

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Αριθμός: 1454

**ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΝΕΡΟΥ**

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2015

© 2015-all rights reserved

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε. της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και έχει σαν θέμα τα υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα νερού.

Θέλουμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Σταθάτο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας αυτής.

Σταθόπουλος Ιωάννης
Σταθόπουλος Κωνσταντίνος

Ιανουάριος 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη των υβριδικών φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων νερού.

Αφού γίνει μία σύντομη εισαγωγή στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία, αναλύεται η ανάγκη ανάπτυξης και ο σκοπός των φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων. Στη συνέχεια δίνονται οι βασικοί σταθμοί στην εξέλιξη της εν λόγω τεχνολογίας

Αναλύονται οι βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών/θερμικών συλλεκτών, όπως: Επίπεδοι συλλέκτες (flatplate collectors ή sheet-and-tube PV/T-collectors), συλλέκτες ΦΒ/Θ με κανάλια (channel PV/T-collectors), ελεύθερης ροής ΦΒ/Θ συλλέκτες (free flow PV/T-collectors), ΦΒ/Θ συλλέκτες διπλής απορρόφησης (two-absorber PV/T-collectors) Συγκεντρωτικοί τύποι φωτοβολταϊκών/θερμικών συλλεκτών, Building Integrated Photovoltaics

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μελέτη της απόδοσης και της αξιοπιστίας των υβριδικών ΦΒ/Θ συστημάτων νερού. Πιο συγκεκριμένα μελετώνται οι απώλειες (ανάκλασης, θερμικές), οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση (ταχύτητα εργαζόμενου μέσου, γεωμετρία και διαστάσεις του συλλέκτη, θερμική αγωγιμότητα, τύπος συλλέκτη) και περιγράφονται οι δοκιμές αξιοπιστίας των συστημάτων αυτών.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι δυνατές εφαρμογές, όπως εφαρμογές σε κτίρια, βιομηχανία και αγροτικό τομέα και μελετάται η δυνατότητα του συνδυασμού της τεχνολογίας αυτής με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Τέλος, δίνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή καθώς και μια γενική αποτίμηση της δυναμικής της τεχνολογίας των ΦΒ/Θ συστημάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	
1.1 Γενικά.....	4
1.2 Ημιαγωγοί.....	5
1.3 Η Δίοδος P-N.....	9
1.4 Πόλωση Διόδου P-N.....	12
1.5 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	16
1.6 Δομή Φωτοβολταϊκού Στοιχείου.....	20
1.7 Είδη Φωτοβολταϊκών Στοιχείων.....	21
1.8 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά.....	23
1.9 Δομή Φωτοβολταϊκού Πλαισίου.....	24
1.10 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	26
2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ	
2.1 Γενικά.....	28
2.2 Βασικοί Τύποι Συγκεντρωτικών Μέσων.....	29
2.3 Εξάρτηση της Παραγόμενης Ισχύος από την Κλίση του CPV.....	36

3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΦΒ/Θ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

3.1 Γενικά.....	38
3.2 Ψύξη των ΦΒ Συστημάτων.....	40
3.3 Ψύξη με Εξάτμιση.....	42
3.4 Ψύξη Συγκεντρωτικών ΦΒ Συστημάτων.....	47
3.5 Ανάγκη Ανάπτυξης των Υβριδικών ΦΒ/Θ Συστημάτων.....	49
3.6 Ιστορική Αναδρομή.....	50
3.7 Σχεδιαστικές Παράμετροι.....	54
3.8 Περιορισμοί και Παραδοχές των Υβριδικών ΦΒ/Θ Συστημάτων....	55

4. ΤΥΠΟΙ ΦΒ/Θ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

4.1 Γενικά.....	58
4.2 Επίπεδοι Συλλέκτες.....	58
4.3 Συλλέκτες με Κανάλια.....	60
4.4 Συλλέκτες Ελεύθερης Ροής.....	61
4.5 Συλλέκτες Διπλής Απορρόφησης.....	62
4.6 ΦΒ/Θ Συλλέκτες με Συνδυασμό Νερού και Αέρα.....	63
4.7 Υβριδικά Συγκεντρωτικά Συστήματα.....	65

5. ΑΠΟΔΟΣΗ

5.1 Γενικά.....	71
5.2 Εξάρτηση από τον Τύπο του ΦΒ Κελιού.....	73
5.3 Εξάρτηση από την Παροχή Μάζας του Εργαζόμενου Ρευστού.....	75
5.4 Εξάρτηση από τη Θερμοκρασία.....	81
5.5 Επίδραση του Γυάλινου Καλύμματος.....	83
5.6 Εξάρτηση από το Γεωμετρικό Λόγο W/D.....	85
5.7 Επίδραση του Συστήματος Συγκέντρωσης της Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	86
5.8 Πειραματικές Σχέσεις για την Απόδοση.....	87
5.9 Σύγκριση Υβριδικών ΦΒ/Θ με Συμβατικά ΦΒ.....	90

5.10 Τρόποι Βελτίωσης των ΦΒ/Θ Συστημάτων.....	92
6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	
6.1 Γενικά.....	98
6.2 Βιομηχανικές Εφαρμογές.....	99
6.3 Αγροτικές Εφαρμογές.....	102
6.4 Κτιριακές Εφαρμογές.....	105
6.5 Συνδυασμός ΦΒ/Θ Συστημάτων με Άλλες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	112
6.6 ΦΒ/Θ Συστήματα στο Εμπόριο.....	115
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	117
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	119

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σύγχρονη εποχή οι ανάγκες του ανθρώπου για ενέργεια έχουν αυξηθεί όσο ποτέ άλλοτε, τόσο η αύξηση του πληθυσμού της γης όσο και η αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας έχουν οδηγήσει στην κατασπατάληση των φυσικών πόρων του πλανήτη. Το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, ο λιγνίτης κάποια στιγμή θα τελειώσουν οδηγώντας την ανθρωπότητα σε κρίση.

Μια ενδεχόμενη ενεργειακή κρίση δεν είναι το μόνο πρόβλημα το οποίο καλείται να αντιμετωπίσει ο άνθρωπος, η καύση των ορυκτών καυσίμων και η εκπομπή ρυπαντών όπως το SO₂, CO, HC, τα NO_x έχουν αρνητική επίδραση στον άνθρωπο και στο περιβάλλον. Εκτός της ρύπανσης της ατμόσφαιρας προκαλούν και την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης, κάτι που είναι ευρέως γνωστό ως φαινόμενο του θερμοκηπίου. Βέβαια, τα τελευταία χρόνια γίνονται κάποιες προσπάθειες για την συλλογική αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου όπως το Πρωτόκολλο του Κιότο, και την πιο πρόσφατη παγκόσμια διάσκεψη για τις κλιματικές αλλαγές στην Κοπεγχάγη.

Είναι πλέον ανάγκη να στραφούμε σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας που δεν θα επιβαρύνουν το περιβάλλον και θα καλύπτουν και τις ενεργειακές μας ανάγκες. Ο ήλιος, το νερό, ο αέρας είναι στοιχεία της φύσης που ο άνθρωπος εκμεταλλεύτηκε στο παρελθόν πολύ πριν παρουσιαστεί ο πρώτος μετατροπέας θερμότητας σε μηχανική ενέργεια το έτος 1800μΧ. Τις τελευταίες δεκαετίες γίνονται προσπάθειες εκμετάλλευσης αυτών των στοιχείων για παραγωγή φιλικής προς το περιβάλλον ενέργειας. Αυτές οι λεγόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) έχουν ως σημαντικότερα μειονεκτήματα το αυξημένο κόστος κατασκευής, το μικρό βαθμό απόδοσης και την δυσκολία αποθήκευσης της ενέργειας που παράγουν με αποτέλεσμα η παραγωγή της να είναι ακριβότερη από την παραγωγή με συμβατική καύσιμη ύλη.

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια ανεξάντλητη μορφή ενέργειας που προέρχεται από τον ήλιο. Κύριες εφαρμογές της είναι για την παραγωγή θερμότητας και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην πρώτη περίπτωση θερμαίνουμε κάποιο υγρό, συνήθως νερό, ενώ στην δεύτερη εκμεταλλευόμαστε τις ιδιότητες των φωτοβολταϊκών και μετατρέπουμε την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ισχύ. Επίσης παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορούμε να έχουμε χρησιμοποιώντας κάτοπτρα τα οποία συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα απορροφητή

θερμότητας ο οποίος φέρει το ρευστό εργασίας (συνήθως συνθετικό έλαιο), το ρευστό θερμαίνεται και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού.

Το μεγαλύτερο μέρος της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τα φωτοβολταϊκά 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 απαγωγή της θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια βοηθά όχι μόνο στη μείωση της θερμοκρασίας τους αλλά μπορεί και να αξιοποιηθεί αυξάνοντας τη συνολική ενεργειακή τους απόδοση.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την μελέτη των υβριδικών φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων. Τα υβριδικά φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα είναι ηλιακά συστήματα που έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν τόσο ηλεκτρική όσο και θερμική ενέργεια.

Για την ώρα, οι εφαρμογές τους διεθνώς είναι περιορισμένες. Ο βασικός λόγος είναι ότι το κόστος τους ως προς τις άλλες τεχνολογίες για την εκμετάλλευση των ανανεώσιμες πηγών ενέργειας. Όμως λόγω των ανταγωνιστικών τους πλεονεκτημάτων (δυνατότητα εγκατάστασης τους σε αστικές περιοχές, μεγάλο ηλιακό δυναμικό, αισθητικές λύσεις, κ.τ.λ.) τα συστήματα αυτά βρίσκονται στην πρώτη γραμμή της επιστημονικής έρευνας.

Έτσι στα πλαίσια της εργασίας αυτής γίνεται μια προσπάθεια να παρουσιαστούν οι διάφοροι τύποι των υβριδικών φωτοβολταϊκών θερμικών συστημάτων, ο τρόπος λειτουργίας τους τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά και οι δυνατές εφαρμογές τους.

Για την πληρότητα της εργασίας αυτής πριν γίνει η παρουσίαση των φωτοβολταϊκών θερμικών συστημάτων (ΦΒ/Θ) κρίθηκε σκόπιμο να γίνει αναφορά στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο καθώς επίσης και μια εισαγωγική παρουσίαση της θεωρίας των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) στοιχείων (τύποι των ημιαγωγών και τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά). Επιπλέον γίνεται ειδική αναφορά στα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα των οποίων η σύζευξη με τα ΦΒ/Θ συστήματα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Στη συνέχεια αναλύονται οι λόγοι που οδήγησαν στην ανάπτυξη των ΦΒ/Θ συστημάτων και γίνεται μια αναδρομή στην ιστορική εξέλιξη των συστημάτων αυτών, δηλαδή παρουσιάζεται η αλληλουχία των γεγονότων που έφεραν τα συστήματα αυτά στην μορφή που είναι στις μέρες μας.

Στη συνέχεια αναλύονται οι διάφοροι τύποι των ΦΒ/Θ συστημάτων νερού καθώς επίσης οι ΦΒ/Θ συλλέκτες που συνδυάζουν νερό και αέρα και τα υβριδικά συγκεντρωτικά συστήματα.

Στη συνέχεια δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην απόδοση των ΦΒ/Θ συστημάτων και τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Υπάρχει στη

διεθνή βιβλιογραφία ένα τεράστιο πλήθος δημοσιευμένων εργασιών που με αντικείμενο τη μελέτη της συμπεριφοράς των ΦΒ/Θ και κυρίως του θερμικού και του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης αυτών. Έγινε μια προσπάθεια να παρουσιαστούν όσο γίνεται πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα των ερευνών αυτών.

Επίσης γίνεται μια προσπάθεια να παρουσιαστεί το τεράστιο εύρος εφαρμογών αυτών των συστημάτων στη βιομηχανία, τον αγροτικό τομέα και τα κτίρια.

Έτσι σκοπός της εργασίας αυτής είναι να αξιολογηθούν, να συγκριθούν και να σχολιασθούν τα συστήματα αυτά ώστε να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για μελλοντικές έρευνες πάνω στο πεδίο των υβριδικών φωτοβολταϊκών θερμικών (ΦΒ/Θ) συσκευών νερού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι φωτοβολταϊκοί μετατροπείς ενέργειας είναι συσκευές στις οποίες μέρος της ενέργειας της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσω ειδικά διαμορφωμένων ημιαγωγών. Όταν το φωτοβολταϊκό (ΦΒ) στοιχείο φωτιστεί με φωτόνια κατάλληλης συχνότητας εμφανίζει στα άκρα του μια μικρή διαφορά δυναμικού. Συνδέοντας μια σειρά από ΦΒ στοιχεία μπορούμε να δημιουργήσουμε φωτοβολταϊκά πλαίσια κατάλληλης ισχύος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λειτουργία συσκευών (π.χ. τηλέφωνα, υπολογιστές τσέπης κ.ά.) ενώ μεγάλες συστοιχίες ΦΒ στοιχείων μπορούν να καλύψουν οικιακές ή βιομηχανικές ανάγκες. Επίσης είναι δυνατή η χρήση τους ως δομικά υλικά παρέχοντας τη δυνατότητα για ποικίλους αρχιτεκτονικούς σχεδιασμούς αντικαθιστώντας άλλα παραδοσιακά υλικά (π.χ. κεραμοσκεπές ή υαλοστάσια).

Πολλά είδη ΦΒ στοιχείων είναι σήμερα διαθέσιμα στην αγορά και πολλές ακόμη τεχνολογίες είναι υπό εξέλιξη. Η ποικιλία αυτή οφείλεται στα διαφορετικά υλικά κατασκευής, τις διαφορετικές διατάξεις και την πρόοδο των μεθόδων κατασκευής με σκοπό τη μείωση του κόστους παραγωγής και την αύξηση του βαθμού απόδοσης

Συσκευές με βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο του 30%, έχουν κατασκευαστεί στα εργαστήρια ωστόσο η απόδοση των στοιχείων που συναντάται στις εμπορικές εφαρμογές είναι αρκετά χαμηλότερη. Τα ΦΒ στοιχεία από κρυσταλλικό πυρίτιο (Si) κυριαρχούν εδώ και πολλά χρόνια και κατέχουν το σημαντικότερο τμήμα της αγοράς. Η τεχνολογία τους και οι μέθοδοι κατασκευής τους έχουν φτάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα ωριμότητας και πλέον κατασκευάζονται και από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο αντί για μονοκρυστάλλικο (ενιαίο και χωρίς ατέλειες κρυσταλλικό πλέγμα) που είναι και πιο σπάνιο και δύσκολο να κατασκευαστεί εργαστηριακά. Τα πάνελ από στοιχεία πυριτίου έχουν επικρατήσει, έχουν μια διάρκεια ζωής της τάξης των 25 ετών και η μέχρι τώρα μέγιστη απόδοση τους αγγίζει το 18%.

Μια άλλη τεχνολογία που κερδίζει συνεχώς έδαφος είναι τα φθηνότερα (αλλά και λιγότερο αποδοτικά) στοιχεία από άμορφο πυρίτιο (a-Si) που κατασκευάζονται με τη μορφή λεπτών μεμβρανών (thin films). Αρχικά χρησιμοποιούνταν για να τροφοδοτήσουν μικρές συσκευές όπως ρολόγια χειρός και υπολογιστές τσέπης αλλά πλέον κατασκευάζονται και μεγάλες επιφάνειες που καλύπτονται από τέτοια στοιχεία.

Τα τελευταία χρόνια δοκιμάστηκαν πολλές ημιαγωγικές ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ΦΒ λεπτής μεμβράνης. Τέτοια είναι το cadmium telluride το copper indium diselenide κ.ά. και υπόσχονται χαμηλή τιμή και υψηλές αποδόσεις.

Μια σειρά από υψηλής απόδοσης ΦΒ στοιχεία από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο ή ημιαγωγικές ενώσεις όπως το GaAs (αρσενικούχο γάλιο), προορίζονται για ειδικές εφαρμογές, όπως για την τροφοδοσία δορυφόρων ή συστημάτων που λειτουργούν υπό συγκεντρωμένο ηλιακό φως. Τα ΦΒ υλικά τέλος δεν περιορίζονται στους ημιαγωγούς. Έχουν κατασκευαστεί και ΦΒ κύτταρα από οργανικά μόρια με αξιοπρεπή βαθμό απόδοσης.

1.2 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

Το χαρακτηριστικό στοιχείο ενός ημιαγωγού που το διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα υλικά είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων του ατόμου στην εξωτερική του στοιβάδα (στοιβάδα σθένους). Ο περισσότερος γνωστός ημιαγωγός και το πιο σύνηθες υλικό κατασκευής των ηλιακών στοιχείων είναι το πυρίτιο (Si).

Ένα άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια κατανεμημένα σε τρεις διαφορετικές στοιβάδες. Οι πρώτες δύο στοιβάδες, αυτές που είναι πιο κοντά στον πυρήνα, είναι συμπληρωμένες (με 2 και 8 ηλεκτρόνια αντίστοιχα). Η εξωτερική στοιβάδα όμως έχει μόνο 4 ηλεκτρόνια ενώ θα έπρεπε να έχει 8. Γι' αυτό, το άτομο μοιράζεται ηλεκτρόνια με τα γειτονικά του άτομα. Έτσι, τα άτομα συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν την κρυσταλλική δομή του πυριτίου, που είναι πολύ σημαντική για τα ηλιακά στοιχεία. Κάθε άτομο πυριτίου του πλέγματος συνδέεται με 4 χημικούς δεσμούς (2 ηλεκτρόνια δεσμεύονται για τη δημιουργία ενός δεσμού, ένα από κάθε μετέχον άτομο) με τα γειτονικά του άτομα. Συνεπώς, στη θεμελιώδη κατάσταση, όπου και τα τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους είναι δεσμευμένα ο ημιαγωγός δεν έχει ελεύθερους φορείς ηλεκτρικού ρεύματος, άρα συμπεριφέρεται σαν μονωτής.

Στην περίπτωση που ένας ημιαγωγός απορροφήσει ένα σημαντικό ποσό ενέργειας (με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας), παραδείγματος χάριν αν βρίσκεται στη συνηθισμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τότε η θερμική ενέργεια κατανέμεται στα άτομά του και προκαλεί την απελευθέρωση ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Τα ελευθερωμένα ηλεκτρόνια, απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν από τη θερμότητα και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η αποδυνάμωση των δεσμών στο πλέγμα δεν συνεπάγεται την κατάρρευση της συνοχής του σώματος αφού οι τρεις εναπομείναντες χημικοί δεσμοί μαζί με τον ένα ατελή δεσμό, επαρκούν για τη συγκράτηση των ατόμων στη θέση τους.

Τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, τα ελεύθερα δηλαδή ηλεκτρόνια, περιφέρονται άτακτα στο σώμα, όσο διατηρούν την αυξημένη τους ενέργεια. Αν αυτή μειωθεί σημαντικά, τότε επιστρέφουν στην κενή θέση κάποιου ατελούς δεσμού. Η κάλυψη της κενής θέσης μπορεί να γίνει και από κάποιο γειτονικό ηλεκτρόνιο, το οποίο θα αφήσει μία νέα κενή θέση στο αρχικό του άτομο. Η μετατόπιση των κενών θέσεων στο πλέγμα μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα ιδεατό σωματίδιο, τις οπές (hole-h), οι οποίες θεωρητικά έχουν ίδια μάζα και αντίθετο φορτίο από τα ηλεκτρόνια.

Από ενεργειακής άποψης, τα ηλεκτρόνια χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Στα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων (λιγότερο ενεργά) που δεν συμμετέχουν στον σχηματισμό των χημικών δεσμών, στα ηλεκτρόνια σθένους που σχηματίζουν τους δεσμούς και στα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Οι ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων σθένους σχηματίζουν μία ενεργειακή ζώνη, την ζώνη σθένους (valence band) και αντίστοιχα οι ενέργειες των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας σχηματίζουν τη ζώνη αγωγιμότητας (conduction band). Η ενεργειακή απόσταση ανάμεσα στις δύο ζώνες, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της ενέργειας του λιγότερου ενεργού από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και του περισσότερο ενεργού από τα ηλεκτρόνια σθένους, ονομάζεται ενεργειακό διάκενο (ενεργειακό χάσμα, energy gap) και εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους ώστε να μετατραπεί σε ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας με ταυτόχρονη δημιουργία μίας οπής.

Σε ένα απολύτως καθαρό σώμα, χωρίς καθόλου προσμίξεις και τέλειο κρυσταλλικό πλέγμα, δεν υπάρχουν ενεργειακές στάθμες στο διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους με ενέργεια E_v και τη ζώνη αγωγιμότητας με ενέργεια E_c και η περιοχή αυτή αποτελεί μία απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη.

Η διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους μπορεί να γίνει όταν του προσφερθεί μία ποσότητα ενέργειας, όπως μια δέσμη ακτινοβολίας με φωτόνια ενέργειας $E=hf$. Στην περίπτωση που η ενέργεια των φωτονίων είναι μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο E_g του στοιχείου, τότε το ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να την απορροφήσει. Αν τα προσπίπτοντα φωτόνια έχουν ενέργεια μεγαλύτερη του E_g , το ηλεκτρόνιο αφήνει το χημικό δεσμό και η περίσσεια ενέργειας μετατρέπεται σε κινητική, η οποία γίνεται αντιληπτή ως αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού.

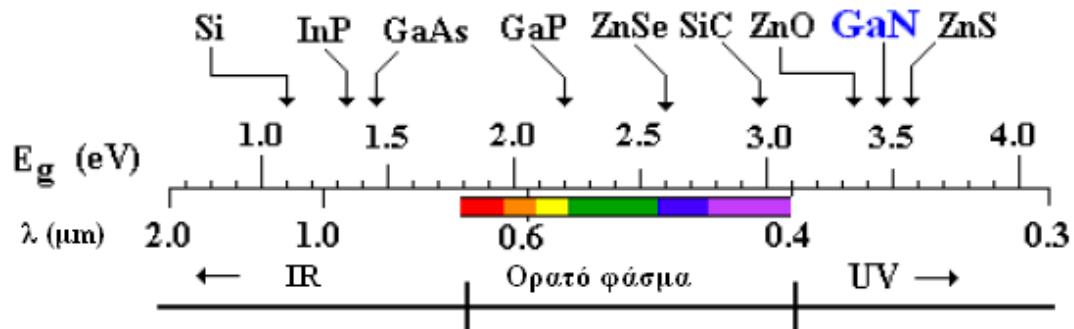


Σχήμα 1.1 Τυπική δομή ενεργειακών ζωνών ημιαγωγού και διέγερση ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας με απορρόφηση ακτινοβολίας [3].

Η πιθανότητα να αποκτήσουν τα ηλεκτρόνια σθένους αρκετή ενέργεια από το περιβάλλον ώστε να διεγερθούν και να υπερπηδήσουν το ενεργειακό διάκενο, εξαρτάται από την απόλυτη θερμοκρασία του σώματος και έχει τιμή ανάλογη προς το μέγεθος $\exp(-E_g/2kT)$ όπου k είναι η σταθερά του Boltzmann.

Όταν διοχετεύεται ενέργεια στο καθαρό (ενδογενές) πυρίτιο, για παράδειγμα με τη μορφή θερμότητας, μερικά ηλεκτρόνια σπάζουν τους δεσμούς τους και φεύγουν από τα άτομα τους. Τότε δημιουργείται μια κενή θέση στο άτομο. Αυτά τα ηλεκτρόνια περιφέρονται τυχαία μέσα στο κρυσταλλικό πυρίτιο αναζητώντας μια άλλη θέση. Έτσι γίνονται φορείς

του ηλεκτρικού ρεύματος. Γενικά όμως, είναι πολύ λίγα με αποτέλεσμα η αύξηση της αγωγιμότητας του υλικού να είναι πολύ μικρή.



Σχήμα 1.2 Τιμές ενεργειακού χάσματος των πιο γνωστών ημιαγωγών σε θερμοκρασία 300 K [3].

Τα πράγματα αλλάζουν αν στο καθαρό πυρίτιο προστεθούν κάποια άτομα προσμίξεων. Τότε ο ημιαγωγός ονομάζεται εξωγενής. Έστω ότι το κρυσταλλικό πυρίτιο αναμιγνύεται με άτομα φωσφόρου. Ο φώσφορος έχει 5 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα και όχι 4 όπως το πυρίτιο. Πάλι συνδέεται με τα γειτονικά του άτομα πυριτίου αλλά ο φώσφορος έχει ένα ηλεκτρόνιο που δεν συνδέεται με κάποιο άλλο. Δεν σχηματίζει δεσμό, αλλά υπάρχει ένα θετικό πρωτόνιο στον πυρήνα του φωσφόρου που το συγκρατεί. Το αποτέλεσμα είναι ότι απαιτείται λιγότερη ενέργεια για να ελευθερωθεί το επιπλέον ηλεκτρόνιο του φωσφόρου.

Σαν αποτέλεσμα τα περισσότερα από αυτά τα ηλεκτρόνια ελευθερώνονται και γίνονται φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος, που είναι πολύ περισσότεροι από αυτούς του κρυσταλλικού πυριτίου. Η διαδικασία μίξης ατόμων κρυσταλλικού πυριτίου με άτομα φωσφόρου δημιουργεί πυρίτιο που ονομάζεται πυρίτιο τύπου N (Negative, Αρνητικό) εξαιτίας της υπεροχής του αριθμού των ηλεκτρονίων και είναι καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος.

Αντίθετα αν προσθέσουμε στο κρυσταλλικό πυρίτιο άτομα βορίου (B), το οποίο έχει μόνο 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα αντί για 4, το πυρίτιο μετατρέπεται σε πυρίτιο τύπου P. Αντί να έχει ελεύθερα ηλεκτρόνια, το πυρίτιο τύπου P (Positive, θετικό) έχει, ως φορείς

πλειονότητας, οπές που ως κενές θέσεις ηλεκτρονίων είναι φορτισμένες θετικά.

Στους εξωγενείς ημιαγωγούς οι ενεργειακές καταστάσεις των ατόμων των προσμείξεων βρίσκονται μέσα στο ενεργειακό χάσμα. Πολύ κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας για ημιαγωγούς τύπου N και πολύ κοντά στη ζώνη σθένους για ημιαγωγούς τύπου P.

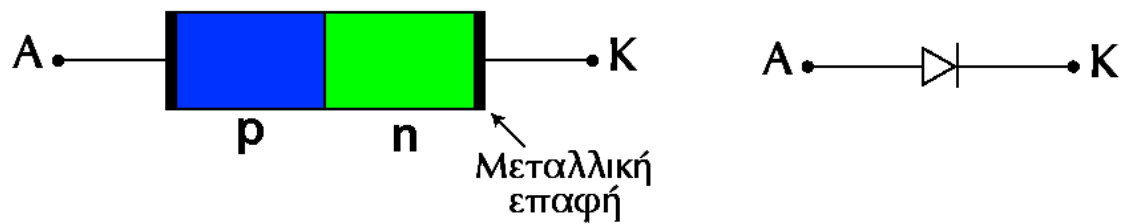
1.3 Η ΔΙΟΔΟΣ P-N

Η απλή δίοδος κατασκευάζεται δημιουργώντας σε έναν ενδογενή ημιαγωγό όπως το πυρίτιο (Si) ή το γερμάνιο (Ge) δύο εξωγενείς ημιαγωγούς p- και n-τύπου, προσθέτοντας προσμίξεις τρισθενούς ή πενταθενούς στοιχείου αντίστοιχα. Στην πλευρά τύπου p οι φορείς πλειονότητας είναι οι οπές ενώ στην πλευρά τύπου n οι φορείς πλειονότητας είναι τα ηλεκτρόνια. Όταν γίνει η προσθήκη των προσμίξεων στις δύο πλευρές του ενδογενούς ημιαγωγού γίνεται μετακίνηση οπών προς τον ημιαγωγό τύπου n και ηλεκτρονίων προς τον ημιαγωγό τύπου p, η οποία προκαλείται λόγω της μεγάλης διαφοράς συγκέντρωσης οπών και ηλεκτρονίων στις δύο πλευρές του ημιαγωγού.

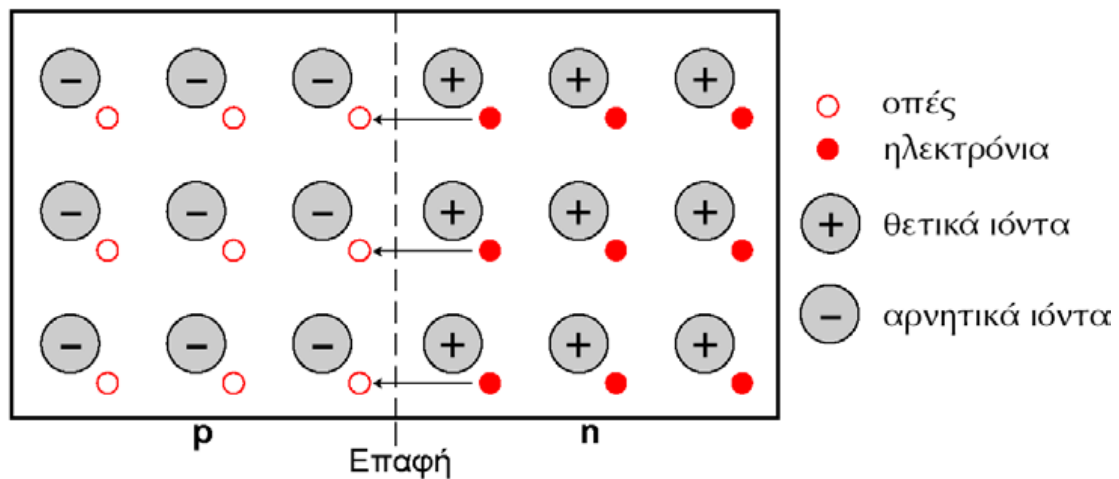
Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάχυση ηλεκτρονίων και οπών. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι η δημιουργία μιας λεπτής περιοχής στην νοητή ένωση των δύο εξωγενών ημιαγωγών. Ολόκληρη αυτή η περιοχή, που εκτείνεται εκατέρωθεν της επαφής μεταξύ των δύο ημιαγωγών, ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης ή εκκένωσης (Depletion region). Στην περιοχή απογύμνωσης δεν υπάρχουν πλέον ελεύθεροι φορείς, λόγω του φαινομένου της επανασύνδεσης (recombination) μεταξύ ηλεκτρονίων και οπών κατά την μετακίνησή τους από την μια περιοχή στην άλλη. Αντίθετα, στην περιοχή αυτή παραμένουν τα στατικά ιόντα του πλέγματος, που είναι θετικά στην περιοχή τύπου n και αρνητικά στην περιοχή τύπου p. Έτσι, δημιουργείται ένα εσωτερικό πεδίο στην περιοχή της επαφής και συνακόλουθα υπάρχει μια διαφορά δυναμικού, που σταδιακά εμποδίζει τη διάχυση των φορέων. Το φαινόμενο της διάχυσης σταματάει όταν η διαφορά δυναμικού στην επαφή αποκτήσει τέτοια τιμή ώστε είναι αδύνατον να συνεχιστεί η μετακίνηση ηλεκτρονίων και οπών από την μια πλευρά του ημιαγωγού στην άλλη. Αυτή η διαφορά δυναμικού ονομάζεται φράγμα δυναμικού ή τάση κατωφλίου V_0 ή V_D . Σε δίοδο πυριτίου το φράγμα δυναμικού είναι 0.7V.

Η διόδος p-n υλοποιείται με σύνδεση των άκρων των δύο ημιαγωγικών τμημάτων p και n με μεταλλικές επαφές. Έτσι, προκύπτουν η άνοδος A και η κάθοδος K της διόδου, η οποία στα ηλεκτρικά κυκλώματα συμβολίζεται με ένα βέλος στην πλευρά p και μία γραμμή στην πλευρά n (σχήμα 1.3).

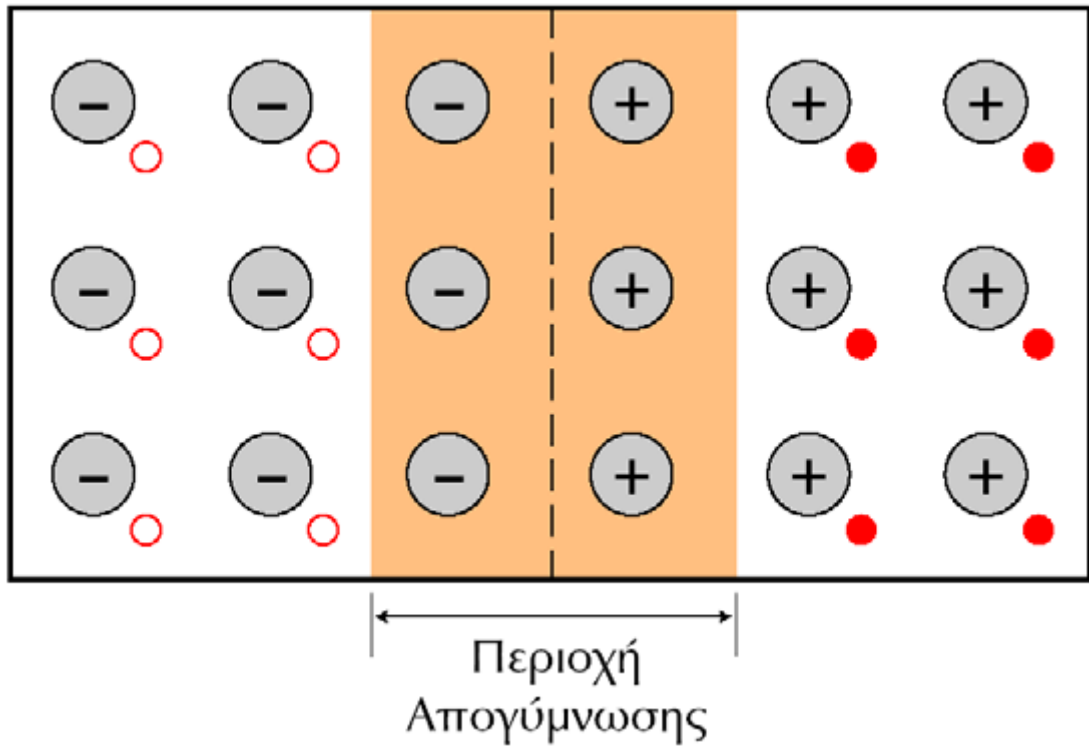
Η ζώνη απογύμνωσης λειτουργεί ως πυκνωτής με χωρητικότητα η οποία λαμβάνει τιμές στην περιοχή 1-100 pF.



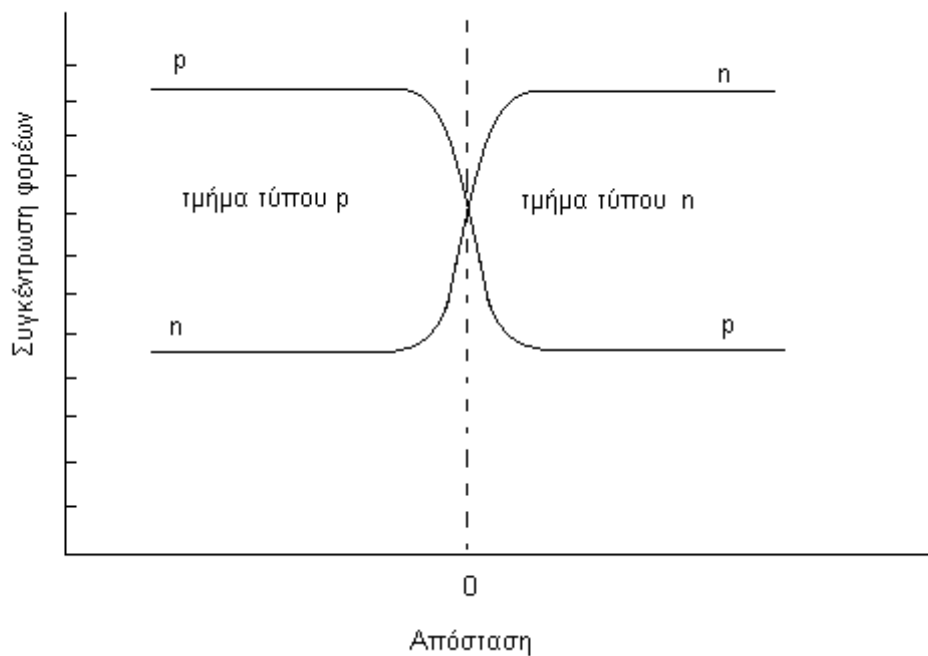
Σχήμα 1.3 Υλοποίηση και συμβολισμός διόδου p-n [5].



Σχήμα 1.4 Επαφή P-N [5].



Σχήμα 1.5 Σχηματισμός της ζώνης απογύμνωσης [5].



Σχήμα 1.6 Συγκεντρώσεις των φορέων σε μια επαφή p-n [3].

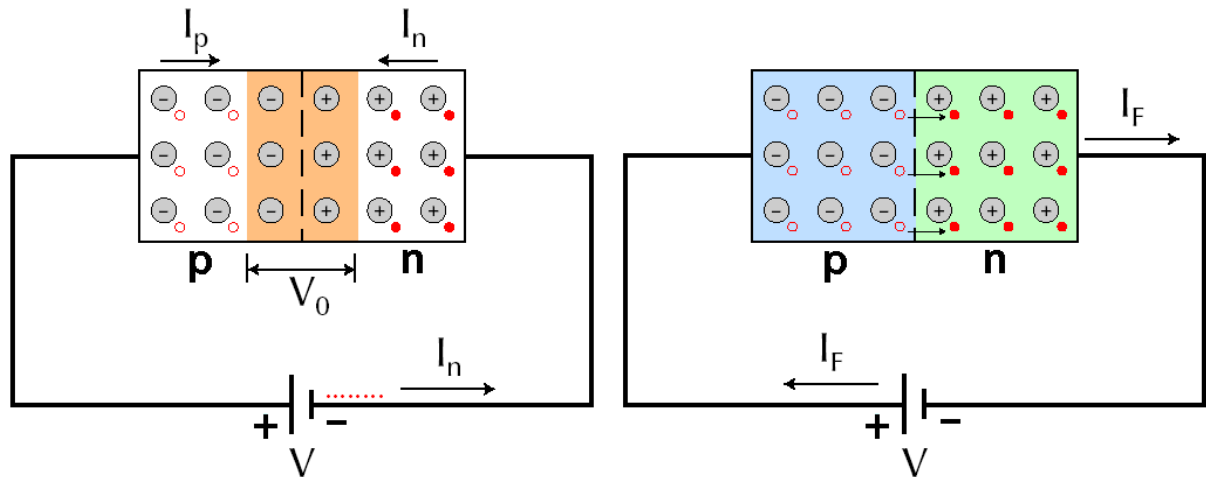
1.4 ΠΟΛΩΣΗ ΔΙΟΔΟΥ P-N

Ανάλογα με την σύνδεση εξωτερικής πηγής με τα άκρα της διόδου p-n διακρίνουμε δύο είδη πόλωσης της:

(α) Ορθή πόλωση (forward bias), όταν ο θετικός πόλος της εξωτερικής πηγής συνδέεται με το τμήμα p της διόδου (Σχ. 1.7).

(β) Ανάστροφη πόλωση (reverse bias), όταν ο θετικός πόλος της εξωτερικής πηγής συνδέεται με το τμήμα n της διόδου (Σχ. 7).

Ορθή Πόλωση



Σχήμα 1.7 Ορθή πόλωση διόδου p-n
(α) $V < V_0$, (β) $V > V_0$ [5].

Σημειώνεται κίνηση των φορέων (οπές και ηλεκτρόνια) σε κάθε τμήμα της διόδου προς την επαφή p-n.

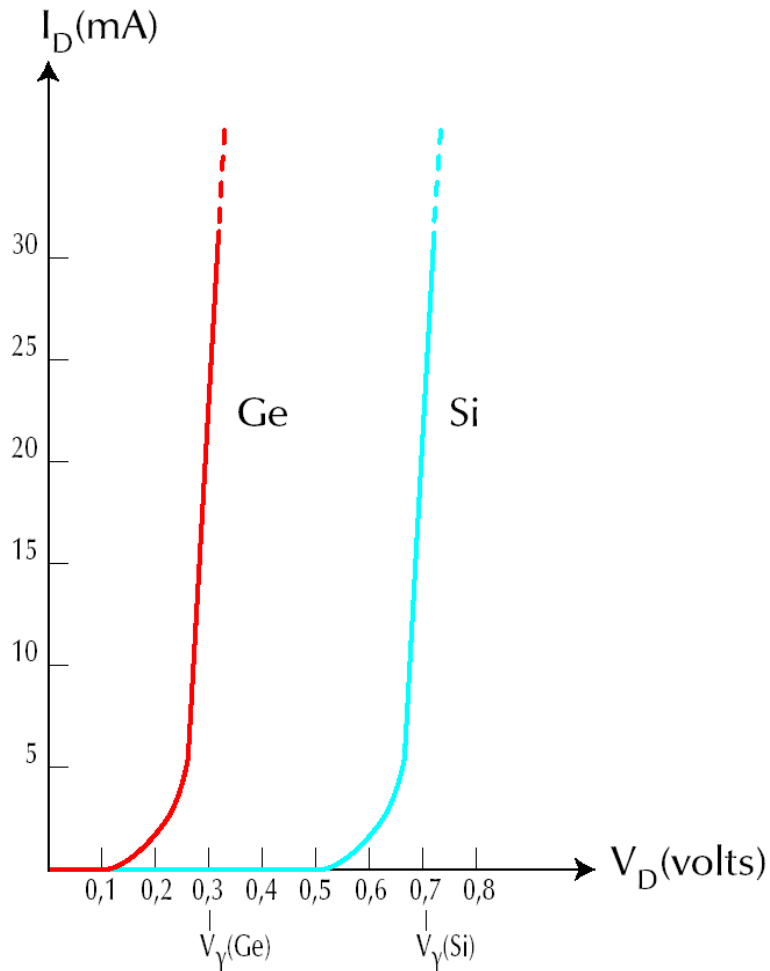
Με αύξηση της εξωτερικής τάσης, το μήκος της ζώνης απογύμνωσης βαθμιαία μειώνεται μέχρις ότου μηδενιστεί, οπότε ξεκινά ροή ρεύματος στο κύκλωμα προς μία κατεύθυνση.

Κατευθείαν ρεύμα ή ρεύμα ορθής φοράς ή ρεύμα διάχυσης (forward current) (I_F): Είναι το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα και σημειώνεται με φορά αντίθετη προς τη φορά κίνησης των ηλεκτρονίων.

