



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης
Τμήμα Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος



«ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ PV/T HYBRID SOLAR SYSTEM»



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Α. ΛΑΒΙΔΑΣ (Α.Μ 528)

ΧΑΝΙΑ 2008

Κεφάλαιο 1	4
Εισαγωγή	4
1.1 Εισαγωγικά.....	4
1.2 Σκοπός.....	4
1.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	5
1.4 Ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θεωρία των ενεργειακών ζωνών των κρυσταλλικών στερεών.....	5
Κεφάλαιο 2	7
Το φωτοβολταϊκό σύστημα	7
2.1 Το φωτοβολταϊκό σύστημα	7
2.2 Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκού συστήματος.....	9
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση στο φωτοβολταϊκό σύστημα	10
2.4 Πειραματικά αποτελέσματα για την εξάρτηση της ισχύος αιχμής ενός φωτοβολταϊκού από την θερμοκρασία.....	11
Κεφάλαιο 3	14
Γενική περιγραφή υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων	14
3.1 Θερμικά υβριδικά ηλιακά συστήματα	14
3.2 Σχεδίαση φ/β-θερμικού ηλιακού συστήματος	16
3.3 Παράμετροι απόδοσης ενός υβριδικού φ/β-θερμικού ηλιακού συστήματος.....	19
3.4 Η σημασία του ρευστού σε ένα υβριδικό φ/β-θερμικό σύστημα.....	19
3.5 Βελτίωση υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων.....	21
3.5.1 Σύστημα με την χρήση σύνθετων παραβολικών συγκεντρωτών.....	21
3.5.2 Θεωρητική ανάλυση συστήματος με Σ.Π.Σ.....	22
3.5.3 Σύστημα με χρήση διαχεόμενων ενισχυτικών ανακλαστήρων.....	23
3.6 Το κόστος ως κριτήριο επιλογής για τα υβριδικά ηλιακά συστήματα.....	27
Κεφάλαιο 4	30
Μοντέλα υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων	30
4.1 Σύγχρονα μοντέλα υβριδικών φ/β-θερμικών ηλιακών συστημάτων.....	30
4.2 Υβριδικά φ/β-συστήματα με χρήση διαφορετικών τύπων φ/β στοιχείων	32
4.3 Υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα με την χρήση νερού ως μεταφορέα θερμότητας	34
4.4 Υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα με την χρήση αέρα ως μεταφορέα θερμότητας	36

4.5 Ανάλυση υβριδικού φ/β-θερμικού συστήματος με αέρα.....	37
4.6 Σύγκριση υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων με απλά φ/β συστήματα.....	42
Κεφάλαιο 5	47
Εφαρμογές υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων	47
5.1 Εφαρμογές υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων στην βιομηχανία.....	47
5.2 Εφαρμογές υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων για οικιακή χρήση.....	50
5.3 Σύγκριση των υβριδικών φ/β συστημάτων νερού και αέρα.....	54
Συντομεύσεις	56
Συμβολισμοί.....	58
Βιβλιογραφία.....	63

Περίληψη

Τα φ/β συστήματα δίνουν την δυνατότητα να μετατρέψουμε την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα φ/β στοιχεία σε ηλεκτρική ενέργεια δίνοντας έτσι την δυνατότητα να παράγεται ενέργεια χωρίς την χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας. Σε αυτήν την εργασία παρουσιάζονται τα υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα τα οποία μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και ταυτόχρονα θερμική ενέργεια μέσω ρευστών τα οποία χρησιμοποιούν ως μεταφορείς θερμότητας. Η εργασία αποτελεί ανασκόπηση των διαφορετικών ειδών υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων τα οποία έχουν αναπτυχθεί κατά την διάρκεια των ετών. Αναδεικνύεται ότι η χρήση υβριδικών συστημάτων δεν περιορίζεται μόνο σε πειράματα στο εργαστήριο αλλά μπορούν να χρησιμοποιούνται για οικιακούς και βιομηχανικούς σκοπούς βοηθώντας στην ανεξάρτηση της κοινωνίας, κατά ένα μέρος, από την χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Τέλος γίνεται αναφορά στην οικονομική βιωσιμότητα αυτών των συστημάτων

Abstract

The pv-systems provide the ability to convert the solar radiation that hits the pv-cells into electrical energy giving in such way the ability to produce energy without the use of conventional energy sources. This essay is a review of the different types of hybrid pv-thermal systems which can produce both electrical energy and thermal energy through extraction fluids which act as converters of heat. In this essay different types of hybrid pv-thermal systems are presented, types which have developed through the years. It shows that the use of hybrid systems is not only bound to lab experiments but these systems can be used for domestic and industrial purposes helping society to depend less on the use of conventional energy sources for the production of thermal and electrical energy. Finally there is the report of the economical viability of these systems.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικά

Η ανάπτυξη του πολιτισμού βασίζεται στην αξιοποίηση της ενέργειας και την διοχέτευση αυτής σε συστήματα τα οποία βοηθούν στην καθημερινότητα αλλά και στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και βιομηχανίας. Αρχικό καύσιμο παραγωγής ενέργειας ήταν το κάρβουνο το οποίο αποτελούσε την κύρια καύσιμη ύλη και σε αυτό βασίστηκε κυρίως η βιομηχανική επανάσταση στις αρχές του προηγούμενου αιώνα. Στην σύγχρονη εποχή χρησιμοποιείται κυρίως το πετρέλαιο το οποίο επέφερε αλλαγές στην βιομηχανία αλλά και στην καθημερινή ζωή. Αυτά τα δυο είδη σε συνδυασμό και με άλλα ορυκτά καύσιμα (π.χ. λιγνίτης) οδήγησαν την ανάπτυξη της ανθρωπότητας στο σημείο που έχει φτάσει σήμερα. Εκτιμάται ότι τα συμβατικά καύσιμα καλύπτουν το 85% περίπου της καταναλισκόμενης ενέργειας στις αναπτυγμένες χώρες και το 55% στις υπό ανάπτυξη χώρες.

Όμως τα τελευταία χρόνια εκτός από την αύξηση των εκπομπών CO_2 από την καύση αυτών των πρώτων υλών και την επίδραση του κλίματος από αυτή (φαινόμενο θερμοκηπίου), εκτιμάται ότι με τον σημερινό ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας αυτές οι πηγές ενέργειας δεν θα είναι ικανές να συντηρήσουν την κοινωνία επαρκώς αφού τα αποθέματα τους δεν είναι ανεξάντλητα και η δημιουργία πετρελαίου είναι μια χρονοβόρα διαδικασία που γίνεται στο υπέδαφος και απαιτεί πολλά εκατοντάδες χρόνια.

Για να λυθεί το πρόβλημα της μόλυνσης του περιβάλλοντος αλλά και της απεξάρτησης της ενεργειακής παραγωγής από τα ορυκτά καύσιμα αναπτύσσονται τεχνολογίες που επιτρέπουν παραγωγή ενέργειας χωρίς ρύπους και χωρίς την χρήση καυσίμων, με την χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε) και αφορούν την ηλιακή ενέργεια, την αιολική ενέργεια κλπ.

1.2 Σκοπός

Στόχος της εργασίας είναι η ενασχόληση με την φωτοβολταϊκή ενέργεια και τρόπους εξέλιξης των απλών φ/β συστημάτων σε πιο οικονομικά αλλά και ταυτόχρονα πιο αποδοτικά συστήματα, όπως τα υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα.

Παρόλο που το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είχε παρατηρηθεί το 1839 από τον Becquerel, η πρώτη κατασκευή του πρώτου ηλιακού στοιχείου Si έγινε το 1954 με απόδοση 6% από τους Fuller και Pearson. Οι αρχικές κατασκευές ήταν υψηλού κόστους και μικρής απόδοσης (5-10%) και κατασκευάζονταν από κρυσταλλικό πυρίτιο c-Si. Σε γενικές γραμμές το φ/β

στοιχείο είναι ένα σύστημα δυο υλικών σε επαφή το οποίο φωτίζεται και εμφανίζει στα άκρα του συνεχή ηλεκτρική τάση. Τα δυο στρώματα αποτελούνται από το ίδιο υλικό το ένα στρώμα από ημιαγωγό τύπου n και το άλλο τύπου p [1].

1.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Για να προκύψει το φ/β φαινόμενο απαιτείται η δημιουργία διάταξης δυο φωτοαγωγίμων ημιαγωγικών υλικών σε επαφή (π.χ τύπου p και n) .

Όταν ένα φωτόνιο που προέρχεται από μια ακτίνα φωτός απορροφηθεί από ένα ασθενές ηλεκτρόνιο ενός ατόμου η ενέργεια του ηλεκτρονίου αυξάνεται όσο είναι η ενέργεια του φωτονίου. Εάν η ενέργεια του φωτονίου είναι ίση ή παραπάνω από αυτή του διάκενου του ημιαγωγού το ηλεκτρόνιο με την περίσσια ενέργεια που αποκτάει θα μεταφερθεί στην αγωγίμη περιοχή όπου θα μπορεί να κινηθεί πιο εύκολα. Εάν όμως η ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι μικρότερη τότε θα παραμείνει εκεί που βρίσκεται αφού δεν έχει την απαιτούμενη ενέργεια για να μετακινηθεί. Σε αυτήν την περίπτωση η περίσσια ενέργεια των ηλεκτρονίων θα μετατραπεί σε περίσσια κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που θα δώσει αύξηση της θερμοκρασίας [1].

1.4 Ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θεωρία των ενεργειακών ζωνών των κρυσταλλικών στερεών

Ένας χημικά καθαρός, κρυσταλλικός ημιαγωγός ονομάζεται ενδογενής. Αυτός ο ημιαγωγός συνήθως αποτελείται από πυρίτιο (Si) ή γερμάνιο (Ge) και λόγω της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του (επιλεκτικά περνάει φορτίο ρεύματος) διαχωρίζεται από τους αγωγούς (επιτρέπουν σε όλο το φορτίο ρεύματος να περάσει) και τους μονωτές (δεν επιτρέπουν να περάσει φορτίο ρεύματος).

Έτσι λοιπόν τα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την συμπλήρωση των ενεργειακών τους ζωνών [1] :

- **Μονωτής** : Ως μονωτής ορίζεται το στερεό το οποίο διαθέτει πλήρως γεμάτες και πλήρες άδειες ζώνες, με ενεργειακό χάσμα, μεταξύ ανώτερης κατειλημμένης και της επόμενης άδειας, μεγαλύτερο, από $\approx 2.5eV$.
- **Ημιαγωγός** : Ως ημιαγωγός ορίζεται το στερεό το οποίο είναι στο απόλυτο μηδέν, έχει ενεργειακό χάσμα E_g από κλάσμα του eV , μέχρι $\approx 2.5eV$.
- **Αγωγός** : Ως αγωγοί ορίζονται τα στερεά τα οποία διαθέτουν μερικές συμπληρωμένες ενεργειακές ζώνες.

Στην κατηγορία των αγωγών εντάσσονται τα μέταλλα και τα ημιμέταλλα τα οποία παρουσιάζουν σχεδόν μεταλλική αγωγιμότητα που οφείλεται στην μερική επικάλυψη κάποιων ανώτερων ενεργειακών ζωνών, που εξηγείται ως εξής : τα ηλεκτρόνια της χαμηλής ενεργειακής ζώνης περνούν ανέξοδα στην επόμενη κενή ζώνη συμβάλλοντας έτσι στην αγωγιμότητα του υλικού [1].

Κεφάλαιο 2

Το φωτοβολταϊκό σύστημα

2.1 Το φωτοβολταϊκό σύστημα

Η ένωση πολλών φ/β στοιχείων μας δίνει ένα φ/β πλαίσιο.

Το κύριο υλικό που χρησιμοποιείται σήμερα για την κατασκευή φ/β πλαισίων είναι το πυρίτιο (Si) το οποίο μετά από επεξεργασία που υφίσταται αποκτάει καθαρότητα 99,99999%.

Οι κατηγορίες που χωρίζονται τα φ/β στοιχεία πυριτίου είναι [1] :

- Φ/Β μονοκρυσταλλικού πυριτίου :

Μεγάλο πάχος της τάξης των ~300μm.

Απόδοση κυψελίδας 21%-24%.

Απόδοση πλαισίου 13%-16%.

Χρώμα σκούρο μπλε ή μαύρο.

Υψηλό κόστος.

- Φ/Β πολυκρυσταλλικού πυριτίου :

Το πάχος του αποτελείται από λεπτά επιστρώματα 10-50μm πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Απόδοση κυψελίδας 17%-20%.

Απόδοση πλαισίου 10-14%.

Χρώμα γαλάζιο.

Κόστος χαμηλότερο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

- Φ/Β άμορφου πυριτίου :

Το πάχος του αποτελείται από διαδοχικές ενώσεις λεπτών επιστρώσεων από διαφορετικά υλικά όπως κράμα πυριτίου με άνθρακα ή γερμάνιο.

Απόδοση κυψελίδας 13%.

Απόδοση πλαισίου 13%.

Κόστος γενικά χαμηλό.

