούς άμορφου πυριτίου παρουσιάζουν μεγαλύτερες ετήσιες θερμικές απολαβές για όλες τις διατάξεις σε σχέση με αυτές των στοιχείων από ημιαγωγούς πολυκρυσταλλικού πυριτίου.
5. Οι φωτοβολταϊκές θερμικές (ΦΒ/Θ) συσκευές που χρησιμοποιούν στοιχεία από ημιαγωγούς πολυκρυσταλλικού πυριτίου παρουσιάζουν μεγαλύτερες ετήσιες ηλεκτρικές απολαβές για όλες τις διατάξεις σε σχέση με αυτές των στοιχείων από ημιαγωγούς άμορφου πυριτίου.
6. Γενικά για όλα τα συστήματα η ετήσια θερμική ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την ετήσια ηλεκτρική ενέργεια, διότι λόγω των χαμηλών βαθμών ηλεκτρικής απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων το μεγαλύτερο ποσοστό της απορροφημένης ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμότητα.
7. Οι θερμικές ανάγκες ενός έτους μπορούν να καλυφθούν (για ένα κτίριο που διαμένουν τέσσερα άτομα) μονό κατά ένα μέρος παρότι κάποιους μήνες (θερινούς μήνες) οι ανάγκες υπερκαλύπτονται από την παραγωγή
8. Τα συστήματα αυτά χωρίς επιχορήγηση δεν είναι οικονομικά συμφέροντα. Το συμπέρασμα αυτό προέκυψε θεωρώντας 10 χρόνια για την απόσβεση και επιτόκιο 8%. Όμως έχουν τις προοπτικές σταδιακά να αποτελέσουν μια αξιόπιστη και ανταγωνιστική λύση για την παραγωγή πράσινης ενέργειας.

Γενικά αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι τα συμπεράσματα όπως αυτά προέκυψαν από τα αποτελέσματα των υπολογισμών συμπίπτουν με τις αναφορές από την βιβλιογραφική έρευνα. Όμως εδώ πρέπει να τονιστεί ότι τα συμπεράσματα αυτά δεν πρέπει να ληφθούν ως de facto καθώς οι υπολογισμοί έγιναν από εμπειρικές σχέσεις

που μπορεί να αποδειχθεί ότι έχουν κάποιο ποσοστό λάθους, ενώ πάντα υπάρχει ο κίνδυνος εισαγωγής σφάλματος λόγω του ανθρώπινου παράγοντα και των παραδοχών που έγιναν. Ωστόσο, είναι ένα σκαλί για μελλοντικές αναζητήσεις και έρευνες. Επιπλέον παρατηρώντας τη μεγάλη επίδραση που έχει ο τύπος του ημιαγωγού από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το φωτοβολταϊκό στοιχείο στην ετήσια θερμική και ηλεκτρική απολαβή προτείνεται και η εξέταση των άλλων τύπων των ημιαγωγών. Κλείνοντας πρέπει να υπογραμμισθεί ότι η βιώσιμη ενεργειακά ανάπτυξη πρέπει να παρέχει κατάλληλες ενεργειακές υπηρεσίες για την ικανοποίηση των βασικών αναγκών, να βελτιώνει την κοινωνική ευημερία και να επιτυγχάνει την οικονομική ανάπτυξη παντού πάνω στον πλανήτη χωρίς να θέτει σε κίνδυνο την ποιότητα ζωής της παρούσα γενιάς αλλά και τον μελλοντικών. Η προστασία του περιβάλλοντος βρίσκεται στα χέρια μας. Με τη συμπεριφορά μας και τις καθημερινές αποφάσεις και επιλογές μας αποφασίζουμε το μέλλον του πλανήτη.

## Βιβλιογραφία

1. Καλαμάρας Ν, (2007). «ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ/ΘΕΡΜΙΚΑ (ΦΒ/Θ) ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΝΕΡΟΥ», Αθήνα
2. Νικολακοπούλου Α, (2012). «ΜΕΛΕΤΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ( PV/T ) ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΝΕΡΟΥ», Πάτρα
3. Ζαπίτης Σ, (2012). «Προσομοίωση Υβριδικών Φωτοβολταϊκών Θερμικών συστημάτων νερού με χρήση λογισμικού Energy Plus», Αθήνα
4. Τρυπαναγνωστόπουλος Ι, Τζαβέλλας Δ., Ζούλια Ε. «ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ/ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΕΡΑ», Πάτρα, 2005
5. 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
6. 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
7. Green M.A., Zhao J., Wang A., “23% Module and other silicon solar cell advances” 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic, 1998, σελίδες 1187-1192.

## ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

1. <http://www.renevol.gr/ybridiko-fotovoltaiko-thermiko-plaisio>
2. <http://www.mcit.gov.cy/mcit/mcit.nsf/All/.pdf>
3. <http://www.solarenergy4u.gr/displayITM1.asp?ITMID=106&LANG=GR>