Ανάστροφο ρεύμα κόρου (I_0): είναι το ρεύμα που οφείλεται σε θερμική διέγερση του ημιαγωγού και λαμβάνει πολύ χαμηλή τιμή (μερικά μA).

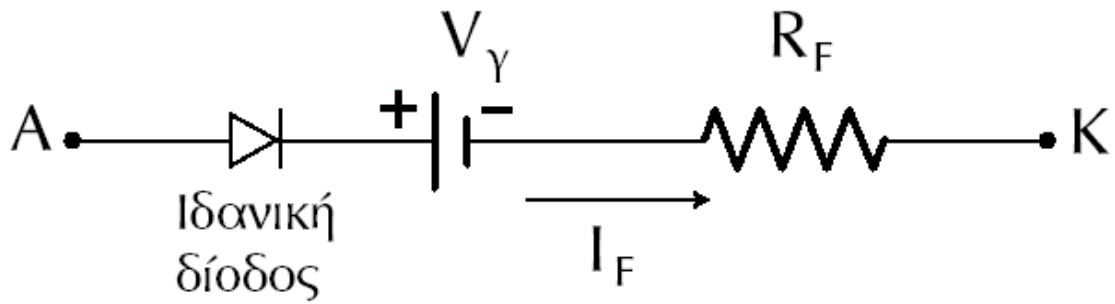
Ρεύμα εξωτερικού κυκλώματος (I_D): $I_D = I_F - I_0$.

Τάση γόνατος (V_γ): Είναι η τιμή της εξωτερικής τάσης, μετά την οποία αυτή αυξάνεται εκθετικά, (Σχήμα 1.8). Για το Ge λαμβάνει την τιμή 0.3V, ενώ για το Si την τιμή 0.7V.



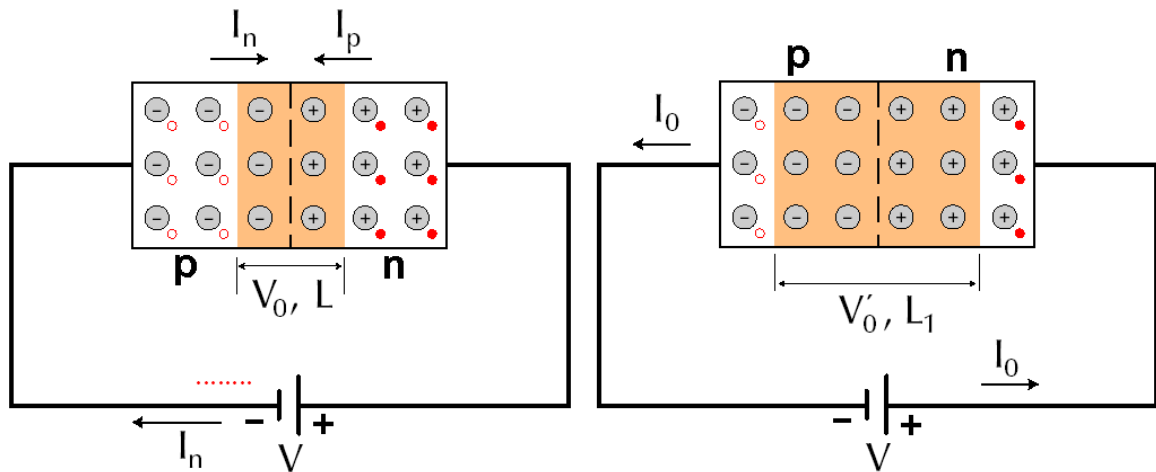
Σχήμα 1.8 Χαρακτηριστική καμπύλη V-I διόδου p-n σε ευθεία πόλωση [5].

Η ορθά πολωμένη διάδος p-n λειτουργεί ως κλειστός διακόπτης και το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμά της φαίνεται στο Σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9 Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικής και μη ιδανικής διόδου p-n με ορθή πόλωση [5].

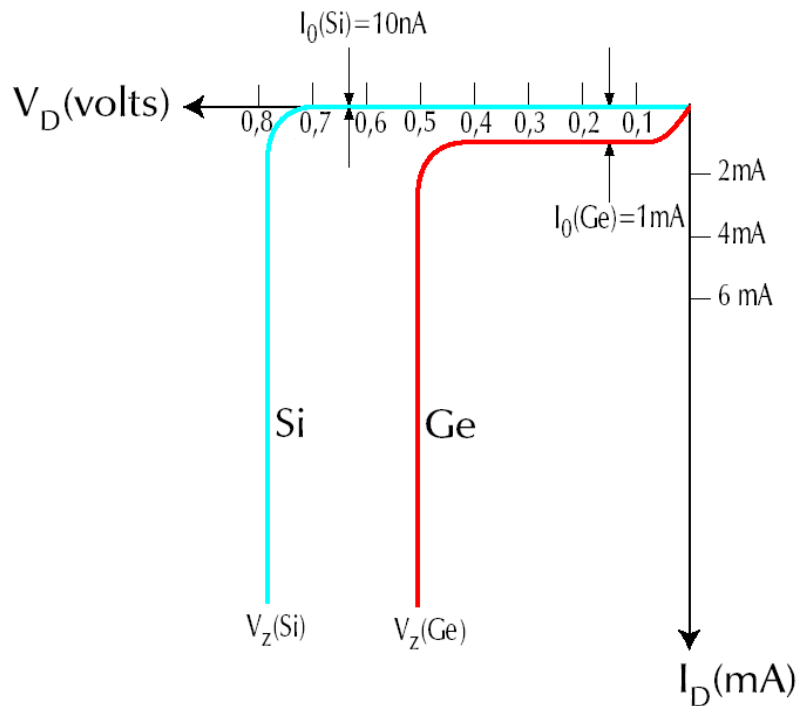
Ανάστροφη Πόλωση



Σχήμα 1.10 Ανάστροφη πόλωση διόδου p-n: (α) $V < V_0$, (β) $V' > V_0$ [5].

Σημειώνεται κίνηση των φορέων (οπές και ηλεκτρόνια) σε κάθε τμήμα της διόδου προς τα άκρα αυτής (απομακρύνονται από την επαφή p-n).

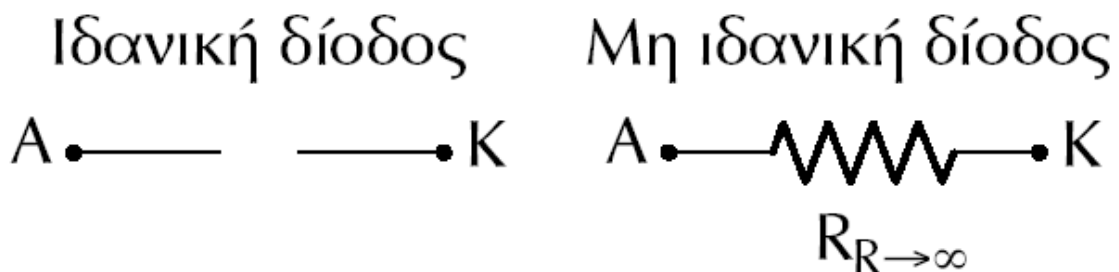
Με αύξηση της εξωτερικής τάσης, το μήκος της ζώνης απογύμνωσης αυξάνεται συνεχώς ($L_1 > L$) και η διόδος διαρρέεται από ένα πολύ μικρό ρεύμα (I_0), που ονομάζεται ανάστροφο ρεύμα κόρου (της τάξης των μA) και παραμένει σχεδόν σταθερό.



Σχήμα 1.11 Χαρακτηριστική καμπύλη V-I διόδου p-n σε ανάστροφη πόλωση [5].

Όταν η εξωτερική τάση φθάσει μια ορισμένη τιμή (V_z) που λέγεται τάση διάσπασης ή τάση Zener, παρατηρείται ραγδαία αύξηση του ρεύματος. Το φαινόμενο καλείται κατάρρευση της διόδου. Στο σχήμα 1.11 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη V-I της διόδου σε ανάστροφη πόλωση.

Η ανάστροφα πολωμένη διάδος p-n αντιμετωπίζεται σε κύκλωμα ως ανοικτός διακόπτης (ιδανική διάδος) ή ως πολύ μεγάλη αντίσταση (μη ιδανική διάδος) όπως φαίνεται παραστατικά στο σχήμα 1.12.



Σχήμα 1.12 Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικής και μη ιδανικής διόδου p-n με ανάστροφη πόλωση [5].

1.5 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

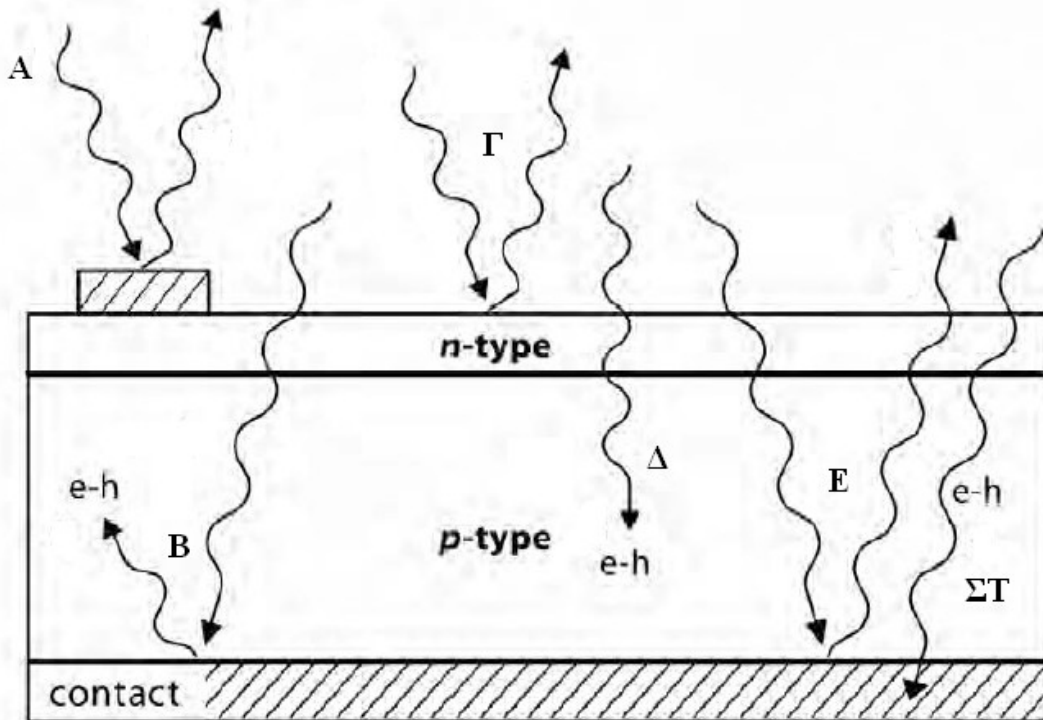
Το φωτοβολταϊκό στοιχείο βασίζεται σε μία δίοδο p-n με πολύ λεπτή και έντονα νοθευμένη περιοχή επιφάνειας. Η επιφάνεια ακτινοβολίας μπορεί να είναι η περιοχή p ή η περιοχή n. Στα στοιχεία πυριτίου, η επιφάνεια ακτινοβολίας είναι η περιοχή n. Όταν το στοιχείο φωτίζεται, τότε τα φωτόνια που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, μπορούν να απορροφηθούν από τα δεσμευμένα ηλεκτρόνια και να προκαλέσουν τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής τα οποία διαχωρίζονται αμέσως λόγω του εσωτερικού ηλεκτροστατικού πεδίου E_0 . Τα ηλεκτρόνια έτσι ολισθαίνουν προς την επιφανειακή περιοχή και αντίστοιχα οι οπές προς την p περιοχή. Συνεπώς δημιουργείται μία τάση ανοιχτού κυκλώματος ανάμεσα στους ακροδέκτες της διάταξης και η p περιοχή είναι θετικά φορτισμένη σε σχέση με την επιφανειακή περιοχή.

Χωρίς την ύπαρξη του ηλεκτροστατικού πεδίου E_0 δεν είναι δυνατόν να διαχωριστούν τα φωτοδιεγειρόμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών και να συσσωρευτούν επιπλέον ηλεκτρόνια στην επιφανειακή περιοχή και επιπλέον οπές στην p περιοχή.

Στα φ/β στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι στο περιβάλλον.

Ακολουθώς, από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος των φωτονίων που έχουν ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο. Για αυτά τα φωτόνια, ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διάφανο σώμα. Τα φωτόνια που έχουν ενέργεια $h\nu$ ίση ή μεγαλύτερη από το E_g , απορροφούνται και δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με ενέργεια $h\nu$.

Επειδή τα διεγερμένα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε θερμική ισορροπία στην ζώνη αγωγιμότητας μόνο όταν έχουν ενέργεια περίπου ίση με το E_g , το υπόλοιπο της ενέργειας που απορρόφησαν, $h\nu - E_g$ πρέπει να χαθεί. Αυτή η ποσότητα ενέργειας μεταφέρεται στις πλεγματικές ταλαντώσεις υπό μορφή θερμότητας καθώς τα ηλεκτρόνια σκεδάζονται από τα ταλαντούμενα άτομα.



Σχήμα 1.13 Ανάκλαση και απορρόφηση ακτινοβολίας. Α,Ε: Ανάκλαση στους μεταλλικούς ακροδέκτες. Β: Ανάκλαση στον μεταλλικό ακροδέκτη και μετέπειτα απορρόφηση της ακτινοβολίας. Γ: Ανάκλαση στην επιφάνεια τύπου n. Δ: Απευθείας απορρόφηση της ακτινοβολίας. ΣΤ: Απορρόφηση ακτινοβολίας στον ακροδέκτη [3].

Τα φωτόνια με κατάλληλη ενέργεια για να διεγείρουν τον ημιαγωγό, απορροφούνται πολύ πιο εύκολα κοντά στην επιφάνεια που ακτινοβολείται και λιγότερο εύκολα στο βάθος του υλικού.

Η ροή των φωτονίων Φ εντός του ημιαγωγού δίνεται από το νόμο Beer-Lambert:

$$\Phi(x) = \Phi_0 \cdot e^{-ax} \quad (1.1)$$

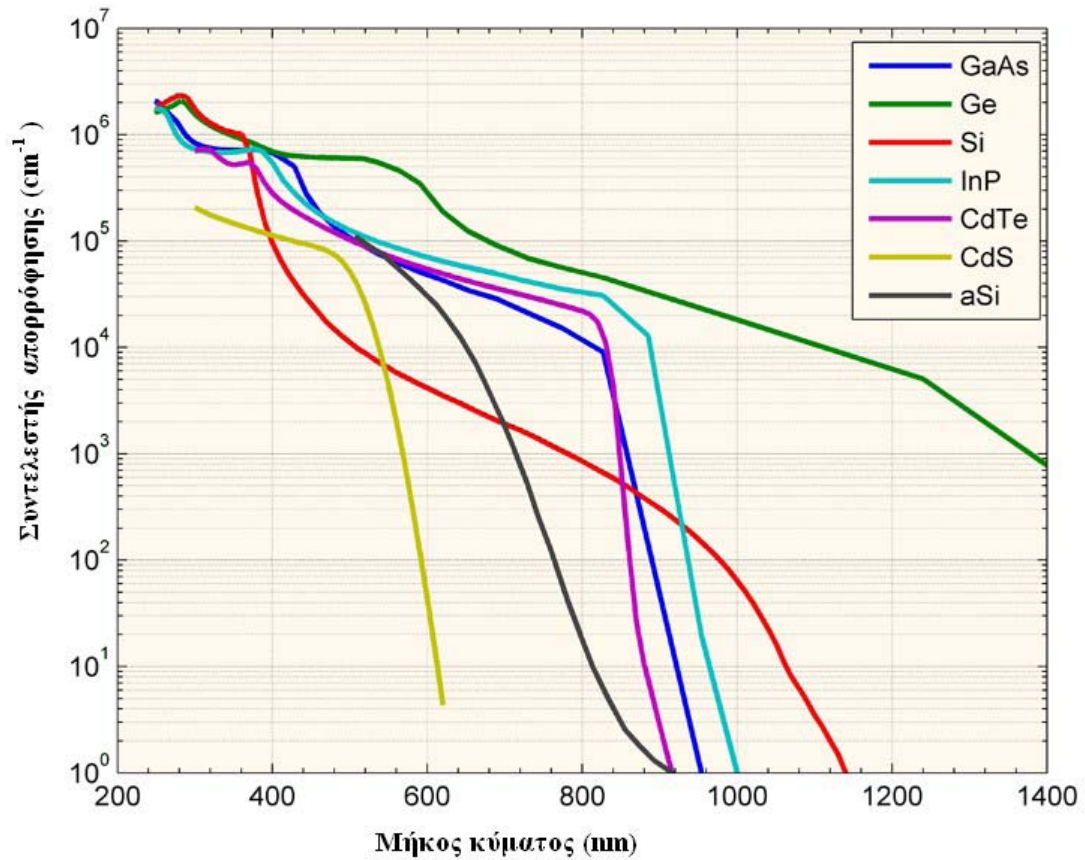
όπου:

Φ_0 η αρχική τιμή της ροής στην επιφάνεια

x η απόσταση που διανύει η ακτινοβολία εντός του ημιαγωγού

a ο συντελεστής απορρόφησης

Ο συντελεστής απορρόφησης (μετριέται σε m^{-1}) εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων άρα από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.



Σχήμα 1.14 Ο συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει του μήκους κύματος για τους κυριότερους ημιαγωγούς των φ/β διατάξεων [3].

Τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών λόγω της φωτοδιέγερσης που δημιουργούνται από φωτόνια μεγάλου μήκους κύματος, απορροφώνται στην p περιοχή και διαχέονται στην περιοχή αυτή αφού δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Αν ο χρόνος επανασύνδεσης των ηλεκτρονίων είναι τ_e τότε το ηλεκτρόνιο διαχέεται σε μία μέση απόσταση ίση με το λεγόμενο μήκος διάχυσης:

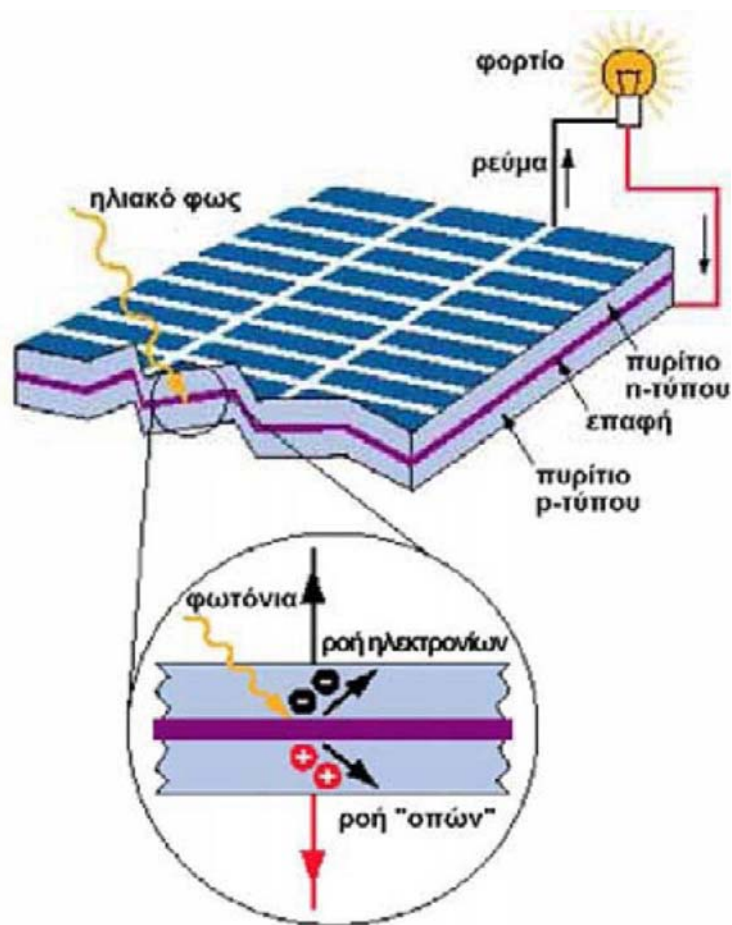
$$L_e = \sqrt{D_e \cdot \tau_e} \quad (1.2)$$

όπου D_e είναι ο συντελεστής διάχυσης στην p περιοχή.

Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε απόσταση L_e από την περιοχή εξάντλησης μπορούν εύκολα να διαχυθούν μέχρι εκεί. Από την περιοχή αυτή και μετά ολισθαίνουν λόγω του πεδίου E_0 και μεταβαίνουν στην n-

περιοχή. Έτσι μόνο τα φωτοδημιουργούμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που βρίσκονται σε απόσταση μήκους διάχυσης L_e των φορέων μειονότητας από τη ζώνη εξάντλησης συνεισφέρουν στο ϕ/β φαινόμενο.

Μόλις ένα ηλεκτρόνιο διαχυθεί μέχρι την ζώνη απογύμνωσης, σαρώνεται προς την n-περιοχή από το πεδίο E_0 , δίνοντας έτσι εκεί ένα επιπλέον αρνητικό φορτίο. Οι οπές που παραμένουν στην p-περιοχή δημιουργούν ένα συνολικό θετικό φορτίο στην περιοχή. Τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που δημιουργούνται σε απόσταση από την ζώνη εξάντλησης μεγαλύτερη του μήκους διάχυσης L_e , χάνονται λόγω επανασύνδεσης. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται ότι το μήκος της διάχυσης L_e , είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο.



Σχήμα 1.15 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο [2].

Οι ίδιες αρχές ισχύουν και για τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που δημιουργούνται στην n-περιοχή, λόγω της απορρόφησης φωτονίων μικρού μήκους κύματος. Οι οπές που δημιουργούνται εντός απόστασης μικρότερης του μήκους διάχυσης L_h , μπορούν να φτάσουν μέχρι τη ζώνη

εξάντλησης όπου και σαρώνονται στην p-περιοχή. Επομένως, η φωτοδιέγερση των ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που συνεισφέρει στο ϕ/β φαινόμενο λαμβάνει χώρα στην περιοχή μήκους L_h+W+L_e . Αν οι ακροδέκτες της διάταξης είναι βραχυκυκλωμένοι, τότε τα επιπλέον ηλεκτρόνια της n-περιοχής μπορούν να κινηθούν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος και να εξουδετερώσουν τις οπές στην p-περιοχή.

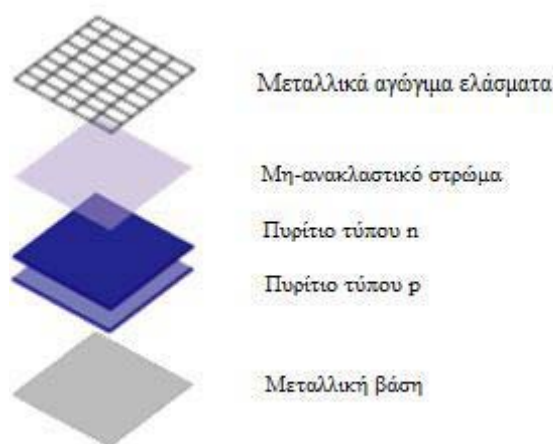
Το ρεύμα που οφείλεται στη ροή των φωτοδιεγερμένων φορέων, ονομάζεται φωτόρευμα I_{ph} . Το φωτόρευμα εξαρτάται από παράγοντες όπως ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου, ο συντελεστής απορρόφησης, το πάχος του ημιαγωγού, η πιθανότητα επανασύνδεσης των φορέων κ.ά.

1.6 ΔΟΜΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Κατασκευαστικά για λόγους μηχανικής αντοχής και ευχρηστίας, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν ενσωματωμένα στο περίγραμμά τους μεταλλικά ελάσματα ανοδιωμένου αλουμινίου, και για λόγους προστασίας είναι αεροστεγώς και υδατοστεγώς κλεισμένα μέσα σε ειδικό γυαλί και ειδικό μονωτικό πλαστικό.

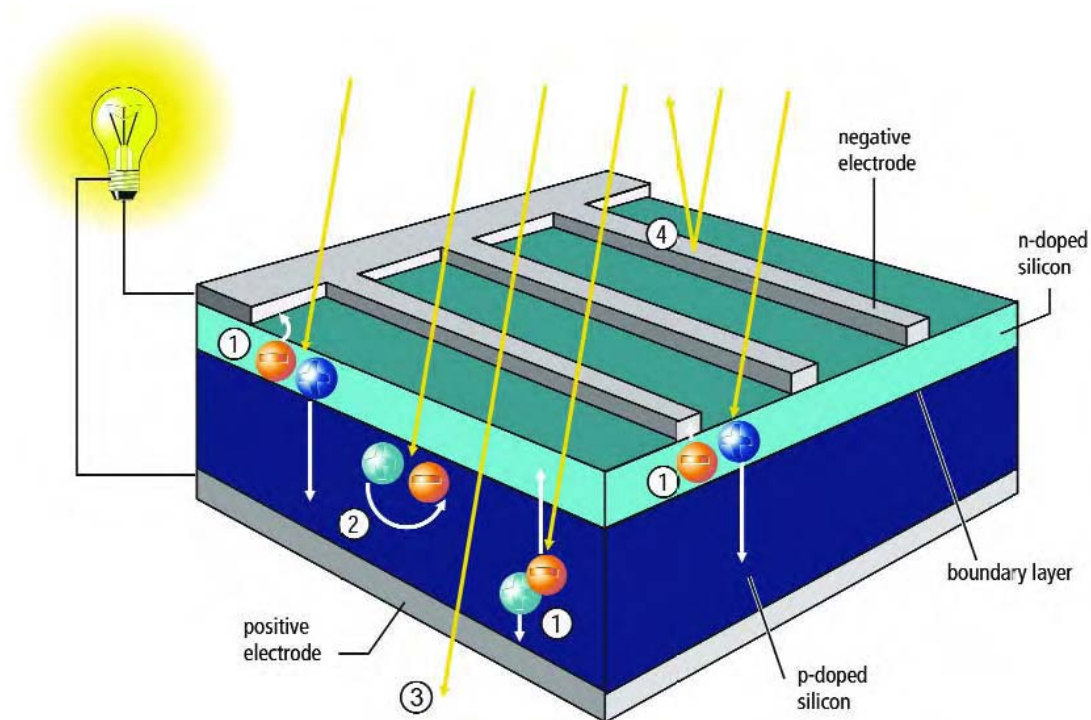
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από :

- Μεταλλική βάση
- Πυρίτιο τύπου P
- Πυρίτιο τύπου N
- Μη ανακλαστικό στρώμα
- Μεταλλικά αγωγή ελάσματα



Σχήμα 1.16 Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου [6].

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από πολλά λεπτά οριζόντια ελάσματα, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.16 και είναι περισσότερα σε σχέση με τα κάθετα και είναι αυτά τα στοιχεία που μαζεύουν τα ηλεκτρόνια που διεγείρονται και αποτελούν το ρεύμα. Στη συνέχεια τα ηλεκτρόνια διοχετεύονται στα κάθετα παχιά ελάσματα, που ονομάζονται “busbars” ή διαφορετικά ζυγοί (Σχήμα 1.17). Οι ζυγοί των στοιχείων ενώνονται μεταξύ τους και έτσι έχουμε πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους τα οποία και αποτελούν το πλαίσιο. Κάθε πλαίσιο έχει δύο ακροδέκτες τον θετικό και τον αρνητικό πόλο.



Σχήμα 1.17 Πλάγια όψη φωτοβολταϊκού στοιχείου όπου:
 (1) Διαχωρισμός φορτίου (2) Επανασύνδεση
 (3) Αχρησιμοποίητη φωτεινή ενέργεια (4) Αγωγή ελάσματα [6].

1.7 ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία διακρίνονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες, ανάλογα με το υλικό παρασκευής, τη δομή του βασικού υλικού καθώς και τον τρόπο παρασκευής. Έτσι, έχουμε την παρακάτω κατηγοριοποίηση:

Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Single Crystalline Silicon, sc-Si)

Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3mm. Η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15-18% για το πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 24,7%. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης. Ένα μειονέκτημά τους είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σύγκριση με τα πολυκρυσταλλικά.

Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Και οι δύο βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου.

Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με την υψηλότερη απόδοση στο εμπόριο σήμερα, έχει απόδοση πλαισίου 18,5% και έχει μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πλαισίου αποκομίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 1.18 Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου [6].

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

Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3mm. Η μέθοδος παραγωγής τους κοστίζει φθηνότερα σε σύγκριση με αυτή των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή πώλησής τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές.

Όσο μεγαλύτερη είναι η έκταση της μονοκρυσταλλικής περιοχής τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά

φωτοβολταϊκά στοιχεία. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ).

Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση"), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.



Σχήμα 1.19 Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου [6].

1.8 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Στο σχήμα 1.20 φαίνεται η χαρακτηριστική I-V καθώς και η καμπύλη ισχύος ενός φ/β. Κάθε σημείο της χαρακτηριστικής I-V του στοιχείου, αντιστοιχεί και σε μία τιμή του φορτίου.

Ως συντελεστής απόδοσης ενός φ/β στοιχείου, ορίζεται το πηλίκο της μέγιστης ισχύος προς την συνολική πυκνότητα ηλιακής ισχύος που αυτό λαμβάνει. Δηλαδή:

$$\eta = \frac{V_m \cdot I_m}{H \cdot A} \quad (1.3)$$

όπου:

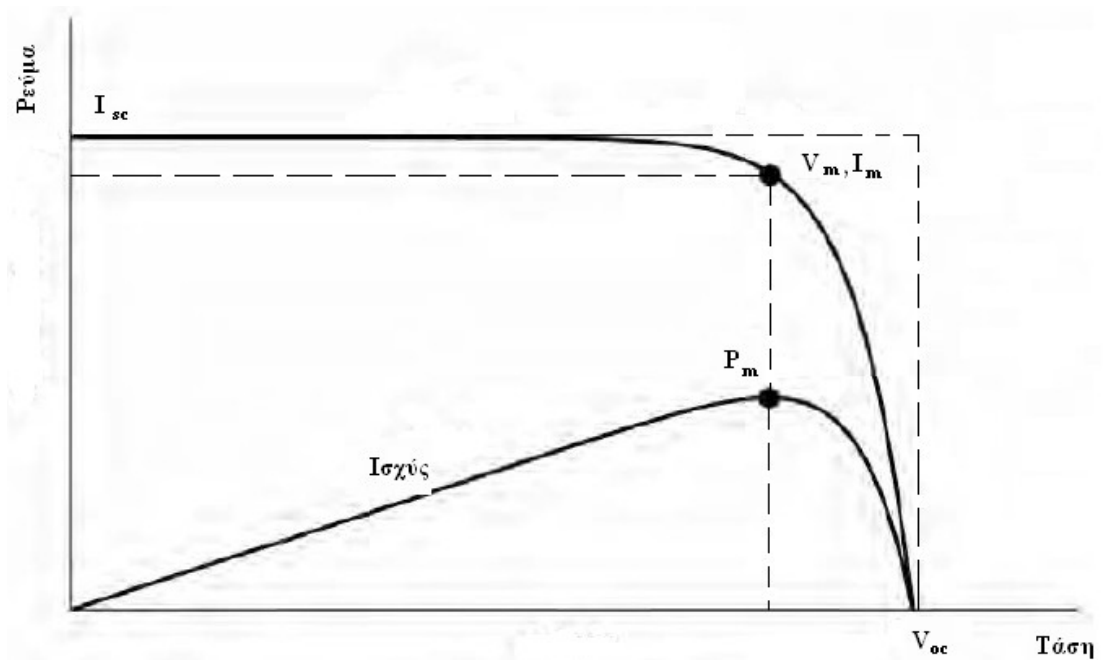
H είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

A είναι το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας που ακτινοβολείται

Ως παράγοντας πλήρωσης (Fill Factor, FF) ορίζεται το πηλίκο του γινομένου της τάσης μέγιστης ισχύος επί το ρεύμα μέγιστης ισχύος, προς την τάση ανοιχτοκύκλωσης επί το ρεύμα βραχυκύκλωσης:

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1.4)$$

Σχηματικά, στην χαρακτηριστική καμπύλη I-V ο παράγοντας πλήρωσης προκύπτει ως ο λόγος του εμβαδού που ορίζεται από τις τιμές τάσης και ρεύματος για τις οποίες μεγιστοποιείται η ισχύς προς το εμβαδόν που ορίζεται από την τάση ανοιχτοκύκλωσης και το ρεύμα βραχυκύκλωσης.



Σχήμα 1.20. Χαρακτηριστική I-V, P-V και τα μεγέθη μέγιστης ισχύος φ/β στοιχείου [3].

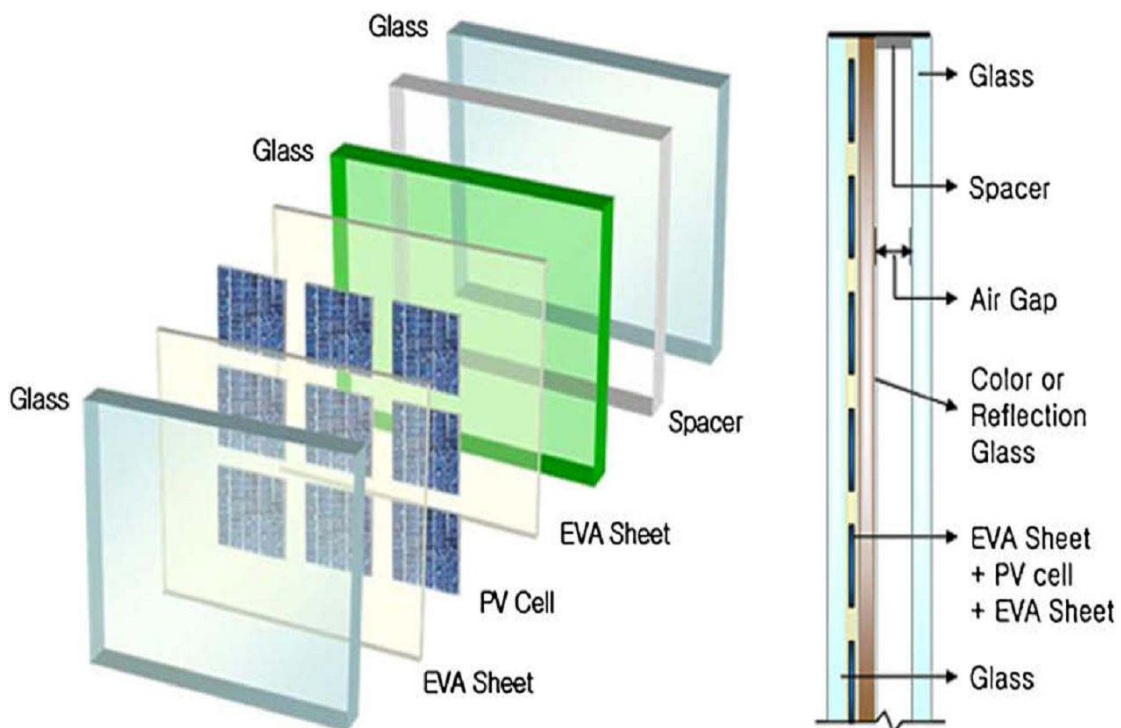
1.9 ΔΟΜΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από έναν αριθμό φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για να λειτουργήσει το πλαίσιο τα στοιχεία θα πρέπει να προστατεύονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι πλαισίων και εξαρτώνται από το είδος των φωτοβολταϊκών στοιχείων καθώς και την εφαρμογή τους.

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από διάφορα στρώματα, τα οποία είναι:

- Ειδικό γυαλί
- Συμπυκνωμένο πολυμερές υλικό (Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Sheet) για την ενθυλάκωση των στοιχείων
- Ηλιακά στοιχεία
- Συμπυκνωμένο υλικό (EVA)
- Ειδικό γυαλί
- Κενό αέρος
- Ειδικό γυαλί

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία περικλείονται συνήθως από δυο κομμάτια γυαλιού ή ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικού, ενώ μερικές φορές εξολοκλήρου από πλαστικό. Τα είδη των γυαλιών που χρησιμοποιούνται είναι διαφανή, χρωματισμένα και αντανακλούν την θερμότητα. Το συμπυκνωμένο υλικό είναι συνήθως EVA, υλικό που εμφανίζει πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 1.21.



Σχήμα 1.21 Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου [6].

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται σε σειρά, παράλληλα ή σε συνδυασμούς προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε τάση και σε ρεύμα. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πρέπει να είναι όμοια, για να εμφανίζουν όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται επάνω σε περιστρεφόμενα στηρίγματα που ακολουθούν την τροχιά του ήλιου. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας άρα και τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

1.10 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι:

- Υψηλή αξιοπιστία-μεγάλη διάρκεια ζωής. Αρχικά κατασκευάστηκαν για χρήση στις διαστημικές αποστολές όπου οι επισκευές είναι ιδιαίτερα δαπανηρές ή και αδύνατες. Σήμερα όλοι σχεδόν οι τεχνητοί δορυφόροι τροφοδοτούνται με ενέργεια μέσω φωτοβολταϊκών στοιχείων.
- Μηδενικό κόστος λειτουργίας. Χρησιμοποιούν το φως του Ήλιου. Δεν καταναλώνουν πρώτες ύλες.
- Δεν χρειάζονται συντήρηση. Δεν έχουν κινούμενα μέρη, έτσι δεν χρειάζονται συντήρηση κατά τη λειτουργία τους.
- Δεν μολύνουν το περιβάλλον. Δεν παράγουν υποπροϊόντα ούτε χρειάζονται καύσιμα για να λειτουργήσουν. Η λειτουργία τους είναι αθόρυβη, συνεπώς δεν προκαλούν ηχορύπανση. Κατασκευάζονται από ανακυκλώσιμα υλικά.
- Ευελιξία. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα εγκαθίστανται ανάλογα με τις απαιτήσεις σε ενέργεια. Αν οι ανάγκες αυτές αυξηθούν τότε πολύ εύκολα το σύστημα αναβαθμίζεται ώστε να καλύψει τις αυξημένες ανάγκες.
- Αυτονομία. Μπορούν να τοποθετηθούν σε δύσβατες περιοχές, σε πλωτές εξέδρες και γενικά όπου το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ασύμφορο να φτάσει.

Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι:

- Μικρή πυκνότητα ισχύος. Η απαιτούμενη επιφάνεια ανά MW φωτοβολταϊκής ισχύος είναι 25 στρέμματα.
- Χαμηλή απόδοση. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού και ο μέσος ετήσιος συντελεστής απασχόλησης έχουν γενικά χαμηλές τιμές.
- Υψηλό κόστος εγκατάστασης. Το μέσο κόστος εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού πάρκου μεγάλης ισχύος κυμαίνεται στα 2000 ευρώ ανά kW.
- Υψηλό κόστος παραγωγής. Τα προηγούμενα δύο χαρακτηριστικά έχουν σαν αποτέλεσμα το κόστος παραγωγής να είναι υψηλό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα συμβατικά φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν με ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ενός ηλίου, όπου ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ενός ηλίου είναι περίπου 1000 W/m^2 , με ολόκληρη την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών να καλύπτεται με ηλιακές κυψέλες. Το υλικό των ΦΒ είναι ακριβό, έτσι το κόστος ολόκληρου του συστήματος είναι αρκετά υψηλό.

Σαν εναλλακτική λύση, τα φωτοβολταϊκά συστήματα συγκέντρωσης (CPV) χρησιμοποιούν οπτικά στοιχεία χαμηλότερου κόστους όπως οι καθρέφτες μίνι-αντανάκλασης ή ο φακός Fresnel όπου συγκεντρώνουν ηλιακή ένταση από 200 έως 1000 ήλιους, με συνέπεια να έχουμε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με 200 έως 1000 φορές λιγότερο υλικό ημιαγωγών πυριτίου. Τα τετραγωνικά μέτρα του πυριτίου αντικαθίστανται με τετραγωνικά μέτρα φακών ή ανακλαστήρων χαμηλότερου κόστους τα οποία είναι και αρκετά αποδοτικότερα από τα συμβατικά ηλιακά κύτταρα πυριτίου.

Η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια που παραδίδεται στην ηλιακή κυψέλη είναι από 20 έως 75 W/cm^2 . Η ενέργεια που δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρική πρέπει να απελευθερωθεί για να αποτρέψει την υπερβολική θέρμανση των κυττάρων και για να αυξήσει την αποδοτικότητα τους. Επομένως, η ψύξη ηλιακών κυψελών είναι ένα αναπόσπαστο τμήμα του συστήματος CPV. Πρώτον γιατί η απόδοση των ηλιακών κυψελών είναι εξαρτώμενη της θερμοκρασίας των κυψελών διότι με μείωση της θερμοκρασίας έχουμε αύξηση της απόδοσης. Δεύτερον, γιατί το ηλιακό κύτταρο πρέπει να κρατηθεί κάτω από το σημείο τήξης της βάσης στην οποία στηρίζεται για να μην οδηγήσει το ΦΒ σύστημα συγκέντρωσης σε αποτυχία και τρίτον, η αξιοπιστία και η διάρκεια ζωής της ηλιακής κυψέλης είναι συνάρτηση του αριθμού θερμικών κύκλων και του μεγέθους της θερμότητας που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της.