Στην κατηγορία αυτή χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά για την κατασκευή ενός φ/β στοιχείου τύπου λεπτής επίστρωσης, όπως παρατίθενται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 : Υλικά κατασκευής φ/β στοιχείων

Βασικά υλικά Φ/Β στοιχείου	Χαρακτηριστικά	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ετερένωση Cu_2S/CdS	Πολυκρυσταλλικό Απόδοση $\approx 10\%$	Χαμηλό κόστος	Μη σταθερή απόδοση του Φ/Β στοιχείου
Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός $CuInS_2$ ή CIS	Άμεσο ενεργειακό διάκενο υψηλή απορρόφηση σε λεπτό στρώμα. Απόδοση 12%-13% Απόδοση πλαισίου 8%-11% με προσθήκη Ga αυξάνουμε την απόδοση στο 17%	Χαμηλό κόστος Σταθερότητα ίση με του c-Si.	Χαμηλή απόδοση πλαισίου
Τελουριούχο κάδμιο CdTe	Ιδανικό ενεργειακό διάκενο	Εξαιρετική εκμετάλλευση ηλιακού φάσματος.	Μη επαναλήψιμες ιδιότητες. Δυσκολία δημιουργίας μεταλλικών επαφών.
Αρσενικούχο γάλλιο GaAs	Υψηλότερη απόδοση $\approx 25,5\%$ (κυψέλης) $\approx 22\%$ (πλαίσου)	Υψηλή απόδοση πλαισίου	Υψηλό κόστος κατασκευής

➤ Φ/Β στοιχεία ταινίας σιλικόνης :

Το πάχος τους αποτελείται από λεπτό τηγμένο υλικό πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Απόδοση κυψελίδας $\approx 13\%$.

Απόδοση πλαισίου $\approx 13\%$.

Κόστος κατασκευής υψηλό.

Τα φ/β στοιχεία αξιοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών και σε αντίθεση με τις άλλες πηγές ενέργειας συμβατικές ή μη. Τα φ/β διακρίνονται γιατί έχουν [1] :

- Άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε μικρή ή μεγάλη ισχύ.
- Υπάρχει η δυνατότητα σταδιακής υλοποίησης της κατασκευής του συστήματος.
- Έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων κατά την λειτουργία τους.
- Δεν υπάρχει δημιουργία θορύβου κατά την λειτουργία τους.
- Έχουν ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης.
- Παρέχουν μεγάλη αξιοπιστία
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Δεν επηρεάζουν πολύ την αισθητική παρουσία ενός χώρου.

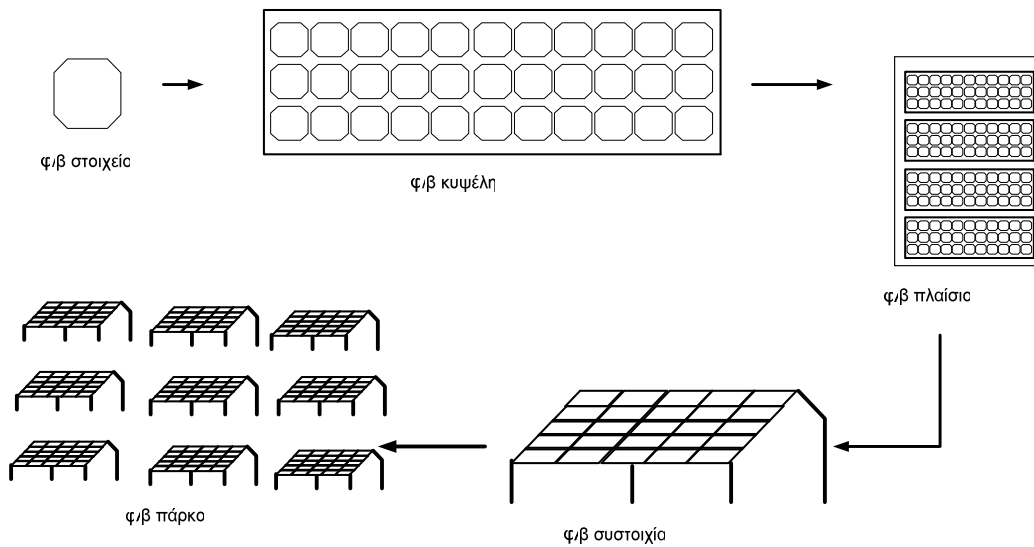
Όμως παρά τα εμφανή πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα φ/β συστήματα θεωρούνται ακόμα ακριβά, αφού το υψηλό οικονομικό κόστος τους τα καθιστά ακριβές εναλλακτικές λύσεις. Επιπλέον δεν παρέχουν εγγυημένη παραγωγή ισχύος.

2.2 Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκού συστήματος

Τα φ/β πλαίσια τοποθετούνται με δύο τρόπους είτε σε σειρά είτε παράλληλα. Η χωροταξική τους κατανομή εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες.

- Εάν ζητείται η αύξηση της τάσης εξόδου τοποθετείται μεγαλύτερος αριθμός φ/β στοιχείων σε σειρά.
- Εάν από την άλλη ζητείται αύξηση της έντασης του ρεύματος τότε τοποθετούνται τα περισσότερα φ/β στοιχεία παράλληλα.

Στο Σχήμα 1 φαίνεται πώς από ένα φ/β στοιχείο γίνεται να κατασκευάσουμε ένα φ/β πάρκο. Αρχικά υπάρχει ένα φ/β στοιχείο από μόνο του, στην συνέχεια τοποθετούνται πολλά στοιχεία μαζί και έτσι δημιουργείται ένα φ/β πλαίσιο. Τα φ/β πλαίσια έχουν μικρό βάρος και όγκο και είναι εύκολα στην αφαίρεση και μεταφορά τους χωρίς επιμέρους επέμβαση στο σύστημα. Με παράταξη πολλών φ/β πλαισίων σε σειρά ή παράλληλα πάνω σε σταθερή ή περιστρεφόμενη επιφάνεια έχουμε την δημιουργία μιας φ/β συστοιχίας. Τέλος ο συνδυασμός πολλών φ/β συστοιχιών μας δίνει ένα φ/β πάρκο το οποίο είναι σε θέση να παράγει ρεύμα και να το μετατρέπει από συνεχές σε εναλλασσόμενο με την χρήση κατάλληλων DC/AC μετατροπέων [1].



Σχήμα 1 : Σχηματική διάταξη για την δημιουργία ενός φ/β πάρκου.

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση στο φωτοβολταϊκό σύστημα

Οι παράμετροι που μειώνουν την απόδοση τους των φ/β συστημάτων είναι : [1].

1. Ο παράγοντας γήρανσης του φ/β που προσδιορίζει την αλλοίωση της κυψελίδας και κατά επέκταση την πτώση στην ισχύ αιχμής του πλαισίου. Οι αλλοιώσεις αυτές είναι μικρές οπότε και η πτώση τάσης αιχμής θεωρείται μικρή. Οφείλονται κυρίως στην υπερθέρμανση των φ/β στοιχείων και προκαλούν ετήσια μείωση της ισχύος αιχμής κατά $\approx 1\%$ ανά έτος χρήσης.

Οι οπτικές ενεργειακές απώλειες που καθορίζονται από την απόκλιση λειτουργίας του συστήματος εάν αυτό ήταν σε πρότυπες συνθήκες (Π.Σ), όπου πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας $1kW / m^2$, θερμοκρασία φ/β στοιχείου $(25 \pm 2)^\circ C$. Όπως επίσης και η διαφοροποίηση ανακλαστικότητας του πλαισίου σε σχέση με την ανακλαστικότητα σε πρότυπες συνθήκες. Παρατηρείται αυξημένη ανακλαστικότητα του οπτικού συστήματος όψεως του φ/β πλαισίου (υαλοπίνακας+αντί-ανακλαστικό επίστρωμα+υλικό φ/β κυψελίδων) σε σχέση με τις Π.Σ σε γωνίες άνω των 60° . Η αύξηση της ανακλαστικότητας του συστήματος, μεταφράζεται σε απώλειες $\approx 3\%$ ανά έτος.

2. Η επίδραση διαφοροποίησης φάσματος ακτινοβολίας σε σχέση με τις φασματικές απώλειες. Αφορούν την επίδραση που έχει η διαφοροποίηση του φάσματος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας. Οι απώλειες αυτές θεωρούνται σημαντικές σε φ/β πλαίσια στενής φασματικής απορρόφησης.

3. Απώλειες που αφορούν την πόλωση προσπίπτουσας-διερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας ($\approx 2\%$ ανά έτος).
4. Απώλειες λόγω χαμηλής τιμής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στο φ/β πλαίσιο, δίνουν χαμηλότερη ισχύ.
5. Καθαρότητα της επιφάνειας του Φ/Β πλαισίου (σκόνη, γύρη, μικροσωματίδια κ.α) που παρεμποδίζουν μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας να δεσμευτεί από το πλαίσιο.
6. Η επίδραση της θερμοκρασίας στην κυψελίδα. Όσο υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας υπάρχει αύξηση του I_{sc} και μείωση του V_{oc} . Επομένως υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ ισχύος αιχμής και θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στην Εξίσωση (1), και παρουσιάζουν γραμμική συσχέτιση.

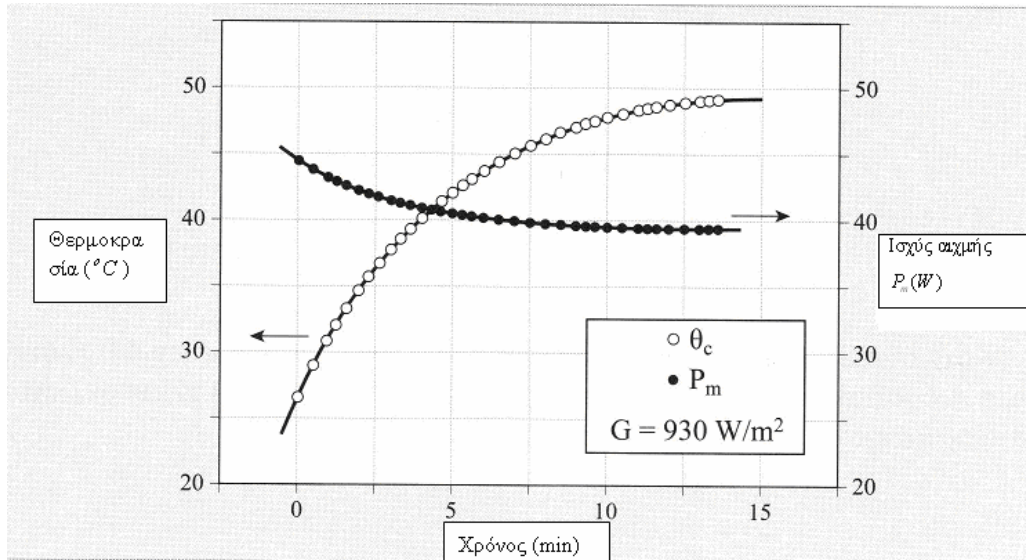
$$\text{Ισχύς αιχμής: } P_m = V_m \cdot I_m \approx \frac{E}{E_{STC}} \cdot P_p \cdot (1 + \gamma_{Pm} \cdot (\theta_c - \theta_{STC})) \quad \text{Εξ. (1)}$$

Όπου $\gamma_{Pm} = \frac{dP}{P_m dT}$ ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος του φ/β στοιχείου.

Όπου $P_p = V_{m,STC} \cdot I_{m,STC}$ μέγιστη ηλεκτρική ισχύς σε πρότυπες συνθήκες.

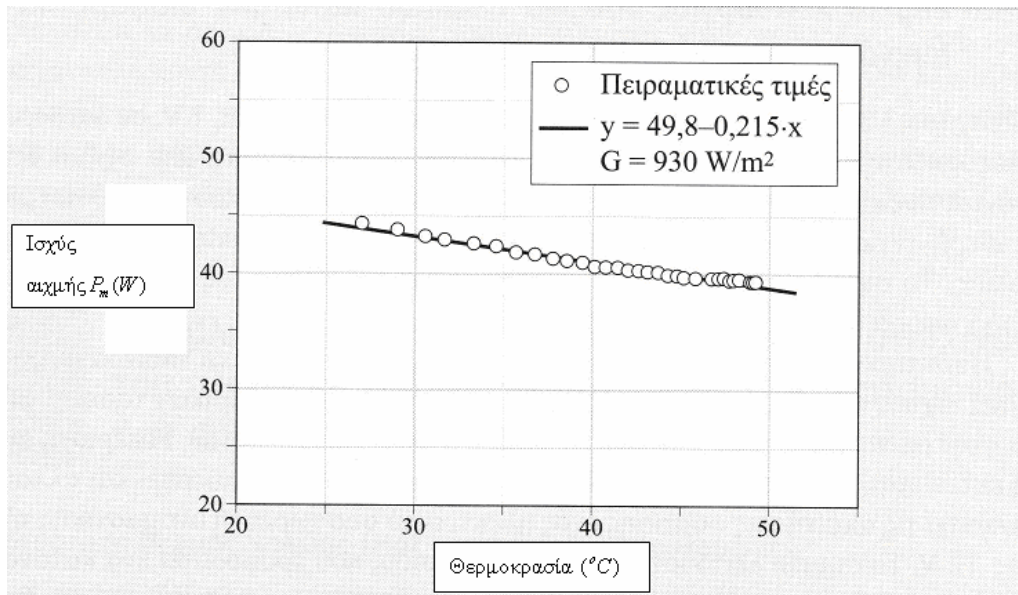
2.4 Πειραματικά αποτελέσματα για την εξάρτηση της ισχύος αιχμής ενός φωτοβολταϊκού από την θερμοκρασία

Η μέτρηση της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος ενός φ/β πλαισίου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, απαιτεί την χρήση ειδικών διατάξεων για να γίνει η καταγραφή της καμπύλης I-V κάτω από σταθερή πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και σταθερή θερμοκρασία πλαισίου. Στο Σχήμα 2 δίνεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας μέγιστης ισχύος ενός φ/β πλαισίου κρυσταλλικού πυριτίου (Siemens M55) το οποίο λειτουργεί για δεκατέσσερα χρόνια. Η διάταξη που χρησιμοποιείται έχει χρόνο καταγραφής $\approx 200ms$, οι διαδοχικές μετρήσεις απέχουν κατά 20 sec και η μεταβολή της θερμοκρασίας στον χρόνο είναι αμελητέα [1].