Τα κύρια εμπόδια εφαρμογής των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών οφείλονται στο γεγονός ότι τα συγκεντρωτικά

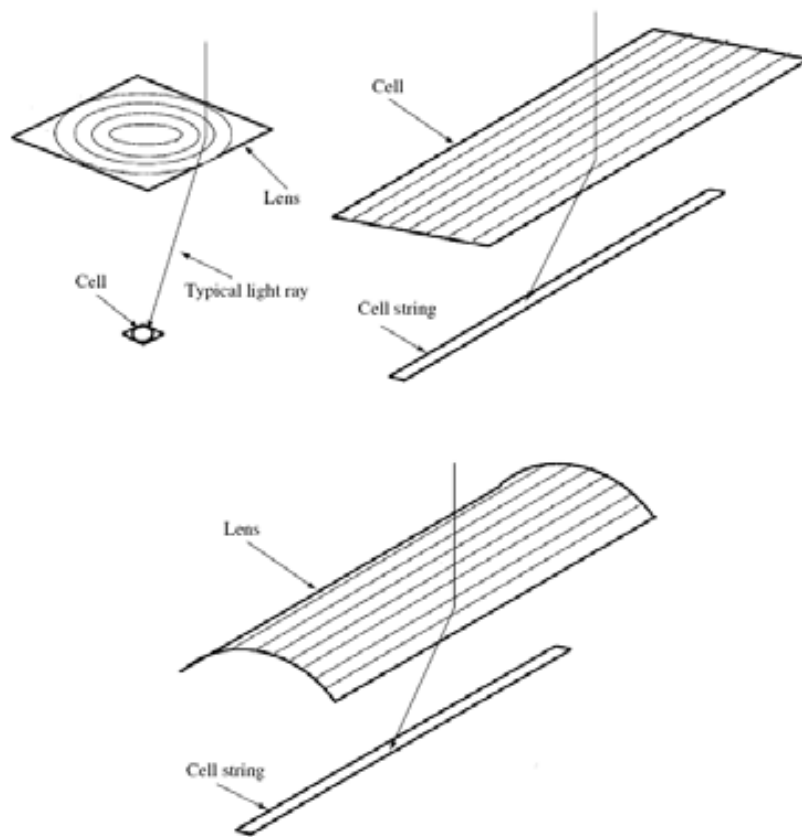
συστήματα, που πρέπει στις περισσότερες περιπτώσεις να ακολουθούν τον ήλιο, εξυπηρετούν την παραγωγή μεγάλων ενεργειακών φορτίων και όχι τις εφαρμογές στα κτίρια. Τα συγκεντρωτικά συστήματα αναπτύχθηκαν με βασική ιδέα την παραγωγή μεγάλων ποσών μη ρυπαντικής ανανεώσιμης ενέργειας. Μέχρι τώρα, το κόστος είναι υψηλό για να ανταγωνιστούν τα συμβατικά καύσιμα. Το χάσμα του κόστους όμως στενεύει και εμφανίζεται μια ισχυρή πιθανότητα, όπου τα μελλοντικά συγκεντρωτικά συστήματα θα είναι οικονομικώς αποδεκτά για την εφαρμογή τους.

2.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ

Τα συγκεντρωτικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τα οπτικά μέσα που χρησιμοποιούνται για να συγκεντρώσουν το φως του ήλιου, τον αριθμό των αξόνων που κινούνται για να παρακολουθήσουν τον ήλιο και τον λόγο συγκέντρωσης. Οι σημαντικότεροι τύποι παρουσιάζονται περιληπτικά παρακάτω.

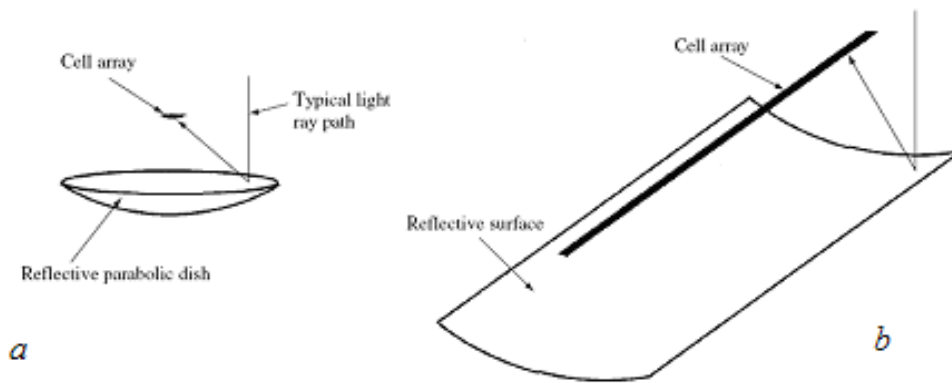
Τύποι οπτικών μέσων

Τα περισσότερα συγκεντρωτικά συστήματα χρησιμοποιούν είτε τους φακούς είτε τα παραβολικά και τα κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα. Οι φακοί οποιουδήποτε μεγέθους άνω των 5cm διαμέτρου είναι πολύ παχιοί και δαπανηροί για να είναι πρακτικοί, επομένως, επιλέγονται συνήθως οι φακοί Fresnel. Ένας φακός Fresnel είναι ο λεπτός φακός όπου σε κάθε σημείο ή τμήμα του, η διάθλαση των προσπίπτοντων ακτίνων είναι διαφορετική, με αποτέλεσμα την σύγκλισή τους σε ένα εστιακό σημείο ή γραμμή. Έτσι, οι φακοί Fresnel ανάλογα με την συμμετρία που έχουν, μπορούν να εστιάζουν το φως σε ένα σημείο (κυκλική συμμετρία) ή σε μια γραμμή (x ή y συμμετρία). Οι φακοί σημειακής εστίασης, χρησιμοποιούν συνήθως ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο πίσω από κάθε φακό, ενώ οι φακοί γραμμικής εστίασης έχουν μια σειρά φωτοβολταϊκών κυττάρων. Το υλικό της επιλογής για το φακό είναι το γυαλί ή το ακρυλικό πλαστικό (methacrylate polymethyl ή PMMA), το οποίο έχει καλή εφαρμογή και έχει παρουσιάσει μεγάλη αντοχή στις καιρικές συνθήκες

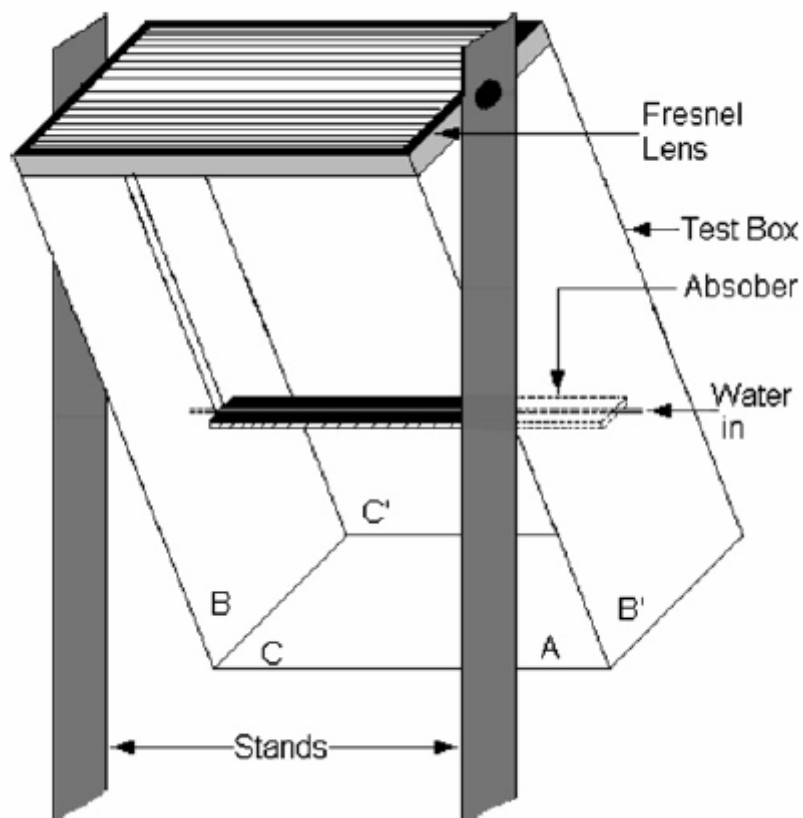


Σχήμα 2.1 Διαμορφώσεις φακών Fresnel. (α) Φακός Fresnel σημειακής εστίασης. (β) Γραμμικός φακός Fresnel ή γραμμικής εστίασης. (γ) Καλυμμένος δια θόλου γραμμικός φακός Fresnel [20].

Μια εναλλακτική περίπτωση στη χρήση των φακών είναι η χρήση των κατόπτρων. Όπως είναι γνωστό, μια ανακλαστική επιφάνεια με τη μορφή μιας παραβολής, θα κατευθύνει τις προσπίπτουσες ακτίνες παράλληλα με τον άξονα της παραβολής, σε ένα σημείο που βρίσκεται στην εστία της παραβολής. Όπως στους φακούς, υπάρχουν 2 είδη παραβολικών συγκεντρωτικών μέσων, αυτά της σημειακής εστίασης (σφαιρικά κάτοπτρα), που διαμορφώνονται με την περιστροφή της παραβολής γύρω από τον άξονά της και τη δημιουργία ενός παραβολοειδούς και αυτά της γραμμικής εστίασης (κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα), που διαμορφώνονται με την επέκταση της παραβολής ως προς τον άξονα της καθέτου της παραβολής). Οι σχηματικές αναπαραστάσεις, παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:

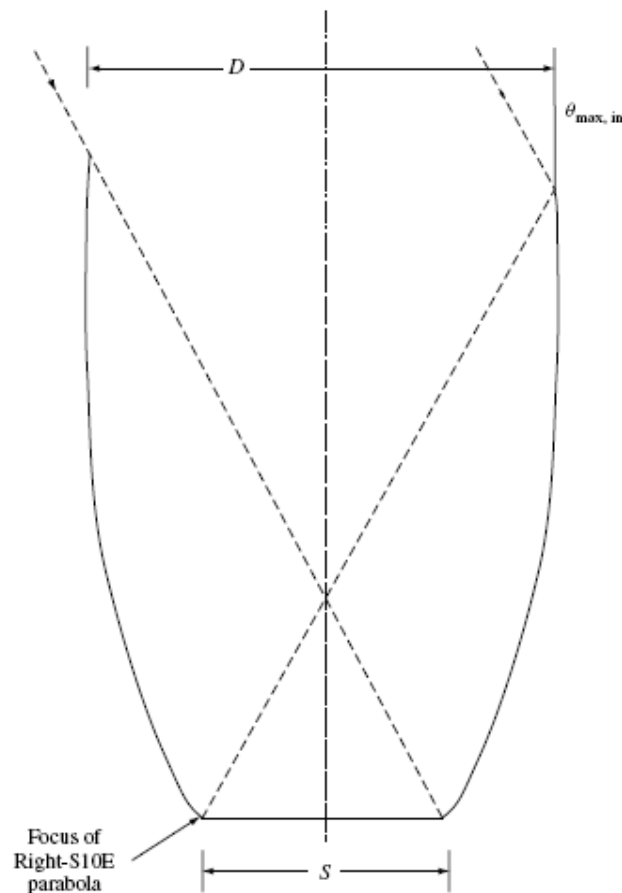


Σχήμα 2.2 Ανακλαστικοί τύποι συγκεντρωτικών μέσων. (α) Ανακλαστικός σφαιρικής παραβολικής επιφάνειας, που εστιάζει σε ένα σημειακό απορροφητή. (β) γραμμικό κυλινδροπαραβολικό κάτοπτρο που εστιάζει σε μια γραμμική εστία [20].



Σχήμα 2.3 Σχηματική παράσταση του συστήματος φακού Fresnel – απορροφητή [9].

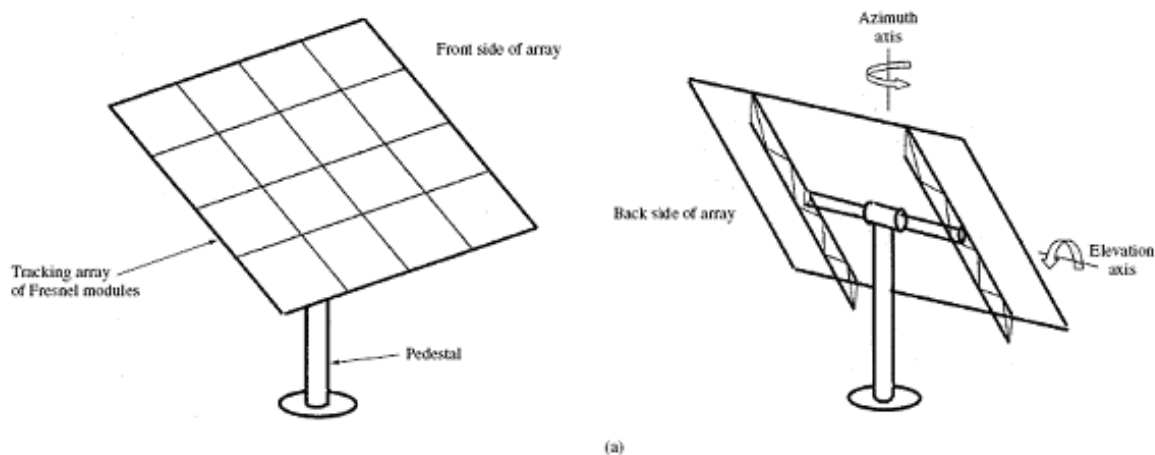
Μια άλλη γεωμετρία συγκεντρωτικών μέσων είναι αυτή του σύνθετου παραβολικού συγκεντρωτικού μέσου (CPC), που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4. Εδώ οι πλευρές του συγκεντρωτικού συστήματος είναι παραβολές, εντούτοις, η εστίαση για κάθε παραβολή είναι στην αντίθετη πλευρά του απορροφητή και ο άξονας της παραβολής a είναι κατά μήκος της κατεύθυνσης της μέγιστης γωνίας αποδοχής, θ_{max} . Το σύστημα CPC είναι ενδιαφέρον, δεδομένου ότι παρέχει τη μέγιστη συγκέντρωση συγκριτικά με το μέγεθος του οπτικού ανοίγματος, ή αλλιώς, για μια δεδομένη μέγιστη γωνία αποδοχής. Για την υψηλή συγκέντρωση, ένα CPC πρέπει να είναι μακρύ και λεπτό, με αποτέλεσμα η χρήση του να περιορίζεται για εφαρμογές στα συστήματα χαμηλής συγκέντρωσης είτε ως δευτεροβάθμιο οπτικό μέσο συγκέντρωσης.

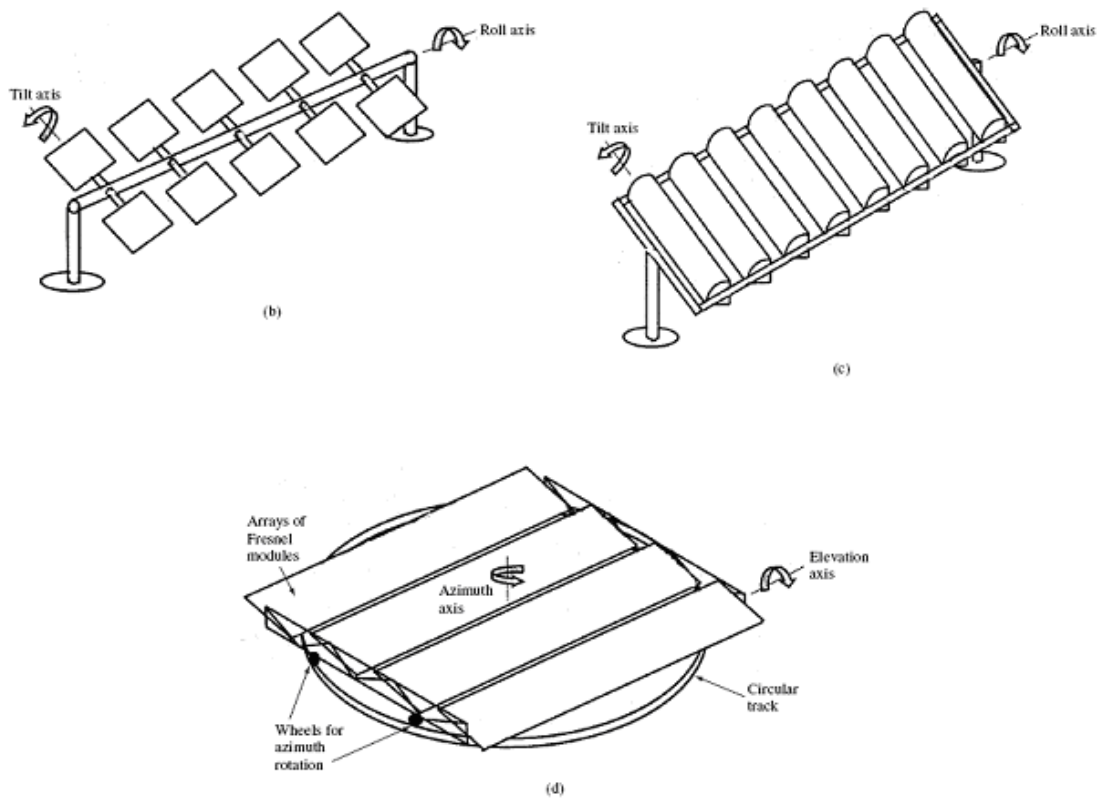


Σχήμα 2.4 Γεωμετρία του σύνθετου παραβολικού συγκεντρωτικού μέσου, όπου σε αυτήν την περίπτωση έχουμε $\theta_{max} = 30^\circ$ [20].

Τύποι συστημάτων παρακολούθησης του ήλιου (solar trackers)

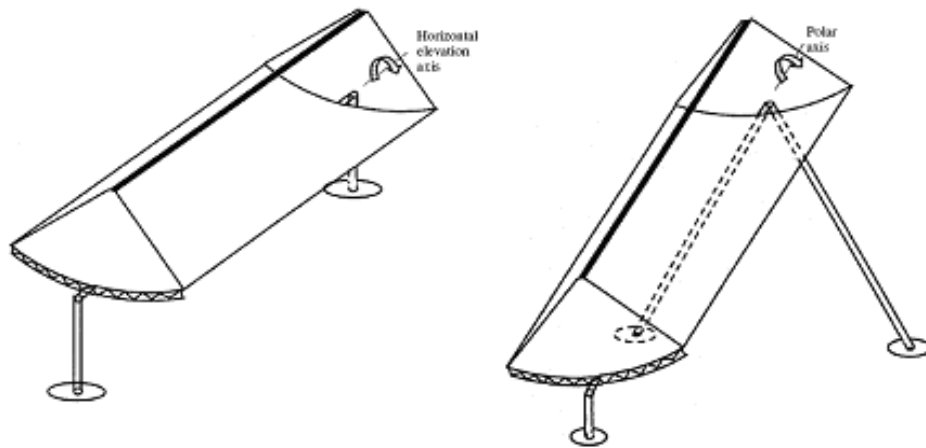
Τα συγκεντρωτικά συστήματα, για την επίτευξη σημαντικών λόγων συγκέντρωσης ή ακόμα και για την λειτουργία τους, απαιτούν την χρήση συστημάτων παρακολούθησης του ήλιου, τους ηλιακούς ιχνηλάτες (solar trackers). Η οπτική σημειακής εστίασης γενικά απαιτεί την ιχνηλάτιση του ήλιου σε δύο άξονες έτσι ώστε το σύστημα να είναι πάντα προσανατολισμένο, διότι μικρές αποκλίσεις από τον προσανατολισμό, είναι καταστροφικές για το σύστημα. Από μια μηχανική σκοπιά, η ιχνηλάτιση του ήλιου σε δύο άξονες είναι πιο σύνθετη από αυτή του μονού άξονα, αλλά τα συστήματα σημειακής εστίασης μπορούν να επιτύχουν πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις του ήλιου και επομένως την χρήση μικρότερης επιφάνειας απορροφητή. Τα κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα γραμμικής εστίασης χρειάζονται την ιχνηλάτιση κατά μήκος ενός άξονα έτσι ώστε το είδωλο να περιορίζεται σύμφωνα με τη γραμμή εστίασης. Τα γραμμικά συγκεντρωτικά συστήματα Fresnel υφίστανται οπτικές παρεκκλίσεις όταν ο ήλιος δεν είναι κάθετος στο επίπεδο των φακών. Αυτό περιορίζει γενικά τα γραμμικά συστήματα Fresnel στην χρήση ιχνηλάτων ηλίου διπλού άξονα. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι συστημάτων παρακολούθησης, του ήλιου. Δύο μεγάλες κατηγορίες διαχωρισμού των συστημάτων αυτών είναι βάση της κίνησής τους, δηλαδή μονού ή διπλού άξονα, ενώ μια δεύτερη κατηγοριοποίηση είναι βάση του άξονα συντεταγμένων που κινούνται (ύψος, αζιμούθιο, πολικός άξονας) και της δομής που χρησιμοποιούν. Οι σημαντικότεροι τύποι παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:



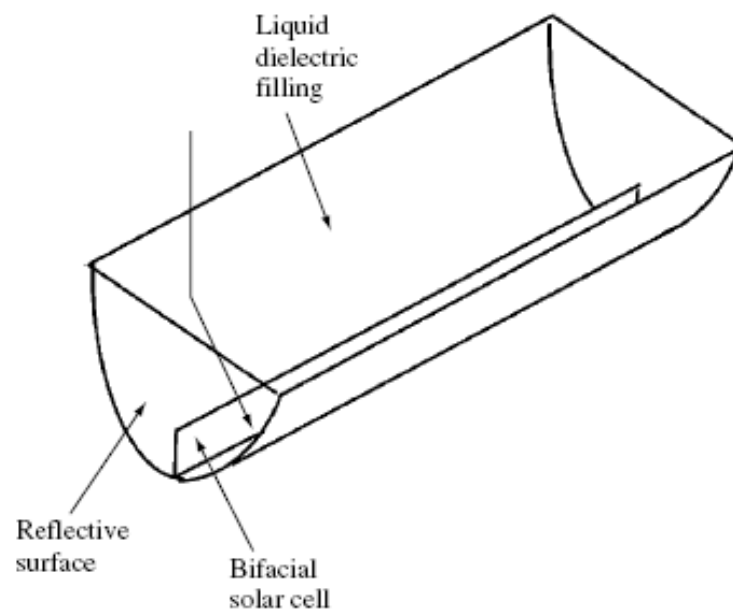


Σχήμα 2.4 Τύποι ιχνηλάτισης του ήλιου σε διπλό άξονα. (α) Ιχνηλάτης δύο αξόνων με την παρακολούθηση των συντεταγμένων του ύψους και αζιμούθιου που τοποθετείται σε ένα βάθρο. (β) Ρύθμιση παρακολούθησης περιστροφής-κλίσης που χρησιμοποιεί τον κεντρικό σωλήνα ροπής. (γ) Ρύθμιση παρακολούθησης περιστροφής-κλίσης που χρησιμοποιεί πλαίσια μονάδων. (δ) Ιχνηλάτης δύο αξόνων περιστροφικών επιφανειών [20].

Αξίζει να σημειώσουμε πως υπάρχουν γεωμετρικές διατάξεις συγκεντρωτικών συστημάτων που δεν χρησιμοποιούν ιχνηλάτιση του ήλιου. Σε γενικές γραμμές, είναι δυνατό να υπάρξει συγκέντρωση χωρίς την χρήση ιχνηλάτισης του ήλιου. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν συνήθως την μη γραμμική οπτική όπως το σύνθετο παραβολικό συγκεντρωτικό σύστημα (CPC) που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.5 Τύποι ιχνηλατικής του ήλιου ένας άξονα. (α) Οριζόντιος ιχνηλάτης ενός άξονα με την κυλινδροπαραβολικό κάτοπτρο. (β) πολικός ιχνηλάτης ενός άξονα με το κυλινδροπαραβολικό κάτοπτρο [20].



Σχήμα 2.6 Μια από τις πολλές στατικές γεωμετρίες συγκεντρωτικών μέσων. Σε αυτήν την περίπτωση ένας διπλής όψης απορροφητής, είναι τοποθετημένος στο σημείο εστίασης ενός συστήματος CPC [20].

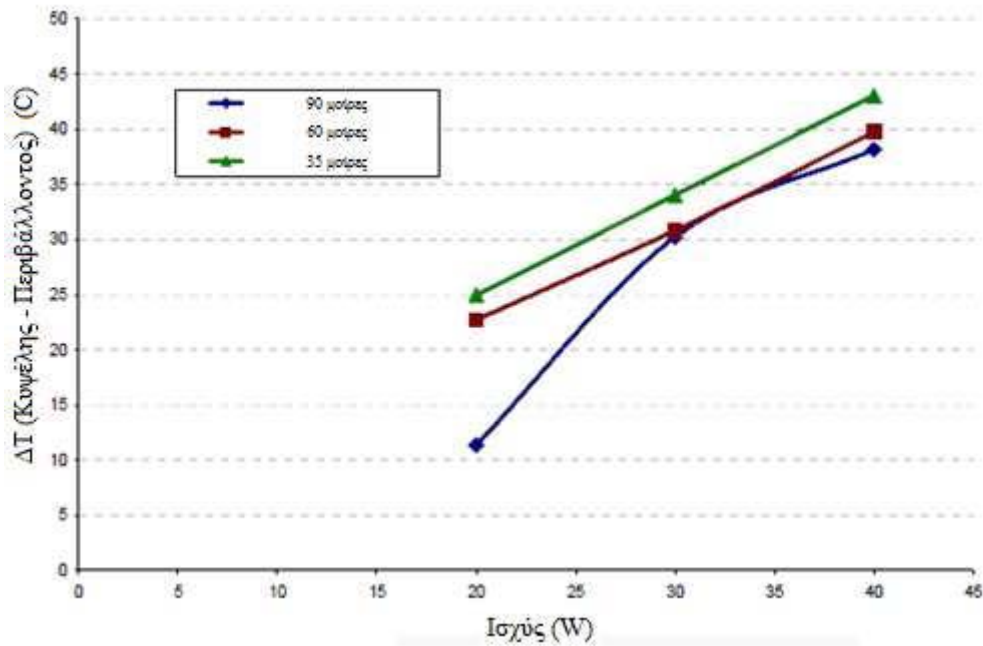
Η γοητεία των ακίνητων συγκεντρωτικών συστημάτων είναι πράγματι μεγάλη, λόγω της μη απαιτούμενης παρακολούθησης του ήλιου, με αποτέλεσμα την οικονομικά αποδοτικότερη χρήση τους για συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Δυστυχώς όμως, κανένα σχέδιο ακίνητων συγκεντρωτικών μέσων δεν έχει βρεθεί ακόμα όπου το προστιθέμενο κόστος του συγκεντρωτικού μέσου να είναι λιγότερο από το επιπρόσθετο ενεργειακό κέρδος που επιτυγχάνεται μέσω της συγκέντρωσης. Η ανακάλυψη και η ανάπτυξη ενός πρακτικού, οικονομικώς αποδοτικού ακίνητου συγκεντρωτικού μέσου θα ήταν μια σημαντική συμβολή για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών.

2.3 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΛΙΣΗ ΤΟΥ CPV

Στα πειράματα που έγιναν για να βρεθεί η επιρροή της κλίσης του ΦΒ συστήματος συγκέντρωσης θα πρέπει η κλίση να μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ημέρας. Επομένως τα πάνελ του CPV τοποθετήθηκαν σε ένα σύστημα δύο αξόνων και ολόκληρο το σύστημα περιστρεφόταν από την ανατολή προς την δύση κατά τη διάρκεια της ημέρας, με σκοπό να είναι πάντα προσανατολισμένο προς τον ήλιο. Με αυτήν την διάταξη, ο σωλήνας θερμότητας ήταν πάντα οριζόντιος.

Οι μετρήσεις έγιναν για τρεις διαφορετικές γωνίες του CPV, όπου οι γωνίες αντιπροσωπεύουν την διάρκεια μιας ημέρας, έτσι 35° είναι η κλίση που θα έχει αργά το μεσημέρι, 60° αντιπροσωπεύει το πρωί ή το βράδυ και 90° θεωρείτε το χάραμα ή το σούρουπο.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 2.7. Το στοιχειώδες κύτταρο CPV είχε επιφάνεια 1cm^2 , επομένως για ισχύ 40 W η ισοδύναμη ροή θερμότητας θα είναι 40 W/cm^2 . Όπως είναι φυσικό, η διαφορά θερμοκρασία 1T μεταξύ της κυψέλης και του περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη για κλίση 35° (μεσημέρι), όπου η αλουμινένια βάση είναι σχεδόν οριζόντια, αυξάνοντας παράλληλα την ποσότητα θερμότητας που απορροφάται. Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας που μετρήθηκε ήταν 43°C και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του σωλήνα θερμότητας με το περιβάλλον ήταν μικρότερη από 25°C , καλύπτοντας έτσι τις απαιτήσεις του πίνακα 4.1.



Σχήμα 2.7 Διαφορά θερμοκρασίας περιβάλλοντος - κυψέλης συνάρτηση της παραγόμενης ισχύος για διάφορες κλίσης του CPV [10].

Η θερμοκρασία μεταξύ της ηλιακής κυψέλης και του περιβάλλοντος, χωρίς το σύστημα ψύξης (σωλήνα θερμότητα και πτερύγια) βρέθηκε ότι είναι 110°C σε σχέση με τους 40°C περίπου που είχαμε με ψύξη. Γίνεται λοιπόν εμφανές ότι υπάρχει ανάγκη για ψύξη του CPV και αυτό διότι στην επιφάνεια της ηλιακής κυψέλης φθάνει πολλαπλάσια ηλιακή ακτινοβολία λόγω των φακών που χρησιμοποιούνται τα συγκεκριμένα ΦΒ συστήματα για να αυξήσουν την ηλιακή ένταση, με αποτέλεσμα οι ηλιακές κυψέλες να απορροφούν μεγάλα ποσά θερμότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΦΒ/Θ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά ηλιακά συστήματα (ΦΒ/Θ) αποτελούνται από φωτοβολταϊκές γεννήτριες και μονάδες απαγωγής θερμότητας ενσωματωμένες σε ενιαίες συσκευές, μετατρέποντας την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική, καθώς και σε θερμική ενέργεια μέσω ρευστού απομάκρυνσης της θερμότητας που κυκλοφορεί στην πίσω επιφάνεια του φωτοβολταϊκού.



Σχήμα 3.1 Η μπροστινή όψη ενός ΦΒ/Θ συλλέκτη [13].

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 απαγωγή της θερμότητας από τα ΦΒ 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 επιδεικτικές εφαρμογές.

Στο σχήμα 3.1 φαίνεται ένας ΦΒ/Θ συλλέκτης ενώ στο σχήμα 3.2 φαίνονται για λόγους σύγκρισης ένας συνηθισμένος συλλέκτης, ένας ΦΒ/Θ συλλέκτης και ένα τυπικό φωτοβολταϊκό.



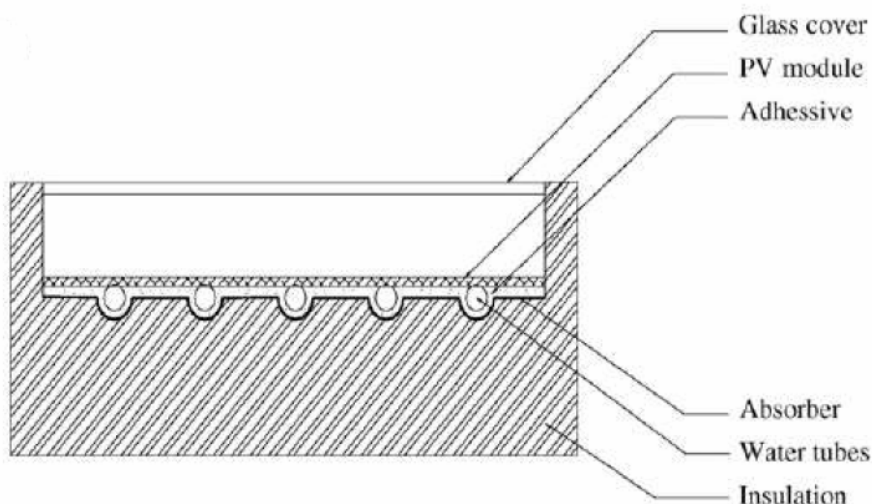
Σχήμα 3.2 Ένας συνηθισμένος συλλέκτης, ένας ΦΒ/Θ συλλέκτης και ένα τυπικό φωτοβολταϊκό [15].

3.2 ΨΥΞΗ ΤΩΝ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Τα υβριδικά ΦΒ/Θ συστήματα συνίστανται από ΦΒ πλαίσια με ενσωματωμένη θερμική μονάδα απολαβής της θερμότητας του ΦΒ, όπου ένα κυκλοφορούν ρευστό χαμηλότερης θερμοκρασίας αυτής του ΦΒ θερμαίνεται ψύχοντάς το. Κατά συνέπεια τα συστήματα αυτά διακρίνονται ανάλογα με το εργαζόμενο μέσο που κυκλοφορεί και ψύχεται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Έτσι έχουμε ΦΒ/Θ συστήματα νερού και αέρα.

Η χρήση του νερού ως ρευστού απολαβής της θερμότητας είναι αποδοτική όλο το έτος, κυρίως σε χώρες με ήπιο ή θερμό κλίμα. Αυτές οι υβριδικές διατάξεις μπορούν να αξιοποιηθούν για την θέρμανση του νερού σε χαμηλές θερμοκρασίες (μέχρι 40° C) ώστε να επιτυγχάνεται παράλληλα και η διατήρηση χαμηλής θερμοκρασίας στα ΦΒ πλαίσια.

Η απαγωγή θερμότητας με κυκλοφορία αέρα απαιτεί απλούστερη και φθηνότερη διάταξη, αλλά η ψύξη του φωτοβολταϊκού είναι λιγότερο αποδοτική. Όταν ο αέρας του περιβάλλοντος έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη των 20° C τα ΦΒ/Θ συστήματα αέρα έχουν περιορισμένες δυνατότητες εφαρμογής (κυρίως φυσικός αερισμός σε κτίρια και θέρμανση αέρα για ορισμένες βιομηχανικές και αγροτικές διεργασίες).



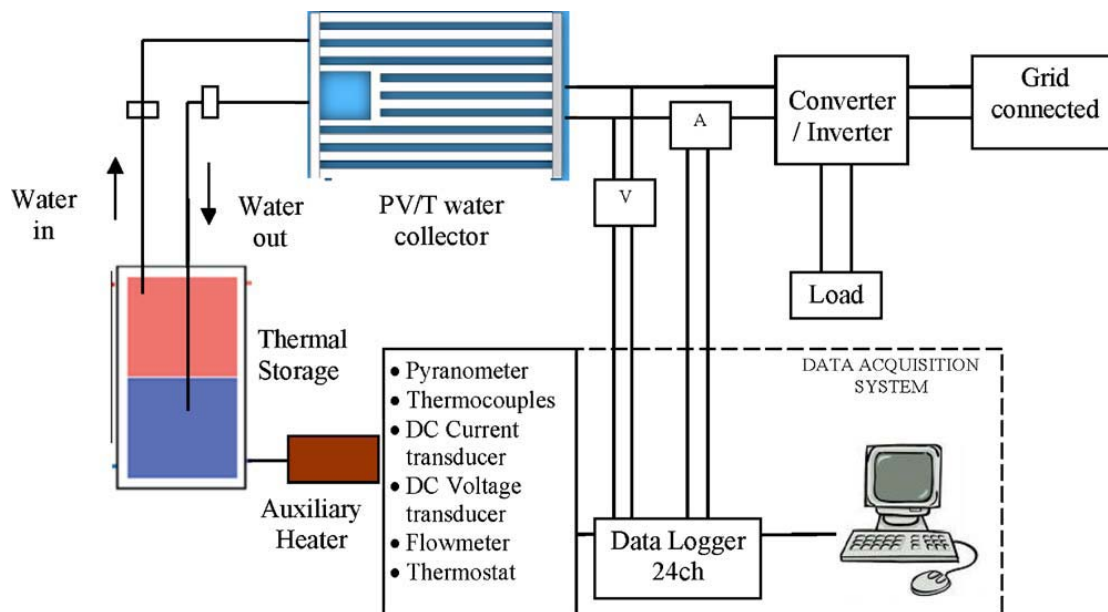
Σχήμα 3.3 Θερμική μονάδα απολαβής θερμότητας ενσωματωμένη σε φωτοβολταϊκό σύστημα [1].

Η μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης των ΦΒ λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας τους μπορεί να αποφευχθεί σε κάποιο βαθμό με την απαγωγή της θερμότητας μέσω της κυκλοφορίας νερού ή αέρα σε επαφή με την επιφάνειά τους. Η θέρμανση των ΦΒ οφείλεται στην απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια που δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό και η ψύξη τους θεωρείται αναγκαία για να διατηρηθεί η ηλεκτρική απόδοση σε ικανοποιητικό επίπεδο. Η φυσική ή ακόμη και η βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα είναι απλές και φθηνές μέθοδοι για την απομάκρυνση της θερμότητας από τα ΦΒ, αλλά έχουν μικρότερη πρακτική αξία όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι πάνω από 20° C, όπως αυτό συμβαίνει πολλούς μήνες το έτος σε τοποθεσίες που βρίσκονται γενικά σε μικρά γεωγραφικά πλάτη. Η απαγωγή θερμότητας με κυκλοφορία νερού είναι πιο ακριβή διαδικασία σε σχέση με την απαγωγή θερμότητας με αέρα, αλλά θεωρείται πιο πρακτική για την προαναφερόμενη περίπτωση επειδή η θερμοκρασία του νερού του δικτύου είναι κάτω των 20° C σχεδόν όλο το έτος. Ο συνήθης τρόπος ψύξης του ΦΒ με νερό είναι η κυκλοφορία του διαμέσου εναλλάκτη θερμότητας σε επαφή με την πίσω επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου, ώστε να αποφεύγονται προβλήματα σχετικά με την πίεση του νερού και τον παραγόμενο ηλεκτρισμό.

Αν το ρευστό απολαβής της θερμότητας δεν χρησιμοποιείται μόνο για την ψύξη του ΦΒ αλλά και για άλλες πρακτικές εφαρμογές τότε οι συσκευές αυτού του τύπου συνιστούν τα υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά (ΦΒ/Θ) συστήματα. Στις 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.

Οι υβριδικές ΦΒ/Θ συσκευές παρέχουν ποσότητα θερμότητας επιπλέον της ηλεκτρικής ενέργειας και κατά συνέπεια έχουν μεγαλύτερη ολική αποδιδόμενη ενέργεια σε σχέση με τα απλά ΦΒ πλαίσια και μπορεί να καταστούν οικονομικά αποδοτικές αν το κόστος της πρόσθετης θερμικής μονάδας είναι σχετικά μικρό.

Τα υβριδικά ΦΒ/Θ συστήματα αέρα έχουν χρησιμοποιηθεί τελευταία σε εφαρμογές σε κτίρια (εγκατάσταση στην πρόσοψη ή στην επικλινή οροφή τους), ενώ τα ΦΒ/Θ νερού έχουν πολύ μικρότερη εφαρμογή και δεν έχουν ακόμη αναπτυχθεί πολλά εμπορικά μοντέλα.



Σχήμα 3.4 Σχηματική απεικόνιση ενός ΦΒ/Θ συστήματος νερού [18].

3.3 ΨΥΞΗ ΜΕ ΕΞΑΤΜΙΣΗ

Η μέθοδος της ψύξης με εξάτμιση είναι βασισμένη στη θεωρία του σωλήνα θερμότητας (Heat pipe). Σε αυτήν την μέθοδο, η ψύξη της ΦΒ κυψέλης γίνεται με ελεγχόμενη κυκλοφορία αερίου που ρέει μέσα από τους σωλήνες θερμότητας. Το σχήμα του ΦΒ πάνελ είναι τετραγωνικής ή κυλινδρικής μορφής. Το επιλεγμένο ψυκτικό ρευστό απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης θερμότητας και εξατμίζεται.

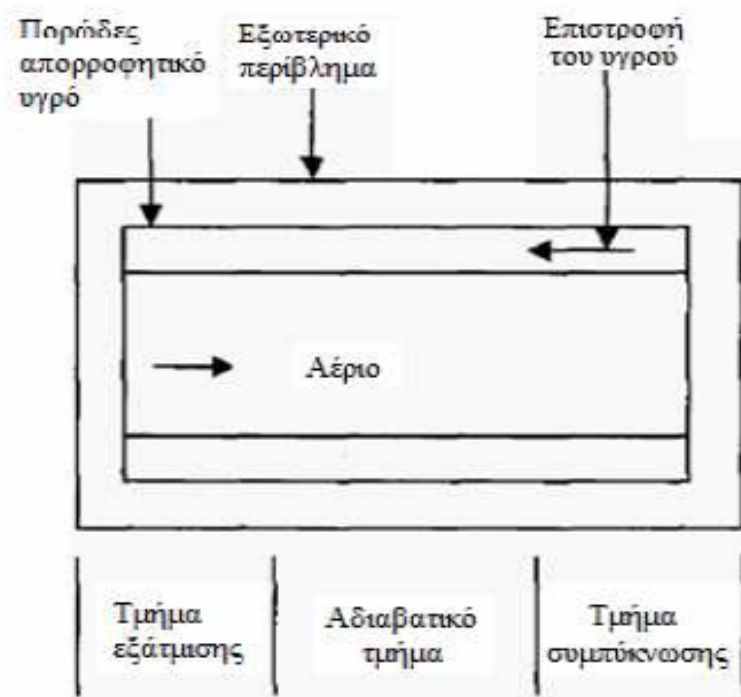
Τέλος, θα συμπυκνωθεί μέσα στο συμπυκνωτή και θα επιστρέψει σε υγρή μορφή στην ΦΒ κυψέλη μέσω των σωλήνων θερμότητας όπου και θα εξατμιστεί ξανά. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνεται η ποσότητα των ατμών που συμπυκνώνονται στον συμπυκνωτή.

Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιείται ο σωλήνας θερμότητας κυλινδρικής γεωμετρίας, αλλά ανάλογα τις απαιτήσεις μπορεί να έχουμε και σωλήνες θερμότητας τετραγωνικής ή ορθογώνιας γεωμετρίας. Ο σωλήνας θερμότητας είναι μια συσκευή με πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα, και χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας από μια θέση σε μια άλλη με μικρή απόκλιση της θερμοκρασίας. Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται ο σωλήνας θερμότητας φαίνονται στο σχήμα 3.5.

Αποτελείται από τρία τμήματα τα οποία είναι:

1. Τμήμα εξάτμισης.
2. Τμήμα συμπυκνωτών.
3. Αδιαβατικό τμήμα που διαχωρίζει το τμήμα εξάτμισης και το τμήμα του συμπυκνωτή.

Η σχεδίαση και ο αριθμός των σωλήνων θερμότητας εξαρτώνται από την απαιτούμενη ποιότητα της θερμότητας που πρέπει να μεταφερθεί και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

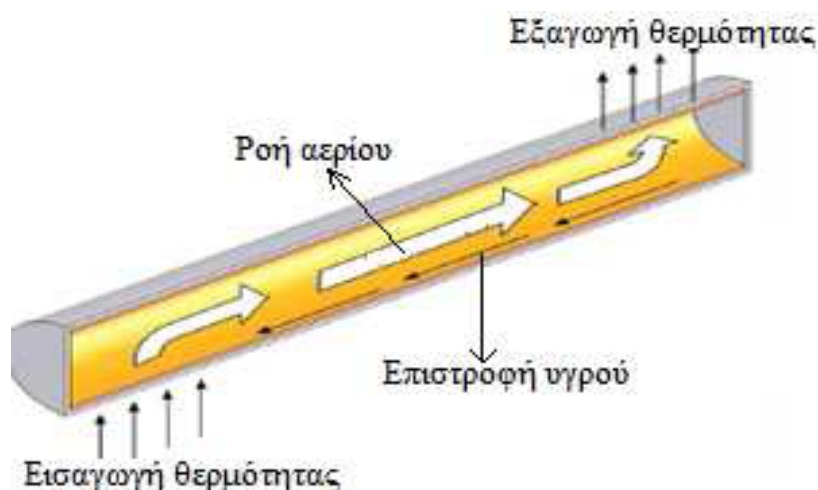


Σχήμα 3.5 Μέρη από τα οποία αποτελείται ο σωλήνας θερμότητας [10].

Σωλήνες θερμότητας

Οι σωλήνες θερμότητας μεταφέρουν την θερμότητα του ρευστού εργασίας σε δύο φάσεις (σχήμα 3.6). Ο σωλήνας θερμότητας είναι βασικά ένας σφραγισμένος σωλήνας, συνήθως κατασκευασμένος από θερμοαγώγιμο υλικό (π.χ. χαλκός ή αλουμίνιο). Η εισαγωγή θερμότητας ατμοποιεί το υγρό ρευστό εργασίας μέσα από το τμήμα εξάτμισης. Ο ατμός, που φέρνει τη λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης, ρέει προς το πιο ψυχρό τμήμα των συμπυκνωτών.

Στο συμπυκνωτή, ο ατμός υγροποιείται και απορροφάται από ένα πορώδες υλικό απελευθερώνοντας θερμική ενέργεια. Σε υγρή μορφή ξανά, το ψυκτικό μέσο κατευθύνεται από το πορώδες απορροφητικό υλικό προς τη μεριά του σωλήνα θερμότητας με την υψηλότερη θερμοκρασία (βάση ψήκτρας). Η διαδικασία αλλαγής φάσης και η διαφασική κυκλοφορία συνεχίζονται εφόσον διατηρείται η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του τμήματος εξάτμισης και του συμπυκνωτή. Οι σωλήνες θερμότητας είναι μια ιδανική συσκευή για τα συστήματα CPV.



Σχήμα 3.6 Σωλήνας θερμότητας [10].

Οι σωλήνες θερμότητας είναι παθητικές θερμικές συσκευές όπου η θερμότητα μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις με πολύ χαμηλή πτώση τη θερμοκρασίας. Οι σωλήνες θερμότητας είναι επίσης μετασχηματιστές ροής θερμότητας. Παίρνουν τη θερμότητα σε πολύ υψηλή ροή (από την πίσω πλευρά της ηλιακής κυψέλης του CPV) και τη μεταφέρουν σε έναν αποδέκτη θερμότητας (ψήκτρα) με σημαντικά χαμηλότερη ροή θερμότητας (φυσική μεταφορά στο περιβάλλον). Επειδή ο σωλήνας θερμότητας λειτουργεί σχεδόν ισοθερμικά, το τμήμα του αποδέκτη θερμότητας θα λειτουργεί πολύ αποτελεσματικά. Η χαρακτηριστική αντίσταση διάδοσης του αποδέκτη θερμότητας εξουδετερώνεται και επομένως, ο αποδέκτης θερμότητας μπορεί να έχει μικρότερο μέγεθος και κόστος.

Κατασκευαστικά στοιχεία των σωλήνων θερμότητας

Οι σωλήνες θερμότητας κατασκευάζονται από μια μεγάλη ποικιλία υλικών τόσο για το εξωτερικό περίβλημα όσο και για το εσωτερικό

μέρος, ανάλογα με το ρευστό εργασίας. Τα υλικά κατασκευής και το ρευστό εργασίας πρέπει να είναι συμβατά, αυτό σημαίνει ότι το ρευστό λειτουργίας δεν πρέπει να διαβρώνει και να ενώνεται χημικά με τα μεταλλικά μέρη του σωλήνα θερμότητας και ειδικά του τμήματος που ελευθερώνει το μη-συμπυκνωμένο αέριο (NCG). Εάν δημιουργηθεί NCG, μια ποσότητα του θα μπλοκαριστεί στο τμήμα συμπύκνωσης και η απόδοση του σωλήνα θερμότητας θα μειωθεί με την πάροδο του χρόνου.

Υλικά σωλήνων θερμότητας

Για τη περιοχή θερμοκρασιών που μας ενδιαφέρουν (από -20 μέχρι 100°C), το δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά του εξωτερικού περιβλήματος και των εσωτερικών τοιχωμάτων είναι ο χαλκός και το αλουμίνιο. Ο χαλκός έχει υψηλότερη πυκνότητα και θερμική αγωγιμότητα από το αλουμίνιο, αλλά είναι ακριβότερος. Ένα πλεονέκτημα του χαλκού είναι ότι ακόμα και αν η επιφάνεια του σκονιστεί η σκουριάσει συνεχίζει να έχει υψηλή αξιοπιστία. Πλεονέκτημα του αλουμινίου είναι ότι απομακρύνει εύκολα ποσότητες θερμότητας από το εσωτερικό του με χαμηλό κόστος.

Ρευστά λειτουργίας βάση των υλικών του σωλήνα θερμότητας

Η επιλογή του ρευστού εργασίας εξαρτάται από την επιλογή του υλικού των τοιχωμάτων και των αυλακιών. Αυτό γίνεται για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του σωλήνα θερμότητας. Οι σωλήνες θερμότητας για την ψύξη των CPV κατασκευάζονται για λειτουργία περίπου 30 ετών. Η μη συμβατότητα μεταξύ των δύο υλικών αναμένεται να δημιουργήσει διάβρωση και μη-συμπυκνωμένα αέρια (NCG), επίσης τα προϊόντα διάβρωσης που παράγονται στα αυλάκια του σωλήνα θερμότητας εμποδίζουν την καλή λειτουργία του και σε ακραίες καταστάσεις μπορεί να έχουμε διαρροή.

Οι συνδυασμοί για βέλτιστη λειτουργία, συνάρτηση της θερμοκρασίας είναι:

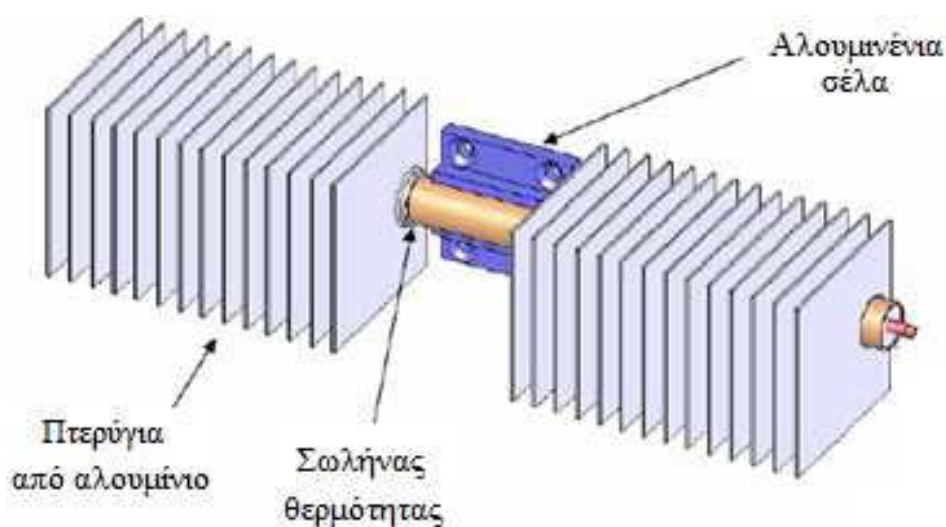
- Χαλκός/νερό
- Αλουμίνιο/αμμωνία

Ωστόσο, και με τα δύο ρευστά έχουμε πιθανά προβλήματα. Το νερό παγώνει στους 0°C, και έτσι μεταφέρεται πολύ μικρή ισχύς σε θερμοκρασίες κάτω από 30°C. Τα συστήματα χαλκού/νερού πρέπει να σχεδιαστούν ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες σε περίπτωση που παγώσει το νερό. Η λειτουργία τους για θερμοκρασίες πάνω από 30°C δεν αποτελεί πρόβλημα, διότι το σύστημα θερμαίνεται πριν αρχίσει να

λειτουργεί. Από την άλλη η αμμωνία έχει υψηλή πίεση ατμού. Η απόδοση των σωλήνων θερμότητας με χρήση αμμωνίας ως ρευστό εργασίας πέφτει σε θερμοκρασίες πάνω από τους 80°C.

Σχεδίαση συστημάτων σωλήνων θερμότητας

Στην ενότητα αυτή αναλύεται η κατασκευαστική δομή των σωλήνων θερμότητας χαλκού/νερού (σχήμα 3.7). Η ηλιακή κυψέλη τοποθετείται σε μια αλουμινένια βάση. Η θερμότητα διαβιβάζεται από την ηλιακή κυψέλη μέσω της αλουμινένιας βάσης σε έναν θερμοσωλήνα νερού/χαλκού. Οι σωλήνες θερμότητας μεταβιβάζουν ισοθεμικά τη θερμότητα σε μια σειρά αλουμινένιων πτερυγίων και η θερμότητα μεταφέρεται από τα πτερύγια στον αέρα με φυσική μεταφορά.



Σχήμα 3.7 Σωλήνας θερμότητας νερού χαλκού [10].

Η επιλογή τους έγινε μέσα από μία σειρά αναλύσεων CFD (υπολογισμός δυναμικής ροής) με προσομοίωση του σωλήνα θερμότητας στον ελεύθερο αέρα και εκτιμήθηκε ύστερα από ένα μεγάλο αριθμό ελέγχων, όπου η θερμοκρασία που επιλέχθηκε για τις εξωτερικές επιφάνειες ήταν 20°C και η πίεση μηδενική.

Σε μετρήσεις που έγιναν για να καθοριστεί η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των πτερυγίων βρέθηκε ότι η βέλτιστη απόσταση είναι 7,94mm.

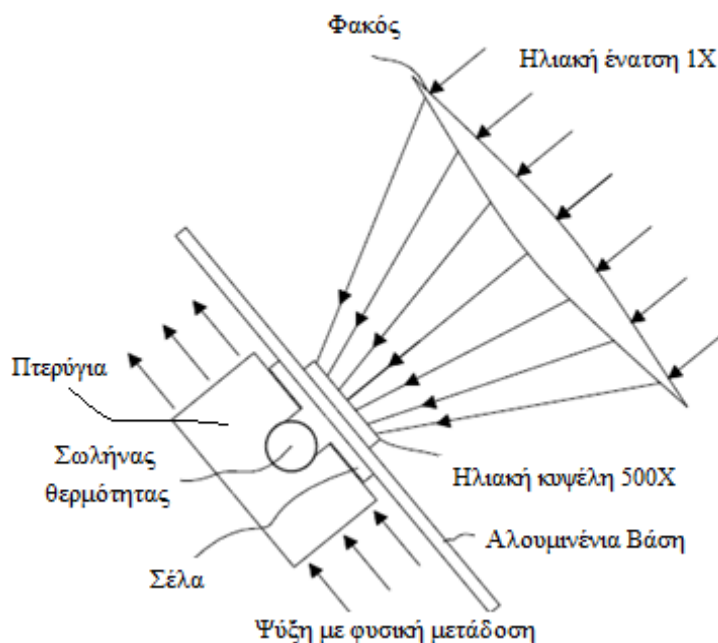
Μικρότερη απόσταση δίνει μεγαλύτερη επιφάνεια με αποτέλεσμα ο αέρας να μην μπορεί να κυκλοφορήσει εύκολα μέσω των πτερυγίων. Αντίθετα, ο αέρας μπορεί να κυκλοφορήσει πιο εύκολα όταν η απόσταση

μεταξύ των πτερυγίων είναι μεγαλύτερη αλλά τότε μειώνεται η επιφάνεια.

3.4 ΨΥΞΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Μια σχηματική αναπαράσταση του συστήματος CPV με έναν σωλήνα θερμότητας παρουσιάζεται στο σχήμα 3.8. Το ηλιακό κύτταρο τοποθετείται πάνω σε μια αλουμινένια βάση. Η ηλιακή ακτινοβολία πριν φθάσει στην ηλιακή κυψέλη έχει γίνει 500 φορές μεγαλύτερη μέσω του φακού Fresnel.

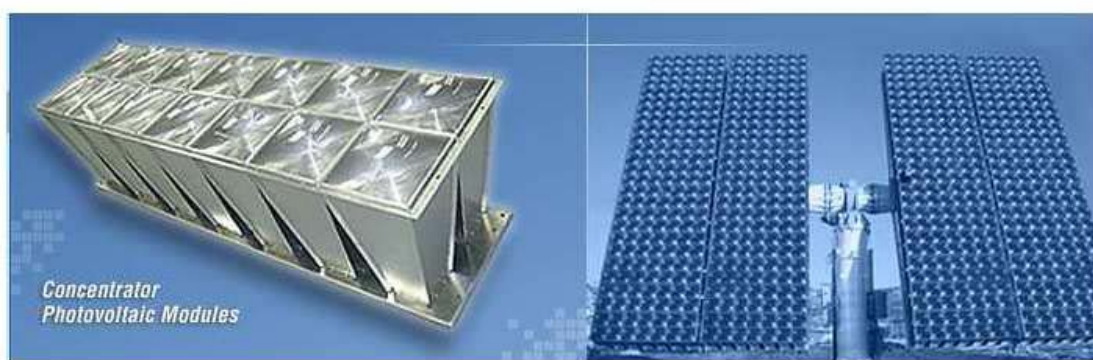
Η συγκεντρωμένη ροή χτυπά τη ηλιακή κυψέλη, παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια. Η θερμική ενέργεια που παράγεται περνά από την κυψέλη μέσω της σέλας, και από εκεί στον σωλήνα θερμότητας, έπειτα διανέμεται από το σωλήνα θερμότητας σε μια σειρά πτερυγίων, όπου και αφαιρείται με φυσική μετάδοση.



Σχήμα 3.8 Φωτοβολταϊκό σύστημα συγκέντρωσης με φακούς Fresnel [10].

Στο σχήμα 3.9 φαίνεται ένα CPV τύπου GEN 1 της εταιρίας EMCORE. Όπως φαίνεται στα αριστερά της εικόνας, το σύστημα της

EMCORE αποτελείται από πολλές ηλιακές κυψέλες, όπου η καθεμία έχει επιφάνεια 1cm^2 . Κάθε κυψέλη σφραγίζεται σε ένα κιβώτιο και τοποθετείται σε μια αλουμινένια βάση πάχους $0,5\text{cm}$. Όπως φαίνεται στη δεξιά εικόνα, οι κυψέλες τοποθετούνται σε ένα σύστημα δύο αξόνων όπου η κατεύθυνση τους είναι πάντα προς τον ήλιο. Τα ηλιακά πάνελ ακολουθούν τον ήλιο με περιστροφή γύρω από έναν κάθετο άξονα. Τα κύτταρα περιστρέφονται και γύρω από έναν οριζόντιο άξονα. Αυτό βοηθάει στη σχεδίαση των σωλήνων θερμότητας, εφόσον ο σωλήνας θερμότητας είναι οριζόντιος για όλες τις συνθήκες λειτουργίας, απλοποιώντας έτσι τη σχεδίαση τους.



Σχήμα 3.9 Φωτοβολταϊκό σύστημα συγκέντρωσης της EMCORE [10].

Διαστάσεις κελιού	$1\text{cm} \times 1\text{cm}$
Συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας	περίπου 500 ήλιοι
Απαγωγή θερμότητας σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας	περίπου 40W
Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ σωλήνα θερμότητας και περιβάλλοντος σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας	25°C
Διάρκεια ζωής	20 με 30 χρόνια
Τρόπος ψύξης	Παθητική

Πίνακας 3.1 Απαιτήσεις ψύξης των ΦΒ κυψελών συγκέντρωσης [10].

Οι απαιτήσεις ψύξης των κυψελών δίνονται στον πίνακα 3.1. Η ψύξη γίνεται με φυσική μετάδοση θερμότητας, δεδομένου ότι η εξαναγκασμένη μετάδοση απαιτεί ανεμιστήρα, και η ισχύς που απαιτείται για να τροφοδοτήσει τον ανεμιστήρα μειώνει την συνολική απόδοση του συστήματος.

Ενώ η φυσική μετάδοση επιτρέπει την παθητική αφαίρεση της θερμότητας, η απαγωγή θερμότητας με φυσική μετάδοση είναι από 10 έως 100 φορές χειρότερη από την ψύξη με εξαναγκασμένη μετάδοση. Όσο αυξάνεται το μέγεθος του αποδέκτη θερμότητας (ψήκτρα), αυξάνονται και οι απώλειες μετάδοσης θερμότητας με αποτέλεσμα να πέφτει η απόδοση του CPV.

Επειδή η φυσική μεταφορά απαιτεί μεγάλο αποδέκτη θερμότητας, οι απώλειες αυτές αναμένεται να είναι σημαντικές. Οι σωλήνες θερμότητας παρέχουν μια μέθοδο για να προσδώσουν ισοθεμικά τη θερμότητα σε όλα τα πτερύγια, αυξάνοντας έτσι την απόδοση του συστήματος.

3.5 ΑΝΑΓΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΦΒ/Θ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

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.

Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει φαίνεται ότι η ενσωμάτωση των μονάδων παραγωγής θερμότητας στα ΦΒ μειώνει σημαντικά τον χρόνο απόσβεσης της επένδυσης. Χαρακτηρίστηκε αναφέρεται ότι η ενσωμάτωση μιας μονάδας παραγωγής 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) αντικαταστώντας στοιχεία της κατασκευής με τα ΦΒ.
- Η παραγωγή ενέργεια αυξάνεται ανά μονάδα επιφανείας.
- Καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα.

3.6 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Οι ηλιακοί συλλέκτες έχουν μεγάλη ιστορία και είναι εκμεταλλεύσιμοι εμπορικά από 19 αιώνα, ενώ η εμπορική εκμετάλλευση και παραγωγή των ΦΒ κελιών χρονολογείται από το 1950. Κατά την διάρκεια του 1960 τα ηλιακά κελιά ήταν πολύ ακριβά και η ανάπτυξη τους ήταν κυρίως επικεντρωμένη σε διαστημικές εφαρμογές. Όμως μετά το πετρελαϊκό εμπάργκο του ΟΡΕC το 1973/1974, που είχε σαν αποτέλεσμα την κατακόρυφη αύξηση της τιμής του πετρελαίου, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργεια μπήκαν δυνατά στο παιχνίδι της ενέργειας.

Κατά συνέπεια εφαρμογές και τεχνικές που προηγουμένως θεωρούνταν πολύ ακριβές και ασύμφορες εξετάστηκαν εκ νέου. Ανάμεσα σε αυτές ήταν και οι εφαρμογές ηλιακών κελιών και μαζί με αυτές προωθήθηκαν και τα πρώτα προγράμματα ΦΒ/Θ συστημάτων.

Τις τελευταίες δεκαετίες πολλές θεωρητικές και πειραματικές μελέτες έχουν δημοσιευτεί στα επιστημονικά περιοδικά. Τα ΦΒ/Θ συστήματα διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο ψύξης, δηλαδή ανάλογα με το ρευστό απολαβής θερμότητας σε νερό και αέρα. Θα περιοριστούμε στην ιστορική εξέλιξη των ΦΒ/Θ συστημάτων νερού (PV/T water)

Η πρώτη εργασία πάνω στα ΦΒ/Θ νερού με επίπεδους συλλέκτες έγινε από τον Martin Wolf, ο οποίος ασχολήθηκε με ένα σταθερό φωτοβολταϊκό πυριτίου σε σειρά με θερμικό συλλέκτη χωρίς συγκεντρωτή, χρησιμοποιώντας μπαταρία για την αποθήκευση της ενέργειας. Από την έρευνα του συμπεράνε τις προοπτικές και τα οφέλη αυτής της τεχνολογίας. Μετά την πρωτοπόρα ερευνά του Martin Wolf το 1976, το αντικείμενο των συλλεκτών ΦΒ/Θ νερού ερευνήθηκε από πολλά ιδρύματα όπως το MIT. Η επίδειξη του πρώτου εγχειρήματος έγινε από τον καθηγητή Boer, ο οποίος χρησιμοποίησε 13 συλλέκτες ΦΒ/Θ νερού στο σπίτι του, το 1978. Κατά την περίοδο 1974–1978 έρευνες πάνω στα φωτοβολταϊκά και στα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα νερού έγιναν στο πανεπιστήμιο της Αριζόνα (Arizona State University). Μεγάλο βάρος δόθηκε στη μοντελοποίηση αυτών των συστημάτων για της εφαρμογές στο TRNSYS . Αυτή η δουλειά επεκτάθηκε και στους επίπεδους συλλέκτες ΦΒ/Θ, η οποία είναι και η βάση για το ΦΒ/Θ μοντέλο τύπου TYPE50 το οποίο χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα.

Το 1978, στο εργαστήριο Lincoln (MIT Lincoln laboratory) 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). Από τα πειράματα που έγιναν πάνω σε αυτά τα συστήματα φάνηκε ότι τα αποτελέσματα ήταν χαμηλότερα από τις αρχικές προδιαγραφές (ηλεκτρική απόδοση 6,5% και θερμική απόδοση 40%). Για αυτό το λόγο μια δεύτερη γενιά ΦΒ/Θ συλλεκτών κατασκευάστηκε, αποτελούμενη από ΦΒ/Θ νερού με το προηγούμενο σχέδιο, δύο πειραματικά ανεπτυγμένα ΦΒ/Θ με αέρα, και τρία νέας σχεδίασης ΦΒ/Θ νερού (με αγωγούς διπλής ροής, σχεδίαση χωρίς γυάλινο κάλυμμα, και διπλής φάση Φρέον όπου το ΦΒ/Θ λειτουργεί σαν εξαμιστής της αντλίας θερμότητας). Οι δύο πρώτοι τύποι των ΦΒ/Θ αναπτύχθηκαν και κατασκευάστηκαν ο μεν πρώτος από την MIT και από την Spire Corporation και ο άλλος από τις Solar Design Associates και Spire Corporation κάτω από την υψηλή εποπτεία της MIT. Τα αποτελέσματα των ερευνών καθώς και η τελική αναφορά αυτών έχουν εκδοθεί σε πολλές δημοσιεύσεις.

Στο εργαστήριο Sandia, έγιναν πολλές έρευνες για την επίδραση της θερμότητας στην ηλεκτρική απόδοση. Το 1980 έρευνες ξεκίνησαν στα εργαστήρια της JPL και Brookhaven για την περαιτέρω ανάπτυξη των ΦΒ/Θ συλλεκτών.

Εκτός των ΗΠΑ πραγματοποιήθηκαν σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες και σε άλλες χώρες. Στην Ιαπωνία, η Sharp κατασκεύασε δύο πρωτότυπους επίπεδους ΦΒ/Θ συλλέκτες, ενώ η δουλειά πάνω στους συγκεντρωτές των ΦΒ/Θ έγινε από τον Nakata και την ερευνητική του ομάδα. Στην Γερμανία, ο Karl ανέπτυξε και δοκίμασε φωτοβολταϊκό από κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) με γυάλινο κάλυμμα (μαζί με την AEG Telefunken) και στη Γαλλία έγιναν διάφορες μελέτες πάνω στα ΦΒ/Θ συστήματα με συμπακνωτές.

Ωστόσο, το 1982 λόγω της πετρελαϊκής κρίση αυξήθηκε σημαντικά το παγκόσμιο ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και κυρίως για την ηλιακή ενέργεια. Παρόλα αυτά στην Αμερική το ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν ήταν το ίδιο έντονο. Τη δεκαετία του 1980 τα κονδύλια που προορίζονταν για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ήταν εμφανώς περιορισμένα. Οι περισσότερες ομάδες που εργάζονταν πάνω στα ΦΒ/Θ συστήματα σταμάτησαν την έρευνα τους με εξαίρεση την SunWatt η οποία ασχολήθηκε με τα σταθερά συστήματα ΦΒ/Θ χαμηλής συγκέντρωσης. Ξεκινώντας την ανάπτυξη των ΦΒ/Θ συστημάτων, η SunWatt κατασκεύασε και εγκατέστησε πάνω από 100 ΦΒ/Θ συλλέκτες νερού από το 1981 έως το 1989.

Επίσης κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 κάποιες μεμονωμένες προσπάθειες έγιναν στην Ευρώπη και πιο συγκεκριμένα στην Ελβετία στο ινστιτούτο μικροτεχνικής στο πανεπιστήμιο του Νιουσατέλ (Institut de Microtechnique de l' Université de Neuchatel), καθώς και στη Γιουγκοσλαβία. Ενώ στη δεκαετία του 90, στην Ευρώπη, έγινε στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κυρίως λόγω της παγκόσμιας αναγνώρισης του προβλήματος της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

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. Μια άλλη σημαντική προσπάθεια έγινε στο πανεπιστήμιο του Αϊτχοφεν (Eindhoven University of Technology-EUT), που επικεντρώθηκε στην μελέτη των ΦΒ/Θ συστημάτων με γυάλινο κάλυμμα. Το 1999, η εταιρία Ecofys, το ίδρυμα TNO και το πανεπιστήμιο του Αϊτχόφεν (EUT) έκανα 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 Αϊτχόφεν 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. Οι συλλέκτες που κατασκευάστηκαν από την Solarwatt είχαν σχεδιαστεί να εγκατασταθούν σε πρόγραμμα επίδειξης στο Malteser Krankenhaus, αλλά αντί για τους ΦΒ/Θ συλλέκτες εγκαταστάθηκαν απλοί ΦΒ συλλέκτες.

Στη 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 συγκριτικές μελέτες πάνω στα ΦΒ/Θ συστήματα με ή χωρίς γυάλινο κάλυμμα, με ή χωρίς διάχυτο ανακλαστήρα. Επίσης η οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων αυτών αποτελεί αντικείμενο πολλών μελετών. Επιπλέον, στην Κύπρο έγινε μια αριθμητική μελέτη πάνω σε ένα θερμοσιφωνικού τύπου ΦΒ/Θ σύστημα όπου παρουσιάστηκε και εκτενή βιβλιογραφική αναφορά. Το σύστημα αυτό μοντελοποιήθηκε σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο της Πάτρας.

Στο Ισραήλ, αναπτύχθηκε ένας εμπορικός συλλέκτης ΦΒ/Θ χωρίς γυάλινο κάλυμμα. Αρχικά έμφαση δόθηκε 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. Από εκείνη τη στιγμή και μετά η Millennium Electric είχε τα αποκλειστικά δικαιώματα για την παραγωγή των ΦΒ/Θ. Το 2004 η Millennium Electric ξεκίνησε σε συνεργασία με το τεχνολογικό πανεπιστήμιο της Δανίας (Technical University of Denmark) το πρόγραμμα MULTISOLAR. Το πρόγραμμα MULTISOLAR είναι ένα επιδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση πρόγραμμα για την ανάπτυξη ΦΒ/Θ συστήματα ενσωματωμένα σε κτήρια για την αγορά της Ευρώπης.

Τα προγράμματα για την ανάπτυξη των ΦΒ/Θ συστημάτων δεν έτρεχαν μόνο στην Ευρώπη αλλά και στον υπόλοιπο κόσμο. Στο πανεπιστήμιο του Χόνγκ Κόνγκ (City University of Hong Kong), ο καθηγητής Chow δημιούργησε ένα δυναμικό μοντέλο για τους ΦΒ/Θ συλλέκτες όπου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόδοσης των

θερμοσιφωνικών συστημάτων. Στην Κίνα (University of Science and Technology of China) έκαναν ανάλυση ευαισθησίας των συστημάτων αυτών.

Τέλος στην Αμερική τα κυριότερα προγράμματα έγιναν από τις εταιρίες PowerLight and SDA. Πιο συγκεκριμένα η εταιρία PowerLight επικεντρώθηκε και ανέπτυξε τα ΦΒ/Θ συστήματα χωρίς γυάλινο κάλυμμα, βασισμένη στα μεταλλικά κελιά άμορφου πυριτίου (a-Si) για συλλέκτες πρισινών. Ωστόσο προβλήματα που είχαν να κάνουν με το κόστος παραγωγής και την αξιοπιστία των προϊόντων έκαναν απαγορευτική την παραγωγή των ΦΒ/Θ συστημάτων. Η εταιρία SDA επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη ΦΒ/Θ συλλεκτών με γυάλινο κάλυμμα. Όμως η εμπορική τους παραγωγή δεν ξεκίνησε ποτέ διότι το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης ήταν πολύ μεγάλο για να δικαιολογηθεί από τα αναμενόμενα κέρδη.

3.7 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Ένα από τα πρώτα στοιχεία που πρέπει να προσδιορίσουμε για το σύστημα μας είναι το αν το εργαζόμενο μέσο θα είναι ο αέρας ή το νερό. Αυτό κατά ένα μεγάλο μέρος εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής για την οποία προορίζεται το σύστημα και συνήθως στις κτιριακές εφαρμογές προτιμάται ο αέρας.

Ωστόσο θα πρέπει να συνυπολογιστεί η κλιματική παράμετρος καθώς σε τόπους με θερμό κλίμα το ζεστό νερό έχει μεγαλύτερη εμπορική αξία. Για τη διαστασιολόγηση του συστήματος λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:

- Θερμοκρασία εξόδου του μέσου
- Θερμικό φορτίο (kWt)
- Ηλεκτρικό φορτίο (kWe)
- Κατάλληλη τοποθέτηση εγκατάστασης (προσανατολισμός, σκίαση)
- Κτιριακοί περιορισμοί (διαθέσιμος χώρος, αντοχή κτιρίου, αισθητική)

Κατά την μελέτη σε BIPV εγκαταστάσεις θα πρέπει το σύστημα να διαστασιολογείται κυρίως με βάση το θερμικό κέρδος για τις χειμερινές ημέρες, αφού συνήθως τέτοια συστήματα είναι συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο και δεν έχουν πρόβλημα ηλεκτροδότησης. Η αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος από την ψύξη είναι επιθυμητή κυρίως το καλοκαίρι οπότε και δεν υπάρχει ανάγκη θέρμανσης.

3.8 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΩΝ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΦΒ/Θ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η φυσική κυκλοφορία αέρα αποτελεί μια απλή και χαμηλού κόστους μέθοδο για να αφαιρέσει τη θερμότητα από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και να κρατήσει την ηλεκτρική απόδοση σε ικανοποιητικό επίπεδο. Η εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα είναι αποδοτικότερη αλλά οι πρόσθετες ενεργειακές απαιτήσεις της αντλίας μειώνουν το καθαρό κέρδος του συστήματος σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η άμεση εξαγωγή της θερμότητας από την πίσω επιφάνεια του φωτοβολταϊκού με τη χρήση κάποιου υγρού είναι αποτελεσματικότερος τρόπος ψύξης. Για να αποφύγουμε τα προβλήματα λόγω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού, χρησιμοποιείται και ένας εναλλάκτης θερμότητας σε θερμική επαφή με την πίσω επιφάνεια του φωτοβολταϊκού.

Η θερμοκρασία λειτουργίας της θερμικής μονάδας στα υβριδικά συστήματα ΦΒ/Θ έχει επιπτώσεις στην ηλεκτρική απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Για να μεγιστοποιήσουμε την ηλεκτρική παραγωγή, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο πρέπει να βρίσκεται στην βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία εξαρτάται από την εισερχόμενη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την ταχύτητα του ανέμου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρησιμοποίηση ενός ρευστού για την απαγωγή της θερμότητας, το οποίο θα έχει κατάλληλη ροή μάζας (παροχή) ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερη άνοδο της θερμοκρασίας του υγρού στην έξοδο του.

Το ζεστό νερό που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση χώρου, σε πισίνες ή σε βιομηχανίες. Μεγαλύτερες θερμοκρασίες μπορεί να φανούν πιο χρήσιμες για θέρμανση αλλά τότε μειώνεται η ηλεκτρική απόδοση του φωτοβολταϊκού.

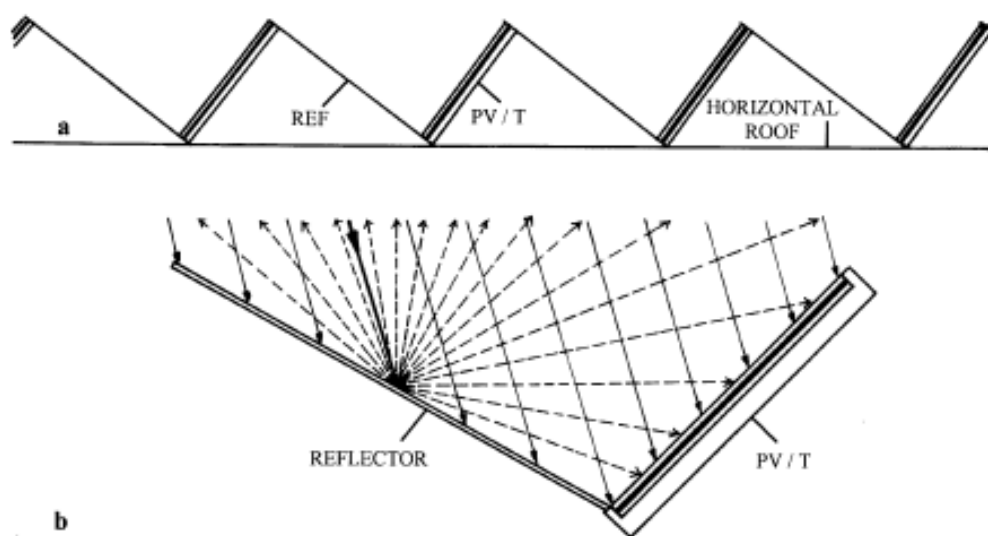
Για το φωτοβολταϊκό σε περιοχές με χαμηλή θερμοκρασία και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, η θέρμανση χώρου είναι περισσότερο απαραίτητη για σχεδόν όλο το έτος και η ψύξη των ΦΒ με αέρα μπορεί να φανεί πιο αποδοτική έναντι της ψύξης με νερό. Επομένως το μέσο ψύξης εξαρτάται από την μέση τιμή της θερμοκρασία της περιοχής, της ηλιακής ακτινοβολίας και τις ανάγκες που έχουμε για ηλεκτρική ή θερμική απόδοση.

Σε όλες τις εφαρμογές ΦΒ/Θ συστημάτων το συμπληρωματικό κόστος του θερμικού μέρους (εξαγωγή θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, το ρευστό λειτουργίας και ο τρόπος ροής του, οι σωλήνες κυκλοφορίας, οι αντλίες, η θερμική μονάδα αποθήκευσης νερού, κ.τ.λ.) πρέπει να συγκριθεί με το κόστος μια συμβατικής εγκατάστασης

φωτοβολταϊκού, υπολογίζοντας το κέρδος της ηλεκτρικής παραγωγής που έχουμε με ψύξη, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το σύστημα και να το καταστήσει οικονομικά αποδοτικό.

Η προστιθέμενη θερμική μονάδα πρέπει να είναι ανθεκτική, δεδομένου ότι η ψύξη του φωτοβολταϊκού μπορεί να δώσει στα ηλιακά κύτταρα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Το κόστος της θερμικής μονάδας είναι το ίδιο για όλους τους τύπους των φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιούνται στα υβριδικά συστήματα, για την ίδια απαγωγή θερμότητας και για ίση επιφάνεια της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, αλλά η θερμική αποδοτικότητα διαφέρει ανάλογα τον τύπο του φωτοβολταϊκού. Τα φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου (a-Si) εμφανίζουν μεγαλύτερη θερμική απόδοση λόγω του ότι έχουν μικρότερη ηλεκτρική απόδοση και μικρότερες οπτικές απώλειες.

Στις σταθερές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται συνήθως σε παράλληλη διάταξη, σε απόσταση μεταξύ τους για να αποφευχθεί το φαινόμενο της σκίασης (shading). Καθώς οι ηλιακές ακτίνες πέφτουν πάνω στην οριζόντια επιφάνεια μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας δεν εκμεταλλεύεται από την ΦΒ εγκατάσταση.



Σχήμα 3.10 Συνδυασμός ΦΒ/Θ συστημάτων με επίπεδους διάχυτους ανακλαστήρες [10].

Αυτό συμβαίνει από την άνοιξη μέχρι το φθινόπωρο λόγω της μεγαλύτερης απόσταση του ήλιου από τη επιφάνεια της θάλασσας. Μέρος αυτή της ακτινοβολίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από τα

φωτοβολταϊκά πλαίσια, γι' αυτό και έχουν προταθεί οι συμπληρωματικοί διάχυτοι ανακλαστήρες που τοποθετούνται μεταξύ των παράλληλων πλαισίων του φωτοβολταϊκού όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10, αυξάνοντας την έκθεση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών.

Οι διάχυτοι συμπληρωματικοί ανακλαστήρες επιτυγχάνουν μια ομαλότερη διανομή της πρόσθετης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των ΦΒ, η οποία μπορεί να είναι σχεδόν ομοιόμορφη εφόσον έχουν την κατάλληλη γεωμετρία τα συστήματα των ανακλαστήρων. Η πρόσθετη ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των ΦΒ είναι χαμηλότερη από αυτή που έχουμε με κατοπτρικούς ανακλαστήρες, αλλά οι διάχυτοι ανακλαστήρες είναι φτηνότεροι και μπορούν να συνδυαστούν πιο εύκολα με τυπικά μεγέθη ΦΒ.

Στα υβριδικά ΦΒ/Θ συστήματα αυτή η πρόσθετη ηλιακή εισαγωγή μπορεί να αυξήσει τη θερμική και ηλεκτρική παραγωγή τους, κρατώντας τη θερμοκρασία των ΦΒ σε ένα λογικό επίπεδο. Η εισαγωγή συμπληρωματικών διάχυτων ανακλαστήρων στα υβριδικά ΦΒ/Θ συστήματα προτείνεται κυρίως για οικονομική βελτίωση της συνολικής εγκατάστασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΥΠΟΙ ΦΒ/Θ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

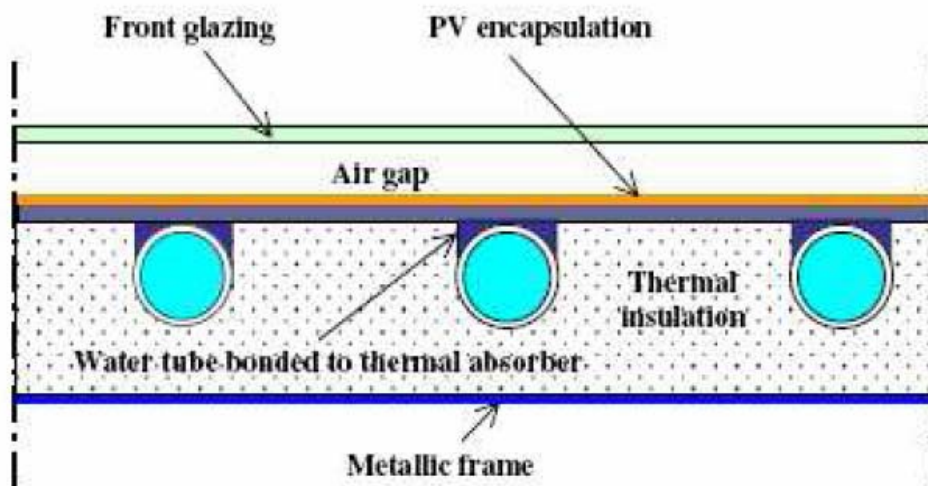
Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τους τύπους των ΦΒ/Θ συλλεκτών. Θα περιοριστούμε στους ΦΒ/Θ συλλέκτες που χρησιμοποιούν νερό για την απαγωγή της θερμότητας.

Στην περίπτωση αυτή η απόδοση του ΦΒ/Θ συστημάτων έχει να κάνει με τον τύπο της μονάδας απαγωγής θερμότητας που χρησιμοποιείται γιατί η απόδοση στην συναλλαγή θερμικής ενέργειας από το ΦΒ καθορίζει την απόδοση μετατροπής και του ηλεκτρισμού και της θερμότητας.

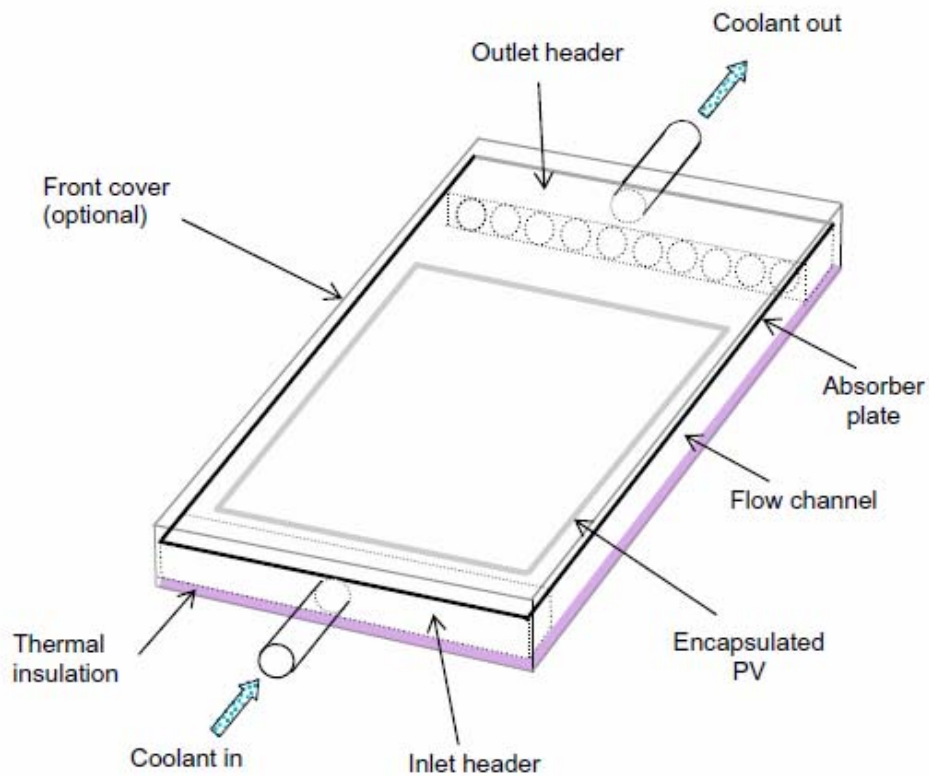
Οι κυριότερες κατηγορίες των ΦΒ/Θ συλλεκτών με νερό που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία είναι: οι επίπεδοι συλλέκτες (flat plate collectors ή sheet-and-tube PV/T-collectors), οι συλλέκτες ΦΒ/Θ με κανάλια (channel PV/T-collectors), οι ελεύθερης ροής ΦΒ/Θ συλλέκτες (free flow PV/T-collectors), και οι ΦΒ/Θ συλλέκτες διπλής απορρόφησης (two-absorber PV/T-collectors).

4.2 ΕΠΙΠΕΔΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

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 μόνη σημαντική διαφορά όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ που είναι προσαρτημένα στην κορυφή της απορροφητικής πλάκας. Στο σχήμα 4.1 φαίνεται εκτός των άλλων η απορροφητική πλάκα με τους σωλήνες, το γυάλινο κάλυμμα, και η μόνωση.



Σχήμα 4.1 Διάταξη επίπεδου συλλέκτη [1].



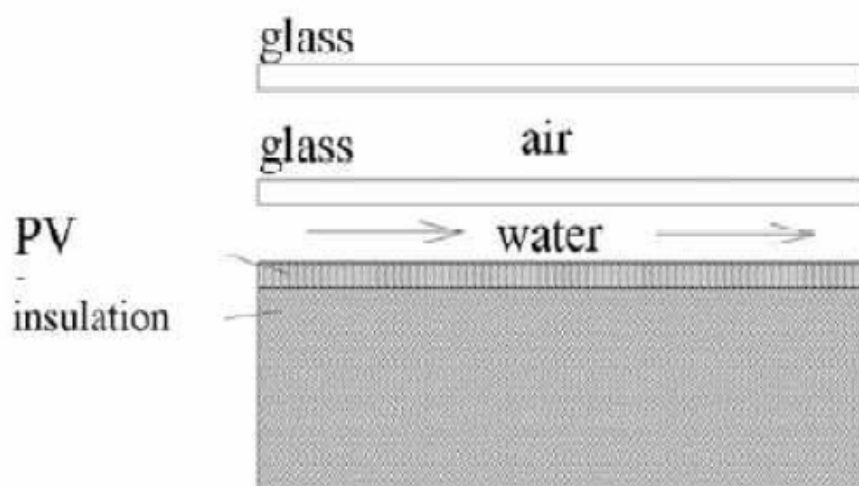
Σχήμα 4.2 Τα σημαντικότερα τμήματα ενός επίπεδου ΦΒ/Θ συλλέκτη [17].

Η θερμική μόνωση αυτών των συστημάτων μπορεί να βελτιωθεί βάζοντας επιπλέον καλύμματα. Όμως, επειδή κάθε επιπλέον κάλυμμα δημιουργεί επιπρόσθετη αντανάκλαση, αυτή η πρακτική μειώνει την ηλεκτρική παραγωγή του ΦΒ/Θ συλλέκτη. Επίπεδοι ΦΒ/Θ συλλέκτες που έχουν πρακτικό ενδιαφέρον είναι αυτοί που έχουν ένα, δύο ή κανένα κάλυμμα. Συστήματα με παραπάνω από δύο καλύμματα δεν μας απασχολούν καθώς ο ηλεκτρικός βαθμός των ΦΒ/Θ πέφτει παρά πολύ.

4.3 ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΜΕ ΚΑΝΑΛΙΑ

Οι συλλέκτες ΦΒ/Θ με κανάλια (channel PV/T-collectors) φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα. Αυτού του τύπου οι συλλέκτες υπόκεινται σε περιορισμούς όσον αφορά 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.

Στις συνήθεις εφαρμογές επιτρέπεται να χρησιμοποιείται νερό που έχει μικρή επικάλυψη της απορροφητικής ικανότητας του φωτοβολταϊκού. 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.



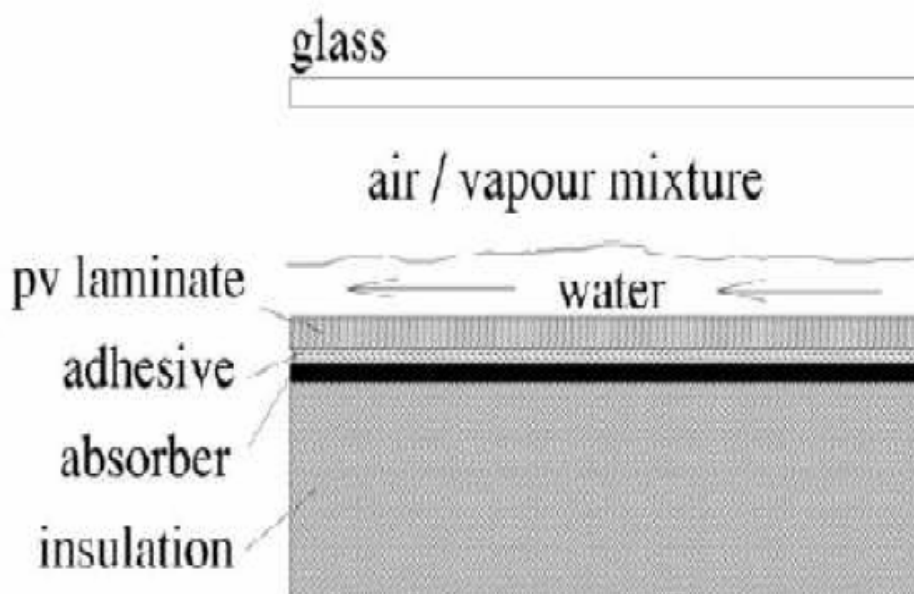
Σχήμα 4.3 Διάταξη συλλέκτη ΦΒ/Θ με κανάλια [1].

Σαν αποτέλεσμα η κατασκευή είναι αρκετά βαριά και εύθραυστη. Μια διαφοροποίηση αυτής του τύπου είναι να αφήσουμε το νερό να ρέει κάτω από το φωτοβολταϊκό.

Οι εν λόγω συλλέκτες έχουν δοκιμαστεί και με διαφανή αλλά και με αδιαφανή φωτοβολταϊκά πάνελ. Στις εφαρμογές με αδιαφανή φωτοβολταϊκά πάνελ η θερμική απόδοση είναι καλύτερη όμως το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό. Επιπλέον όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα φωτοβολταϊκά πάνελ θα πρέπει να αντέχουν στην πίεση του νερού. Στην περίπτωση των αδιαφανών φωτοβολταϊκών πάνελ αυτό είναι λιγότερο πρόβλημα αφού μπορούν να προσαρτηθούν πάνω τους κατάλληλα ελάσματα ούτως ώστε να πάρουν τις τάσεις.

4.4 ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ

Οι ελεύθερης ροής ΦΒ/Θ συλλέκτες (free flow PV/Tcollectors). 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.

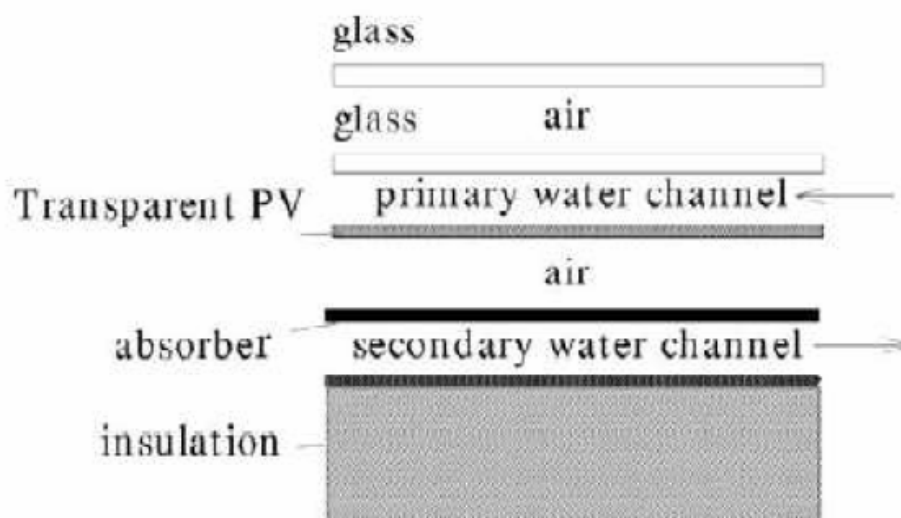


Σχήμα 4.4 Διάταξη ελεύθερης ροής ΦΒ/Θ συλλέκτη [1].

Κατά συνέπεια η αντανάκλαση και το κόστος υλικών μειώνεται, ενώ επιπρόσθετα το πρόβλημα αντοχής του επιπλέον γυαλιού εξαλείφεται. Στον αντίποδα το μειονέκτημα του είναι η αυξημένες θερμικές απώλειες λόγω εξάτμισης. Επιπλέον όπως και στην περίπτωση των συλλεκτών ΦΒ/Θ με κανάλια και εδώ θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι το υγρό που κυλάει πάνω από το φωτοβολταϊκό θα πρέπει να είναι διάφανο σε σχέση με το ηλιακό φάσμα που ενεργοποιεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο σε κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Η χρησιμοποίηση του νερού είναι μια λύση όμως, εφόσον η πίεση εξάτμισης δεν είναι πολύ χαμηλή. Η εξάτμιση έχει αποδειχτεί ότι προκαλεί προβλήματα όταν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή.

4.5 ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΔΙΠΛΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Οι ΦΒ/Θ συλλέκτες διπλής απορρόφησης (two-absorber PV/T-collectors) χρησιμοποιούν ένα διάφανο φωτοβολταϊκό φύλλο σαν κύριο απορροφητή και μια μαύρη μεταλλική πλάκα σαν δεύτερο απορροφητή. Το σύστημα έχει δύο κανάλια το ένα πάνω στο άλλο. Η εισαγωγή του νερού γίνεται από το πάνω κανάλι και η επιστροφή από το κάτω κανάλι.



Σχήμα 4.5 Διάταξη ΦΒ/Θ συλλέκτη διπλής απορρόφησης [1].

Με αυτόν τον τύπο συλλέκτη ασχολήθηκε ο Hendrie στο εργαστήριο του MIT όπου απέδειξε την υψηλή θερμική απόδοση του.

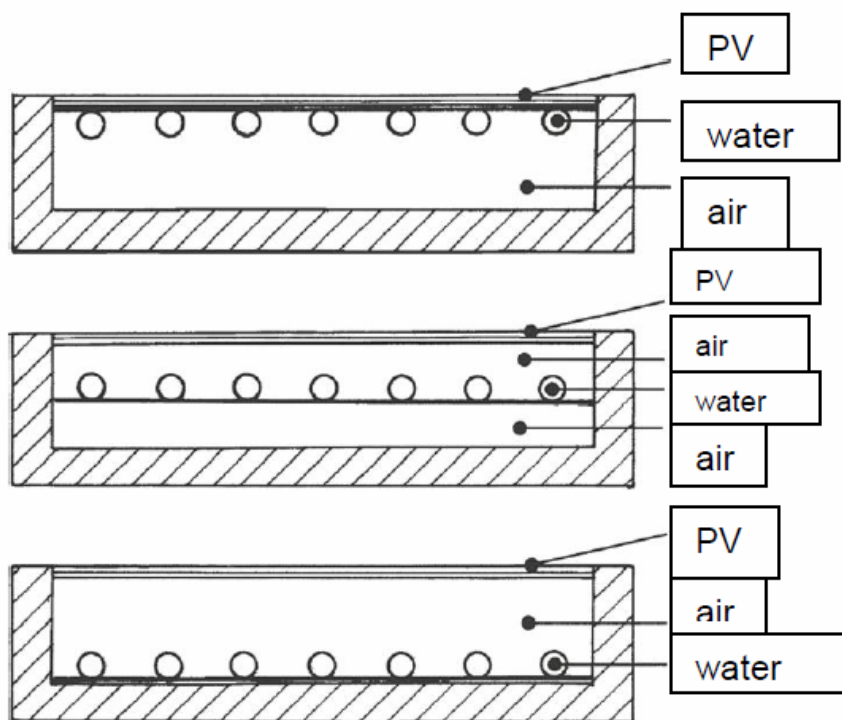
Παρόλα αυτά, οι επισημάνσεις που έγιναν προηγουμένως για το βάρος των καναλιών ισχύουν και εδώ. Η απόδοση του συστήματος αυτού μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας ένα διάφανο μονωτικό στρώμα ανάμεσα στο επάνω και το κάτω κανάλι ώστε να μειωθούν οι θερμικές απώλειες. Όμως αυτό μειώνει την ικανότητα του συλλέκτη. Στη φωτογραφία φαίνεται η διάταξη ενός ΦΒ/Θ συλλέκτης διπλής απορρόφησης.

4.6 ΦΒ/Θ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΕΡΑ

Ο διαφορετικός σχεδιασμός και λειτουργία των ΦΒ/Θ συλλεκτών νερού και αέρα έχει ως αποτέλεσμα κάποιους περιορισμούς στις εφαρμογές αυτών. Οι ΦΒ/Θ συλλέκτες νερού μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά σχεδόν όλες τις εποχές κυρίως σε περιοχές μικρού και μεσαίου γεωγραφικού πλάτους προς αποφυγή προβλημάτων πήξης του νερού και δημιουργίας πάγου. Απ' την άλλη πλευρά, οι ΦΒ/Θ συλλέκτες αέρα μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά σχεδόν όλες τις εποχές κυρίως σε περιοχές μεσαίου και υψηλού γεωγραφικού πλάτους. Σε περιοχές μικρού γεωγραφικού πλάτους κατά την περίοδο του καλοκαιριού η ψύξη των φωτοβολταϊκών με κυκλοφορία αέρα είναι λιγότερο αποδοτική λόγω του ότι η θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος είναι αρκετά υψηλή. Επιπλέον, ο θερμός αέρας που παράγεται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμος στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογών φβ/θ αέρα.

Για τους παραπάνω λόγους, ενδιαφέρον παρουσιάζει η πρόταση του Εργαστηρίου Ηλιακής Ενέργειας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών περιλαμβάνει το συνδυασμό φωτοβολταϊκού/θερμικού συλλέκτη αέρα και νερού (PVT/DUAL) σε μια συσκευή με αποτέλεσμα να αποφεύγονται οι περιορισμοί χρήσης αυτών των δύο συλλεκτών. Αυτού του είδους ο ΦΒ/Θ συλλέκτης αποτελείται από ξεχωριστές μονάδες νερού και αέρα πίσω από την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Η απαγωγή θερμότητας γίνεται άλλοτε μέσω νερού και άλλοτε μέσω αέρα, ανάλογα των καιρικών συνθηκών και αναγκών της εφαρμογής. Αυτή η μορφή ΦΒ/Θ συλλέκτη με συνδυασμό απαγωγής της θερμότητας αέρα ή νερού είναι απλή και μπορεί να εφαρμοστεί στις στέγες κτιρίων και στις προσόψεις ή σε άλλες εφαρμογές στο βιομηχανικό και αγροτικό τομέα.

Με την προτεινόμενη συσκευή, η απαγωγή θερμότητας με νερό μπορεί να γίνει κατά τη διάρκεια περιόδων με υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, καθώς η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη από το δίκτυο δεν υπερβαίνει συνήθως τους 20°C. Αντίθετα, ο ΦΒ/Θ συλλέκτης απαγωγής θερμότητας με αέρα έχει καλύτερα αποτελέσματα όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλή.



Σχήμα 4.6 Μορφές ΦΒ/Θ συλλέκτη με συνδυασμό νερού και αέρα [9].

Η τοποθέτηση του συλλέκτη με τους σωλήνες νερού μπορεί να γίνει ακριβώς πίσω από το φωτοβολταϊκό και σε επαφή με αυτό, στη μέση του αεραγωγού ή στη μόνωση πίσω στον αεραγωγό. Η συσκευή με τους σωλήνες νερού ακριβώς πίσω από το φωτοβολταϊκό, εφόσον βρίσκεται σε θερμική επαφή με αυτό, αποδίδει καλύτερη θερμική απόδοση στο νερό. Σε αυτή την περίπτωση επιπλέον η απαγωγή θερμότητας από τον αέρα είναι βελτιωμένη λόγω του ότι οι σωλήνες πάνω από τον αεραγωγό αυξάνουν την επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας για τον αέρα.

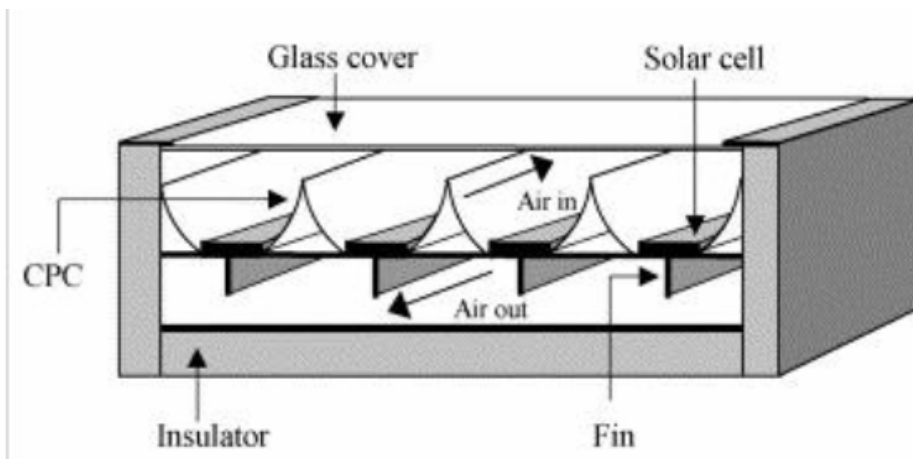
4.7 ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Πέρα από τα συγκεντρωτικά συστήματα υψηλής συγκέντρωσης που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί από εταιρείες συγκεντρωτικά υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, για εγκατάσταση κυρίως στον κτιριακό τομέα. Τα φωτοβολταϊκά, από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, μόνο ένα μικρό μέρος μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ το υπόλοιπο μεταδίδεται προς το περιβάλλον με μορφή θερμότητας.

Εκτός αυτού, με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας, η ηλεκτρική τους απόδοση μειώνεται. Με την ψύξη όμως του συστήματος μέσω κάποιου ρευστού (νερό ή αέρας), απάγεται η θερμότητα από το φωτοβολταϊκό, και το θερμό ρευστό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των θερμικών αναγκών. Αυτή είναι και η αρχή λειτουργίας των υβριδικών συστημάτων, τα οποία έχουν σαν σκοπό την όσο καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, με τις λιγότερες απώλειες.



Σχήμα 4.7 Συγκεντρωτικό ΦΒ/Θ σύστημα [8].



Σχήμα 4.8 ΦΒ/Θ σύστημα με συγκεντρωτικούς ανακλαστήρες CPC [9].

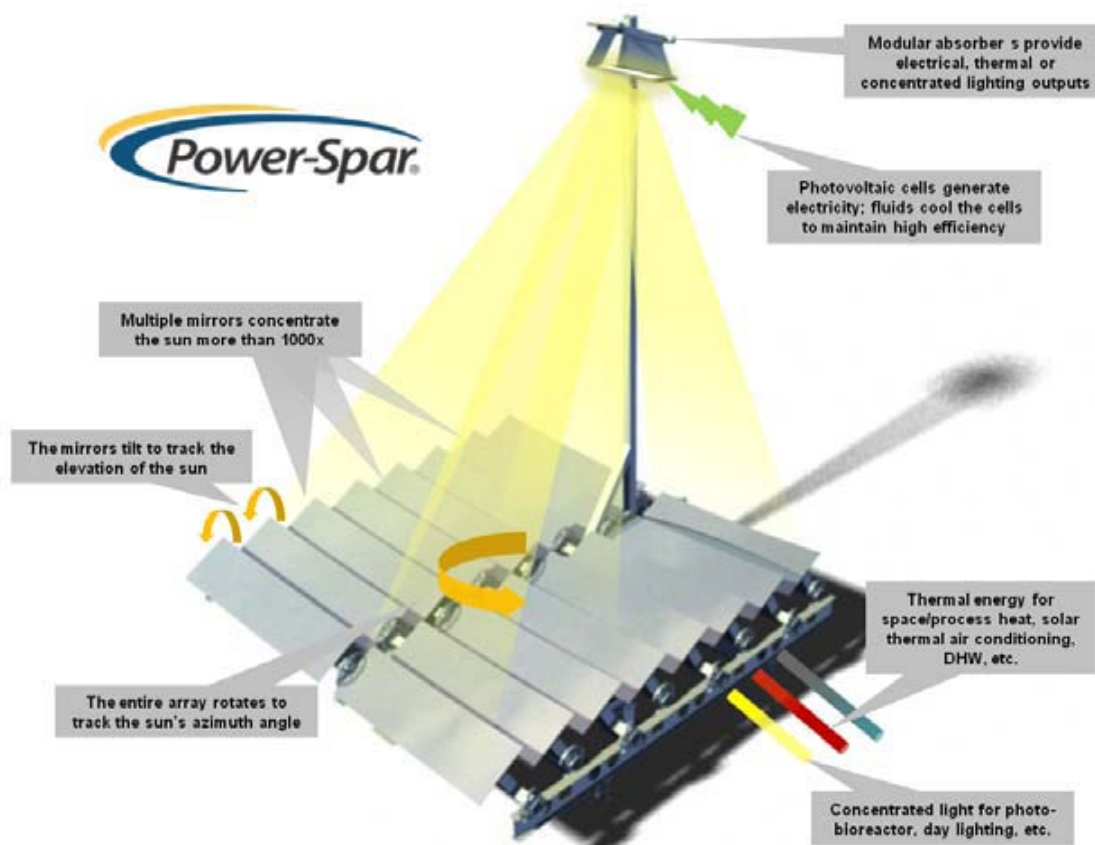
Το πρώτο συγκεντρωτικό ΦΒ/Θ σύστημα που ήταν διαθέσιμο εμπορικά είναι της εταιρίας Heliodynamics στη Βρετανία βασίζεται στην τεχνολογία συστήματος παρακολούθησης του ήλιου. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε συνοπτικά σε δύο από τα πιο εμπορικά διαδεδομένα μοντέλα συγκεντρωτικών υβριδικών συστημάτων (CPV/T).



Σχήμα 4. 9 Το συγκεντρωτικό ΦΒ/Θ σύστημα της εταιρείας Heliodynamics [9].

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ POWER SPAR

Το συγκεντρωτικό σύστημα Power-Spar της εταιρείας Menova, κινείται σε δύο-άξονες, όπου μια μηχανή ρυθμίζει την κλίση των καθρεφτών σύμφωνα με τη γωνία του ύψους του ήλιου και μια δεύτερη μηχανή περιστρέφει ολόκληρη την διάταξη κατά την γωνία του αζιμούθιου. Κάθε ένας από τους ανακλαστικούς καθρέφτες είναι παραβολικός, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται συγκέντρωση στον απορροφητή μεγαλύτερη από 1000 ήλιους (Σχήμα 4.10). Το σύστημα αυτό είναι εμπορικά διαθέσιμο σήμερα σε τρεις διαφορετικές τύπους: ως υβριδικό ΦΒ/Θ σύστημα (CPVT), ως συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό σύστημα (CPV) και ως συγκεντρωτικό θερμικό σύστημα (CT).



Σχήμα 4.10 Απεικόνιση της λειτουργίας ενός συγκεντρωτικού υβριδικού συστήματος Power-Spar, συμπαράγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας [20].

Η διαδικασία λειτουργίας του είναι απλή: ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας (HTF) διαβρέχει τις πίσω επιφάνειες των κυττάρων PV για να τα ψύξει και για να διατηρήσει υψηλά την απόδοσή τους, με αποτέλεσμα να απάγει θερμότητα από τα κύτταρα PV και να θερμαίνεται. Εν συνεχεία, το θερμό ρευστό χρησιμοποιείται για την θέρμανση χώρων ή θέρμανση νερού για χρήση στο κτίριο. Με το συνυπολογισμό μιας ηλιακής θερμικής μονάδας κλιματισμού (STAC), η θερμική ενέργεια μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει ψύξη σε ένα κτίριο.

Πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι και στο σύστημα CPVT και στο CPV, η θερμοκρασία του HTF κρατιέται όσο το δυνατόν χαμηλότερη για να μεγιστοποιείται η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος. Έτσι, οι θερμοκρασίες του ρευστού πρέπει να προσαρμόζονται ανάλογα με τις θερμικές απαιτήσεις της εγκατάστασης, γι αυτό και ένα κατάλληλο ρευστό μεταφοράς θερμότητας επιλέγεται για να δώσει κάθε φορά τις επιθυμητές θερμοκρασίες εξόδου.

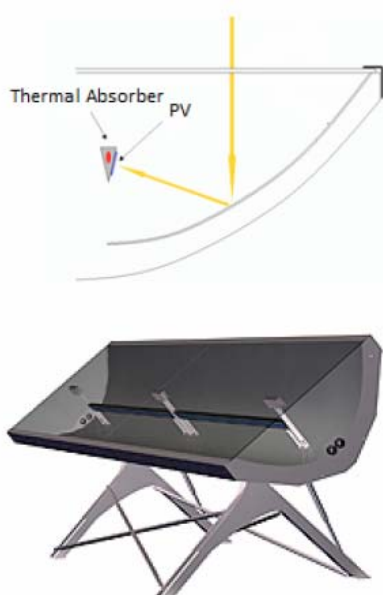
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ABSOLICON X10

Το συγκεντρωτικό σύστημα Absolicon X10 βασίζεται στην ιδέα μιας οικονομικής αποδοτικής συσκευής με χρήση της συγκέντρωσης του ήλιου για παραγωγή μεγαλύτερων ενεργειακών ποσών και ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Η ανακλαστική επιφάνεια είναι σχήματος παραβολικού και στην εστία της βρίσκονται τα φωτοβολταϊκά κύτταρα που απορροφούν την συγκεντρωτική ακτινοβολία. Ανάμεσά τους, ρευστό διαβρέχει την επιφάνειά τους για την ψύξη και την καλύτερη λειτουργία τους, ενώ ταυτόχρονα, με την απαγωγή της θερμότητας, το ρευστό θερμαίνεται και αξιοποιείται για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της εγκατάστασης. Η σχηματική αναπαράσταση του συστήματος με τα τεχνικά χαρακτηριστικά, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.11.

Έτσι, με το X10, χρειάζεται μόνο ένα σύστημα προκειμένου να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Με αυτόν τον τρόπο το X10 βελτιστοποιεί τη χρήση του χώρου εγκατάστασης, παραδείγματος χάριν στις κορυφές στεγών όπου η ενότητα μπορεί να εγκατασταθεί, ενώ συγχρόνως μειώνονται εντυπωσιακά οι δαπάνες εγκατάστασης, με την χρήση λιγότερων καλωδίων και σωλήνων.

Το σύστημα κινείται κατά ένα άξονα (γωνία ύψους του ήλιου ή ζενίθια γωνία), χρησιμοποιώντας μια συσκευή καταδίωξης του ήλιου και ελέγχου (PLC), ενώ με τη βοήθεια ενσωματωμένων αισθητήρων θερμοκρασίας, εξασφαλίζεται ότι το ηλιακό σύστημα δεν θα υπερθερμαθεί ποτέ.

Η X10 κατασκευή βελτιστοποιείται για τις εγκαταστάσεις μεγαλύτερες από 20m². και προσφέρεται σε τέσσερα διαφορετικά μήκη 6,10,14 και 18 μέτρα. Αυτά τα διαφορετικά μήκη μπορούν να συνδεθούν σε σειρά για εγκαταστάσεις χωρίς περιορισμούς επιφάνειας για την κάλυψη μεγάλων θερμικών αναγκών, όπως παραδείγματος χάριν τα ξενοδοχεία, τα νοσοκομεία, τις βιομηχανίες, τα αθλητικά κέντρα, τους αερολιμένες και τις πολυκατοικίες.



Production

Electricity	120 kWh/m ² /annum
Hot water (50°C)	750 kWh/m ² /annum

Thermal

U-value	0,5 W/m ² *K; 0,005
Optical n0 direct; diffuse	W/m ² *K ²
Angular dependence, b0	70%; 12%
Pressure drop	0,1
Operating temperature	40 Pa at 300 l/h 10°C – 80°C

Electrical

PV Power at 25°C	100 Wp/m ² active surface
PV Parameters	Voc = 85 V, FF=70% Vmpp = 70 V, Impp = 13 A.

Σχήμα 4.11 Απεικόνιση της λειτουργίας και των τεχνικών χαρακτηριστικών ενός συγκεντρωτικού υβριδικού συστήματος Absolicon X10, συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας [20].



Σχήμα 4.12 Εγκατεστημένες μονάδες του συγκεντρωτικού συστήματος Absolicon X10 [20].

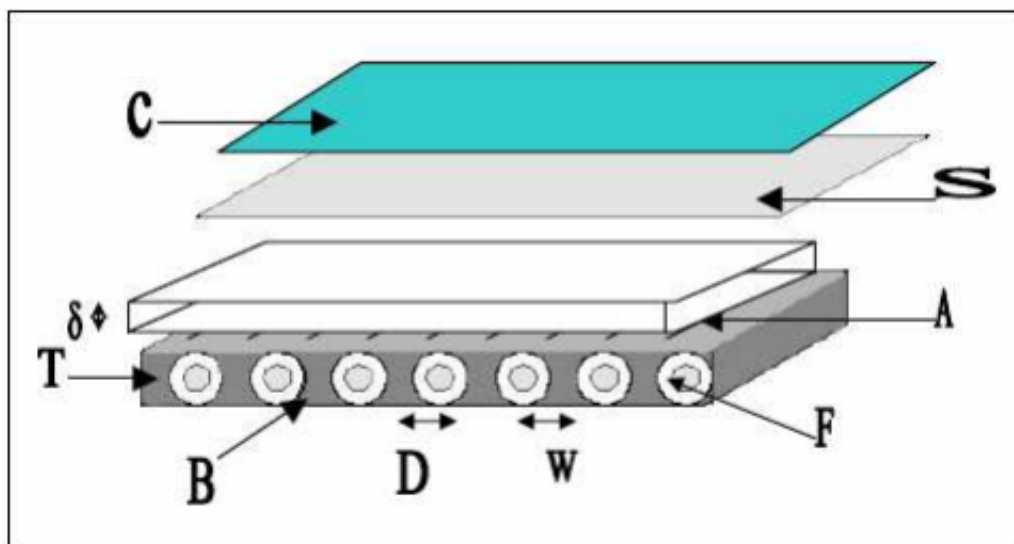
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΟΔΟΣΗ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η συνολική παραγωγή ενέργειας από τα υβριδικά ΦΒ/Θ συστήματα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η ταχύτητα του αέρα, η μάζα του εργαζόμενου μέσου, ο αριθμός των καλυμμάτων, η θερμική αγωγιμότητα του απορροφητή με το ρευστό.

Ειδικά στην περίπτωση των ΦΒ/Θ συλλεκτών νερού επηρεάζουν πολύ την απόδοση και οι διαστάσεις της απορροφητικής πλάκας όπως η απόσταση μεταξύ των σωλήνων, η διάμετρος των σωλήνων και το πάχος. Η γενική διαμόρφωση ενός υδρόψυκτου συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.1 Βασικό μοντέλο ΦΒ/Θ συστήματος νερού [10].

Τα γράμματα στην παραπάνω εικόνα σημαίνουν:

C είναι η κάλυψη του συστήματος,
S είναι το ηλιακό πλαίσιο,
A είναι ο απορροφητής,
δ είναι το πάχος του απορροφητή,
D είναι η διάμετρος του σωλήνα,
W η απόσταση μεταξύ δύο σωλήνων,
F το ρευστό που περνά μέσω των σωλήνων,
B είναι ο εναλλάκτης θερμότητας και το
T αντιπροσωπεύει κάθε σωλήνα.

Η ηλεκτρική απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 5%-20%, ενώ η θερμική απόδοση ενός θερμικού συλλέκτη κυμαίνεται μεταξύ 70%-90%. Σε ένα ΦΒ/Θ συλλέκτη η συνολική ηλεκτρική και θερμική απόδοση είναι μικρότερη απ' ό τι στην περίπτωση ενός φωτοβολταϊκού και ενός θερμικού συλλέκτη ξεχωριστά. Ωστόσο, δύο ΦΒ/Θ συλλέκτες παράγουν περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας απ' ό τι ένα φωτοβολταϊκό και ένας συλλέκτης συνολικά. Συνεπώς, η χρήση ΦΒ/Θ συλλεκτών είναι η πιο κατάλληλη σε εφαρμογές όπου η διαθέσιμη επιφάνεια είναι περιορισμένη.

Μία σημαντική παράμετρος είναι η οπτική απόδοση του υλικού του συλλέκτη. Η χρήση υπερδιαφανών πλαστικών αντί του γυαλιού μπορεί να αυξήσει την οπτική απόδοση αλλά η ευαισθησία τους στο υπεριώδες και τις υψηλές θερμοκρασίες περιορίζει πολύ τη δυνατότητα εφαρμογής αυτών των υλικών στα ΦΒ/Θ συστήματα.

Η θερμική απόδοση ορίζεται ως το πηλίκο της θερμότητας που παρέχεται στο νερό, στη μονάδα του χρόνου, για την αύξηση της θερμοκρασίας του προς την ενέργεια της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο συλλέκτη στη μονάδα του χρόνου.

Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}c(T_{out} - T_{in})}{GA} \quad (5.1)$$

όπου:

\dot{m} είναι η παροχή του νερού

c είναι η ειδική θερμότητα του νερού

T_{in} και T_{out} είναι η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του νερού

G είναι η ένταση της ακτινοβολίας σε W/m^2

A είναι η επιφάνεια του συλλέκτη

Η ηλεκτρική απόδοση αντίστοιχα ορίζεται από τη σχέση:

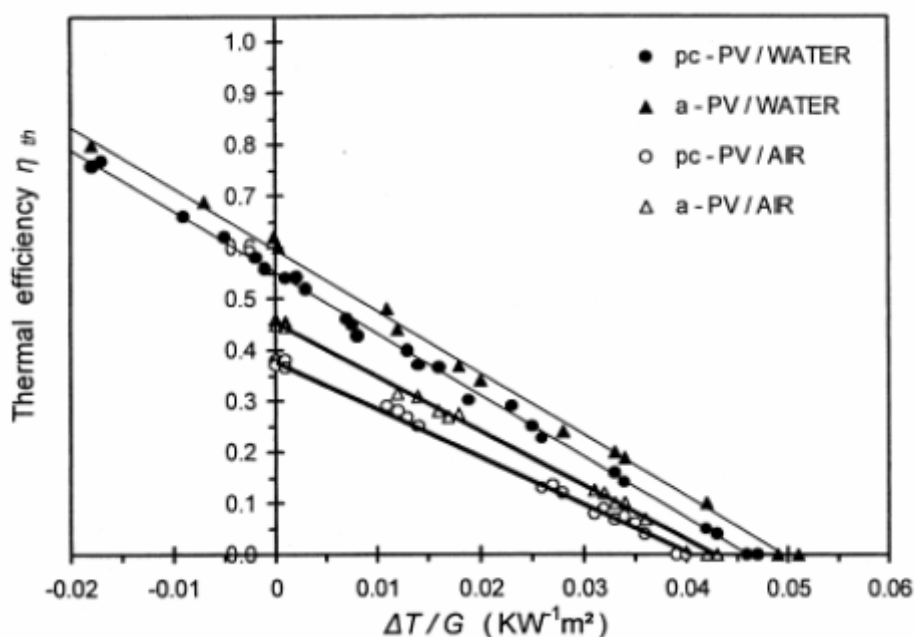
$$\eta_{el} = \frac{V_{MPP} I_{MPP}}{GA} \quad (5.2)$$

όπου:

V_{MPP} και I_{MPP} είναι η τάση και η ένταση ρεύματος αντίστοιχα στο σημείο μέγιστης ισχύος.

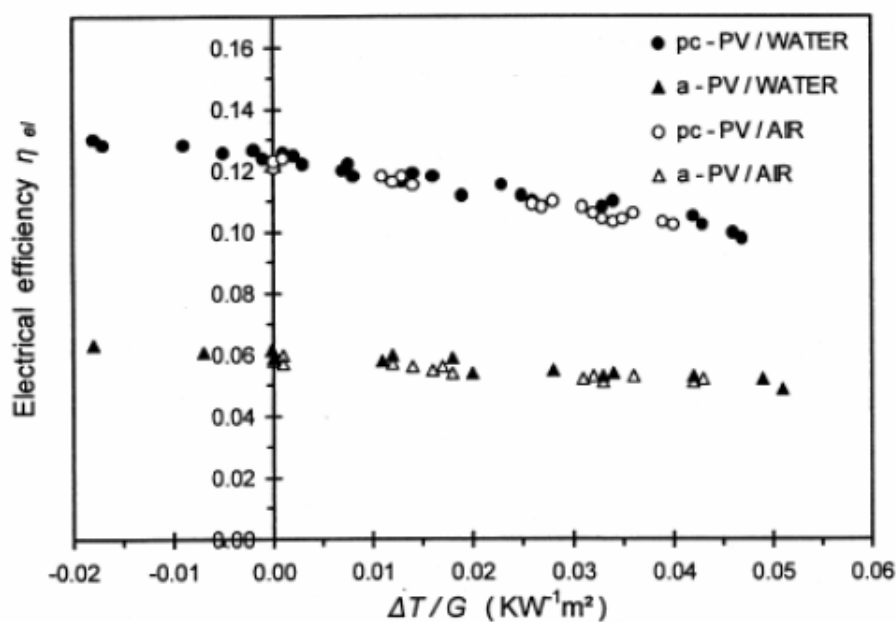
5.2 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΤΥΠΟ ΤΟΥ ΦΒ ΚΕΛΙΟΥ

Στην ενότητα αυτή γίνεται η σύγκριση των ΦΒ με άμορφο και πολυκρυσταλλικό πυρίτιο με ψύξη με νερό και αέρα, δηλαδή των συστημάτων (pc-PV/WATER), (a-PV/WATER), (pc-PV/AIR) και (a-PV/AIR). Η θερμοκρασία των ΦΒ αυξάνεται λόγω της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας η οποία δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με αποτέλεσμα τη μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης.



Σχήμα 5.2 Θερμική απόδοση ΦΒ με άμορφο και πολυκρυσταλλικό πυρίτιο [16].

Στις πολυκρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου η θερμοκρασία επιδρά περισσότερο από τις αντίστοιχες άμορφου πυριτίου (a-Si) όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.2, όπου η θερμική απόδοση των συστημάτων με άμορφο πυρίτιο (a-Si) είναι μεγαλύτερη. Αντίθετα η ηλεκτρική απόδοση των ΦΒ συστημάτων με πολυκρυσταλλικό πυρίτιο είναι μεγαλύτερη από αυτή με άμορφο, όπως επιβεβαιώνεται και πειραματικά στο σχήμα 5.3. Η ηλεκτρική απόδοση για τα συστήματα με pc-Si μειώνεται με ρυθμό 0,45%/K, ενώ στα συστήματα με a-Si ο ρυθμός μείωσης είναι 0,25%/K.



Σχήμα 5.3 Ηλεκτρική απόδοση ΦΒ με άμορφο και πολυκρυσταλλικό πυρίτιο [16].

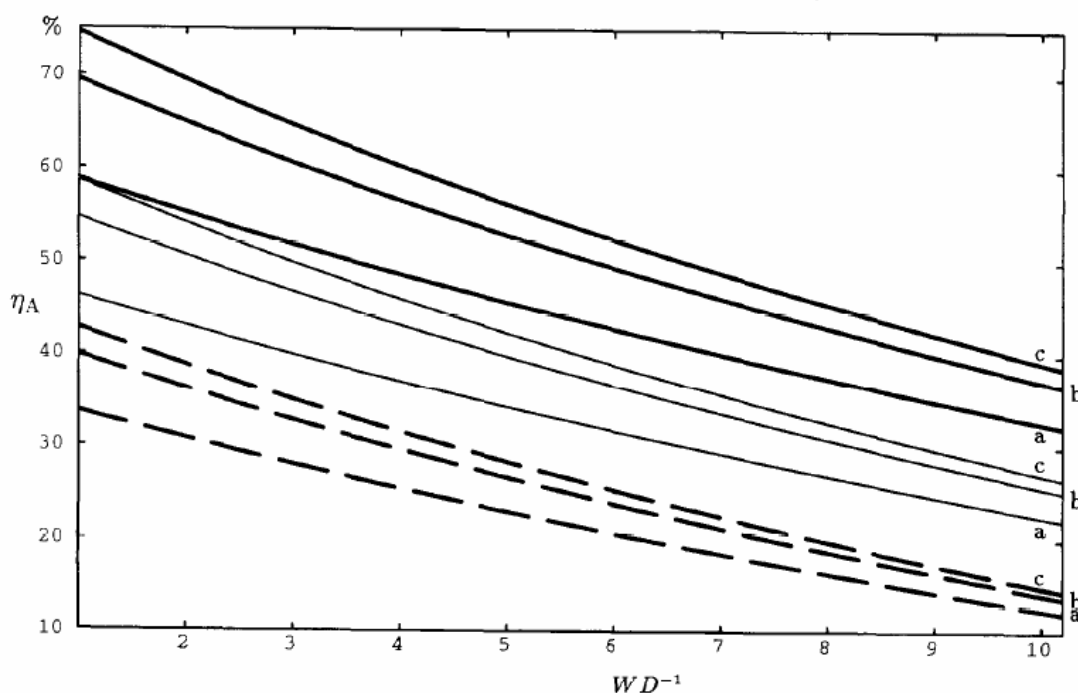
Οι αρνητικές τιμές στα διαγράμματα αυτά οφείλονται στο γεγονός ότι σε κάποιες μετρήσεις η θερμοκρασία του νερού ήταν χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Στον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης ΔT είναι μόνο η θερμοκρασία του πάνελ του ΦΒ.