Σχήμα 2 : Γραφική παράσταση μέγιστης ισχύος – θερμοκρασίας φ/β πλαισίου.

Σύμφωνα με το Σχήμα 2 και των μετρήσεων που μας προσφέρει μπορεί να δημιουργηθεί μια γραφική παράσταση μέγιστης ισχύος σε σχέση με την θερμοκρασία του φ/β πλαισίου. Η νέα γραφική παράσταση φαίνεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3 : Εξάρτηση μέγιστης ισχύος από την θερμοκρασία.

Από το παραπάνω σχήμα είναι εμφανές πως όσο υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας η μέγιστη ισχύς που παράγει το φ/β πλαίσιο μειώνεται. Το συμπέρασμα από την παραπάνω γραφική παράσταση είναι πως ανά έτος θα υπάρξει μείωση της απόδοσης του πλαισίου που χρησιμοποιείται.

Στο Σχήμα 3 η σύγκριση της αναλυτικής μορφής της ευθείας που προσαρμόζεται καλύτερα στα πειραματικά σημεία δίνεται από την Εξίσωση 2 [1].

$$P_m(\theta_c, E) = \frac{E}{E_{STC}} \cdot P_p \{1 + \gamma_{Pm} \cdot (\theta_c - \theta_{STC})\} \quad \text{Εξ.}(2)$$

Όπου $\gamma_{Pm} = \frac{dP}{P_m dT}$ ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος του Φ/Β πλαισίου.

$$\theta_{STC} = 25^{\circ} C.$$

$$P_m = 930W / m^2 \text{ στους } 25^{\circ} C \text{ για τον συντελεστή } \gamma_{Pm}.$$

Αντικαθιστώντας τα γ_{Pm} , θ_{STC} , P_m προκύπτουν οι εξισώσεις

$$0.93P_p \cdot (1 - 25 \cdot \gamma_{Pm}) = 49.8W \quad \text{Εξ.}(3)$$

$$0.93 \cdot \gamma_{Pm} \cdot P_p = -0.215W / K \quad \text{Εξ.}(4)$$

Επιλύοντας τις εξισώσεις το $P_p = 47.8 W$ και το $\gamma_{Pm} = 0.0048 K^{-1}$

Έτσι λοιπόν κατά την δεκαετηρατή χρήση του συγκεκριμένου φ/β παρατηρείται ότι η ποσοστιαία ελάττωση ισχύος αιχμής του φ/β (γήρανση πλαισίου) είναι κατά προσέγγιση :

$$\frac{\Delta P_p}{P_p(\text{αρχικο})} = 13\% \quad \text{Εξ.}(5)$$

Οπότε υπάρχει μείωση της τάξης του $\approx 1\%$ ανά έτος [1].

Κεφάλαιο 3

Γενική περιγραφή υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων

3.1 Θερμικά υβριδικά ηλιακά συστήματα

Όπως προαναφέρθηκε η ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία είναι μια καθαρή μορφή ενέργειας που ενδέχεται στο μέλλον να καλύπτει μεγάλο μέρος της ζήτησης της ενέργειας παγκοσμίως.

Ένα σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει την ηλιακή ακτινοβολία κυρίως με δυο τρόπους [2]:

- Με μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε θερμική ενέργεια. Δηλαδή όταν ο θερμικός συλλέκτης του συστήματος θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία και μεταφέρει αυτή την θερμότητα στο ρευστό που υπάρχει στο σύστημα.
- Με μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτήν την περίπτωση ο συλλέκτης του συστήματος χρησιμοποιεί τις φ/β κυψέλες που διαθέτει ώστε η ηλιακή ενέργεια να μετατραπεί σε ηλεκτρική.

Βάση λοιπόν των δύο αυτών παραπάνω τρόπων εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας τα δύο αυτά διαφορετικά συστήματα μπορούν να συνδυαστούν και να δώσουν ένα νέο σύστημα, το φ/β-θερμικό υβριδικό ηλιακό σύστημα, του οποίου η ονομασία απευθύνεται σε συστήματα τα οποία έχουν θερμικούς συλλέκτες αλλά ταυτόχρονα χρησιμοποιούν φ/β κυψέλες σαν ολοκληρωμένο μέρος του συστήματος απορρόφησης. Το νέο υβριδικό σύστημα είναι σε θέση να παράγει ταυτόχρονα θερμική και ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία που έρχεται σε επαφή με τους νέους αυτούς συλλέκτες [2].

Με την παραπάνω κατασκευή μπορεί να αξιοποιηθεί ο παράγοντας θέρμανσης του φ/β πλαισίου από την ηλιακή ακτινοβολία, χωρίς αυτός να μειώνει την ηλεκτρική αποδοτικότητα των φ/β κυψελών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την χρήση των υβριδικών φ/β-θερμικών συλλεκτών είναι δυνατή η απομάκρυνση της θερμότητας που αναπτύσσεται πάνω στην επιφάνεια των κυψελών και η εκμετάλλευση της ώστε να επιτυγχάνεται τελικά την ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα φ/β-θερμικά υβριδικά συστήματα αποτελούνται συνεπώς από φ/β κυψέλες οι οποίες είναι συνδεδεμένες με συσκευές μετάδοσης θερμότητας. Η ολική ενέργεια που παράγεται από αυτά τα συστήματα (θερμική και ηλεκτρική) εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται το πλαίσιο, την θερμοκρασία περιβάλλοντος, την ταχύτητα του ανέμου, την θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος και τον ρυθμό μεταφοράς της θερμότητας [2].

Οι πρώτοι ερευνητές που μελέτησαν τα φ/β-υβριδικά ηλιακά συστήματα ήταν οι Kern και Russell [3] το 1978 που ουσιαστικά έδωσαν και τις βασικές ιδέες του συστήματος με χρήση νερού ή αέρα σαν μέσο μετάδοσης θερμότητας.

Το 1979 ο Florschuetz [4] πρότεινε μια επέκταση του μοντέλου Hottel-Whiller για την ανάλυση ενός υβριδικού συστήματος.

Το 1979 ο Hendrie [5] παρουσίασε ένα μοντέλο ενός φ/β-θερμικού υβριδικού συστήματος χρησιμοποιώντας συμβατικές τεχνικές θερμικών συλλεκτών.

Το 1981 ο Raghuraman [6] παρουσίασε αριθμητικές μεθόδους που προβλέπουν τις αποδόσεις των υβριδικών φ/β-θερμικών ηλιακών συστημάτων.

Το 1985 οι Cox και Raghuraman [7] με την βοήθεια της χρήσης υπολογιστή μελέτησαν με προσομοίωση υβριδικά συστήματα που είχαν ως μέσον μεταφοράς θερμότητας αέρα.

Το 1986 ο Lalovic [8] πρότεινε ένα νέο τύπο διαφανούς κυψέλης άμορφου πυριτίου (a-Si) σαν μια βελτίωση για την μείωση του κόστους των υβριδικών φ/β-θερμικών ηλιακών συστημάτων.

Το 1988 ο Loferski [9] έδωσε αποτελέσματα για φ/β-θερμικό ηλιακό υβριδικό σύστημα που χρησιμοποιούσε αέρα. Το συγκεκριμένο σύστημα τοποθετήθηκε σε κτίριο με κατοικίες.

Το 1991 ο Bhargava [10] και το 1994 ο Prakash [11] παρουσίασαν αποτελέσματα για τα υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα που αφορούσαν την επίδραση του ρυθμού παροχής αέρα, το μήκος του αεραγωγού, το μήκος και κλάσμα της επιφάνειας που καλύπτεται με απορροφητικές πλάκες στα συστήματα αυτά.

Όσον αφορά τα υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα αέρα η θερμική τους απόδοση εξαρτάται από τον ρυθμό ροής του αέρα, το βάθος του αεραγωγού και το μήκος του συλλέκτη. Για υψηλότερες τιμές ροής του αέρα σε ένα υβριδικό φ/β-θερμικό σύστημα ένα μικρότερο μήκος αεραγωγού δίνει απόδοση $\approx 55\%$ (οι αποδόσεις βασίζονται σε θεωρητικά μοντέλα). Τέλος και για τα δύο παραπάνω υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση είναι η κατανομή των φ/β κυψελών μέσα στο πλαίσιο [2][12].

Το 1994 ο Takashima [13] πρότεινε την τοποθέτηση ενός φ/β πλαισίου πάνω σε ένα θερμικό συλλέκτη με την δημιουργία κενού μεταξύ του θερμικού συλλέκτη και του πλαισίου έτσι ώστε να υπάρχει ψύξη στο σύστημα.

Το 1995 ο Bergene και ο Lonvik [14] έδωσαν ένα λεπτομερές φυσικό μοντέλο και αλγορίθμους για ποσοτική πρόβλεψη της απόδοσης του υβριδικού φ/β-θερμικού συστήματος. Με την χρήση υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων με συγκεντρωτικούς συλλέκτες επιτυγχάνεται μείωση του κόστους στα φ/β αφού τα πάνελ μπορούν να συγκεντρώνουν

μεγαλύτερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα να υπάρχει αύξηση στην απόδοση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση λιγότερων πλαισίων. Όμως χρειάζεται να γίνουν και κάποιες ανάλογες ρυθμίσεις στο σύστημα. Τα συστήματα που χρειάζονται τους ανακλαστήρες είναι κυρίως φωτοσκιασμένες εγκαταστάσεις σε κτίρια. Οι σταθεροί κατοπτρικοί ενισχυτικοί ανακλαστήρες μπορεί να είναι μια καλή εναλλακτική λύση όμως ο συνδυασμός τους με φ/β στοιχεία δεν είναι εύκολος, και αυτό λόγω της ποικιλότητας της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας που καταλήγει σε μια μη σταθερή πυκνότητα φωτισμού στην επιφάνεια του φ/β μειώνοντας έτσι την ηλεκτρική απόδοση του συστήματος [12].

Ένα σημαντικό μέρος που είναι αποφασιστικό για την κοστολόγηση ενός υβριδικού φ/β-θερμικού συστήματος είναι η φ/β κυψέλη. [12] Η έκταση των φ/β κυψελών που απαιτεί ένα υβριδικό φ/β-θερμικό ηλιακό σύστημα το οποίο θα παράγει ταυτόχρονα θερμότητα και ηλεκτρισμό εξαρτάται από το ποσό της ενέργειας που απαιτεί το ρευστό ώστε να κινείται μέσα στο σύστημα και να μπορεί να δεσμεύει την θερμότητα από τις φ/β κυψέλες.

Μια ακόμη τεχνική για την μείωση του κόστους είναι η χρήση ηλιακού συστήματος συγκέντρωσης στο σύστημα. Το 1991 ο Garg [15] παρουσίασε την επίδραση που έχουν οι ενισχυτές ακτινοβολίας σε ένα φ/β.

Μεταξύ του 1998 και 2000 ο Garg και ο Adhikari [16], [17] ολοκλήρωσαν και παρέδωσαν την ανάλυση της απόδοσης ενός υβριδικού φ/β-θερμικού συλλέκτη με ολοκληρωμένο κύκλωμα αυλακώσεων με Σ.Π.Σ.

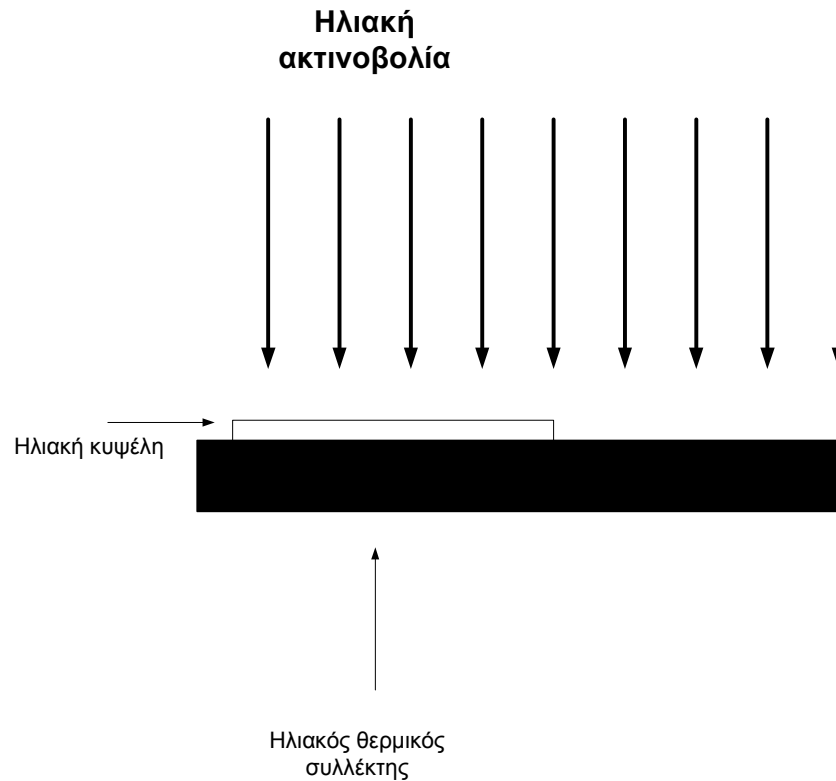
Και οι δύο παραπάνω μελέτες έδειξαν ότι η ολική απόδοση με ανακλαστήρα είναι λίγο μεγαλύτερη από ότι η απόδοση σε συστήματα χωρίς ανακλαστήρες [2]. Λόγω της αυξημένης ηλιακής ακτινοβολίας το μέσο επίπεδο και η θερμοκρασία των φ/β κυψελών αυξήθηκε. Αφού τέθηκε σε λειτουργία το σύστημα με ανακλαστήρα, παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας και μείωση της ηλεκτρικής αποδοτικότητας.