5.3 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ

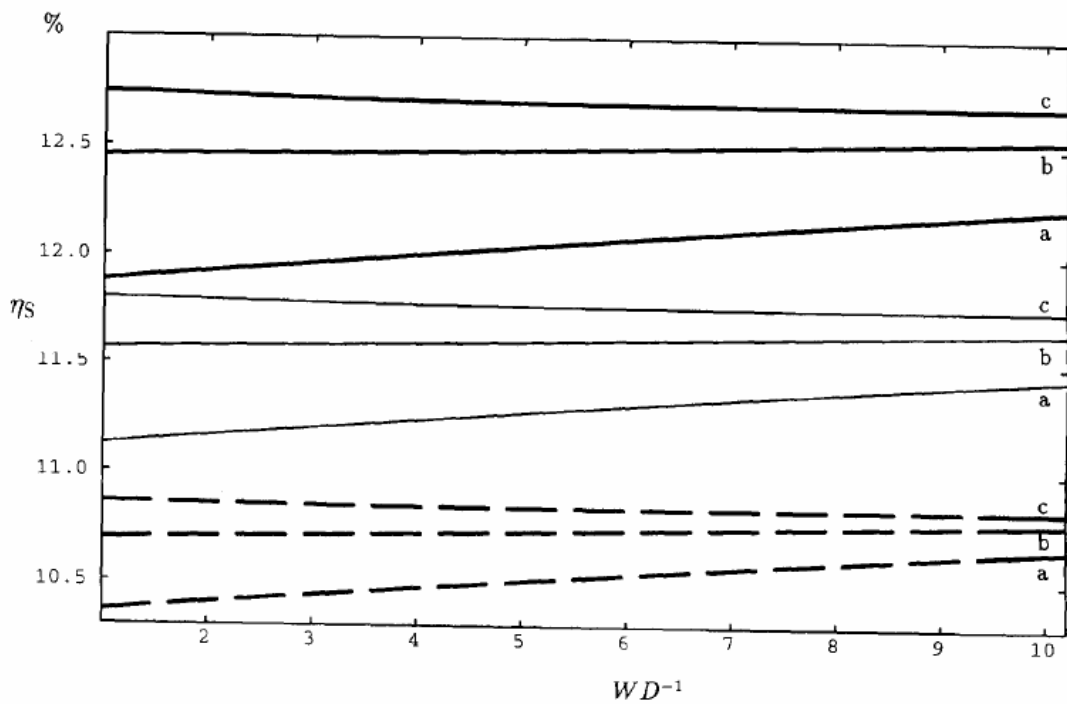
Η ψύξη του ΦΒ μπορεί να γίνει με φυσική ή εξαναγκασμένη κυκλοφορία ρευστού μέσω ανεμιστήρων ή αντλιών. Η μέχρι τώρα έρευνα που έχει γίνει πάνω στην επίδραση της ροής μάζας στην απόδοση του ΦΒ/Θ συλλέκτη, έδειξε ότι υπάρχει εξάρτηση.

Συγκεκριμένα ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται όταν αυξηθεί η ταχύτητα κυκλοφορίας του νερού, διότι αυξάνει ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, ο οποίος μεγιστοποιεί την ψύξη του ΦΒ/Θ αλλά και την μεταφορά θερμότητας στο νερό. Ωστόσο οι μέχρι τώρα έρευνες δεν έχουν καταλήξει σε μία γενική μέθοδο υπολογισμού της τιμής της βέλτιστης ροής μάζας.

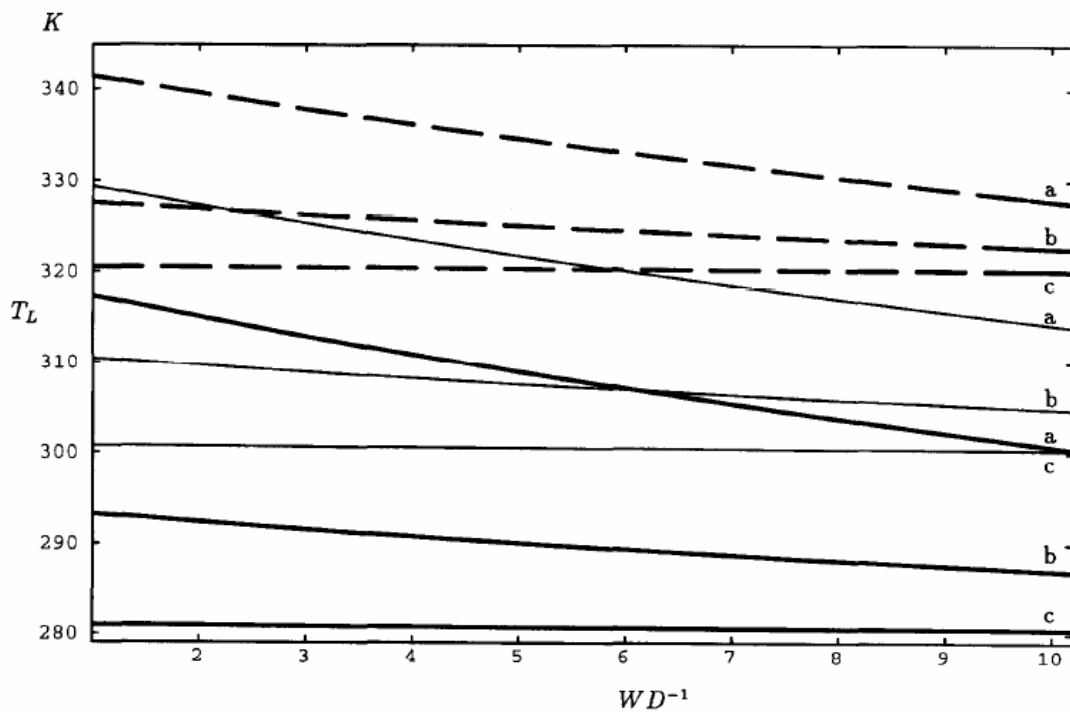
Σε παραμετρική μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Bergene και Lonvik [11], συναρτήσεως της ροής μάζας και του λόγου W/D , βρέθηκε ότι η θερμική απόδοση αυξάνεται μόνο κατά 0,1 όταν η ροή μάζας αυξηθεί από 0,001 σε 0,075 kg/s. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η θερμική (η_A) και ηλεκτρική απόδοση (η_s), συναρτήσεως του λόγου W/D με W σταθερό και το D να μεταβάλλεται από 0,01 μέχρι 0,1 με σταθερό βήμα κατά 0,01m.



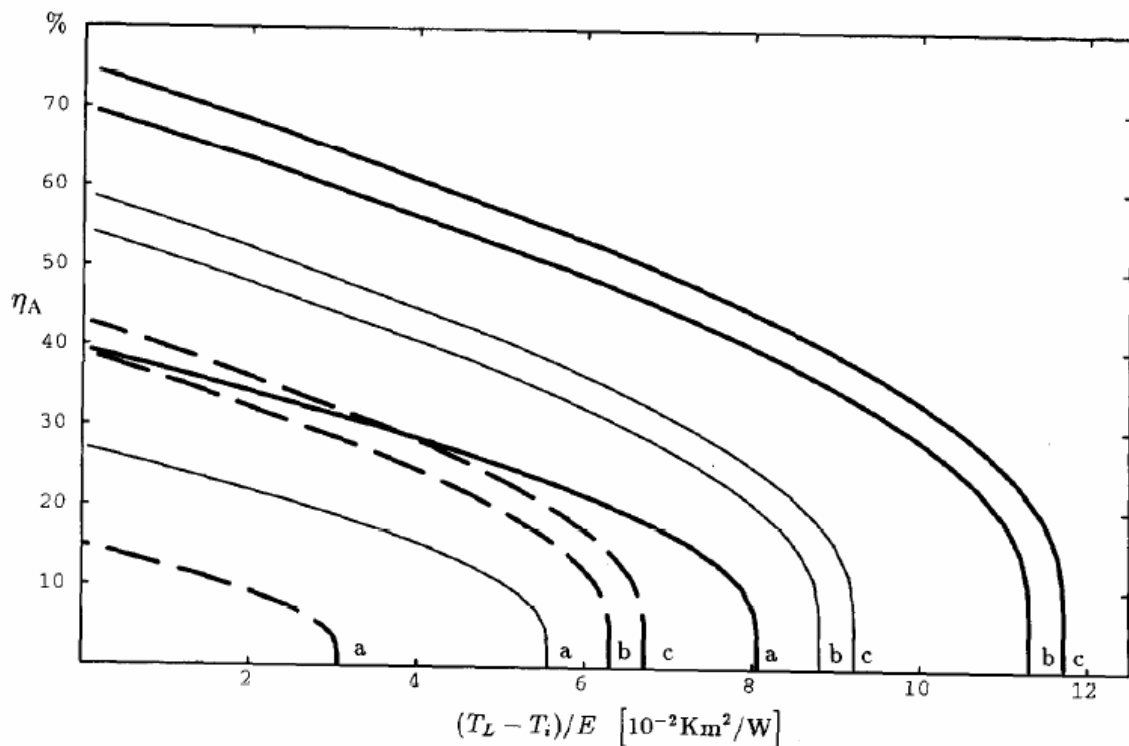
Σχήμα 5.4 Η θερμική απόδοση η_A συναρτήσεως του λόγου W/D [11].



Σχήμα 5.5 Η ηλεκτρική απόδοση η_s συναρτήσει του λόγου W/D [11].



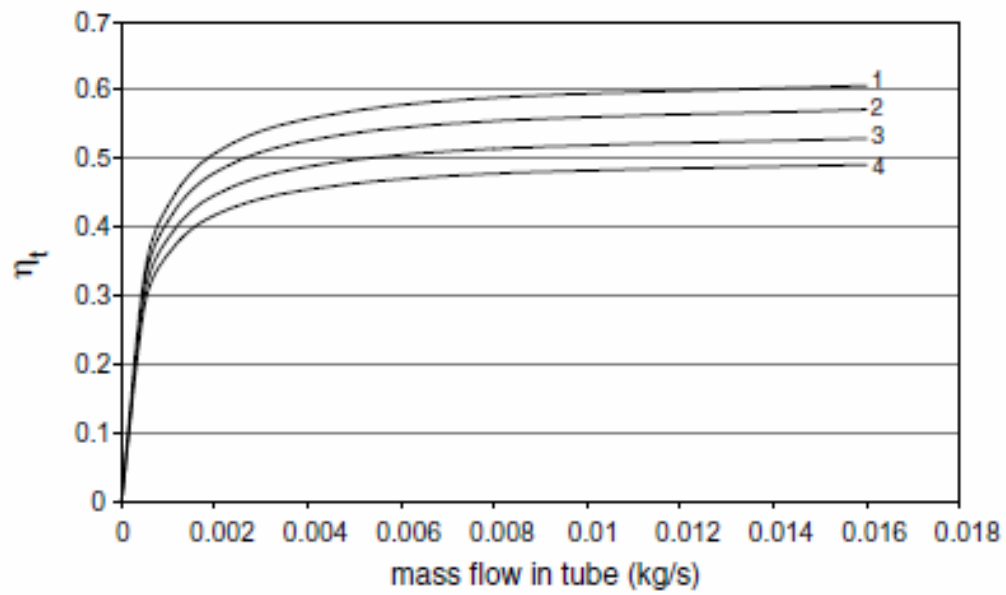
Σχήμα 5.6 Η θερμοκρασία εξόδου του νερού, T_L συναρτήσει του λόγου W/D [11].



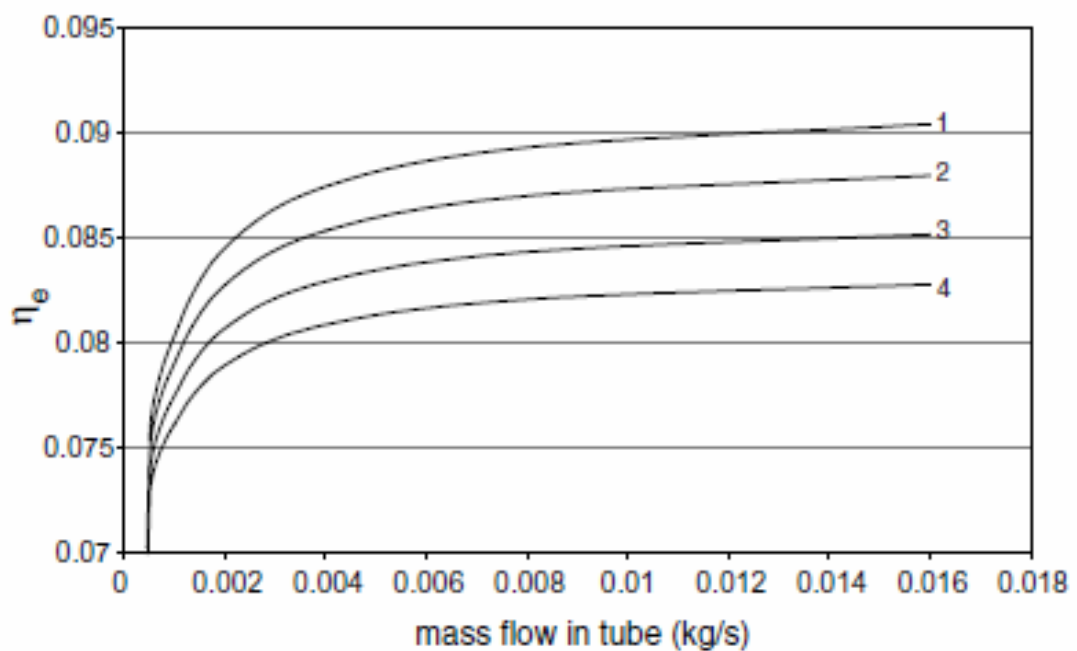
Σχήμα 5.7 Η θερμική απόδοση η_A συναρτήσει της ποσότητας $(T_L - T_i)/E$ [11].

Οι διακεκομμένες γραμμές των σχημάτων 5.4 έως και 5.7 αντιστοιχούν σε θερμοκρασία εισόδου του νερού 320 K, οι λεπτές γραμμές σε 300 K, και οι έντονες σε 280 K, επίσης τα γράμματα a, b και c αντιστοιχούν σε ροή μάζας 0.0003, 0.001 και 0.015 kg/s, αντίστοιχα. Όπως βλέπουμε η ροή μάζας επηρεάζει περισσότερο τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης από ότι τον θερμικό, επιπλέον για μικρές ροές μάζας η ηλεκτρική απόδοση αρχίζει να επηρεάζεται περισσότερο από τον λόγο W/D και συγκεκριμένα αυξάνεται με αύξηση του W/D ενώ όταν η ροή μάζας είναι μεγάλη (καμπύλες c) έχουμε μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης.

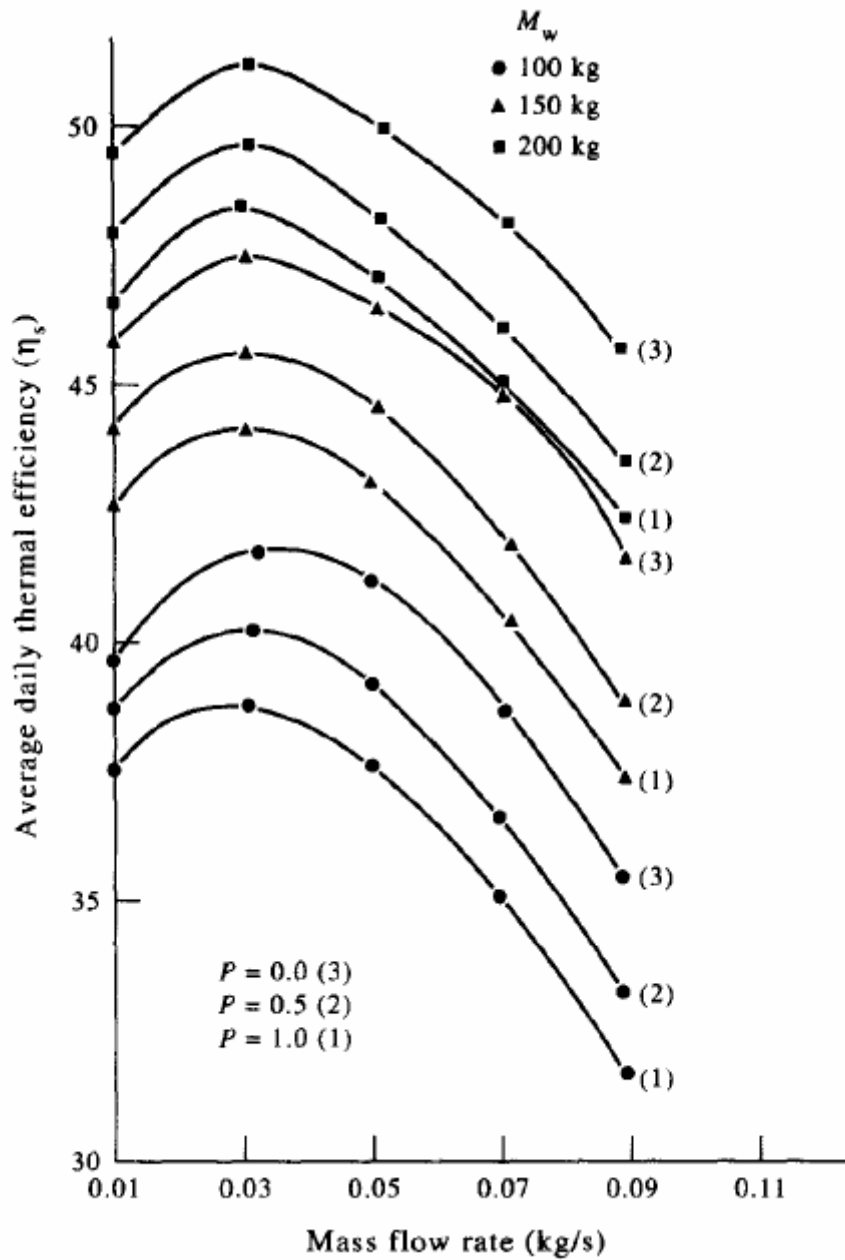
Σε έρευνες που έγιναν από τον Chow [12] σε επιφάνεια ΦΒ πάνελ 2m^2 , βρέθηκε ότι καθώς η ροή μάζας αυξάνεται από 0.002 σε 0.016 kg/s αυξάνεται η ηλεκτρική και η θερμική απόδοση. Αυτό επιβεβαιώνεται γραφικά στα σχήματα 5.8 και 5.9 για διάφορες θερμικές αγωγιμότητες μεταξύ της απορροφητικής πλάκας και των σωλήνων, όπου 1, 2, 3, και 4 είναι οι καμπύλες για θερμικές αγωγιμότητες 10000, 100, 45 και 25 W/mK αντίστοιχα.



Σχήμα 5.8 Θερμική απόδοση συναρτήσει της ροής μάζας [12].



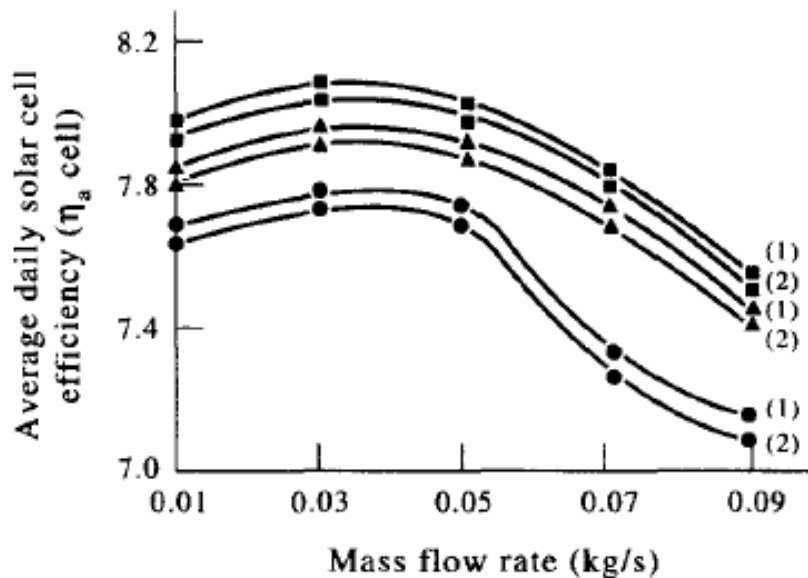
Σχήμα 5.9 Ηλεκτρική απόδοση συναρτήσει της ροής μάζας [12].



Σχήμα 5.10 Η επίδραση του ρυθμού ροής μάζας του νερού και του ποσοστού, P , του συλλέκτη που καλύπτεται από το ηλιακό στοιχείο στη μέση ημερήσια θερμική απόδοση για τρεις διαφορετικές τιμές συνολικής μάζας νερού [14].

Σε μοντέλα προσομοίωσης που δημιούργησαν οι Garg και Agarwal [14], για διάφορα μεγέθη επιφάνειας κελιών, υπολογίστηκε η επίδραση

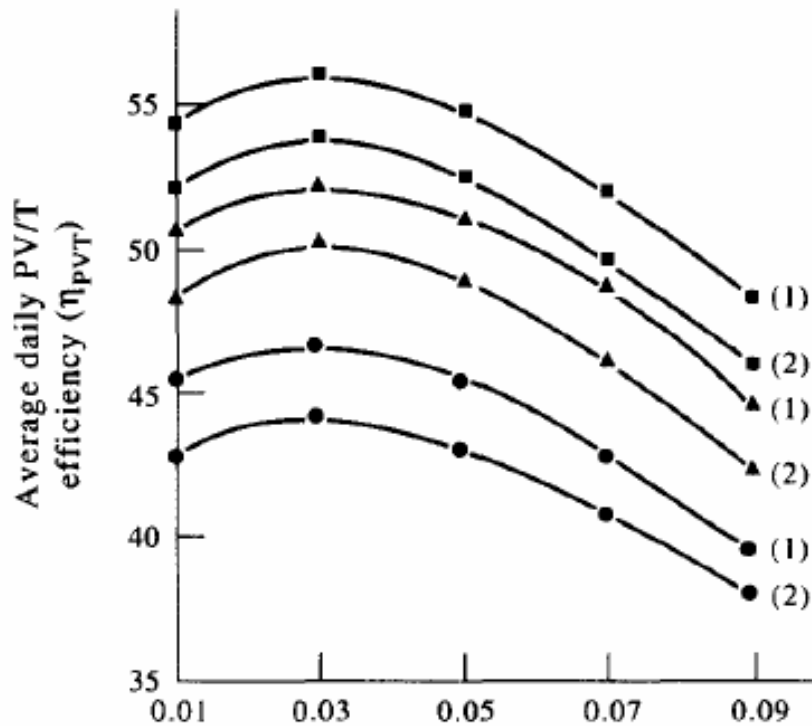
της ροής μάζας, σε σύστημα που περιλάμβανε ένα ΦΒ/Θ συλλέκτη, μια δεξαμενή αποθήκευσης νερού, μια αντλία και ένα διαφορικό ελεγκτή. Τα πειράματα εκτελέστηκαν σε επιφάνεια συλλέκτη 2m^2 και η βέλτιστη ροή μάζας για να έχουμε μέγιστη θερμική απόδοση βρέθηκε ότι πρέπει να είναι 0.03 kg/s .



Σχήμα 5.11 Η επίδραση του ρυθμού ροής μάζας του νερού και του ποσοστού, P , του συλλέκτη που καλύπτεται από το ηλιακό στοιχείο στη μέση ημερήσια ηλεκτρική απόδοση για τρεις διαφορετικές τιμές συνολικής μάζας νερού [14].

Αντίστοιχα με τη θερμική απόδοση, η ηλεκτρική και η συνολική απόδοση του συστήματος ακολουθούν μία παρόμοια συμπεριφορά. Να σημειωθεί επίσης ότι η ηλεκτρική και η συνολική απόδοση του συστήματος αυξάνονται με αύξηση της συνολικής μάζας νερού.

Τέλος οι Garg και Agarwal [14] υπολόγισαν την απαιτούμενη ισχύς της αντλίας για την κυκλοφορία του νερού. Η καταναλισκόμενη από την αντλία ισχύς γενικά είναι πολύ μικρή. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι για ροή μάζας $0,07\text{ Kg/s}$ η ισχύς της αντλίας είναι μόλις 176 mW .



Σχήμα 5.12 Η επίδραση του ρυθμού ροής μάζας του νερού και του ποσοστού, P, του συλλέκτη που καλύπτεται από το ηλιακό στοιχείο στη μέση ημερήσια συνολική απόδοση του ΦΒ/Θ συστήματος για τρεις διαφορετικές τιμές συνολικής μάζας νερού [14].

5.4 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Ο Chow και οι συνεργάτες του [13] μελέτησαν την επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου του νερού, T_{in} , στην απόδοση του ΦΒ/Θ συστήματος. Για τον υπολογισμό της απόδοσης στη μόνιμη κατάσταση πραγματοποίησαν υπολογιστικές προσομοιώσεις για τρεις διαφορετικές καταστάσεις:

- A. η επιφάνεια του απορροφητή καλύπτεται πλήρως από το φωτοβολταϊκό
- B. η επιφάνεια του απορροφητή καλύπτεται κατά 50% από το φωτοβολταϊκό
- C. η επιφάνεια του απορροφητή δεν καλύπτεται από φωτοβολταϊκό (δηλαδή θερμικός συλλέκτης).

Οι συνθήκες λειτουργίας που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς ήταν:

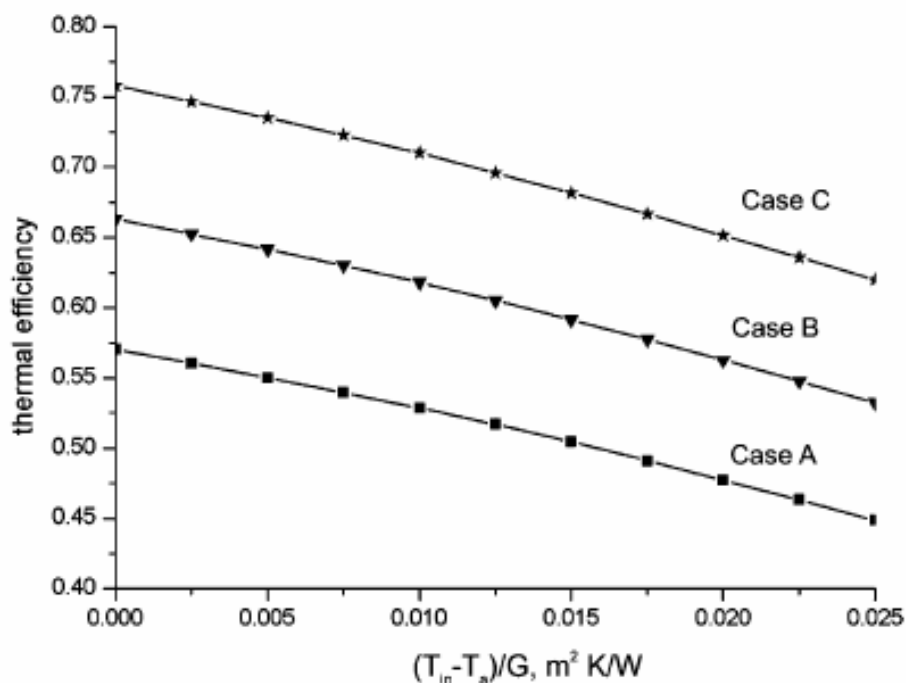
$$\text{Ηλιακή ακτινοβολία: } G = 800 \frac{W}{m^2}$$

Θερμοκρασία αέρα: $T_a = 20^\circ C$

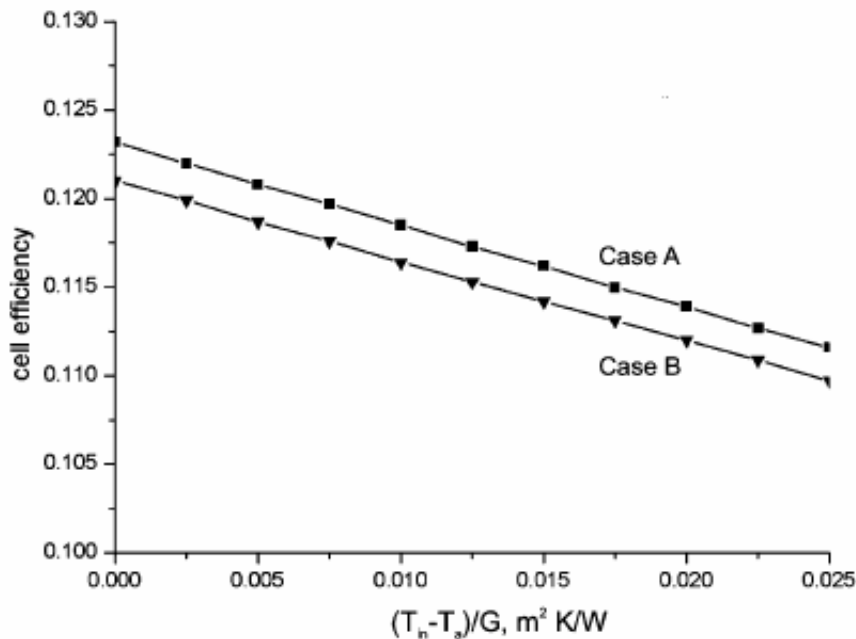
Παροχή μάζας νερού: $76 \frac{kg}{h}$ για κάθε τετραγωνικό μέτρο συλλέκτη.

Η ροή του νερού για όλες τις περιπτώσεις A, B, C θεωρήθηκε ότι ήταν στρωτή.

Στα σχήματα 5.13 και 5.14 που ακολουθούν φαίνεται η εξάρτηση της θερμικής και της ηλεκτρικής απόδοσης από την ανηγμένη θερμοκρασία εισόδου του νερού. Όπως βλέπουμε στα σχήματα αυτά τόσο η θερμική όσο και η ηλεκτρική απόδοση μειώνονται με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του νερού.



Σχήμα 5.13 Εξάρτηση της θερμικής απόδοσης του ΦΒ/Θ συστήματος από τη θερμοκρασία εισόδου του νερού [13].



Σχήμα 5.14 Εξάρτηση της ηλεκτρικής απόδοσης του ΦΒ/Θ συστήματος από τη θερμοκρασία εισόδου του νερού [13].

5.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΓΥΑΛΙΝΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα για τα εξής συστήματα:

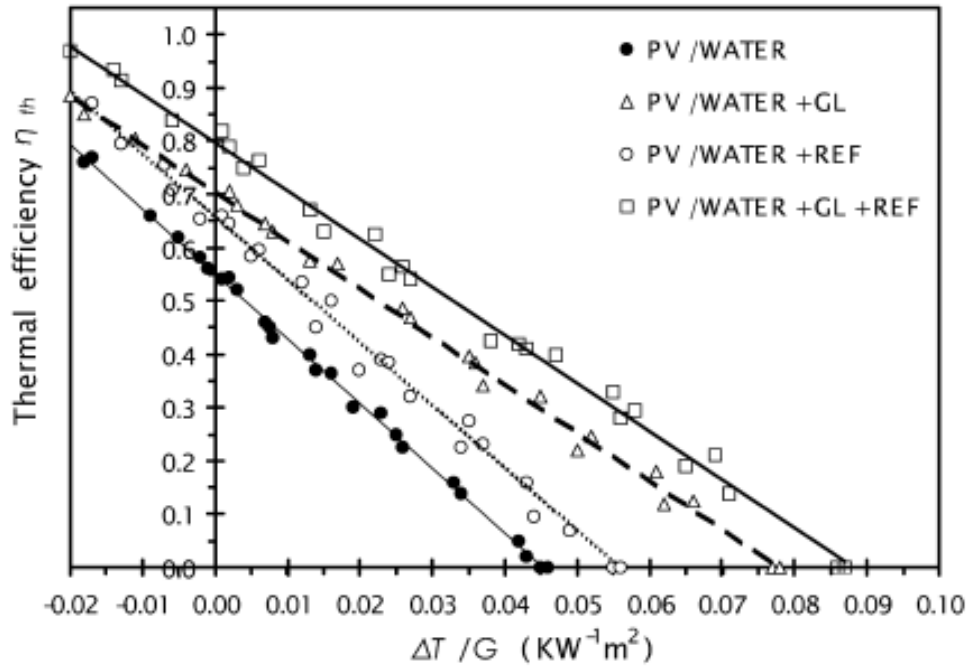
Καθαρή ψύξη με νερό (PV/WATER),

με τοποθέτηση μίας γυάλινης επιφάνειας (PV/WATER + GL),

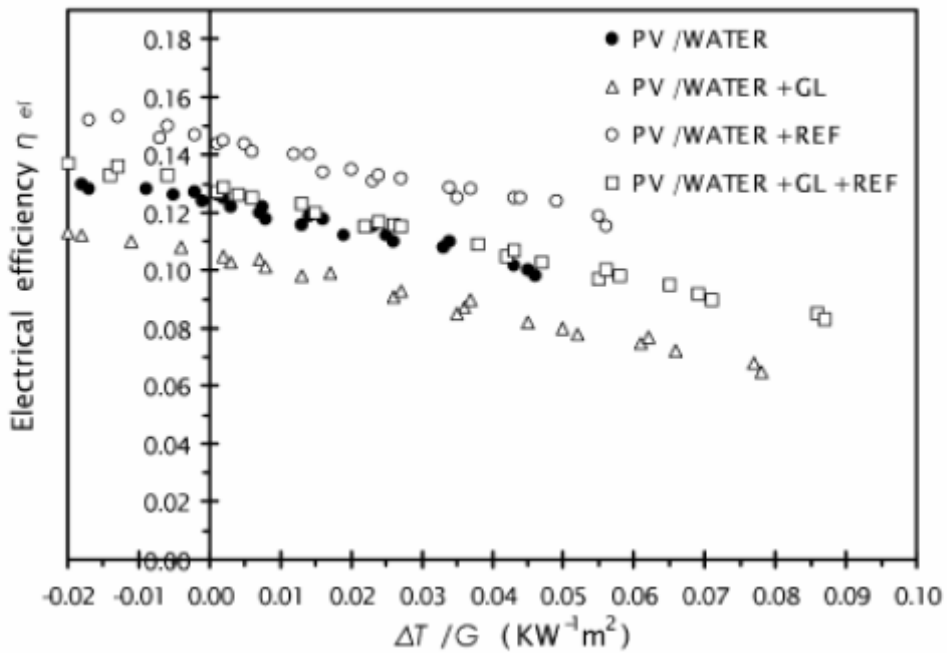
με διάχυτο ανακλαστήρα με $C_t = 1.35$, (PV/WATER + REF) και

με τοποθέτηση μίας γυάλινης επιφάνειας και με διάχυτο ανακλαστήρα με $C_t = 1.35$ (PV/WATER + GL + REF).

Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών φαίνονται στην εικόνα 5.15 για τον θερμικό βαθμό απόδοσης και στην εικόνα 5.16 για τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης, σαν συνάρτηση του λόγου $\Delta T/G$ όπου ΔT στον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης είναι μόνο η θερμοκρασία του πάνελ του ΦΒ. Οι αρνητικές τιμές για τον λόγο $\Delta T/G$ στο διάγραμμα της ηλεκτρικής απόδοσης προέκυψαν από μετρήσεις όπου η θερμοκρασία εισόδου του νερού ήταν χαμηλότερη από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 5.15 Θερμικός βαθμός απόδοσης σε ΦΒ/Θ συστήματα νερού [10].



Σχήμα 5.16 Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης σε ΦΒ/Θ συστήματα νερού [10].

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών του σχήματος 5.15 βλέπουμε ότι για $\Delta T/G = 0 \text{ K/Wm}^2$ η αύξηση της θερμικής απόδοσης με νερό είναι 29% για το σύστημα PV/WATER+GL και 20% για το PV/WATER+REF σε σχέση με την καθαρή ψύξη PV/WATER. Η αύξηση της θερμικής απόδοσης οφείλεται στην μείωση των θερμικών απωλειών που έχουμε με την προσθήκη της γυάλινης επιφάνειας, η οποία αυξάνει την θερμοκρασία του ΦΒ πλαισίου.

Για τη λειτουργία των συστημάτων με $\Delta T/G = 0 \text{ K/Wm}^2$ (χαμηλή θερμοκρασία εισόδου του νερού) παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασία του ΦΒ πλαισίου ήταν 10-20°C υψηλότερη από την θερμοκρασία εισόδου του νερού, με συνέπεια καλύτερη μεταφορά θερμότητας.

Όσον αφορά τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης βλέπουμε ότι με την γυάλινη επιφάνεια μειώνεται περίπου 16% σε σχέση με την καθαρή ψύξη με νερό (PV/WATER). Από την άλλη με χρήση των διάχυτων ανακλαστήρων (PV/WATER + REF) βλέπουμε ότι αυξάνεται ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης περίπου 16% σε σχέση με το σύστημα PV/WATER. Τέλος το σύστημα PV/WATER + GL + REF παρουσιάζει μια σημαντική αύξηση της θερμικής παραγωγής κατά περίπου 45% ενώ η αύξηση της ηλεκτρικής παραγωγής είναι ελαφρώς υψηλότερη από αυτή του βασικού συστήματος PV/WATER. Τα αποτελέσματα οφείλονται στην αρνητική επίδραση της γυάλινης επιφάνειας λόγω των μεγάλων οπτικών απωλειών που εισάγουν, οι οποίες αντισταθμίζονται με την προσθήκη του συμπληρωματικού διάχυτου ανακλαστήρα ο οποίος αυξάνει την συνολική απορροφούμενη ακτινοβολία.

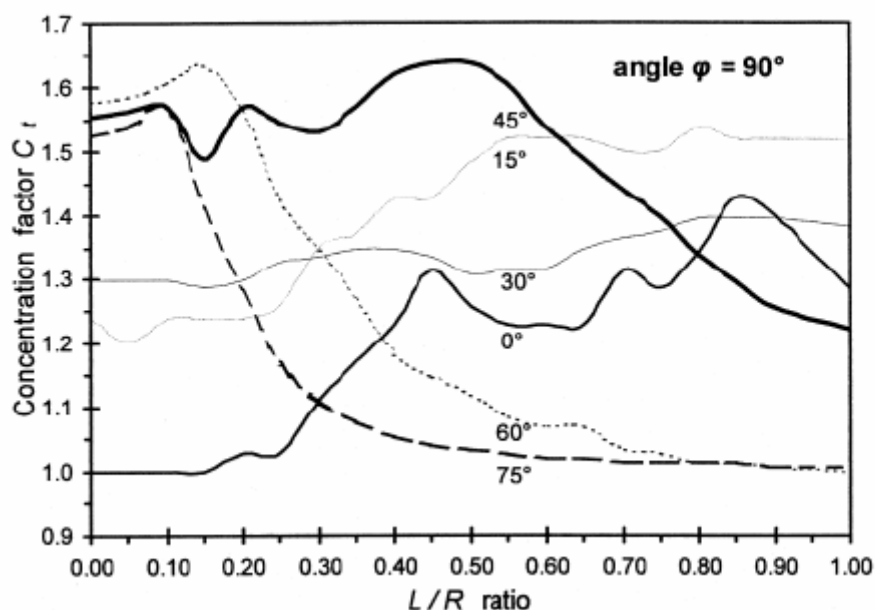
5.6 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΛΟΓΟ W/D

Από έρευνες που πραγματοποίησαν οι Bergene και Lonvik, για την επίδραση του λόγου W/D (W η απόσταση μεταξύ δύο σωλήνων και D η διάμετρος του σωλήνα) κατέληξαν στα παρακάτω συμπεράσματα.

Η θερμική απόδοση υποδιπλασιάζεται και παράλληλα μειώνεται η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού εργασίας, όταν η διάμετρος των σωλήνων (D) γίνει 10 φορές μικρότερη της απόστασης μεταξύ δύο σωλήνων (W) για σταθερό W. Στην περίπτωση που κρατήσουμε σταθερό το D και αυξήσουμε το W δεν αναμένεται μείωση της θερμικής απόδοσης. Η συνολική απόδοση επηρεάζεται από το μήκος του ελάσματος, όχι όμως και η ηλεκτρική.

5.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η διανομή της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας από το διάχυτο ανακλαστήρα στην επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου εξαρτάται από το απόσταση του ήλιου από την επιφάνεια της θάλασσας, τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στον διάχυτο ανακλαστήρα (θ), από την καθαρότητα του ουρανού (επίπεδο διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας), από τη γωνία μεταξύ του ανακλαστήρα και του ΦΒ πλαισίου (φ), από την κλίση του ΦΒ πάνελ και από τις οπτικές ιδιότητες του υλικού του ανακλαστήρα. Ο συντελεστής συγκέντρωσης C_t σαν συνάρτηση του λόγου L/R , όπου L το πλάτος του ΦΒ και R το πλάτος του διάχυτου ανακλαστήρα για διαφορές γωνίες θ και $\varphi = 90^\circ$ φαίνεται στο σχήμα 5.17.

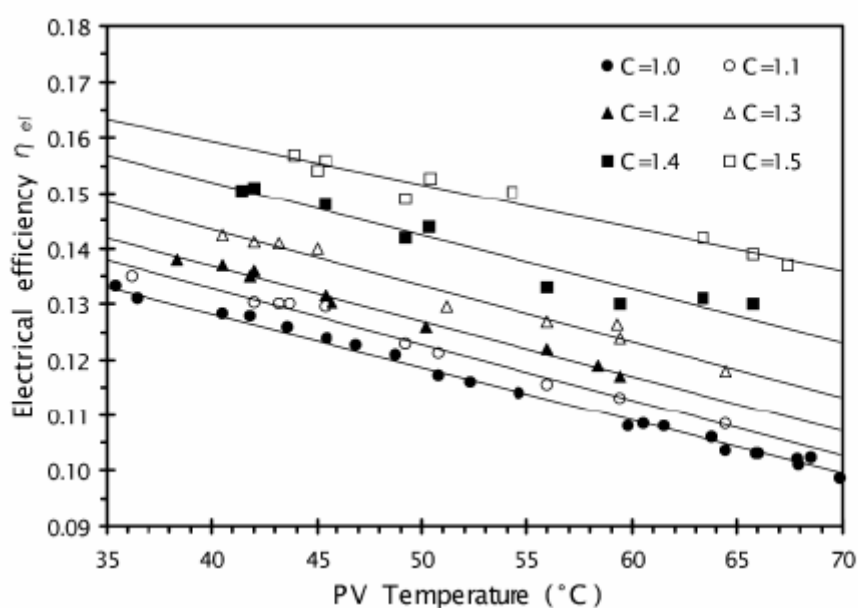


Σχήμα 5.17 Συντελεστής συγκέντρωσης σαν συνάρτηση του λόγου L/R για διάφορες γωνίες θ [10].

Στην περίπτωση που η γωνία πρόσπτωσης θ , της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 90° , δεν υπάρχει καμία επίδραση του συμπληρωματικού ανακλαστήρα. Για γωνίες $15^\circ < \theta < 45^\circ$ έχουμε ομοιόμορφη διανομή της ηλιακής ακτινοβολίας με μέση τιμή του συντελεστή αναλογίας $C_t \sim 1.4$. Ο βέλτιστος λόγος L/R βρίσκεται στο

διάστημα $0,5 < L/R < 0,8$. Τέλος όσο αφορά την γωνία φ ανάμεσα στο ΦΒ πάνελ, και στον διάχυτο ανακλαστήρα αυτή βρέθηκε ότι πρέπει να είναι ανάμεσα στις 90° με 120° .

Για γωνίες φ μεγαλύτερες από 120° δεν έχουμε βελτίωση της συνολικής απορροφούμενης ακτινοβολίας από τον ΦΒ πάνελ. Στην εικόνα 5.18 φαίνεται η επίδραση του διάχυτου ανακλαστήρα στον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης σαν συνάρτηση στις θερμοκρασίας του ΦΒ πάνελ, για διάφορες τιμές του συντελεστή συγκέντρωσης.



Σχήμα 5.18 Ηλεκτρική απόδοση συναρτήσει της θερμοκρασίας, για διάφορες τιμές του συντελεστή συγκέντρωσης [10].

5.8 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται χρήσιμοι τύποι για τον υπολογισμό του θερμικού και του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης που προέκυψαν από πειραματικές δοκιμές των ΦΒ/Θ συσκευών σε εξωτερικές φυσικές συνθήκες. Η παρουσίαση στους παρακάτω πίνακες γίνεται ανά τύπο ημιαγωγού (άμορφου και πολυκρυσταλλικού πυριτίου) για τέσσερις διαφορετικές διατάξεις.

Η θερμική απόδοση των πειραματικών ΦΒ/Θ συστημάτων δίνεται σαν συνάρτηση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, G , την

θερμοκρασία του εισερχόμενου ρευστού, T_i και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, T_a .

Η ηλεκτρική απόδοση των ΦΒ/Θ μοντέλων δίνεται σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας λειτουργίας, T_{PV} .

$(Pc - Si)$	
ΦΒ/Θ χωρίς κάλυμμα	$n_{el} = 0,1659 - 0,00094 \cdot (T_{PV})_{eff}$
	$n_{th} = 0,55 - 11,99 \cdot \left(\frac{\Delta T}{G}\right)$
ΦΒ/Θ με κάλυμμα	$n_{el} = 0,1457 - 0,00094 \cdot (T_{PV})_{eff}$
	$n_{th} = 0,71 - 9,04 \cdot \left(\frac{\Delta T}{G}\right)$
ΦΒ/Θ με κάλυμμα και διάχυτο ανακλαστήρα	$n_{el} = 0,1560 - 0,00096 \cdot (T_{PV})_{eff}$
	$n_{th} = 0,78 - 9,67 \cdot \left(\frac{\Delta T}{G}\right)$
ΦΒ/Θ χωρίς κάλυμμα με διάχυτο ανακλαστήρα	$n_{el} = 0,1773 - 0,00098 \cdot (T_{PV})_{eff}$
	$n_{th} = 0,61 - 11,74 \cdot \left(\frac{\Delta T}{G}\right)$

Πίνακας 5.1 Πειραματικές σχέσεις για το θερμικό και τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης για ΦΒ/Θ συστήματα πολυκρυσταλλικού πυριτίου [1].

Για στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου η θερμοκρασία λειτουργίας δίνεται από τη σχέση:

$$T_{PV} = 30,0006 + 0,0175 \cdot (G - 300) + 1,14 \cdot (T_a - 25) \quad (5.3)$$

Για τα στοιχεία άμορφου πυριτίου η χαμηλότερη ηλεκτρική τους απόδοση έχει σαν αποτέλεσμα την ελαφρώς υψηλότερη θερμοκρασία του ΦΒ. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η σχέση:

$$T_{PV} = 30,0006 + 0,0175 \cdot (G - 150) + 1,14 \cdot (T_a - 25) \quad (5.4)$$

(a-Si)	
ΦΒ/Θ χωρίς κάλυμμα	$n_{el} = 0,0601 - 0,00011 \cdot (T_{PV})_{eff}$
	$n_{th} = 0,60 - 12,02 \cdot \left(\frac{\Delta T}{G}\right)$
ΦΒ/Θ με κάλυμμα	$n_{el} = 0,0485 - 0,00011 \cdot (T_{PV})_{eff}$
	$n_{th} = 0,73 - 8,24 \cdot \left(\frac{\Delta T}{G}\right)$
ΦΒ/Θ με κάλυμμα και διάχυτο ανακλαστήρα	$n_{el} = 0,0565 - 0,00015 \cdot (T_{PV})_{eff}$
	$n_{th} = 0,82 - 8,41 \cdot \left(\frac{\Delta T}{G}\right)$
ΦΒ/Θ χωρίς κάλυμμα με διάχυτο ανακλαστήρα	$n_{el} = 0,0698 - 0,00014 \cdot (T_{PV})_{eff}$
	$n_{th} = 0,68 - 11,98 \cdot \left(\frac{\Delta T}{G}\right)$

Πίνακας 5.2 Πειραματικές σχέσεις για το θερμικό και τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης για ΦΒ/Θ συστήματα άμορφου πυριτίου [1].

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται διάχυτοι ανακλαστήρες χρησιμοποιείται η σχέση:

$$T_{PV} = 30,0006 + 0,0175 \cdot (G \cdot CR - 150) + 1,14 \cdot (T_a - 25) \quad (5.5)$$

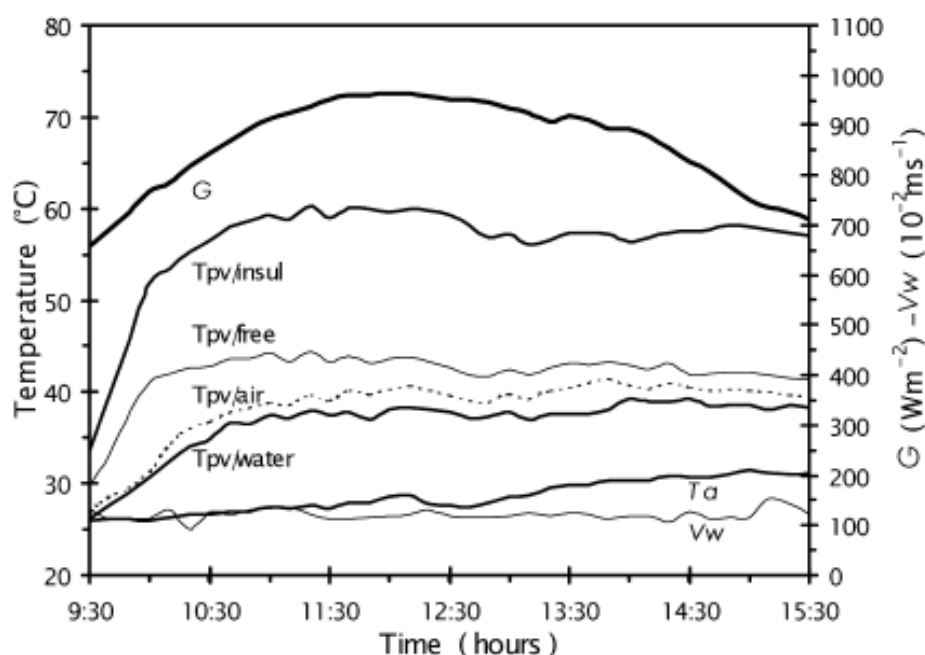
όπου CR είναι ο λόγος συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στην περίπτωση των ΦΒ/Θ συστημάτων η θερμοκρασία των ΦΒ εξαρτάται και από τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Στα ΦΒ/Θ συστήματα, η ηλεκτρική απόδοση είναι συνάρτηση της $(T_{PV})_{eff}$, η οποία συνδέει τη θερμοκρασία του ΦΒ με τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$(T_{PV})_{eff} = T_{PV} + (T_{PV/T} - T_a) \quad (5.6)$$

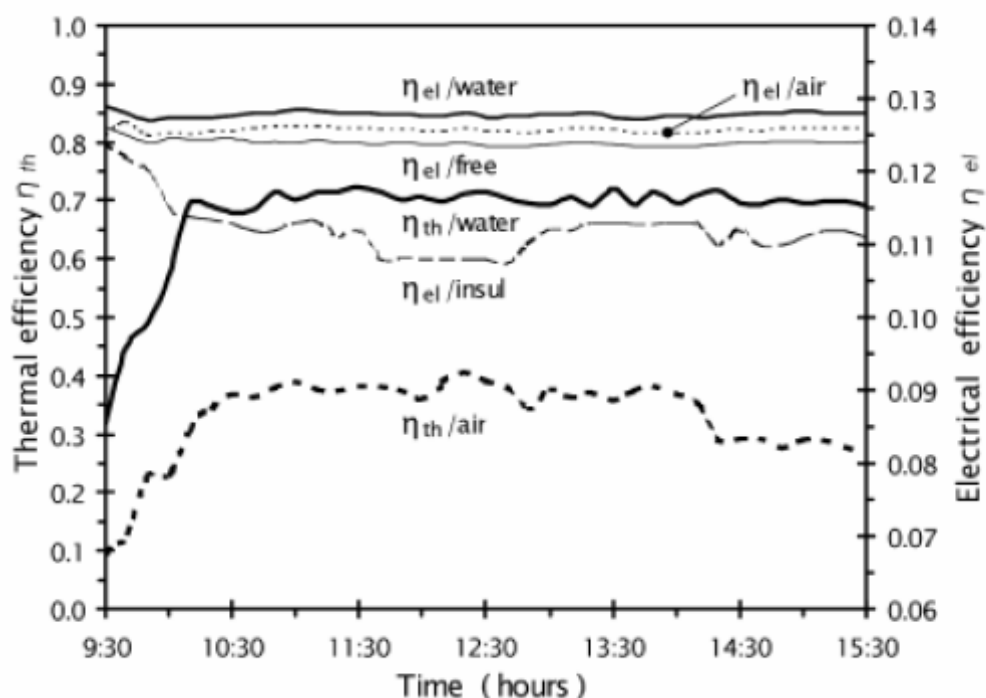
5.9 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΦΒ/Θ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΦΒ

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων τεσσάρων διαφορετικών ΦΒ/Θ συστημάτων. Η εξαγωγή θερμότητας με νερό ή με αέρα μειώνει τη θερμοκρασία του ΦΒ και αυξάνει την ηλεκτρική απόδοσή του, γι' αυτό και μετράται και συγκρίνεται με τις θερμοκρασίες των συστημάτων PV/FREE και PV/INSUL, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.19.



Σχήμα 5.19 Καταγραφή της θερμοκρασίας των ΦΒ πάνελ και της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάστημα 6 ωρών [10].

Οι δοκιμές έγιναν σε ΦΒ με πολυκρυσταλλικό πυρίτιο και κάτω από τις ίδιες κλιματολογικές συνθήκες. Στο σχήμα 5.20 φαίνεται η ηλεκτρική και η θερμική απόδοση των συστημάτων αυτών συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 5.20 Καταγραφή της θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσης σε διάστημα 6 ωρών [10].

Από τα αποτελέσματα του σχήματος 5.19 παρατηρούμε ότι η απαγωγή θερμότητας με νερό οδηγεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία το ΦΒ ($T_{pv}/water$ - $38^{\circ}C$) από ότι με απαγωγή θερμότητας με αέρα (T_{pv}/AIR - $41^{\circ}C$), επειδή κατά τη διάρκεια των δοκιμών η θερμοκρασία του νερού από τους κεντρικούς αγωγούς ήταν χαμηλότερη (T_S - $20^{\circ}C$) από αυτή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος (T_A - $29^{\circ}C$). Αυτό έχει επιπτώσεις στη θερμική και ηλεκτρική απόδοση. Φυσικά όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος τόσο μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα έχει η ψύξη με νερό έναντι της ψύξης με αέρα.

Συγκρίνοντας την θερμοκρασία του ΦΒ πλαισίου (Trpv), αυτών των τεσσάρων συστημάτων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ψύξη με νερό ή αέρα για την απαγωγή θερμότητας δεν μειώνει σημαντικά τη θερμοκρασία σε σχέση με το ΦΒ χωρίς ψύξη.

Επιπλέον, το σύστημα PV/FREE έχει χαμηλότερη θερμοκρασία έναντι του ΦΒ με μόνωση (PV/INSUL), λόγω των χαμηλότερων θερμικών απωλειών από την πίσω επιφάνειά του. Σε σχέση με τα συστήματα PV/WATER, PV/AIR και PV/FREE ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του PV/INSUL είναι μειωμένος κατά 13.3%, 11.% και 9.7%, αντίστοιχα. Επιπλέον, οι ηλεκτρικές αποδόσεις των συστημάτων PV/WATER και PV/AIR είναι ελαφρώς υψηλότερες από αυτή του απλού συστήματος PV/FREE κατά 3.2% και 1.6%, αντίστοιχα.

Όσον αφορά το κόστος των υβριδικών ΦΒ/Θ συστημάτων, υπολογίζεται ότι είναι κατά 8-10% μεγαλύτερο από ένα συμβατικό πολυκρυσταλλικό ΦΒ πυριτίου όταν χρησιμοποιείται νερό σαν μέσο απαγωγής της θερμότητας και 5% με 8% όταν χρησιμοποιείται αέρας με φυσική κυκλοφορία και αέρας με εξαναγκασμένη κυκλοφορία, αντίστοιχα. Τα αντίστοιχα κόστη των μονάδων ψύξης για ΦΒ συστήματα με άμορφο πυρίτιο είναι περίπου διπλάσια.

5.10 ΤΡΟΠΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΦΒ/Θ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

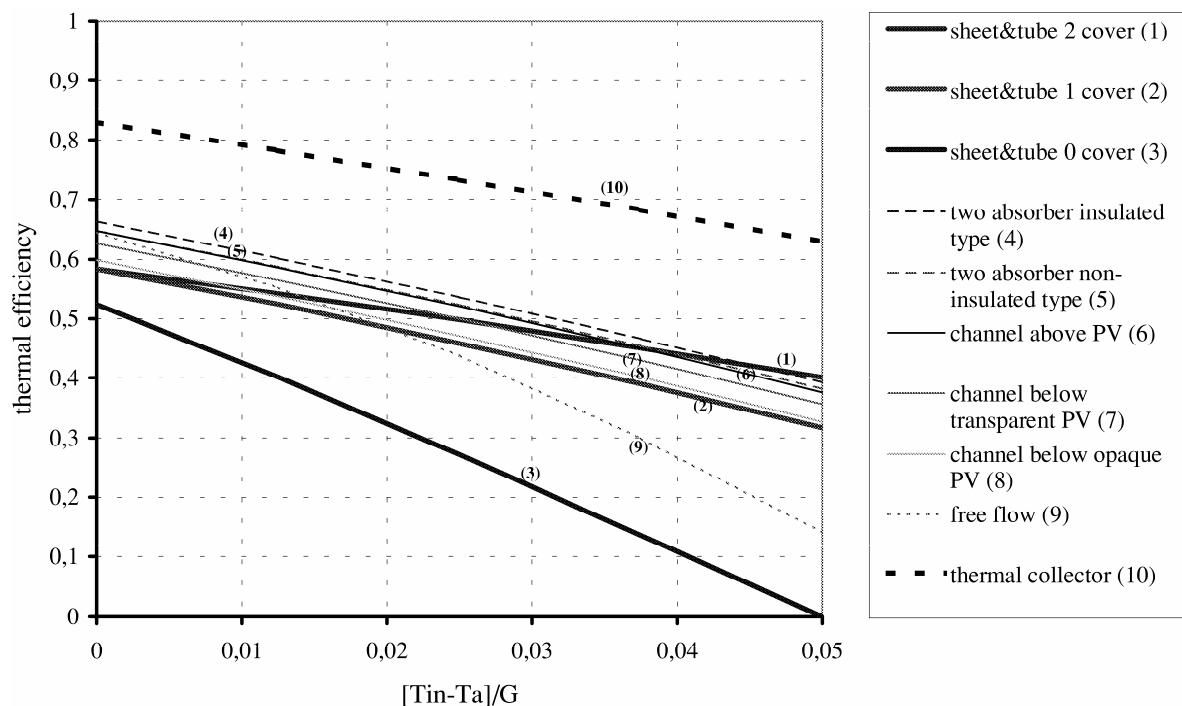
Στην ενότητα αυτή έχουμε συγκεντρώσει όλες τις παρεμβάσεις που μπορεί να γίνουν σε ένα ΦΒ/Θ σύστημα με σκοπό την αύξηση της απόδοσής του.

Υψηλή θερμική απόδοση μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη ενός λεπτού στρώματος μικρού συντελεστή εκπομπής, μπροστά από τα φωτοβολταϊκά κύτταρα με σκοπό να λειτουργούν και σαν επιλεκτικοί απορροφητές. Η ηλεκτρική απόδοση σε αυτή την περίπτωση δεν επηρεάζεται σημαντικά.

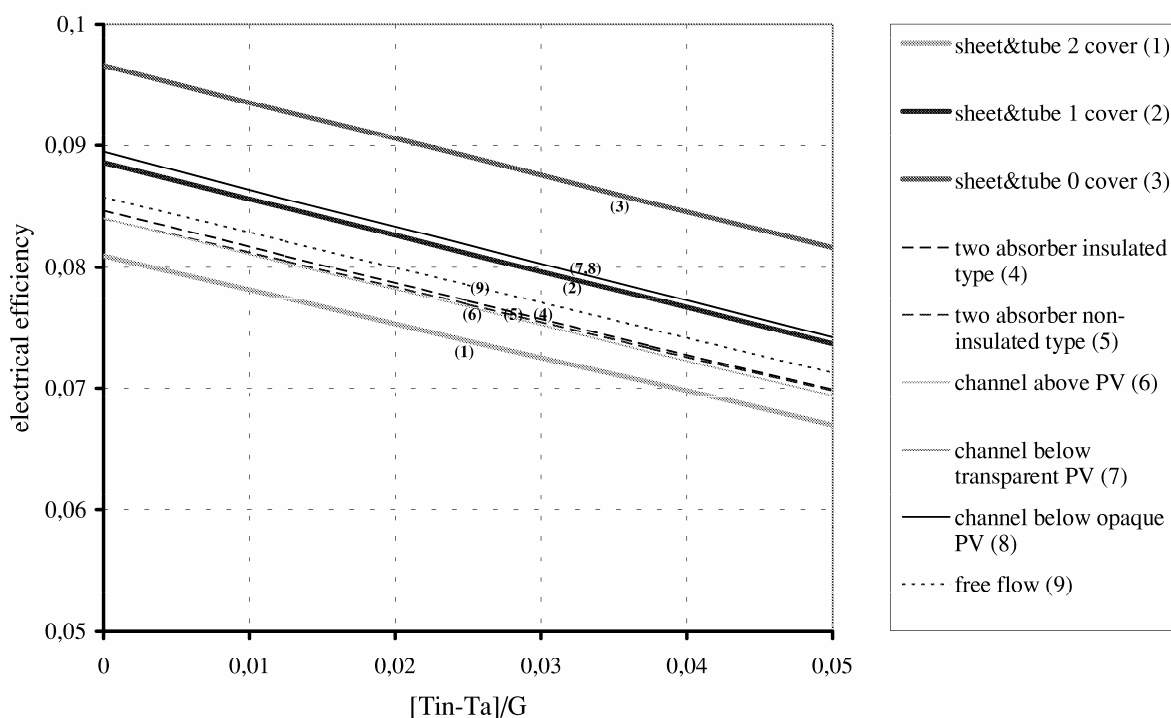
Επιπλέον, η προσθήκη γυάλινου καλύμματος λίγο πιο πάνω από τα φωτοβολταϊκά έχει ως αποτέλεσμα υψηλή θερμική απόδοση λόγω της μείωσης των απωλειών θερμότητας από την πάνω πλευρά. Ωστόσο, παρατηρείται χαμηλότερη ηλεκτρική απόδοση εξαιτίας της μείωσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας λόγω των οπτικών απωλειών από την παρουσία του γυαλιού.

Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει το γυάλινο κάλυμμα να έχει χαμηλό συντελεστή εκπομπής με σκοπό την αύξηση της θερμικής απόδοσης, καθώς και χαμηλό περιεκτικότητα σε σίδηρο, με σκοπό τη μείωση των οπτικών απωλειών ώστε η ηλεκτρική απόδοση να μη μειωθεί σημαντικά.

Προκειμένου να αυξηθεί ακόμα περισσότερο η θερμική απόδοση μπορεί να γίνει και προσθήκη δύο γυάλινων καλυμμάτων μπροστά από το φωτοβολταϊκό. Ωστόσο, η ηλεκτρική απόδοση μειώνεται αισθητά λόγω της μείωσης της διαπερατότητας εξαιτίας της μεγαλύτερης απορρόφησης και των ανακλάσεων και από τα δύο γυάλινα καλύμματα. Στα παρακάτω διαγράμματα δίνονται οι θερμικές και ηλεκτρικές αποδόσεις ΦΒ/Θ συστήματος ακάλυπτου και με ένα ή δύο γυάλινα καλύμματα.



Σχήμα 5.21 Θερμική απόδοση ΦΒ/Θ συστημάτων διαφόρων διαμορφώσεων [15].



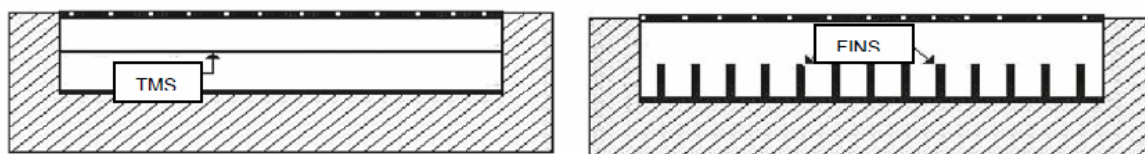
Σχήμα 5.22 Ηλεκτρική απόδοση ΦΒ/Θ συστημάτων διαφόρων διαμορφώσεων [15].

Είναι προφανές ότι η καλύτερη ηλεκτρική απόδοση επιτυγχάνεται με τον ακάλυπτο ΦΒ/Θ συλλέκτη, ενώ η θερμική απόδοση είναι πολύ χαμηλή λόγω του υψηλού ποσοστού θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

Τόσο η ηλεκτρική όσο και η θερμική απόδοση των ΦΒ/Θ συλλεκτών αέρα ή νερού μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη διάχυτων ανακλαστήρων μπροστά από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Η εγκατάσταση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί στις οριζόντιες στέγες, όπου τα φωτοβολταϊκά πάνελ τοποθετούνται σε παράλληλες σειρές και σε μια ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους. Η τοποθέτησή των διάχυτων ανακλαστήρων γίνεται στο χώρο μεταξύ των φωτοβολταϊκών, με τέτοιο τρόπο ώστε να ανακλούν επιπλέον ακτινοβολία πάνω στα φωτοβολταϊκά. Έτσι η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται (περίπου 4%-20% σε σχέση με τα απλά φωτοβολταϊκά χωρίς προσθήκη ανακλαστήρων), ενώ η επιπλέον αύξηση του κόστους για τους διάχυτους ανακλαστήρες είναι μικρή (περίπου 5%).

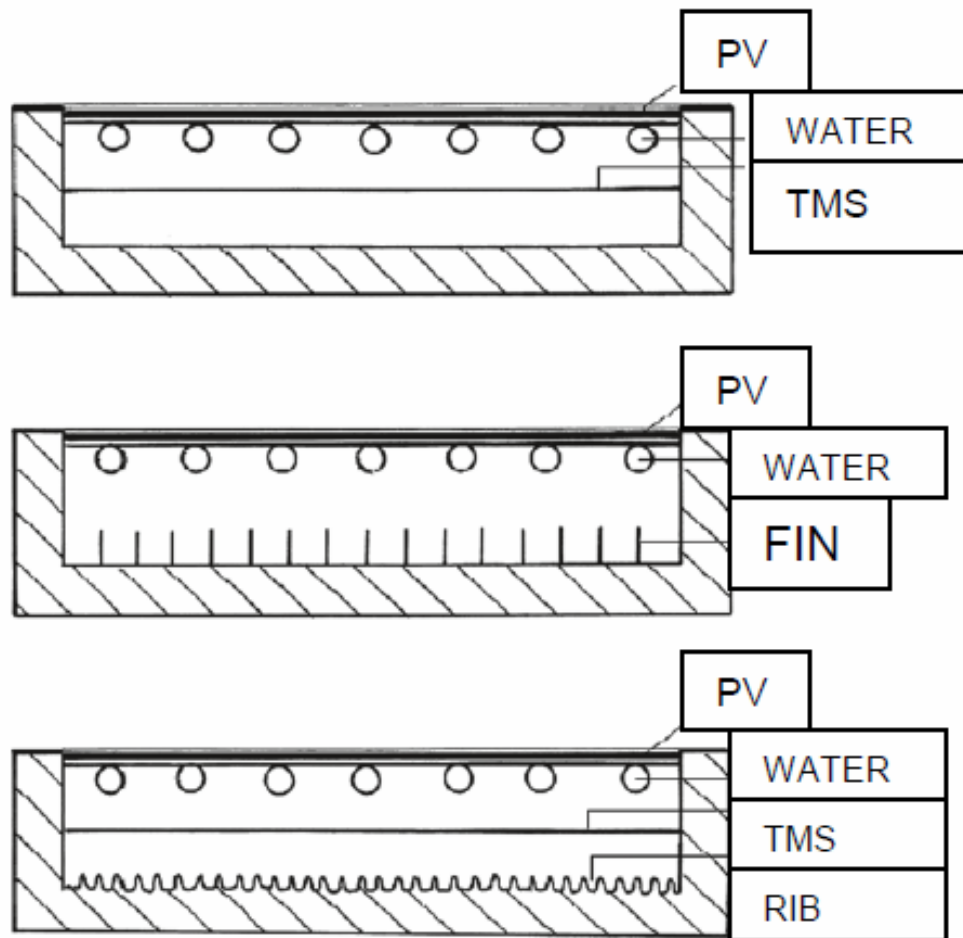
Η χρήση διάχυτων ανακλαστήρων γίνεται γιατί έτσι μπορεί να επιτευχθεί αρκετά ομοιόμορφη κατανομή της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού, ενώ η χρήση κατοπτρικών ανακλαστήρων συντελεί σε ανομοιόμορφη κατανομή και διαφοροποιήσεις στο φωτισμό της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αρνητικά η ηλεκτρική απόδοσή του.

Η απαγωγή θερμότητας σε ένα υβριδικό ΦΒ/Θ σύστημα αέρα μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας μεγαλύτερη επιφάνεια εναλλαγής της ροής στον αεραγωγό, ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μετάδοση θερμότητας με μεταφορά στον αέρα που κυκλοφορεί. Τέτοια βελτίωση συνεπώς μπορεί να γίνει με προσθήκη μεταλλικού φύλλου στη μέση του αεραγωγού (TMS) στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού καθώς και με προσθήκη πτερυγίων στην απέναντι πλευρά του αεραγωγού (FINS). Οι προσθήκες αυτές βελτιώνουν την απόδοση με χαμηλό επιπλέον κόστος στην όλη διάταξη. Μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν σε εγκαταστάσεις ενσωμάτωσης σε κτίρια.



Σχήμα 5.23 Βελτιώσεις απαγωγής θερμότητας με μεταλλικό φύλλο TMS και πτερύγια (FINS) [9].

Ο ΦΒ/Θ συλλέκτης με συνδυασμό απαγωγής θερμότητας με νερό και αέρα (PVT/DUAL), που έχει ήδη αναφερθεί, μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με τους τρόπους που αναφέρθηκαν στην περίπτωση του απλού ΦΒ/Θ συλλέκτη αέρα, δηλαδή με την προσθήκη μεταλλικού φύλλου στη μέση του αεραγωγού (TMS) ή πτερυγίων στο πίσω μέρος του αεραγωγού (FINS). Μια τρίτη βελτίωση, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 5.24, αποτελεί η προσθήκη του μεταλλικού φύλλου (TMS) συνδυασμένο με τραχιά επιφάνεια του πίσω τοίχου του αεραγωγού, δηλαδή δημιουργία ραβδώσεων RIBS στον τοίχο, (PVT/DUAL -TMS/RIB).



Σχήμα 5.24 Βελτιώσεις απαγωγής θερμότητας του συστήματος με συνδυασμό αέρα και νερό PVT/DUAL με μεταλλικό φύλλο TMS, πτερύγια FINS και μεταλλικό φύλλο TMS με συνδυασμό ραβδώσεων στην πίσω πλευρά του αεραγωγού RIBS (TMS-RIBS) [9].

Μια εναλλακτική πρόταση για την επίτευξη θερμού νερού υψηλότερης θερμοκρασίας και καλύτερης ψύξης του φωτοβολταϊκού είναι ο συνδυασμός ΦΒ/Θ με αντλία θερμότητας. Αυτό απαιτεί την άμεση σύζευξη του ΦΒ/Θ συστήματος με ένα σύστημα αντλίας θερμότητας.

Σε ΦΒ/Θ συστήματα ψύξης με αέρα μπορεί να γίνει τοποθέτηση εναλλάκτη θερμότητας νερού. Έχει διαπιστωθεί ότι ο πιο αποτελεσματικός και αποδοτικός τρόπος τοποθέτησης του εναλλάκτη είναι η ενσωμάτωσή του μέσα στον αεραγωγό και ακριβώς πίσω από την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών. Αυτός ο συνδυασμός αποτελεί τον βέλτιστο τρόπο απαγωγής θερμότητας με νερό και αέρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να εφαρμοστούν στη βιομηχανία και στον αγροτικό τομέα, καθώς απαιτούνται υψηλές ποσότητες ηλεκτρισμού και θερμότητας ώστε να καλύψουν την ενεργειακή ζήτηση για διάφορες διεργασίες σ' αυτούς τους τομείς. Στις περισσότερες βιομηχανικές διεργασίες, είναι απαραίτητος ο ηλεκτρισμός για τη λειτουργία κινητήρων και άλλων μηχανών καθώς και η θερμότητα για θέρμανση νερού, αέρα ή οποιουδήποτε ρευστού. Αυτό καθιστά τα φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα υποσχόμενες συσκευές για ευρύτερη χρήση, που προσαρμόζονται σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες (όπως πλύσιμο, καθάρισμα, παστερίωση, αποστείρωση, ξήρανση, βρασμό, απόσταξη, πολυμερισμό κ.τ.λ.). Η καταλληλότερη χρήση αυτών των συστημάτων γίνεται σε διεργασίες που απαιτείται θερμότητα σε μεσαίες (50°C - 80°C) και κυρίως σε χαμηλές (<50°C) θερμοκρασίες, καθώς σε αυτές τις θερμοκρασίες γίνεται ο αποδοτικότερος συνδυασμός της ηλεκτρικής και θερμικής λειτουργίας του υβριδικού συστήματος. Οι διεργασίες στις οποίες απαιτείται θερμότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι στα είδη τροφίμων, κρασιού, μύρας, ροφημάτων, χαρτιού και στην κλωστοϋφαντουργία.

Παρόλο που η ηλιακή ενέργεια, με τα υβριδικά συστήματα, μπορεί να προσαρμοστεί στην ενεργειακή ζήτηση των βιομηχανικών διεργασιών, η διείσδυση των ηλιακών θερμικών συστημάτων στη βιομηχανία είναι ακόμη πολύ χαμηλή αναλογιζόμενοι τη συνολική ζήτηση θερμότητας στη βιομηχανία. Σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς, η απαιτούμενη θερμότητα είναι τόσο υψηλή που δε χρειάζεται αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας, κάτι που καθιστά τα ΦΒ/Θ συστήματα να μπορούν να εφαρμοστούν με χαμηλότερο κόστος. Οι περισσότερες ηλιακές εφαρμογές σε βιομηχανικές διεργασίες που χρησιμοποιούν θερμικούς συλλέκτες, έχουν εφαρμοστεί σε σχετικά μικρή κλίμακα, και μόνο μερικά συστήματα χρησιμοποιούνται ευρέως.

Σχετικά με τον αγροτικό τομέα, τα ΦΒ/Θ συστήματα μπορούν να εφαρμοστούν σε θερμοκήπια, για ξήρανση ή σε διεργασίες απόσταξης, παρέχοντας την απαιτούμενη θερμότητα και ηλεκτρισμό.

Τέλος στον κτιριακό τομέα γίνεται σημαντική έρευνα πάνω στα λεγόμενα κτιριακά ολοκληρωμένα ΦΒ/Θ (building-integrated PV/T, BIPVT). Όσον αφορά τις κτιριακές εφαρμογές είναι περισσότερο δημοφιλή τα ΦΒ/Θ αέρα (BIPVT/a) ενώ λίγες ερευνητικές ομάδες ασχολούνται με τα ΦΒ/Θ νερού (BIPVT/w).

6.2 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Στις περισσότερες βιομηχανικές διεργασίες τόσο ο ηλεκτρισμός όσο και η θερμότητα είναι απαραίτητοι και αυτό καθιστά τα ΦΒ/Θ συστήματα υποσχόμενες συσκευές για εκτενή χρήση σε αυτόν τον τομέα.

Η θερμότητα και ο ηλεκτρισμός που χρειάζονται σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες είναι συνήθως αρκετά μεγάλης ποσότητας ώστε δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν πλήρως από τα ηλιακά συστήματα. Ένα μέρος αυτών των αναγκών μπορεί να καλυφθεί στις περισσότερες περιπτώσεις.

Τα ΦΒ/Θ συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές θερμοκρασιών 50°C-80°C και κυρίως σε χαμηλές θερμοκρασίες (<50°C). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλοί τύποι ΦΒ/Θ συστημάτων και η επιλογή του κατάλληλου τύπου εξαρτάται από την απαιτούμενη θερμοκρασία του ρευστού και την τελική του χρήση. Για παράδειγμα, τα φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα νερού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση νερού σε διεργασίες πλυσίματος ή καθαρισμού. Επιπλέον, η προσθήκη χαμηλού κόστους ανακλαστήρων, όπως λευκές επιφάνειες ή άλλοι φθινοί διάχυτοι ανακλαστήρες, μπορούν να αυξήσουν την αποδιδόμενη θερμική ενέργεια.

Το κεντρικό σύστημα για την παροχή θερμότητας, στα περισσότερα εργοστάσια, παρέχει θερμό νερό στη θερμοκρασία που απαιτείται για τις διάφορες διεργασίες. Το θερμό νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για προθέρμανση νερού (ή άλλων ρευστών) χρήσης σε διάφορες διεργασίες (πλύσιμο, βάψιμο κ.τ.λ.) ή για απευθείας σύζευξη του ηλιακού συστήματος στις διάφορες διεργασίες. Στην περίπτωση προθέρμανσης του νερού, επιτυγχάνονται υψηλότερες αποδόσεις εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας εισόδου του νερού στο ηλιακό σύστημα. Συνεπώς, απλοί συλλέκτες ή ΦΒ/Θ συστήματα νερού μπορούν να δουλέψουν αποδοτικά.

Σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητη η χρήση αποθήκης θερμότητας, η οποία επιτρέπει τη λειτουργία της διεργασίας και σε περιόδους χαμηλής ακτινοβολίας ή και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Οι βιομηχανίες έχουν υψηλή ζήτηση τόσο σε θερμότητα όσο και σε ηλεκτρισμό και γι' αυτό τα υβριδικά ΦΒ/Θ συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ηλιακές μονάδες συμπαραγωγής, με σκοπό να συνδυαστούν οι απαιτήσεις. Τα ΦΒ/Θ συστήματα νερού και αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία λαμβάνοντας υπόψη το κατάλληλο ρευστό για τις διάφορες βιομηχανικές διεργασίες. Και οι δύο τύποι μπορούν να λειτουργήσουν όλο το χρόνο και αυτό το γεγονός αποτελεί το κύριο πλεονέκτημα της εφαρμογής των ΦΒ/Θ συστημάτων στη βιομηχανία σε σχέση με τα κατοικήσιμα κτίρια όπου τα συστήματα αυτά δεν είναι χρήσιμα όλες τις εποχές. (κυρίως τα ΦΒ/Θ συστήματα αέρα). Η χρήση ηλιακών εγκαταστάσεων στη βιομηχανία είναι αυτή τη στιγμή στο περιθώριο (<1%) σε σχέση με τη χρήση τους στα κατοικήσιμα κτίρια, στα ξενοδοχεία και σε άλλους τομείς.

Τα ΦΒ/Θ συστήματα νερού και αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία λαμβάνοντας υπόψη το κατάλληλο ρευστό για τις διεργασίες. Και οι δύο τύποι μπορούν να λειτουργήσουν όλο το χρόνο και το γεγονός αυτό αποτελεί το κύριο πλεονέκτημα της εφαρμογής των ΦΒ/Θ συστημάτων στη βιομηχανία σε σχέση με τα κτίρια κατοικιών όπου τα συστήματα αυτά δεν είναι χρήσιμα κατά τη διάρκεια όλων των εποχών (κυρίως τα ΦΒ/Θ συστήματα αέρα).

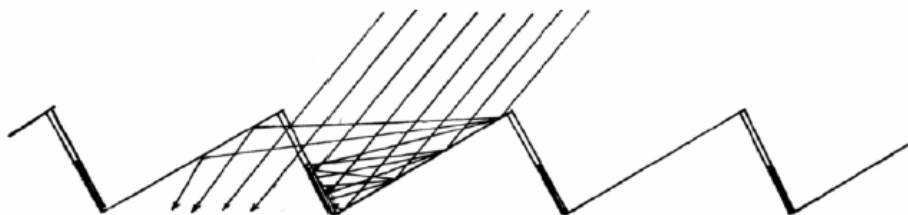
Οι ανάγκες θερμότητας στη βιομηχανία φτάνουν το ένα τρίτο της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες. Το ποσοστό των θερμικών αναγκών τους σε θερμοκρασίες πάνω από 250°C είναι υψηλό, ιδιαίτερα στη βιομηχανία τροφίμων, κρασιού, μύρας, ροφημάτων, στην κλωστοϋφαντουργία και στη βιομηχανία αυτοματισμού. Σε αυτές τις διεργασίες τα ΦΒ/Θ συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προθέρμανση του ρευστού. Τα ΦΒ/Θ συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή σε θερμότητας σε διεργασίες χαμηλών και μεσαίων θερμοκρασιών, όπως πλύσιμο, καθάρισμα, παστερίωση, αποστείρωση, ξήρανση, βρασμό, απόσταξη, πολυμερισμό κτλ.

Για τη χρήση θερμότητας σε διάφορες διεργασίες, όπου απαιτούνται θερμοκρασίες υψηλότερες από 80 με 100°C, προτείνεται η χρήση συγκεντρωτικών ΦΒ/Θ συστημάτων, ικανά να παρέχουν ικανοποιητικά ποσά θερμότητας μέσω μεταφοράς από ρευστό, στη ζητούμενη κλίμακα θερμοκρασιών. Με τη βοήθεια αυτών των συστημάτων, είναι σημαντικό να επιτευχθεί το απαραίτητο ποσοστό ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τη ζητούμενη βιομηχανική ενέργεια, η οποία είναι αρκετά υψηλή.

Οι υψηλές ενεργειακές ανάγκες της βιομηχανίας είναι ένα πρόβλημα καθώς η διαθέσιμη επιφάνεια για την εγκατάσταση ηλιακών συστημάτων στη στέγη εργοστασίου ή στο έδαφος αποτελεί πολλές φορές περιοριστικό παράγοντα.

Παρόλο που οι ΦΒ/Θ συλλέκτες αποτελούν υποσχόμενες συσκευές για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών στη βιομηχανία, είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί υπόψη το κόστος επένδυσης, καθώς η τιμή των συμβατικών καυσίμων για βιομηχανικές χρήσεις είναι πολύ χαμηλό και ακριβά φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα σημαίνει ότι δε θα έχουν ικανοποιητικό χρόνο απόσβεσης.

Οι περισσότερες ηλιακές εφαρμογές σε βιομηχανικές διεργασίες που χρησιμοποιούν θερμικούς συλλέκτες είναι μικρής κλίμακας και μόνο μερικά μεγάλα συστήματα χρησιμοποιούνται ευρέως. Η χρήση συστημάτων ηλιακής ενέργειας στον εμπορικό και βιομηχανικό τομέα είναι σχεδόν ασήμαντη σε σχέση με χρήση τους στις κατοικίες. Τα φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλούς κλάδους της βιομηχανίας, με περισσότερο κατάλληλες τις εφαρμογές στις οποίες απαιτείται θερμότητα κυρίως σε χαμηλές (<50°C) θερμοκρασίες, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις η ηλεκτρική και θερμική απόδοση συνδυάζονται σε επιθυμητά επίπεδα. Σε βιομηχανικές εφαρμογές όπου χρειάζεται προθερμασμένο νερό ή αέρα σε χαμηλές θερμοκρασίες (<40°C) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακάλυπτα, δηλαδή χωρίς γυάλινο κάλυμμα, φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα, τα οποία αποδίδουν ικανοποιητικά κυρίως όσον αφορά την ηλεκτρική ενέργεια και έχουν σχετικά χαμηλό κόστος.



Σχήμα 6.1 Εφαρμογή διάχυτων ανακλαστήρων στις πριονωτές στέγες βιομηχανικών κτιρίων [9].

Με σκοπό τη βελτίωση της ηλεκτρικής και θερμικής απόδοσης, μπορεί να γίνει χρήση διάχυτων ανακλαστήρων (όπως βαμμένες λευκές επιφάνειες ή άλλοι διάχυτοι ανακλαστήρες), που μπορούν να εφαρμοστούν ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των ΦΒ/Θ συστημάτων.

Μια τέτοια λύση μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανικές πριονωτές σκεπές, επίπεδες στέγες ή ακόμη και σε εγκαταστάσεις στο έδαφος. Οι διάχυτοι ανακλαστήρες οδηγούν σε αύξηση της θερμικής απόδοσης και έτσι ξεπερνιέται η μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης στις περιπτώσεις προσθήκης του γυάλινου καλύμματος που χρησιμοποιείται για την αύξηση της παρεχόμενης θερμικής ενέργειας.

6.3 ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η διπλή λειτουργία των ΦΒ/Θ συστημάτων να απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και να τη μετατρέπουν σε ηλεκτρισμό και θερμότητα τις καθιστά κατάλληλες συσκευές για προσαρμογή τους σε αγροτικές διεργασίες. Τα θερμοκήπια χρειάζονται θέρμανση το χειμώνα και ψύξη/αερισμό κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Οι ΦΒ/Θ συλλέκτες μπορούν να καλύψουν αυτές τις ανάγκες, καθώς ο έλεγχος του φωτισμού του εσωτερικού χώρου είναι πολύ σημαντικός σχεδόν όλο το χρόνο και φακοί Fresnel σε συνδυασμό με γραμμικούς φωτοβολταϊκούς/θερμικούς συλλέκτες μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο. Επιπλέον, η αφαλάτωση και η επεξεργασία του νερού για άρδευση (πότισμα) είναι κάποιες επιπλέον πιθανές εφαρμογές των ΦΒ/Θ συλλεκτών.