3.2 Σχεδίαση φ/β-θερμικού ηλιακού συστήματος

Όπως αναφέρεται και παραπάνω τα υβριδικά φ/β συστήματα άρχισαν να ερευνώνται εκτενώς ήδη από το 1978 [3], θεωρητικά αλλά και πρακτικά. Μέσω λοιπόν των μελετών αποδείχθηκε ότι τέτοιου είδους υβριδικά συνδυασμένα συστήματα είναι πιο αποδοτικά στην παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας σε σύγκριση με την κάθε τεχνική ξεχωριστά [18].

Συνήθως για να κατασκευαστεί ένα υβριδικό σύστημα πρέπει η ηλιακή κυψέλη και ο ηλιακός θερμικός συλλέκτης να μην έχουν το ίδιο μέγεθος. Όπως στο Σχήμα 4, η κυψέλη είναι μικρότερη του θερμικού συλλέκτη. Με την διάταξη αυτή παρατηρείται καλύτερη λειτουργία και απόδοση στο σύστημα.

Στο Σχήμα 4 δίνεται η κατασκευή ενός απλού υβριδικού φ/β-θερμικού ηλιακού συστήματος [19].



Σχήμα 4 : Σχηματική απεικόνιση απλού υβριδικού συστήματος

Η ηλιακή ακτινοβολία προσκρούει στο σύστημα το οποίο αποτελείται από ηλιακή κυψέλη και έναν θερμικό συλλέκτη. Λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας του θερμικού συλλέκτη το σύστημα παράγει ταυτόχρονα περισσότερη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Αυτό συμβαίνει γιατί η θερμική απόδοση του συστήματος αυξάνεται, αφού απορροφά ο θερμικός συλλέκτης ηλιακή ακτινοβολία αλλά και θερμότητα από την κυψέλη κάνοντας αποδοτικότερη την μετατροπή της σε ηλεκτρική.

Έτσι λοιπόν η θερμική ισχύς που παράγεται από το σύστημα είναι [18]:

$$P_{p\theta} = G \cdot (1 - R) \cdot (1 - n) \quad \text{Εξ. (6)}$$

Η ενέργεια μεταφέρεται με θερμικό συντελεστή και με την απόδοση να είναι 0.5 – 0.7 το οποίο χαρακτηρίζει τον ηλιακό θερμικό συλλέκτη (Η.Θ.Σ).

Η συνολική θερμότητα που παίρνει ο συλλέκτης είναι :

$$W_h = Gn_c \cdot [(1-R) \cdot (1-n) \cdot A_p + (A_c - A_p)] = Gn_c \cdot A_c \cdot [1 - A_p / A_c \cdot (R + n + Rn)]$$

Εξ.(7)

Θεωρείται ότι η απόδοση στον συλλέκτη είναι η ίδια στο κομμάτι που εκτίθεται στην ακτινοβολία και ίδια στο κομμάτι του θερμικού συλλέκτη που καλύπτεται από την φ/β κυψέλη. Άρα η θερμική αποδοτικότητα n_c^* του (Η.Θ.Σ) στο φ/β υβριδικό σύστημα θα είναι:

$$n_c^* = n_c \cdot [1 - A_p / A_c \cdot (R + n + Rn)] \quad \text{Εξ.(8)}$$

Η ηλεκτρική απόδοση της ηλιακής κυψέλης είναι συνήθως της τάξης του -10% έως 20%, ο συντελεστής ανάκλασης είναι συνήθως ο ίδιος όταν χρησιμοποιούνται καλύμματα αντί-ανάκλασης, αλλιώς κυμαίνεται από 30–35%, και ο συντελεστής $(R + n + Rn)$ θα είναι από 0.2-0.6. Συνεπώς εάν ο παραπάνω συντελεστής είναι κοντά στο 1 θα υπάρχουν μεγάλες θερμικές απώλειες από το (Η.Θ.Σ), έτσι λοιπόν η αναλογία πρέπει να είναι σημαντικά μικρότερη του 1. Όπου $A_p / A_c \leq 0.25$ (επιφάνεια ηλιακού θερμικού συλλέκτη προς επιφάνεια φ/β κυψέλη) [18].

Η ολική ισχύς (θερμική και ηλεκτρική) είναι :

$$W_{tot} = Gn_c \cdot A_c \cdot [1 - A_p / A_c \cdot (R \cdot (1 + n/n_c) - n \cdot (n_c^{-1} + R - 1))] \quad \text{Εξ.(9)}$$

Σημαντικός παράγοντας σε τέτοια συστήματα είναι ότι η αποδοτικότητα υβριδικών συλλεκτών εξαρτάται από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με την θερμότητα που παράγει ο ηλιακός συλλέκτης. Έτσι λοιπόν η ολική απόδοση ενός τέτοιου συλλέκτη μπορεί να υπολογιστεί σαν το άθροισμα της ποσότητας ηλεκτρικής και θερμικής απόδοσης που παράγει ένα τέτοιο σύστημα.

Ο Bosanac [19] όρισε την ηλεκτρική απόδοση σαν το ολικό ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που αποδίδεται για ένα χρόνο. Τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν από τον 1^ο θερμοδυναμικό νόμο και 2^ο θερμοδυναμικό νόμο και η απελευθερωμένη ενέργεια σαν η ολική ενέργεια που ελευθερώνει σε ένα χρόνο και είναι μέρος της ενέργειας που, θεωρητικά έστω, θα μπορεί να μετατραπεί ώστε να λειτουργεί σαν μια διαδικασία Carnot.

Ο Coventry [20] υποστηρίζει ότι η απελευθερωμένη ενέργεια, γνωστή και ως διαθέσιμη, ορίζεται σαν το μέγιστο θεωρητικό έργο που δεσμεύει το σύστημα αφού γυρνάει για έρθει σε ισοροπία με το περιβάλλον. Ο φορέας της θερμικής ενέργειας σχετίζεται με το αν το φ/β υβριδικό σύστημα χρησιμοποιεί αέρα ή νερό για μέσο μετάδοσης θερμότητας.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ένα υβριδικό φ/β-σύστημα χρησιμοποιεί την θερμότητα που αποκτούν τα φ/β στοιχεία κατά την έκθεση τους στον ήλιο ενώ ταυτόχρονα παράγεται θερμότητα μετατρέποντας την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει, μέσω χρήσης (Η.Θ.Σ),

και διοχετεύεται η ολική θερμότητα σε ένα ρευστό το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλους σκοπούς, όπως για θέρμανση αέρα ή νερού.

3.3 Παράμετροι απόδοσης ενός υβριδικού φ/β–θερμικού ηλιακού συστήματος

Οι παράμετροι της απόδοσης για ένα υβριδικό φ/β–θερμικό ηλιακό σύστημα καθορίζονται σύμφωνα με τους όρους της αποδοτικότητας των ηλιακών κυψελών και της θερμικής αποδοτικότητας του συστήματος, βάση των παρακάτω εξισώσεων. Η απόδοση των ηλιακών κυψελών εξαρτάται από την θερμοκρασία της κυψέλης [2][21]:

$$n_{pv} = n_{ref} \cdot [1 - 0.0054 \cdot (T_{pav} - T_{ref})] \quad \text{Εξ.}(10)$$

Από την παραπάνω εξίσωση η ενδιάμεση θερμοκρασία T_{pav} υπολογίζεται με την ολοκλήρωση της $T_p(x)$ από την :

$$T_{pav} = \frac{\int_{x=0}^{x=L} T_p(x) dx}{\int_{x=0}^{x=L} dx} \quad \text{Εξ.}(11)$$

Η στιγμιαία θερμική αποδοτικότητα του συστήματος είναι [2][22]:

$$n_{thermal} = \frac{\int m^o \cdot C_f \cdot (T_{out} - T_i) \cdot dt}{CR \cdot \int S_{tot} \cdot dt} \quad \text{Εξ.}(12)$$

Συνεπώς η συνδιαζόμενες θερμικές και ηλεκτρικές αποδόσεις του φ/β συστήματος δίνουν το σύνολο της ενέργειας που θα παράγεται [2][23]:

$$n_{pvt} = \frac{\int m^o \cdot C_f \cdot (T_o - T_i) \cdot dt + \int P_E \cdot dt}{CR \cdot \int S_{tot} \cdot dt} = n_{th} + n_{pv} \quad \text{Εξ.}(13)$$

3.4 Η σημασία του ρευστού σε ένα υβριδικό φ/β–θερμικό σύστημα

Το υβριδικό σύστημα περιέχει στην κατασκευή του κάποιου ρευστό το οποίο λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς θερμότητας για το φ/β στοιχείο, παρουσιάζοντας αύξηση στην ηλεκτρική του απόδοση, ενώ ταυτόχρονα το θερμαινόμενο ρευστό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές. Το ρευστό είναι συνήθως νερό ή αέρας.

Το ρευστό που χρησιμοποιείται πιο συχνά σαν ψυκτικό μέσο είναι ο αέρας ο οποίος κρατάει την ηλεκτρική αποδοτικότητα σε αποδεκτά επίπεδα ενώ ταυτόχρονα είναι απλό στην λειτουργία και ο κόστος του είναι πολύ χαμηλό. Το κόστος χρήσης του αέρα σαν ψυκτικό μέσο ανεβαίνει όταν χρησιμοποιείται αντλία για εξαναγκασζόμενη κυκλοφορία μέσα στο σύστημα ενώ παράλληλα μειώνεται και η ολική απόδοση [12].

Σε αντίθεση με το νερό, σαν ρευστό, ο αέρας δεν παρουσιάζει ηλεκτρική αγωγιμότητα. Εάν στο σύστημα χρησιμοποιείται νερό μπορεί να αποφευχθεί το παραπάνω πρόβλημα με την τοποθέτηση ενός εναλλάκτη θερμότητας στο πίσω μέρος του φ/β [12].

Γενικά λοιπόν η θερμοκρασία λειτουργίας εναλλάκτη σε ένα υβριδικό σύστημα επιδρά άμεσα την ολική του απόδοση (θερμική απόδοση+ηλεκτρική απόδοση). Για να πάρει μέγιστες τιμές η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος πρέπει η φ/β κυψέλη να λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία και κάτω από ορισμένες συνθήκες.

Οι συνθήκες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν είναι η ένταση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα και η ταχύτητα του ανέμου [12]. Βάση αυτών η βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση του ρευστού μετάδοσης θερμότητας στην δυνατόν χαμηλότερη θερμοκρασία του στην είσοδο του συστήματος και με την χρήση ενός κατάλληλου ρυθμού ροής για το εκάστοτε ρευστό. Με αυτή την χρήση αποκτώνται τιμές θερμοκρασιών εξόδου οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για άλλες λειτουργίες όπως την θέρμανση χώρων, προθέρμανση πισινών καθώς και για προθέρμανση ρευστών για χρήση σε βιομηχανίες.

Η τοποθέτηση ενός υβριδικού φ/β-θερμικού συστήματος είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά σε κτίρια τα οποία έχουν χαμηλή έκθεση στον ήλιο και κατ'επέκταση χαμηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος οπότε ανάγκες θέρμανσης υπάρχουν για όλη την διάρκεια του έτους [12].

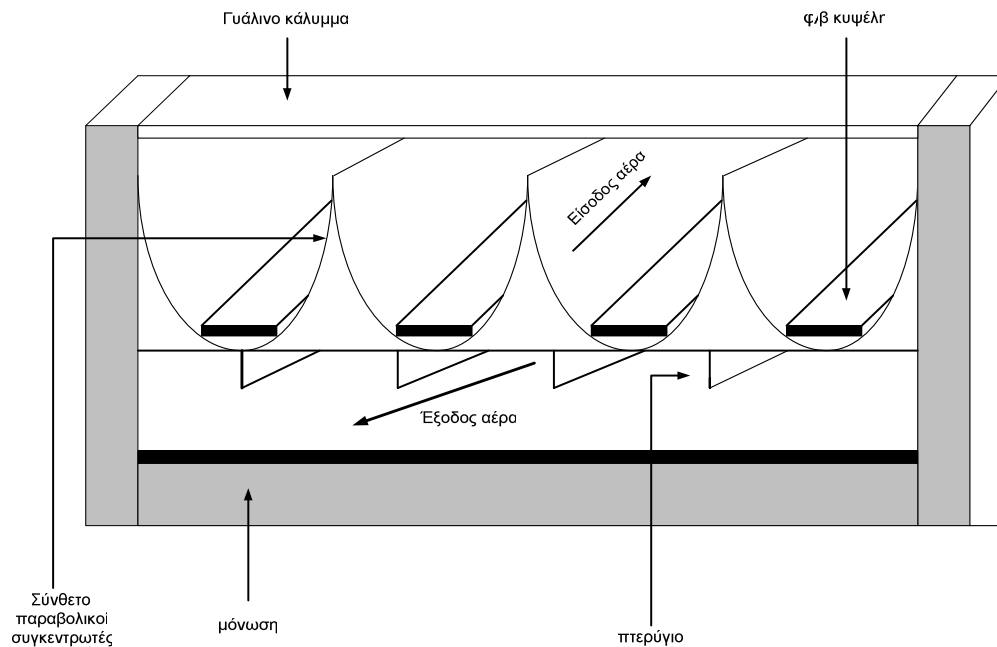
Εάν η τοποθεσία παρουσιάζει υψηλές τιμές ή καλές τιμές προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, τότε θα παρουσιάζονται υψηλές τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ένα υβριδικό φ/β-θερμικό σύστημα είναι μια πολύ καλή επιλογή. Αφού μέσω του ρευστού, που χρησιμοποιεί ως μεταφορέα θερμότητας, μπορεί να διαχειρίζεται την αύξηση της θερμοκρασίας στο πλαίσιο. Το ρευστό πρέπει όμως να επιλέγεται βάσει των θερμικών αναγκών για την εκάστοτε εφαρμογή.

Πρέπει να διευκρινιστεί ότι ανάλογα με το είδος του ρευστού που χρησιμοποιείται ως μέσο μεταφοράς θερμότητας σε ένα υβριδικό σύστημα και ανάλογα με την λειτουργία που ζητάτε από το σύστημα οι αποδόσεις κάποιων λειτουργιών αλλάζουν ενώ συνήθως η ηλεκτρική απόδοση παραμένει σε ανεκτά επίπεδα.

3.5 Βελτίωση υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων

3.5.1 Σύστημα με την χρήση σύνθετων παραβολικών συγκεντρωτών

Η λειτουργία του συστήματος με Σ.Π.Σ είναι μια σχετικά απλή διεργασία όπου το ρευστό εισέρχεται από την άνω δίοδο που σχηματίζεται μεταξύ της γυάλινης επιφάνειας και του φ/β πλαισίου. Έπειτα εξέρχεται από την κάτω δίοδο η οποία σχηματίζεται από την πίσω πλάκα και το φ/β πλαίσιο. Ο Σ.Π.Σ συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία στις φ/β κυψέλες. Τα πτερύγια στο πίσω μέρος του φ/β πλαισίου αυξάνουν την μεταφορά θερμότητας του ρευστού και ενισχύουν την θερμική απόδοση του συστήματος στην έξοδο του ρευστού από το χαμηλότερο κανάλι. Στο Σχήμα 5 παρατίθεται το σχέδιο ενός υβριδικού φ/β-θερμικού ηλιακού συστήματος με αέρα στο οποίο υπάρχουν διπλές δίοδοι, πτερύγια και Σ.Π.Σ [2].



Σχήμα 5 : Σχηματικό μοντέλο ενός φ/β θερμικού ηλιακού συλλέκτη διπλής δίοδου με πτερύγια και Σ.Π.Σ.

Η στιγμιαία ηλεκτρική απόδοση παράγεται στο διπλής δίοδου υβριδικό φ/β-θερμικό ηλιακό σύστημα με αέρα ως ρευστό μετάδοσης θερμότητας, με (Σ.Π.Σ) και πτερύγια και δίνεται από την Εξ.14 [2]:

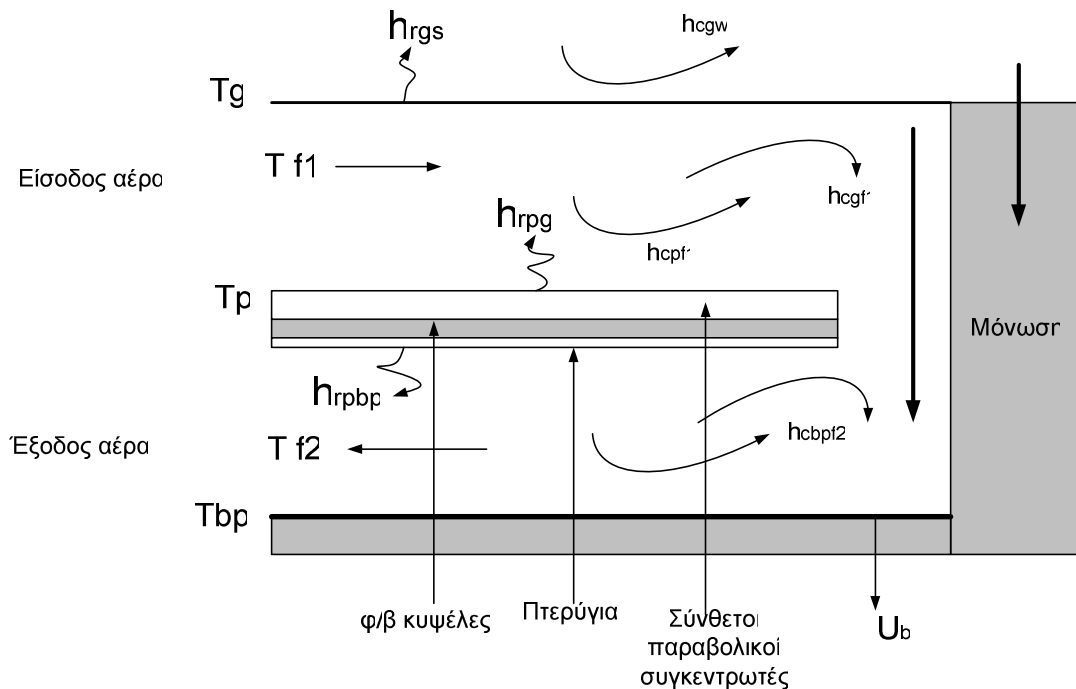
$$P_E = \tau_g \cdot S_U \cdot P n_{pv} \cdot a_{pv} \cdot d \cdot (CR) \cdot p_{Rn} \cdot \left[1 + \left(\frac{\tilde{n}_{pv} \cdot \tilde{n}_g \cdot \tilde{n}_R^{2\tilde{n}}}{CR} \right) \right] \quad \text{Εξ. (14)}$$

3.5.2 Θεωρητική ανάλυση συστήματος με Σ.Π.Σ

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν μια κατασκευή όπως αυτή που αναφέρθηκε προηγουμένως είναι :

- Η διαδρομή της ακτινοβολίας μεταξύ της φ/β πλάκας και του γυάλινου καλύμματος (επηρεάζεται από την θερμοκρασία του αέρα στο πρώτο κανάλι).
- Η διαδρομή της ακτινοβολίας μεταξύ του γυάλινου καλύμματος και της πίσω πλάκας (επηρεάζεται από την θερμοκρασία του αέρα στο δεύτερο κανάλι).

μια τέτοια κατασκευή από άλλη άποψη δίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6 : Θερμική απεικόνιση υβριδικού φ/β-θερμικού μοντέλου διπλής διόδου.

Για απλοποίηση της ανάλυσης του συστήματος θεωρούμε [2]:

- Το σύστημα βρίσκεται σε συνθήκες σταθερής κατάστασης.
- Οι επιδράσεις της θερμοχωρητικότητας του γυάλινου καλύμματος των ηλιακών κυψελών θεωρούνται αμελητέες.
- Οι θερμοκρασίες μεταβάλλονται μόνο στην κατεύθυνση ροής του μέσου μετάδοσης.
- Το Σ.Π.Σ είναι ιδανικό και χωρίς κατασκευαστικά λάθη. Οποιαδήποτε ακτίνα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πέφτει εντός της αποδεκτής γωνίας φτάνει στο δέκτη με την βοήθεια του παραβολικού ανακλαστήρα.

- Οι παράπλευρες απώλειες είναι αμελητέες.

Βάση λοιπόν των παραπάνω οι εξισώσεις ισοροπίας μπορούν να γραφούν ως εξής [2]:

1. Το γυάλινο κάλυμμα :

$$a_g \cdot S_{tot}(CR) \cdot (1 + \tau_g \cdot p_p \cdot p_R^{2n}) =$$

$$h_{rgs} \cdot (T_g - T_s) + h_{cgw} \cdot (T_g - T_w) + h_{cgl} \cdot (T_g - T_{fl}) + h_{rpg} \cdot \frac{A_{ab(T)}}{A_{c1}} \cdot (T_g - T_p) \quad \text{Εξ. (15)}$$

Όπου $\tilde{n} = (\tilde{A}_R / A_s) \tilde{E}_d$, $S_{tot} = S_b + S_d$, $CR=1/\sin\theta$.

2. Το σημείο εισαγωγής αέριου ρεύματος μεταξύ του γυάλινου καλύμματος και της πλάκας εισαγωγής :

$$\frac{m^o \cdot C_{f1}}{W} \cdot \frac{d \cdot T_{f1}}{dx} = h_{cgl} \cdot (T_g - T_{f1}) + h_{cpf1} \cdot \frac{A_{ab(T)}}{A_c} \cdot (T_p - T_{f1}) \quad \text{Εξ. (16)}$$

3. Η πλάκα συλλογής που αποτελείται από φ/β κυψέλες, Σ.Π.Σ και πτερύγια.

$$\begin{aligned} & \tau_g \cdot a_p \cdot S_U \cdot (CR) \cdot p_R^{\tilde{n}} \cdot d \cdot [1 + (\frac{\tilde{n}_g \cdot \tilde{n}_p \cdot n_R^{2\tilde{n}}}{CR})] \cdot (1 - P) + \tau_g \cdot a_{pv} \cdot S_U \cdot P \cdot (CR) \cdot p_R^{\tilde{n}} \cdot d \cdot [1 + (\frac{\tilde{n}_{pv} \cdot \tilde{n}_g \cdot \tilde{n}_{CR}^{2\tilde{n}}}{CR})] \\ & \cdot (1 - n_{pv}) = \\ & h_{cpf1} \cdot \frac{A_{ab(T)}}{A_c} \cdot (T_p - T_{f1}) + h_{rpg} \cdot \frac{A_{ab(T)}}{A_c} \cdot (T_p - T_g) + h_{cpf2} \cdot \frac{A_{ab(B)}}{A_c} \cdot n_p \cdot (T_p - T_{f2}) + h_{rpbp} \cdot \frac{A_{ab(B)}}{A_c} \cdot (T - T_{bp}) \end{aligned} \quad \text{Εξ. (17)}$$

Όπου $S_U = (S_B + S_D) / CR$, $n_p = 1 - \frac{A_{fin}}{A_{ab(B)}} (1 - n_f)$, $n_f = \frac{\tanh \cdot mh_f}{mh_f}$, $m = (\frac{2h_c}{k_f W_f})^{1/2}$

4. Το σημείο εξόδου αέρα μεταξύ της μονωμένης επιφάνειας και της πίσω επιφάνειας.

$$-\frac{m^o C_{f2}}{W} \cdot \frac{dT_{f2}}{dx} = h_{cpf2} \cdot \frac{A_{ab(B)}}{A_c} \cdot c_p \cdot (T_p - T_{f2}) + h_{cbpf2} \cdot (T_{bp} - T_{f2}) \quad \text{η πίσω επιφάνεια}$$

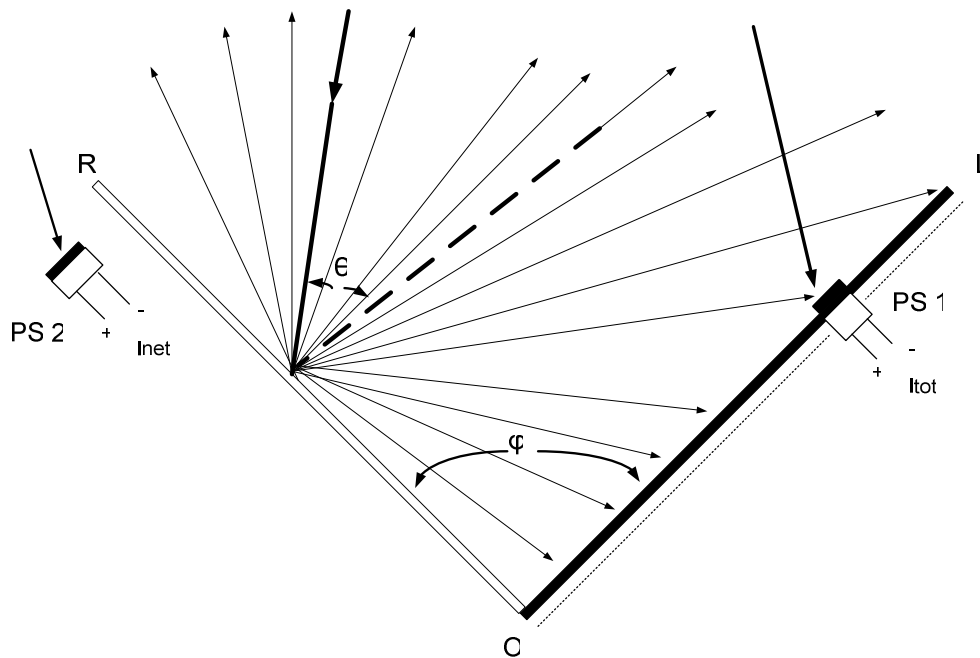
$$h_{cbpf2} \cdot (T_{f2} - T_{bp}) + h_{rpbp} \cdot \frac{A_{ab(B)}}{A_c} \cdot (T_p - T_{bp}) = U_b \cdot (T_{bp} - T_a) \quad \text{Εξ. (18)}$$

3.5.3 Σύστημα με χρήση διαχεόμενων ενισχυτικών ανακλαστών

Παρουσιάζεται μια διάταξη υβριδικού φ/β-θερμικού συστήματος που χρησιμοποιεί Δ.Ε.Α (διαχεόμενους ενισχυτικούς ανακλαστές) ακτινοβολίας. Το 2000 ο Tripanagnostopoulos [12] δοκίμασε σε πειραματική διάταξη ένα τέτοιο σύστημα. Είναι γνωστό ότι η διανομή της

ακτινοβολίας ενός διαχεόμενου ενισχυτικού ανακλαστήρα ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια ενός φ/β στοιχείου εξαρτάται από το ύψος του ήλιου, το αζιμούθιο του ήλιου, την καθαρότητα του ουρανού, την γωνία που είναι τοποθετημένος ο Δ.Ε.Α σε σχέση με την επιφάνεια του φ/β, στην κλίση του φ/β στοιχείου και τις οπτικές ιδιότητες που έχει το υλικό του ανακλαστήρα.