Όσον αφορά τα θερμοκήπια, οι κύριες λειτουργίες που έχουν να κάνουν με τους ΦΒ/Θ συλλέκτες είναι ο έλεγχος της θερμοκρασίας και του φωτισμού των εσωτερικών χώρων των θερμοκηπίων. Σε μερικές περιόδους, κυρίως κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η υψηλή ποσότητα της ακτινοβολίας έχει αρνητική επίδραση στην καλλιέργεια του θερμοκηπίου τόσο στο φωτισμό όσο και στη θερμοκρασία και συνεπώς είναι απαραίτητη η μείωση της ποσότητας της εισερχόμενης ακτινοβολίας. Σε χαμηλού γεωγραφικού πλάτους χώρες, όπως η Ισπανία, η Ελλάδα και οι Μεσογειακές χώρες, η ακτινοβολία είναι επαρκής ώστε να εκπληρώσει τις ανάγκες των φυτών που καλλιεργούνται στο θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και άλλων περιόδων.

Αρκετές μέθοδοι συμβάλλουν στον έλεγχο της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας των θερμοκηπίων, μεταξύ αυτών είναι η σκίαση, ο παθητικός και εξαναγκασμένος αερισμός και η εξάτμιση του νερού. Εκτός αυτού, ο φωτισμός κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι ένας απαραίτητος παράγοντας ανάπτυξης των φυτών και τα θερμοκήπια πρέπει να κατασκευάζονται με ημιδιαφανές κάλυμμα ώστε να εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία με τον πιο αποδοτικό τρόπο.

Μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια, το γυαλί είναι το πιο σταθερό υλικό με ικανοποιητικές οπτικές και θερμικές ιδιότητες. Τα πλαστικά καλύμματα είναι όμως πιο φθηνά από τα γυάλινα, αλλά τα περισσότερα από αυτά είναι χαμηλότερης ποιότητας όσον αφορά το φωτισμό και τη θερμική συμπεριφορά.

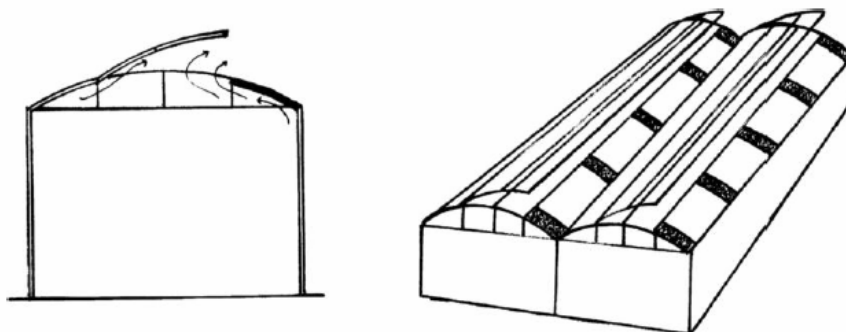
Ένα εναλλακτικό διαφανές κάλυμμα, σε σχέση με τα συνηθισμένα γυάλινα καλύμματα για θερμοκήπια, είναι οι φακοί Fresnel γυάλινου τύπου. Η χρήση των φακών Fresnel σε συνδυασμό με απορροφητές ηλιακής ενέργειας αντί τυπικών γυάλινων καλυμμάτων στη στέγη των θερμοκηπίων, έχει σκοπό τη βελτίωση του φωτισμού και μπορεί να εξυπηρετήσει στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των θερμοκηπίων.

Μια διαφορετική περίπτωση ηλιακού ελέγχου στα θερμοκήπια είναι η τοποθέτηση ΦΒ/Θ συλλεκτών καταλλήλως στη στέγη των θερμοκηπίων, καλύπτοντας ένα μικρό μέρος αυτών ώστε να περιοριστεί η υψηλή μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο του θερμοκηπίου. Τα θερμοκήπια πρέπει να έχουν ανατολικό –δυτικό προσανατολισμό, με τα ηλιακά συστήματα να βλέπουν προς νότο. Η εφαρμογή των ΦΒ/Θ συστημάτων με διπλό σύστημα απαγωγής θερμότητας (νερού και αέρα) προτείνεται στα θερμοκήπια για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια για διάφορες λειτουργίες (όπως σε αντλίες, σε συστήματα για άνοιγμα παραθύρων, για τεχνητό φωτισμό όποτε χρειάζεται, για εξοπλισμό άρδευσης κτλ.) κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου. Το καλοκαίρι, η απαγωγή θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά πάνελ γίνεται με αέρα, ο οποίος εξάγεται μέσω ανοιγμάτων για τον αερισμό του θερμοκηπίου. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η απαγωγή θερμότητας γίνεται με χρήση νερού, το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί και να κυκλοφορήσει όποτε αυτό χρειάζεται (όπως κατά τη διάρκεια της νύχτας) διαμέσου εναλλακτών θερμότητας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με σκοπό να καλύψει τις ανάγκες θέρμανσης του χώρου.

Για τον περιορισμό της σκίασης του εσωτερικού χώρου, τα ΦΒ/Θ συστήματα θα πρέπει να καλύπτουν ένα μικρό ποσοστό της επιφάνειας των θερμοκηπίων το οποίο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 10%. Το ΦΒ/Θ σύστημα διπλού τύπου (νερού και αέρα) προτείνεται να χρησιμοποιηθεί χωρίς μόνωση στην πίσω πλευρά, επειδή οι θερμικές απώλειες είναι μειωμένες εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου του θερμοκηπίου, και συνεπώς η πίσω πλευρά των συστημάτων εκτίθεται στον εσωτερικό χώρο (αέρα).

Τα φωτοβολταϊκά απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και λειτουργούν σαν ηλιακές καμινάδες και συνεπώς μπορεί να επιτευχθεί ένα υψηλό ποσοστό φυσικής ροής κυκλοφορίας αέρα διαμέσου των ανοιγμάτων στη στέγη του θερμοκηπίου.

Στην περίπτωση πολύ υψηλών θερμοκρασιών περιβάλλοντος είναι απαραίτητος ο αερισμός του θερμοκηπίου, όπου ένα μέρος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να λειτουργήσουν αντλίες αερισμού.



Σχήμα 6.2 Ενσωμάτωση ΦΒ/Θ συστήματος αέρα και νερού στην οροφή θερμοκηπίου [9].

Εκτός από την εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας στα θερμοκήπια, η ηλιακή ξήρανση αποτελεί σημαντική εφαρμογή των ΦΒ/Θ συλλεκτών κυρίως αέρα, ως ρευστό απαγωγής της θερμότητας. Έχουν γίνει μελέτες με σκοπό το συνδυασμό της ξήρανσης με τα ΦΒ/Θ συστήματα αέρα.

Οι συσκευές αυτές θεωρούνται οικονομικές λύσεις καθώς η αποδοτική λειτουργία τους προσαρμόζεται, κάτω από ευνοϊκές καιρικές συνθήκες, στις απαιτήσεις των διάφορων διεργασιών ξήρανσης.

Μια ακόμη εφαρμογή των ΦΒ/Θ συστημάτων είναι η επεξεργασία καθαρισμού του νερού και η αφαλάτωση. Εκτός από τους επίπεδους ΦΒ/Θ συλλέκτες, τα συγκεντρωτικά ΦΒ/Θ συστήματα αποτελούν κατάλληλες ηλιακές συσκευές για την παροχή θερμότητας μέσω ρευστού σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Τα συγκεντρωτικά ΦΒ/Θ συστήματα είναι περισσότερο χρήσιμα σε εφαρμογές που απαιτούνται θερμοκρασίες πάνω από 50°C, θερμοκρασίες δηλαδή που αποτελούν περιοριστικό παράγοντα για την αποδοτική λειτουργία επίπεδων ΦΒ/Θ συλλεκτών.

Η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού αποτελεί πεδίο εφαρμογής ΦΒ/Θ συσκευών καθώς ο ηλεκτρισμός που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά μπορεί να οδηγηθεί σε μονάδα αντίστροφης όσμωσης (η οποία είναι και η σημαντικότερη μέθοδος αφαλάτωσης) και η απαγόμενη θερμότητα σε προθέρμανση του ρευστού με σκοπό να γίνει πιο αποδοτική η διαδικασία.

Παρόλο που οι ΦΒ/Θ συλλέκτες είναι κατάλληλοι για χρήση σε αγροτικές διεργασίες τα παραδείγματα εφαρμογών είναι σχετικά λίγα, ωστόσο εκτιμάται ότι θα αυξηθούν αρκετά στα επόμενα χρόνια.

6.4 ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα BIPV (Building Integrated Photovoltaics) είναι τα ΦΒ συστήματα που έχουν ενσωματωθεί σε κτιριακές εγκαταστάσεις συνήθως από τη φάση του σχεδιασμού τους. Πρόκειται για μία λύση που κερδίζει συνεχώς έδαφος στον κατασκευαστικό τομέα καθώς συνδυάζεται εύκολα με την τάση σχεδίασης ηλιακών παθητικών κτιρίων, δηλαδή κτιρίων που είναι σχεδιασμένα να αξιοποιούν στο μέγιστο το φυσικό φως και τη θερμότητα από τον ήλιο. Τα τελευταία χρόνια τα BIPV έχουν γίνει αρκετά δημοφιλή κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες μέσω των εθνικών προγραμμάτων που τα χρηματοδοτούν.

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πάνελ μειώνει την ενεργειακή εξάρτηση του κτιρίου, καθώς ένα τμήμα από τις ηλεκτρικές του ανάγκες καλύπτεται από τα φωτοβολταϊκά, ενώ αυξάνει και την εμπορική του αξία. Αν μάλιστα η μελέτη της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης αποτελεί τμήμα του σχεδιασμού του κτιρίου τότε τα φωτοβολταϊκά μπορούν να αντικαταστήσουν κάποια από τα δομικά υλικά και να δώσουν μία ομοιόμορφη εικόνα.

Η επιτυχημένη ενσωμάτωσή τους απαιτεί το σωστό σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους και την καλή συνεργασία του αρχιτέκτονα και του μηχανικού που θα κάνει τη σχετική μελέτη.

Τα BIPV μπορούν να αποτελούν τμήμα της οροφής ή της πρόσοψης ενός κτιρίου. Στην περίπτωση αυτή τοποθετούνται συνήθως στη νότια πλευρά του κτιρίου.

Στην περίπτωση που τα BIPV τοποθετούνται σε ένα έτοιμο κτίριο τότε οι φωτοβολταϊκές επιφάνειες μπορεί να είναι τα συνηθισμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετημένα στην οροφή (κεκλιμένα ή επίπεδα). Αυτή η λύση είναι κατάλληλη για κτίρια με αρκετό διαθέσιμο χώρο στην οροφή.



Σχήμα 6.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια σε επίπεδη οροφή οικίας [23].

Σε εφαρμογές που τα ΦΒ αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα του σχεδιασμού χρησιμοποιούνται ηλιακά στοιχεία τελευταίας τεχνολογίας όπως εύκαμπτα κρυσταλλικά στοιχεία, στοιχεία λεπτού υμενίου πάνω σε μεταλλικό υπόστρωμα, πλακίδια με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία ως δομικά υλικά, ακόμα και διαφανή ή ημιδιαφανή ή και χρωματιστά ηλιακά στοιχεία.

Έτσι οι επιλογές και οι πιθανοί συνδυασμοί τους είναι κάθε άλλο παρά περιοριστικές για τη φαντασία ενός αρχιτέκτονα. Με τη χρήση π.χ. διαφανών στοιχείων σε ένα κτίριο γίνεται εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού, παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και παράλληλα το κτίριο μπορεί να αποκτήσει ένα πρωτότυπο και πρωτοποριακό σχέδιο.



Σχήμα 6.4 Φωτοβολταϊκά πλαίσια σε κεκλιμένη οροφή [23].

Επίσης τα ΦΒ συστήματα μπορεί να αποτελούν ταυτόχρονα και συστήματα σκίασης (shadow voltaics) και να ακολουθούν μάλιστα την κίνηση του ήλιου για μέγιστη απόδοση.

Παρόλο που τα BIPV είναι ένα σχετικά νέο πεδίο αναμένεται στο εγγύς μέλλον να αποτελέσουν το σημαντικότερο πεδίο εφαρμογής των ΦΒ/Θ τεχνικών και κυρίως αυτών στις οποίες το εργαζόμενο μέσο είναι ο αέρας.



Σχήμα 6.5 Τοίχος με συνδυασμό διαφανών φωτοβολταϊκών για φωτισμό και αδιαφανών [23].

Όλα δείχνουν λοιπόν πως η σύγχρονη τάση για την κατασκευή αποδοτικότερων ενεργειακά κτιρίων(συνεπώς και φιλικότερων προς το περιβάλλον) μπορεί να αποτελέσει το εφαλτήριο για την αξιοποίηση των ΦΒ/Θ συστημάτων. Πάντως θα πρέπει να επισημάνουμε ότι ο αποτελεσματικός συνδυασμός BIPV και ΦΒ/Θ συστημάτων είναι μια πρόκληση για κάθε μηχανικό και μία λανθασμένη μελέτη μπορεί να προκαλέσει οικονομική ζημιά.

Στην πράξη το πρώτο κτίριο στην Ευρώπη που χρησιμοποίησε συνδυασμένο ΦΒ/Θ σύστημα ήταν η δημοτική βιβλιοθήκη του Mataro περιοχή κοντά στη Βαρκελώνη. Η εγκατάσταση έγινε το 1997. Η πρόσοψη του κτιρίου έχει ύψος περίπου 6,5 m ενώ η συνολική επιφάνεια που καλύπτεται από φωτοβολταϊκά φθάνει τα 225 m².



Σχήμα 6.6 Κινούμενο σύστημα σκίασης με τη χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων [23].

Η θερμική ενέργεια από τους BIPVT/w συλλέκτες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ζεστό νερό και θέρμανση σε κτίρια όπως κατοικίες, πολυκατοικίες, ξενοδοχεία, νοσοκομεία, αθλητικά κέντρα κ.τ.λ. Μπορούν να τοποθετηθούν στην πρόσοψη και την οριζόντια ή επικλινή οροφή των κτιρίων αντί ξεχωριστών συσκευών φωτοβολταϊκών και θερμικών ηλιακών συλλεκτών εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό ομοιομορφία ως προς τις χρησιμοποιούμενες ηλιακές συσκευές και καλύτερη αξιοποίηση της διαθέσιμης επιφάνειας.

Οι υβριδικές ΦΒ/Θ συσκευές παρέχουν ποσότητα θερμότητας επιπλέον της ηλεκτρικής ενέργειας και κατά συνέπεια έχουν μεγαλύτερη ολική αποδιδόμενη ενέργεια σε σχέση με τα απλά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Έτσι μπορεί να καταστούν οικονομικά αποδοτικές αν το κόστος της πρόσθετης θερμικής μονάδας είναι σχετικά μικρό. Παρά τα διαφαινόμενα πλεονεκτήματα ελάχιστες εμπορικές ΦΒ/Θ συσκευές έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα [22].



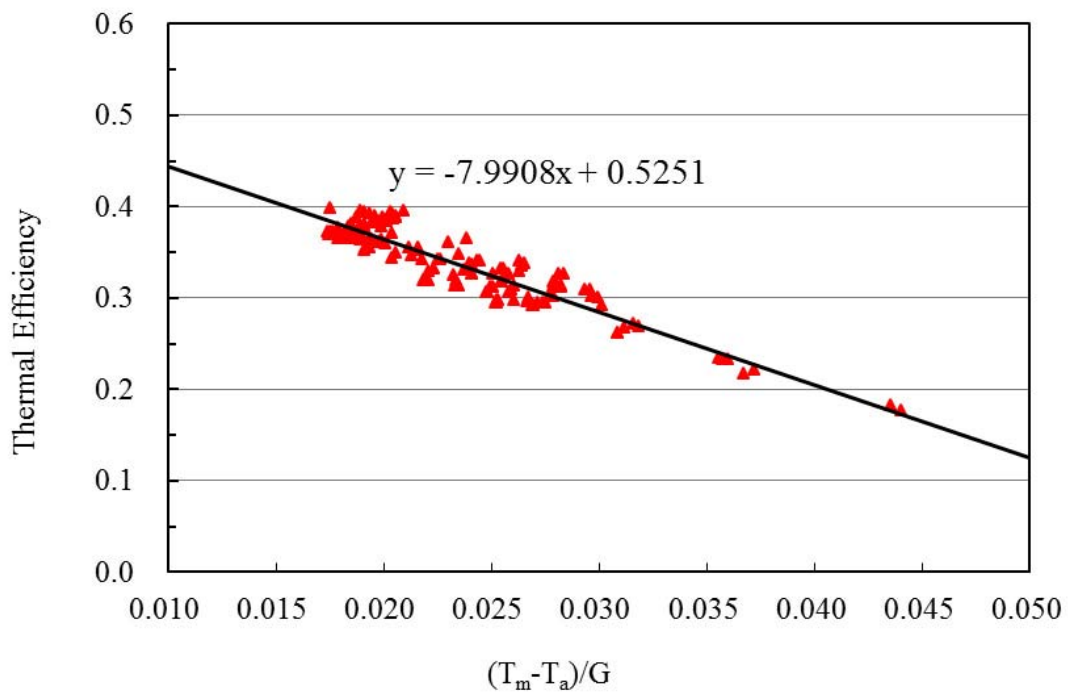
Σχήμα 6.7 Η δημοτική βιβλιοθήκη του Mataro στην Ισπανία [23].

Ο Kim και οι συνεργάτες του [21] μελέτησαν την ενεργειακή απόδοση ενός συστήματος θέρμανσης κτιρίου σε συνδυασμό με ένα BIPVT/w συλλέκτη ενσωματωμένο στην οροφή του κτιρίου (σχήμα 6.3).

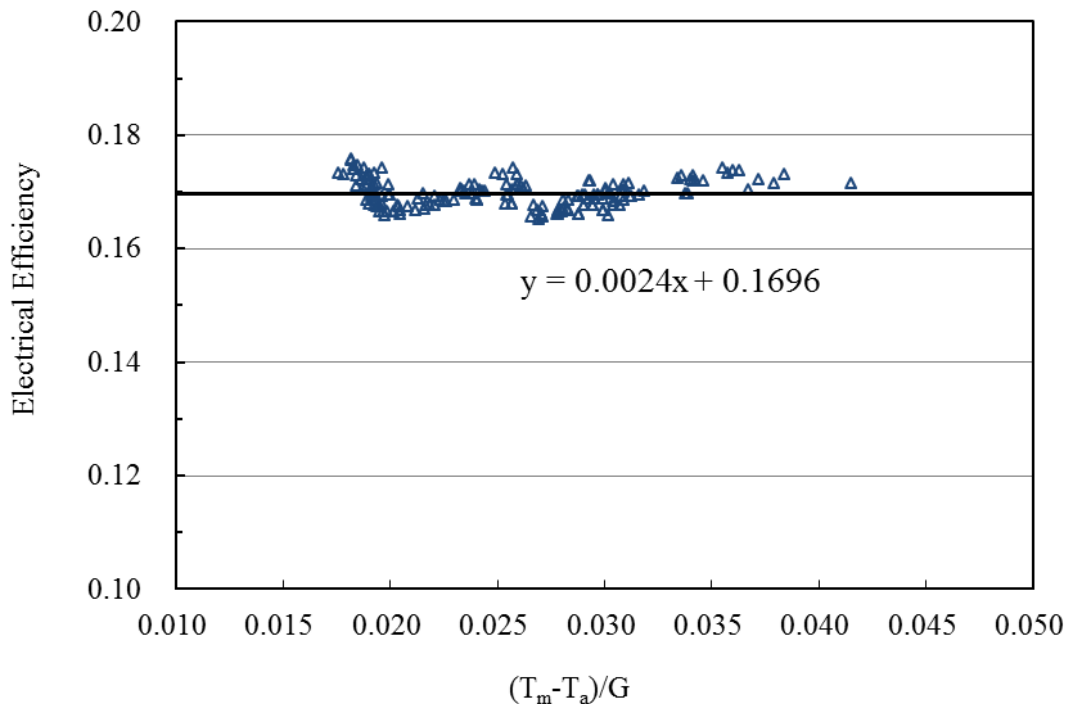
Σύμφωνα με τα πειραματικά τους αποτελέσματα η θερμική και η ηλεκτρική απόδοση του BIPVT/w συλλέκτη ήταν κατά μέσο όρο 30% και 17% αντίστοιχα. Επομένως η χρήση του BIPVT/w συλλέκτη είναι ιδιαίτερα χρήσιμη και μπορεί να συμβάλλει αποτελεσματικά για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου.



Σχήμα 6.8 Η πειραματική μονάδα BIPVT/w συλλεκτών στην οροφή κτιρίου [21].



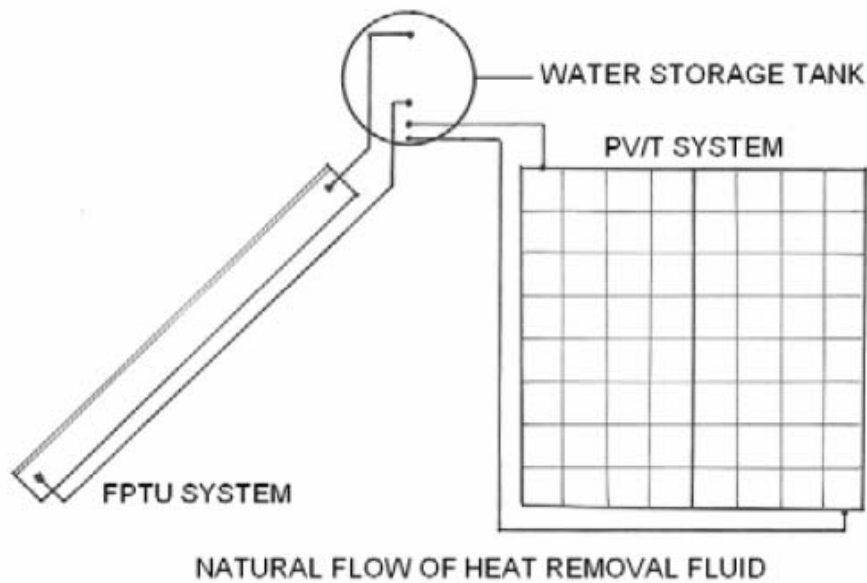
Σχήμα 6.9 Θερμική απόδοση του BIPVT/w συλλέκτη [21].



Σχήμα 6.10 Ηλεκτρική απόδοση του BIPVT/w συλλέκτη [21].

6.5 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΒ/Θ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

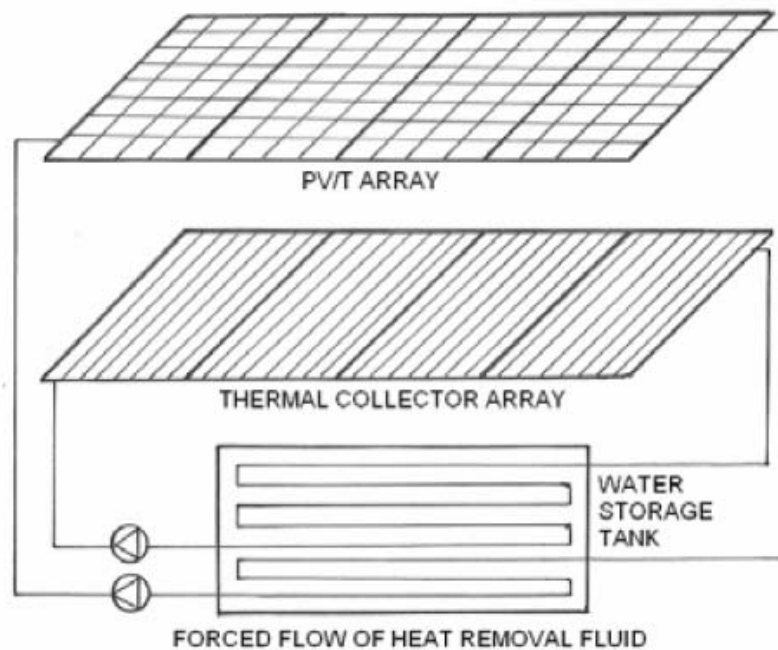
Το θερμικό μέρος ενός ΦΒ/Θ συστήματος έχει κάποιους περιορισμούς ως προς τη λειτουργία του σε σχέση με τους θερμικούς ηλιακούς συλλέκτες, καθώς ένας ηλιακός θερμικός συλλέκτης μπορεί να κατασκευαστεί από επιλεκτική απορροφητική επιφάνεια, μπορούν να προστεθούν δύο γυάλινα καλύμματα, ενώ επιπλέον δεν περιλαμβάνουν φωτοβολταϊκά κύτταρα τα οποία είναι ευαίσθητα και μη αποδοτικά σε υψηλές θερμοκρασίες. Γι' αυτούς τους λόγους οι ΦΒ/Θ συλλέκτες δεν είναι αποδοτικοί σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας του συστήματος, σε αντίθεση με τη λειτουργία των θερμικών ηλιακών συλλεκτών. Άρα θα πρέπει το ΦΒ/Θ σύστημα να παρέχει τη μέγιστη δυνατή θερμοκρασία και ο θερμικός συλλέκτης ομοίως. Προκύπτει συνεπώς ανάγκη για συνδυασμό συστημάτων με σκοπό τη βελτίωση της αποδοτικότητάς τους. Παρακάτω αναφέρονται διάφοροι συνδυασμοί των ΦΒ/Θ συσκευών με διάφορους τύπους ηλιακών θερμικών συλλεκτών.



Σχήμα 6.11 Συνδυασμός ΦΒ/Θ συστήματος και θερμοσιφωνικού ηλιακού συλλέκτη [9].

Μια ενδιαφέρουσα πρόταση αποτελεί ο συνδυασμός ΦΒ/Θ συστήματος με θερμοσιφωνικό ηλιακό συλλέκτη. Το θερμό νερό του ΦΒ/Θ συστήματος εισέρχεται στο κατώτερο σημείο της δεξαμενής αποθήκευσης του θερμοσιφωνικού συλλέκτη, προθερμαίνοντας έτσι το νερό και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα του συστήματος.

Συνδυασμός επίσης ΦΒ/Θ συστημάτων μπορεί να γίνει με συστοιχία ηλιακών θερμικών συλλεκτών. Μια τυπική μονάδα ηλιακών θερμικών συλλεκτών συνήθως συνδέεται με μία ή περισσότερες δεξαμενές αποθήκευσης θερμού νερού, οπότε το ΦΒ/Θ σύστημα μπορεί να συνδεθεί με τη δεξαμενή. Σε αυτό το συνδυασμό η θερμότητα του νερού που έχει προθερμανθεί από τα ΦΒ/Θ συστήματα μεταδίδεται μέσω βεβιασμένης κυκλοφορίας ρευστού στη δεξαμενή αποθήκευσης, μέσω εναλλάκτη θερμότητας. Ο εναλλάκτης θερμότητας τοποθετείται στο κατώτερο μέρος της δεξαμενής ώστε να έρχεται σε θερμική επαφή με το ψυχρό νερό της δεξαμενής, να μεταδίδει θερμότητα και έτσι να προθερμαίνεται. Τελικά οι θερμικοί συλλέκτες παρέχουν νερό υψηλότερης θερμοκρασίας σε σχέση με αυτό των ΦΒ/Θ καθώς λειτουργούν αποδοτικά σε υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 6.12 Συνδυασμός ΦΒ/Θ συστήματος και συστοιχίας θερμικών ηλιακών συλλεκτών με βεβιασμένη κυκλοφορία ρευστού [9].

Η ελαχιστοποίηση των ενεργειακών αναγκών σε όλους τους τομείς και η ενεργειακή παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί πιθανή ενεργειακή πηγή στο κοντινό μέλλον. Σε πολλές περιπτώσεις, μια ενεργειακή πηγή δεν είναι αρκετή ή δεν είναι οικονομικά αποδοτική ώστε να καλύψει την απαραίτητη ενέργεια και πρέπει να συνδυαστεί με άλλες πηγές. Οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες συνδυάζονται συνήθως με γεωθερμική ενέργεια ή λέβητες βιομάζας ώστε να καλύψουν τις κτιριακές ενεργειακές ανάγκες για θέρμανση και ψύξη.

Τα ΦΒ/Θ συστήματα μπορεί να αποτελέσουν έναν αποδοτικό συνδυασμό της ηλιακής ενέργειας με συστήματα θέρμανσης γεωθερμικής ενέργειας μικρού βάθους. Σε αυτή την περίπτωση, το νερό από το έδαφος το οποίο βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία, μπορεί να προωθηθεί από τους ΦΒ/Θ συλλέκτες προς την διάταξη της αντλίας θερμότητας και να αυξήσει το συντελεστή απόδοσης της, καθώς ο παραγόμενος ηλεκτρισμός από τα φωτοβολταϊκά μπορεί να καλύψει τις ανάγκες σε ηλεκτρισμό των συστημάτων αυτών.

Ένας ακόμη ενδιαφέρων συνδυασμός είναι η σύζευξη ΦΒ/Θ συσκευών με λέβητες βιομάζας. Σε αυτή την περίπτωση, οι ΦΒ/Θ συλλέκτες παρέχουν προθερμασμένο νερό, καθώς αποτελεί τον βέλτιστο συνδυασμό, επειδή στις χαμηλές θερμοκρασίες μεγιστοποιείται η ηλεκτρική και θερμική απόδοση. Σε αυτό το συνδυασμό ο λέβητας βιομάζας μπορεί να καλύψει την κύρια θέρμανση του συστήματος.

Τα ΦΒ/Θ συστήματα μπορούν επίσης να συνδυαστούν με συστήματα αιολικής ενέργειας και κυρίως με μικρές ανεμογεννήτριες. Η αιολική ενέργεια αποτελεί την κύρια σήμερα σύγχρονη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, που εκτιμάται ότι θα καλύπτει το 20% των παγκόσμιων ηλεκτρικών αναγκών το 2020. Οι προσόψεις και οι οριζόντιες ή επικλινείς στέγες των κτιρίων είναι κατάλληλες επιφάνειες για τη λειτουργία των ΦΒ/Θ συλλεκτών, καθώς μικρές ανεμογεννήτριες μπορούν να εγκατασταθούν στις στέγες των κτιρίων, κυρίως σε περιοχές με ικανοποιητικό αιολικό δυναμικό (ταχύτητα ανέμου). Σε αυτό το σύστημα, το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες, αν δε χρησιμοποιείται ή δεν αποθηκεύεται σε μπαταρίες, μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία του ρευστού στη δεξαμενή αποθήκευσης της ηλιακής θερμικής μονάδας.

Στα ΦΒ/Θ συστήματα σε συνδυασμό με ανεμογεννήτριες η απόδοση από τα ηλιακά συστήματα εξαρτάται από την ηλιοφάνεια και η απόδοση των ανεμογεννητριών εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και τη διάρκειά του κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Γι' αυτό τα ΦΒ/Θ συστήματα και οι ανεμογεννήτριες μπορούν να εγκατασταθούν συνδυαστικά μαζί, ώστε να συμβάλουν ή και να καλύψουν τις ηλεκτρικές ανάγκες του κτιρίου. Σε αυτή τη περίπτωση προτείνεται δεξαμενή θερμού νερού όπου η θερμότητα που θα προέρχεται από το πλεόνασμα της ενέργειας των υποσυστημάτων (φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες) να μπορεί να αποθηκευτεί.

6.6 ΦΒ/Θ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΟ ΕΜΠΟΡΙΟ

Δεν έχουν αναπτυχθεί πολλά εμπορικά ΦΒ/Θ συστήματα και επίσης δεν έχουν εφαρμοστεί όπως οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες και τα φωτοβολταϊκά. Το εμπορικό μοντέλο που παρουσιάστηκε πρώτο στην αγορά είναι το Multi Solar System της εταιρίας Millenium Electric, το οποίο είναι ένα επίπεδο ΦΒ/Θ σύστημα θέρμανσης νερού και αέρα. Η πρακτική εφαρμογή εμπορικών ΦΒ/Θ συστημάτων είναι κυρίως περιορισμένη στους ΦΒ/Θ συλλέκτες αέρα καθώς η ψύξη μέσω αέρα εφαρμόζεται κυρίως στα κτίρια όπου γίνεται χρήση του θερμού αέρα για τη θέρμανσή του το χειμώνα και για τον αερισμό του κατά τη διάρκεια

του καλοκαιριού. Αποτελεί μια απλή και επιπλέον χαμηλού κόστους τεχνική. Η λειτουργική/αποδοτική αντίθεση μεταξύ των φωτοβολταϊκών κυττάρων, που λειτουργούν αποδοτικά σε χαμηλές θερμοκρασίες, και της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας που είναι χρήσιμη σε υψηλότερες θερμοκρασίες επηρεάζει και τα δύο υποσυστήματα. Τα συγκεντρωτικά ΦΒ/Θ συστήματα γεφυρώνουν αυτή την αντίθεση και καθίστανται έτσι χρήσιμες συσκευές για πολλές πρακτικές εφαρμογές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ΦΒ/Θ συστήματα μπορούν να παρέχουν μια σημαντική παραγωγή θερμότητας, χωρίς όμως η θερμοκρασία του ρευστού να φθάνει σε υψηλά επίπεδα, προκειμένου να κρατηθεί η θερμοκρασία του ΦΒ σε χαμηλό επίπεδο. Αυτή η απαίτηση σημαίνει ότι η εφαρμογή των ΦΒ/Θ συστημάτων είναι περιορισμένη για θέρμανση νερού μέχρι τους 35 με 40°C (νερό που προθερμαίνεται για οικιακή χρήση, για πισίνες, για χρήση σε βιομηχανίες, κ.τ.λ.), για θέρμανση χώρου και φυσικό εξαερισμό κτηρίων.

Λαμβάνοντας υπόψη τις επιπρόσθετες δαπάνες από την προστιθέμενη θερμική μονάδα (μέχρι 10% για το νερό και μέχρι 8% για τον αέρα) παρατηρούμε ότι το επιπλέον κέρδος στην ηλεκτρική απόδοση των υδρόψυκτων και των αερόψυκτων ΦΒ/Θ συστημάτων έναντι του συστήματος PV/FREE είναι χαμηλότερο από το συμπληρωματικό κόστος.

Επομένως το κύριο πλεονέκτημα των υβριδικών ΦΒ/Θ συστημάτων έναντι των κοινών ΦΒ είναι η θερμική παραγωγή και όχι η αύξηση της ηλεκτρικής απόδοσης τους.

Στα ΦΒ/Θ συστήματα με χρήση επιπρόσθετης γυάλινης επιφάνειας έχουμε αύξηση της θερμικής παραγωγής αλλά μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης η οποία μπορεί να αντισταθμιστεί με την τοποθέτηση συμπληρωματικού διάχυτου ανακλαστήρα. Έχει υπολογιστεί ότι ο συνδυασμός τους με τα ΦΒ/Θ συστήματα (PV/T + REF) αυξάνει το συνολικό κόστος περίπου 4%, αλλά η αύξηση της ηλεκτρικής παραγωγής αυξάνεται κατά 16% (για $C_t = 1.35$). Ο συντελεστής συγκέντρωσης από χειμώνα σε καλοκαίρι κυμαίνεται από 1.35 έως 1.55, κάτι που συνεπάγεται ότι το καλοκαίρι, όπου και παρατηρείται η μεγαλύτερη πτώση της ηλεκτρικής απόδοσης των ΦΒ, η αύξηση της ηλεκτρικής παραγωγής που θα έχουμε με τους διάχυτους ανακλαστήρες θα γίνει ακόμη μεγαλύτερη από 16%.

Επομένως, η χρήση των συμπληρωματικών διάχυτων ανακλαστήρων είναι μια νέα μέθοδος για να μειωθεί το κόστος της συνολικής εγκατάστασης των ΦΒ και μια ελπιδοφόρα εφαρμογή για τα υβριδικά ΦΒ συστήματα.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραπάνω ανάλυση είναι τα παρακάτω:

- 1) Η απαγωγή θερμότητας με την κυκλοφορία νερού μέσω εναλλάκτη θερμότητας είναι μεγαλύτερη από ότι με κυκλοφορία αέρα, ειδικά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού όπου η θερμοκρασία του νερού που ρέει στους αγωγούς του δικτύου είναι χαμηλότερη από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.
- 2) Τα ΦΒ/Θ συστήματα με την πρόσθετη τοποθέτηση γυάλινης επιφάνειας αυξάνουν την θερμική απόδοση, αλλά μειώνουν την ηλεκτρική απόδοση λόγω των οπτικών απωλειών.
- 3) Η χρήση του συμπληρωματικού διάχυτου ανακλαστήρα αυξάνει και την ηλεκτρική και την θερμική απόδοση των ΦΒ/Θ συστημάτων.
- 4) Τα ΦΒ/Θ συστήματα με συμπληρωματικούς διάχυτους ανακλαστήρες έχουν μεγαλύτερο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης από ότι τα ΦΒ/Θ συστήματα με ψύξη με νερό.
- 5) Η μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης των ΦΒ με την πρόσθετη τοποθέτηση γυάλινου καλύμματος αντισταθμίζεται με την τοποθέτηση διάχυτων ανακλαστήρων.
- 6) Η βέλτιστη γωνία μεταξύ διάχυτου ανακλαστήρα και ΦΒ πάνελ θα πρέπει να είναι κοντά στις 90° , για να έχουμε πρώτον συντελεστή συγκέντρωσης μεγαλύτερο της μονάδας και δεύτερον ομοιόμορφη κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στο ΦΒ πάνελ.

Η συνεχής βελτίωση των βαθμών απόδοσης των ΦΒ/Θ καθώς και η σταδιακή μείωση των τιμών τους, λόγω της συνεχούς ανάπτυξης της τεχνολογίας κατασκευής των ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται στις ΦΒ κυψέλες, έχει στρέψει το ενδιαφέρον προς αυτά τα συστήματα έναντι των υπολοίπων συστημάτων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πράσινης ενέργειας. Η δυνατότητα εγκατάστασης τους σε αστικά κέντρα, ο μικρός τους όγκος και η δυνατότητα ενσωμάτωσής τους σε κτήρια τα καθιστούν σαν την πιο ελπιδοφόρα λύση για παραγωγή ενέργειας από το σύνολο των Α.Π.Ε.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ν. Καλαμάρας, *Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Θερμικά (ΦΒ/Θ) Συστήματα Νερού*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2007.
- [2] Μ. Μπινώλη, *Προσομοίωση λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου και έλεγχος απόδοσης του*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, ΔΠΘ 2010.
- [3] Ι. Λαγόπουλος, *Πειραματική μελέτη φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτών υμενίων*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ 2011.
- [4] Δ. Κατσαπρακάκης, *Ηλιακή Ενέργεια*, Σημειώσεις, ΤΕΙ Κρήτης.
- [5] http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/D2_Hmiagogoi_2.pdf
- [6] Σ. Τετελένης, *Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών Στοιχείων*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ 2011.
- [7] Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος, Σ. Τσελεπής, Μ. Σουλιώτης και J. Κ. Τοπιί, *Σχεδίαση και οικονομικά στοιχεία για υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά ηλιακά συστήματα*, 3ο Εθνικό Συνέδριο: "Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΣΤΟΧΟ ΤΟΥ 2010", 23 - 25 Φεβρουαρίου 2005, ΑΘΗΝΑ.
- [8] Α. Νικολακοπούλου, *Μελέτη υβριδικού φωτοβολταϊκού θερμικού ηλιακού (PV/T) συστήματος θέρμανσης νερού*, Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών 2012.
- [9] Α. Αποστολοπούλου, *Σύνθετες διατάξεις φωτοβολταϊκών και θερμικών ηλιακών συσκευών*, Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών 2013.
- [10] Λ. Ζαφειρίου και Α. Αποστόλου, *Μέθοδοι βελτίωσης του βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Μέτρηση του βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων συναρτήσει της θερμοκρασίας*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΑΠΘ 2010.
- [11] T. Bergene and O.M. Lovvik, *Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells*, Solar Energy Vol. 75, pp. 453-462 (1995).

- [12] T.T. Chow, *Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model*, Solar Energy Vol. 55, pp. 143-152 (2003).
- [13] T.T. Chow et al, *Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application*, Solar Energy Vol. 80, pp. 298-306 (2006).
- [14] H. P. Garg and R. K. Agarwal, *Some aspects of a PV/T collector/forced circulation flat plate solar water heater with solar cells*, Energy Conversion and Management, Vol. 36, pp. 87-99 (1995).
- [15] H. A. Zondag et al, *The yield of different combined PV-thermal collector designs*, Solar Energy Vol. 74, pp. 253–269 (2003).
- [16] Y. Tripanagnostopoulos et al, *Hybrid photovoltaic/thermal solar systems*, Solar Energy Vol. 72, pp. 217-234 (2002).
- [17] T. T. Chow, *A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology*, Applied Energy Vol. 87, pp. 365-379 (2010).
- [18] A. Ibrahim et al, *Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors*, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 15, pp. 352-365 (2011).
- [19] Σ. Ν. Καπλάνης, *Μηχανική των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων*, εκδόσεις Ίων 2004.
- [20] Π. Γεωργοστάθης, *Μελέτη συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών /θερμικών ηλιακών συλλεκτών*, Διπλωματική Εργασία, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Εφαρμοσμένης Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών 2010.
- [21] J. H. Kim et al, *Experimental performance of heating system with building-integrated PVT (BIPVT) collector*, SHC 2013, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry September 23-25, 2013, Freiburg, Germany.
- [22] Σ. Καλογήρου και Γ. Τρυπαναγνωστόπουλος, *Εφαρμογές υβριδικών φωτοβολταϊκών-θερμικών συσκευών*, Όγδοο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Θεσσαλονίκη 2006.
- [23] Γ. Καράμπαμπας, *Μέθοδοι βελτίωσης της απόδοσης υβριδικών (φωτοβολταϊκών / θερμικών) ηλιακών συλλεκτών αέρα*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2008.
- [24] L. Zhang et al, *Concentrating PV/T Hybrid System for Simultaneous Electricity and Usable Heat Generation: A Review*, International Journal of Photoenergy Article ID 869753 (2012).
- [25] Y. Tripanagnostopoulos et al, *Design and performance of hybrid PV/T solar water heaters*, HPC 2004 – 3rd International Conference on Heat Powered Cycles, Cyprus, October 2004.
- [26] H. A. Zondag, *Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 12, pp. 891–959 (2008).

- [27] R. Daghigh, *Advances in liquid based photovoltaic/thermal (PV/T) collectors*, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 15, pp. 4156–4170 (2011).
- [28] A. Fudholi et al, *Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors*, Energy Conversion and Management Vol. 78, pp. 641-651 (2014).