Τα αποτελέσματα που δίνονται στην πειραματική διάταξη του Tripanagnostopoulos [12] αφορούν δοκιμές εξομίωσης της διανομής ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια του φ/β. Τα δεδομένα συλλέχθησαν κατά την διάρκεια του μεσημεριού με την διαχυτή ηλιακή ακτινοβολία πάνω στο πάνελ να έχει τιμή $\approx 25\%$ και με την ρύθμιση του ανακλαστήρα και της γωνίας του φ/β επιπέδου σε γωνίες φ και θ όπως δίνονται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7 : Μέτρηση του παράγοντα συγκέντρωσης (C_f) με την χρήση φωτοανιχνευτών $PS1(I_{tot})$ και $PS2(I_{net})$ για διαφορετικές γωνίες θ και φ της ηλιακής ακτινοβολίας.

Με αυτές τις ρυθμίσεις καθορίζονται οι κατανομές ακτινοβολίας στις αποκλίσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στον κάθετο άξονα του φ/β στοιχείου, καθώς η επίπεδη ανάκλαση της διάχυτης ακτινοβολίας όπου παρουσιάζεται μια πιο ομοιογενής διανομή της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στο πλαίσιο [12].

Στην πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε από τον Tripanagnostopoulos [12] ο συντελεστής συγκέντρωσης C_f παίρνει τιμή $C=1$ όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει απευθείας πάνω στο φ/β χωρίς να δέχεται πλεόνασμα ακτινοβολίας σε αυτό από τον

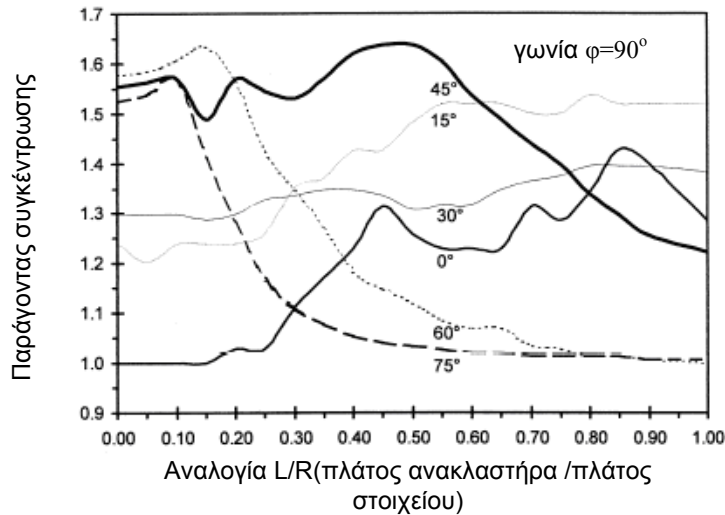
διαχεόμενο ενισχυτικό ανακλαστήρα. Παίρνει τιμή $C_f=1.1$ όταν δέχεται 10% επιπλέον ηλιακή ακτινοβολία με την βοήθεια του διαχεόμενου ενισχυτικού ανακλαστήρα και τιμή $C_f=1.5$ όταν δέχεται 50% επιπλέον ακτινοβολία.

Οι γωνίες που χρησιμοποιούνται αρχικά στην διάταξη είναι, μεταξύ του Δ.Ε.Α και του φ/β $\varphi=90^\circ$ και $\varphi=120^\circ$, με την γωνία $\varphi=120^\circ$ να αποτελεί την μέγιστη αποτελεσματική γωνία. [12]. Οι φωτοανιχνευτές *PS1* και *PS2* που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της καθαρής ηλιακής ακτινοβολίας (I_{net}) και της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (I_{tot}) αποτελούνται από μικρές φ/β κυψέλες pc-Si έκτασης $1cm^2$. Το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένος ο Δ.Ε.Α είναι το αλουμίνιο λόγω του χαμηλού κόστους του και της καλής του ιδιότητας να ανακλά την ηλιακή ακτινοβολία.

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η συσκευή για την μέτρηση του παράγοντα συγκέντρωσης για διαφορετικές τιμές αναλογίας L/R, όπου (L) το πλάτος του φ/β στοιχείου και (R) το πλάτος του Δ.Ε.Α [12]. Ο συντελεστής συγκέντρωσης C_f υπολογίζεται από την εξίσωση

$$C_f = \frac{I_{tot}}{I_{net}} \text{ και υπολογίζεται για διαφορετικές γωνίες } \theta \text{ [12].}$$

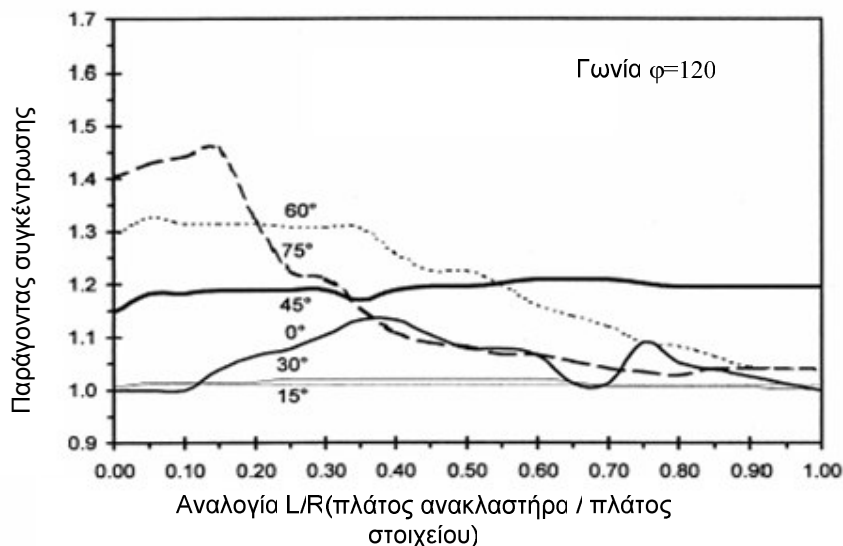
Στο Σχήμα 8 μας δίνονται τα αποτελέσματα υπό την μορφή διαγραμμάτων για την γωνία $\varphi=90^\circ$ μεταξύ του ανακλαστήρα και του φ/β, στο Σχήμα 10 δίνονται τα αποτελέσματα για $\varphi=120^\circ$ και στα δύο σχήματα εμπεριέχονται οι γωνίες $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$. Στην περίπτωση όπου το $\theta=90^\circ$ ο ενισχυτής ανάκλασης έχει τιμή $I_{ref} = 0mA$ και το $C_f=1$ [12].



Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση της ποικιλότητας του συντελεστή συγκέντρωσης C_f για διαφορετικές τιμές ανάλογες L/R , όσον αφορά τις γωνίες $\theta=0^\circ$ έως $\theta=75^\circ$ της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στο ανακλαστήρα διαχέομενης, η οποία σχηματίζει γωνία $\phi=90^\circ$ με την επιφάνεια του συστήματος του υβριδικού ϕ/β -θερμικού.

Στο Σχήμα 8 όπου η γωνία είναι $\phi=90^\circ$ παρατηρείται μια ισοκατανομή όσον αφορά την διανομή της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στο ϕ/β για τις γωνίες $15^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ με μέση αναλογία συγκέντρωσης $C_f=1.4$. Όταν η γωνία είναι $\theta < 15^\circ$ και η αναλογία πλάτους ϕ/β σε συνάρτηση με το πλάτος του ανακλαστήρα είναι $L/R \geq 0.20$ τότε η $C_f \approx 1.2$. Ενώ όταν η γωνία είναι $\theta=60^\circ$ τότε $L/R \geq 0.40$ και $C_f \approx 1.30$ και η ισοκατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρή. Όταν λοιπόν οι τιμές της γωνίας θ είναι $15^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ κατά την διάρκεια του χειμώνα υπάρχει μείωση της ισοκατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας ενώ το καλοκαίρι οι γωνίες είναι μεγαλύτερες των $\theta > 60^\circ$ η ισοκατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζει αύξηση κατά την διάρκεια του καλοκαιριού [12].

Για την γωνία $\phi=120^\circ$ του Δ.Ε.Α στο Σχήμα 9 δίνεται ότι για γωνίες $30^\circ < \theta < 60^\circ$ τα αποτελέσματα για τον παράγοντα συγκέντρωσης είναι μικρότερα για την ίδια αναλογία $L/R \geq 0.40$. Άρα ως βέλτιστη τοποθέτηση του Δ.Ε.Α σε σχέση με το ϕ/β πλαίσιο θεωρείται η γωνία $\phi=90^\circ$.



Σχήμα 9 : Διαφοροποίηση του συντελεστή συγκέντρωσης C_f για διαφορετικές τιμές αναλογίας L/R , όσο αφορά τις γωνίες από $\theta = 0^\circ$ έως $\theta=75^\circ$ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας πάνω στον ανάκλαση διαχεόμενης ακτινοβολίας, η οποία δημιουργεί μια γωνία $\varphi=120^\circ$ με την επιφάνεια του υβριδικού φ/β -θερμικού συστήματος.

Με την χρήση των διαχεόμενων ενισχυτικών ανακλαστήρων σε ένα υβριδικό φ/β -θερμικό σύστημα αυξάνεται η θερμική απόδοση του συστήματος αφού οι παράγοντες που επηρεάζουν ένα φ/β -θερμικό ηλιακό σύστημα είναι ο παράγοντας συγκέντρωσης C_f , η καθαρή προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, η περιβάλλουσα θερμοκρασία και η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού [12].

3.6 Το κόστος ως κριτήριο επιλογής για τα υβριδικά ηλιακά συστήματα

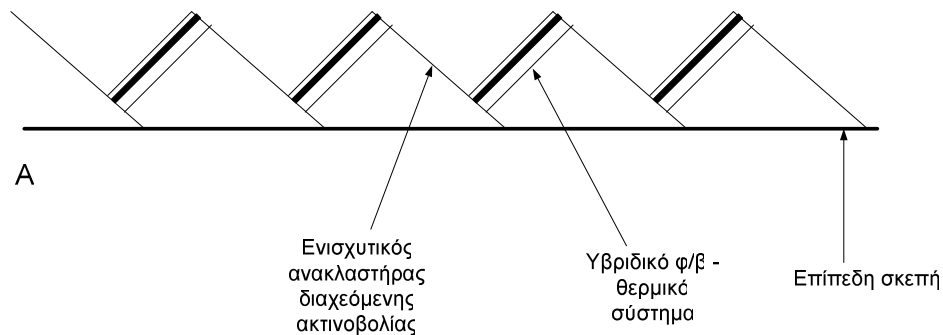
Σε όλες τις εφαρμογές που προηγήθηκαν για τα υβριδικά φ/β -θερμικά συστήματα πρέπει να ληφθεί υπόψιν το κόστος του ολοκληρωμένου θερμικού μέρους που αποτελείται από την μετάδοση θερμότητας του φ/β , τα ρευστά που χρησιμοποιούνται ως μεταφορείς θερμότητας και ο ρυθμός ροής τους, οι σωλήνες κυκλοφορίας, οι αντλίες, το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας κ.α. και πρέπει να συγκριθεί με το κόστος ενός απλού φ/β συστήματος υπολογίζοντας όμως και το κέρδος της ηλεκτρικής εξόδου από την διαδικασία ψύξης στο υβριδικό σύστημα [12].

Η επιπρόσθετη θερμική μονάδα πρέπει να έχει αυξημένη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες καθώς στο υβριδικό φ/β σύστημα το κύκλωμα ψύξης μπορεί να δώσει στις κυνέλες μεγαλύτερη χρονική διάρκεια αποδεχόμενης λειτουργίας από ότι σε ένα απλό φ/β σύστημα

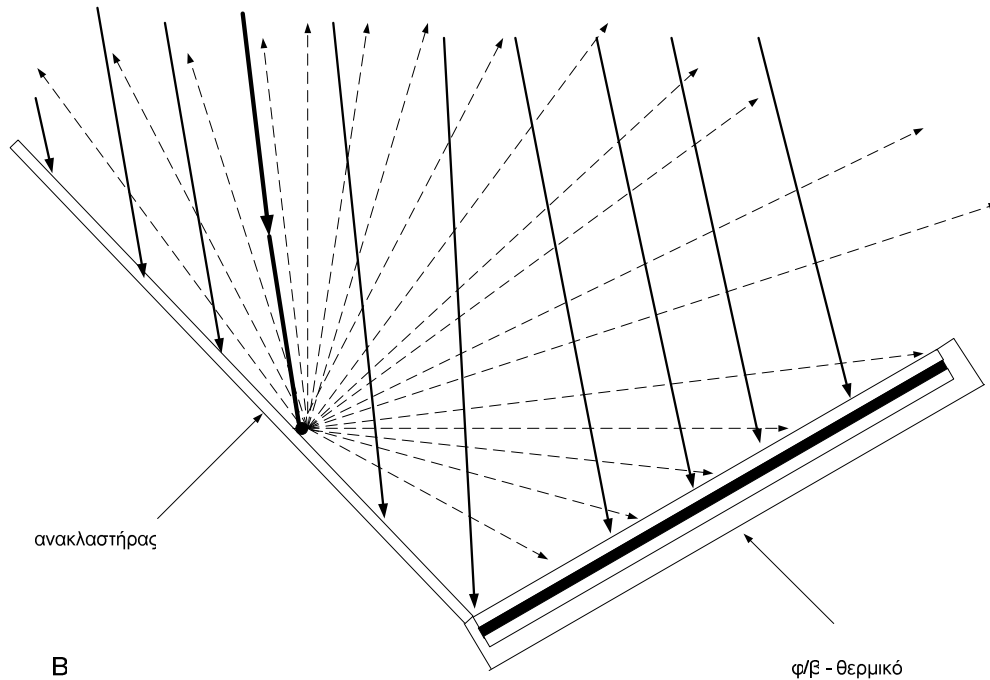
χωρίς αυτό. Το κόστος αυτό για την θερμική μονάδα μπορεί να είναι ίδιο σε όλα τα είδη των εφαρμογών του φ/β που χρησιμοποιούνται σε υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα και που έχουν την ίδια μέθοδο εξαγωγής θερμότητας και τον ίδιο χώρο που θα χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση του υβριδικού συστήματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμική απόδοση διαφέρει ανά τύπο φ/β στοιχείου που χρησιμοποιείται κάθε φορά, οι φ/β κυψέλες με άμορφο πυρίτιο (a-Si) δίνουν υψηλότερες θερμικές αποδόσεις όμως μικρότερη ηλεκτρική αποδοτικότητα και μειωμένες οπτικές απώλειες.

Έχοντας λοιπόν ξεκαθαρίσει τους παράγοντες που αφορούν το κόστος και το είδος του φ/β συστήματος που χρησιμοποιείται γίνεται η τοποθέτηση, που συνήθως είναι σε σταθερές εγκαταστάσεις, όπου τα φ/β είναι τοποθετημένα σε παράλληλες σειρές με κενό ανάμεσα τους ώστε να μην επισκιάζεται το ένα το άλλο. Ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην εγκατάσταση δεν δεσμεύεται από τις φ/β κυψέλες, αυτό συμβαίνει κυρίως από την άνοιξη έως το φθινόπωρο γιατί μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας προσκρούει στην ελεύθερη οριζόντια επιφάνεια μεταξύ των παράλληλων σειρών της φ/β εγκατάστασης (λόγω υψηλότερης θέσης του ήλιου). Το συγκεκριμένο ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που δεν δεσμεύεται μπορεί να δεσμευτεί με την τοποθέτηση διαχεόμενων ενισχυτικών ανακλαστήρων ακτινοβολίας (Δ.Ε.Α) μεταξύ των παράλληλων σειρών ώστε να αυξηθεί η ηλιακή έκθεση ανά μονάδα ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια του φ/β [12].

Με την χρήση των Δ.Ε.Α ακτινοβολίας υπάρχει μια ομαλότερη κατανομή της επιπρόσθετης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φ/β, που μπορεί να παραμείνει αμετάβλητη με την χρήση μιας κατάλληλης γεωμετρικής τους τοποθέτησης. Μια τέτοια διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 10 α και 10 β [12].



Σχήμα 10 α : Σχηματική απεικόνιση υβριδικού φ/β-θερμικού συστήματος με διαχεόμενους ενισχυτικούς ανακλαστήρες ακτινοβολίας πάνω σε σκεπή κτιρίου.



Σχήμα 10 β : Σχηματική απεικόνιση πειραματικού υβριδικού φ/β-θερμικού ηλιακού συστήματος με Δ.Ε.Α και με τις κατευθύνσεις των ανακλώμενων διαχεόμενων ηλιακών ακτινών.

Η επιπρόσθετη ηλιακή είσοδος πάνω στην επιφάνεια των φ/β στοιχείων είναι μικρότερη από αυτή των κατοπτρικών ανακλαστήρων, όμως οι ανακλαστήρες διαχεόμενης ηλιακής ακτινοβολίας είναι φθηνοί και συνδυάζονται με όλα τα είδη φ/β στοιχείων εύκολα. Στα υβριδικά φ/β-θερμικά ηλιακά συστήματα η επιπρόσθετη ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται το σύστημα λόγω της ύπαρξης των Δ.Ε.Α ενδέχεται να παρουσιάζει αύξηση στην θερμική και ηλεκτρική τους έξοδο κρατώντας ταυτόχρονα την θερμοκρασία του φ/β σε ανεκτά επίπεδα. Έτσι λοιπόν ο συνδυασμός των Δ.Ε.Α μαζί με ένα υβριδικό φ/β-θερμικό σύστημα προτείνεται σαν μια βελτιωτική λύση που δίνει αύξηση στην ολική αποδοτικότητα του συστήματος [12].

Κεφάλαιο 4

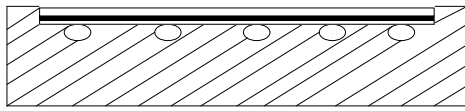
Μοντέλα υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων

4.1 Σύγχρονα μοντέλα υβριδικών φ/β-θερμικών ηλιακών συστημάτων

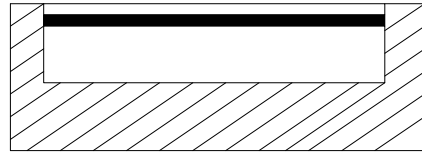
Η κατασκευή των υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων στηρίζεται στην χρήση εμπορικών φ/β κυψελών κυρίως των τύπων pc-Si και a-Si [12]. Υπάρχουν τα φ/β που έχουν και τις δύο επιφάνειες τους ελεύθερες (φ/β-ελεύθερα=PV/FREE) στην εξωτερική περιβάλλουσα θερμοκρασία. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν το νερό ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας (φ/β-νερού=PV/WATER), τα συστήματα που χρησιμοποιούν τον αέρα ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας (φ/β-αέρα=PV/AIR), τα φ/β-νερού στα οποία τοποθετείται επιπρόσθετη κάλυψη γυαλιού (φ/β-νερού+κάλυψης=PV/WATER+GL), τα συστήματα αέρα φ/β-αέρα που έχουν και αυτά επιπρόσθετη κάλυψη γυάλινης επιφάνειας (φ/β-αέρα+κάλυψης=PV/AIR+GL) καθώς και αυτά με νερό και αέρα που συνδυάζουν τα παραπάνω αλλά χρησιμοποιούν και διαχεόμενους ενισχυτικούς ανακλαστήρες (φ/β-νερού+κάλυψης+Δ.Ε.Α=PV/WATER+GL+REF)(φ/β-αέρα+κάλυψης+Δ.Ε.Α=PV/AIR+GL+REF) [24][2][12].

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζεται η κατασκευή των

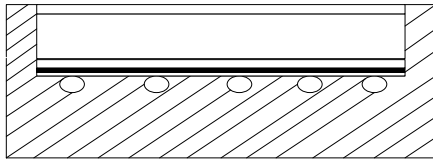
- (Α) φ/β-νερού
- (Β) φ/β-νερού+κάλυψης
- (Γ) φ/β-αέρα
- (Δ) φ/β-αέρα+κάλυψης



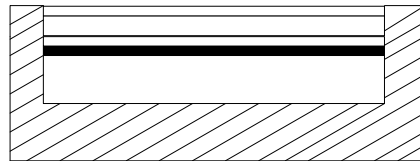
A



Γ



B

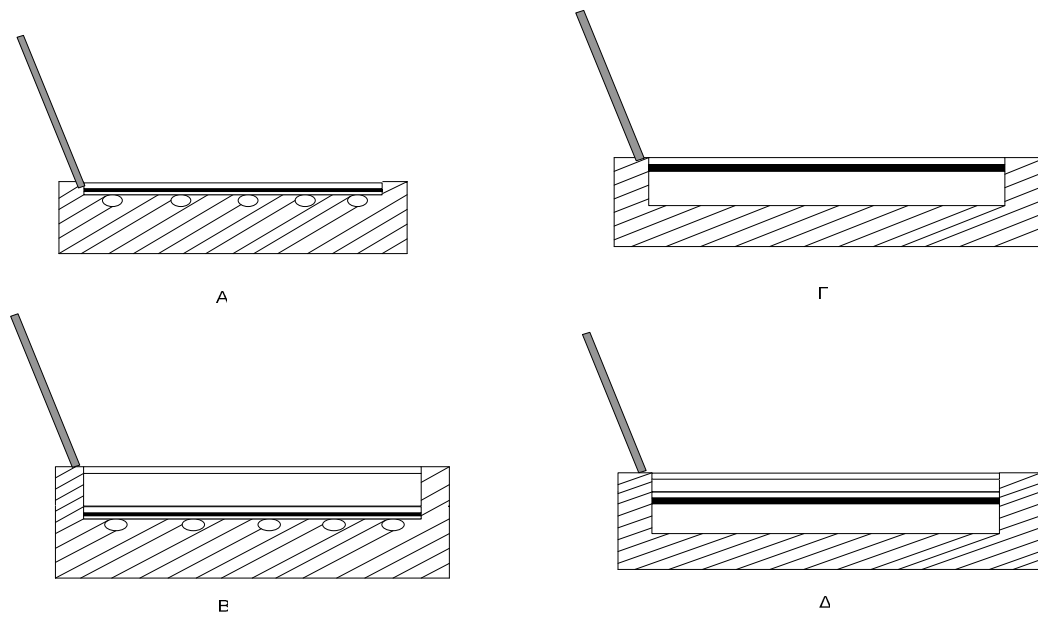


Δ

Σχήμα 11 : Σχηματικές απεικονίσεις διαφορετικών φ/β-υβριδικών συστημάτων.

Ενώ στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται η κατασκευή των

- (A) φ/β-νερού+Δ.Ε.Α
- (B) φ/β-νερού+κάλυψης+Δ.Ε.Α
- (Γ) φ/β-αέρα+Δ.Ε.Α
- (Δ) φ/β-αέρα+κάλυψης+Δ.Ε.Α



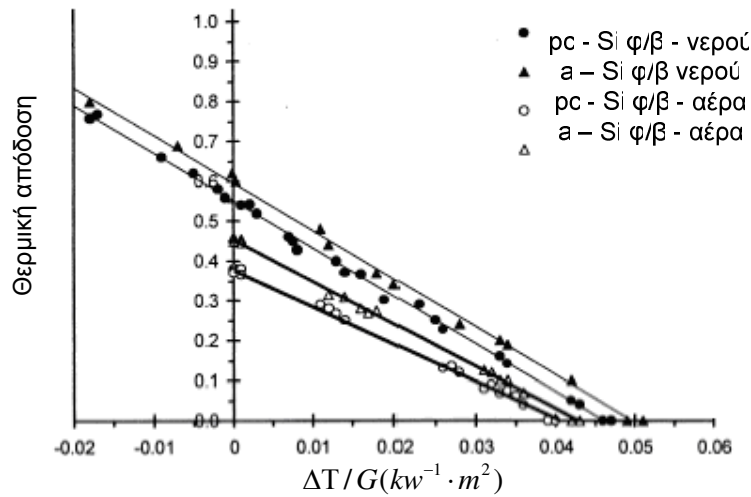
Σχήμα 12 : Σχηματικές απεικονίσεις διαφορετικών φ/β-υβριδικών συστημάτων με την προσθήκη Δ.Ε.Α.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου αναλύονται τα πιο σημαντικά από αυτά τα είδη των υβριδικών φ/β-θερμικών ηλιακών συστημάτων.

4.2 Υβριδικά φ/β-συστήματα με χρήση διαφορετικών τύπων φ/β στοιχείων

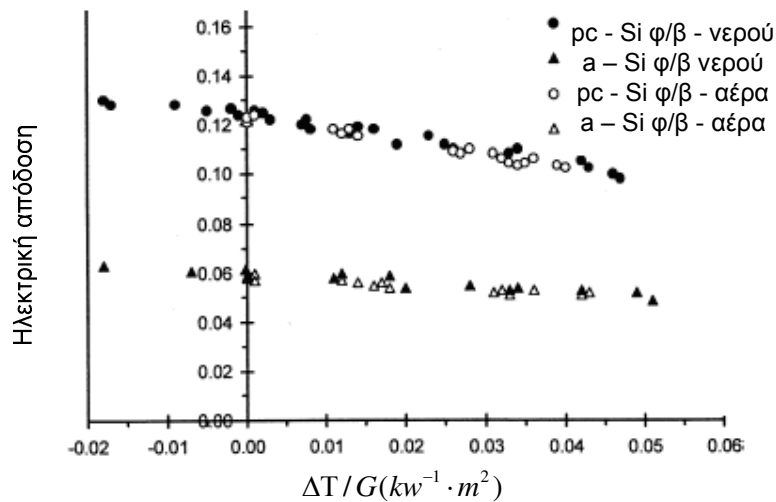
Ο Tripanagnostopoulos [12] εξέτασε πειραματικά τα υβριδικά φ/β-θερμικά ηλιακά συστήματα βάση της ηλεκτρικής και θερμικής τους εξόδου. Στα συστήματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν φ/β κυψέλες τύπου a-Si (άμορφης σιλικόνης) και pc-Si (πολυκρυσταλλικής σιλικόνης) και προσαρμόστηκαν στα δύο βασικά μοντέλα. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά είχαν ως μέσο μετάδοσης θερμότητας το νερό, φ/β-νερού (a-Si φ/β-νερού, pc-Si φ/β-νερού) και τα άλλα είχαν ως μεταφορέα θερμότητας τον αέρα, φ/β-αέρα (a-Si φ/β-αέρα, pc-Si φ/β-αέρα).

Στο Σχήμα 13 δίνονται τα αποτελέσματα για την θερμική απόδοση (n_{th}) των συστημάτων όταν αυτά βρίσκονται σε λειτουργία.



Σχήμα 13 : Αποτελέσματα θερμικής απόδοσης για τα συστήματα a-Si φ/β-νερού, pc-Si φ/β-νερού και a-Si φ/β-αέρα, pc-Si φ/β-αέρα.

Στο Σχήμα 14 δίνονται οι ηλεκτρικές αποδόσεις (n_{el}) για τα συστήματα σε κατάσταση λειτουργίας



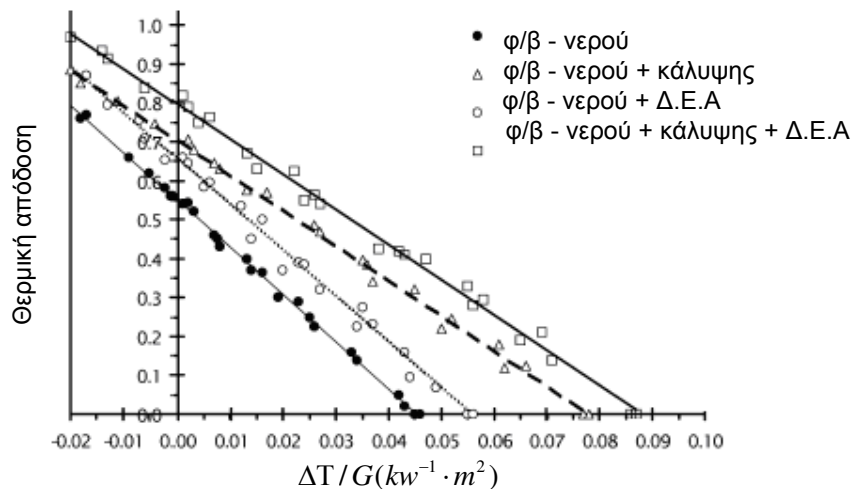
Σχήμα 14 : Αποτελέσματα ηλεκτρικής αποδοτικότητας για τα συστήματα a-Si φ/β-νερού, pc-Si φ/β-νερού και a-Si φ/β-αέρα, pc-Si φ/β-αέρα.

Και στα δύο παραπάνω σχήματα η απόδοση (ηλεκτρική και θερμική) είναι συνάρτηση της αναλογίας $\Delta T / G$, όπου G η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

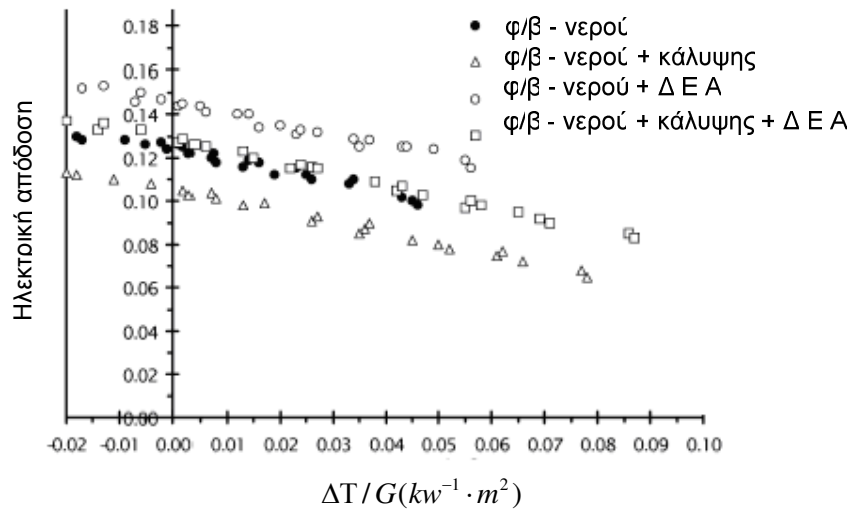
Βάση των σχημάτων τα μοντέλα που έχουν ως μέσο μεταφοράς θερμότητας το νερό υπερτερούν σε θερμική απόδοση των συστημάτων με αέρα, ενώ οι ηλεκτρικές αποδόσεις είναι σχεδόν παρόμοιες.

4.3 Υβριδικά φ/β–θερμικά συστήματα με την χρήση νερού ως μεταφορέα θερμότητας

Τα υβριδικά συστήματα που έχουν ως μέσο μετάδοσης θερμότητας το νερό είναι τα βασικά φ/β–νερού, τα φ/β–νερού+κάλυψης, τα φ/β–νερού+Δ.Ε.Α και τα φ/β–νερού+κάλυψης+Δ.Ε.Α. Τα συστήματα αυτά δοκιμάζονται για διαφορετικές τιμές παράγοντα συγκέντρωσής C_f σε κατάσταση λειτουργίας. Όπως και στο κεφάλαιο 4.2 οι θερμικές και ηλεκτρικές αποδόσεις που δίνονται είναι συνάρτηση της αναλογίας $\Delta T / G = 0 \text{KW}^{-1} \cdot \text{m}^2$ [12]. Στο Σχήμα 15 δίνεται η θερμική απόδοση και στο Σχήμα 16 η ηλεκτρική απόδοση των παραπάνω συστημάτων για τις ανάλογες τιμές $\Delta T / G$ που δίνονται στα Σχήματα 13 και 14 για τα υβριδικά συστήματα φ/β–νερού, που χρησιμοποιούνται φ/β κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου.



Σχήμα 15 : Θερμικές αποδόσεις για τα υβριδικά συστήματα βασικά φ/β–νερού, τα φ/β–νερού+κάλυψης, τα φ/β–νερού + Δ.Ε.Α και τα φ/β–νερού+κάλυψης+Δ.Ε.Α.



Σχήμα 16 : Ηλεκτρικές αποδόσεις για τα υβριδικά συστήματα βασικά φ/β-νερού, τα φ/β-νερού+κάλυψης, τα φ/β-νερού+Δ.Ε.Α και τα φ/β-νερού+κάλυψης+Δ.Ε.Α.

Στα σχήματα οι τιμές που είναι στον αρνητικό άξονα οφείλονται στο γεγονός ότι οι μετρήσεις θερμοκρασίας εισόδου νερού (T_{in}) είναι μικρότερες από την θερμοκρασία της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_a) [12].

Είναι εμφανές ότι το σύστημα με την μεγαλύτερη θερμική απόδοση είναι το φ/β-νερού+κάλυψης+Δ.Ε.Α ενώ την μεγαλύτερη ηλεκτρική απόδοση την έχει το υβριδικό σύστημα που χρησιμοποιεί διαχεόμενους ενισχυτικούς ανακλαστήρες (φ/β-νερού+Δ.Ε.Α). Και στις δύο περιπτώσεις στα συστήματα χρησιμοποιούν στην διάταξη τους Δ.Ε.Α που αυξάνουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία πάνω στο φ/β πλαίσιο.

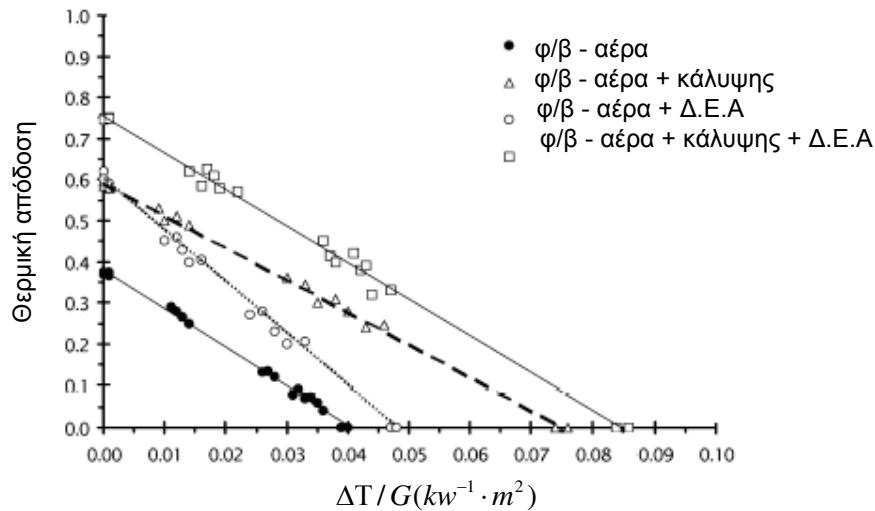
Στην περίπτωση του υβριδικού θερμικού συστήματος φ/β-νερού+κάλυψης+Δ.Ε.Α η διαχεόμενη ακτινοβολία που επιστρέφει στο φ/β πλαίσιο, λόγω των Δ.Ε.Α, συγκρατείται από την επιπλέον κάλυψη γυαλιού που υπάρχει αυξάνοντας την θερμοκρασία στο φ/β πλαίσιο και επιτρέποντας στο ρευστό που χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης θερμότητας να αυξήσει την θερμική του απόδοση.

Στην περίπτωση του υβριδικού θερμικού συστήματος φ/β-νερού+Δ.Ε.Α, οι διαχεόμενοι ενισχυτικοί ανακλαστήρες (Δ.Ε.Α) προσφέρουν στο φ/β πλαίσιο επιπλέον προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία από την ακτινοβολία που δεσμεύουν τα συστήματα χωρίς Δ.Ε.Α, αυξάνοντας έτσι την ηλεκτρική απόδοση των κυψελών του φ/β πλαισίου.

4.4 Υβριδικά φ/β–θερμικά συστήματα με την χρήση αέρα ως μεταφορέα θερμότητας

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται δοκιμές υβριδικών φ/β–θερμικών συστημάτων αέρα [12]. Όπως στα συστήματα με νερό και τα συστήματα με αέρα δοκιμάζονται σε παρόμοιες συνθήκες λειτουργίας. Τα υβριδικά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα φ/β–αέρα, φ/β–αέρα+κάλυψης, φ/β–αέρα+Δ.Ε.Α, φ/β–αέρα+κάλυψης+αέρα.

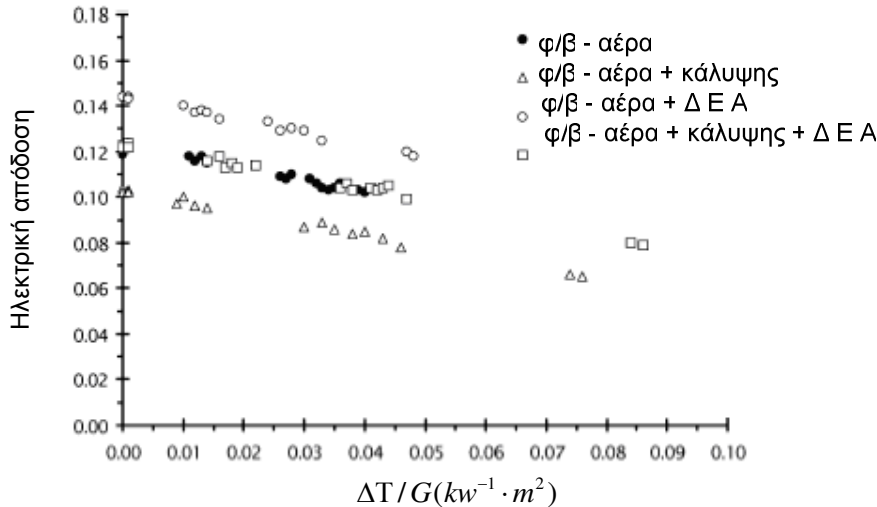
Στο Σχήμα 17 παρουσιάζονται οι θερμικές αποδόσεις για τα υβριδικά συστήματα αέρα :



Σχήμα 17 : Θερμικές αποδόσεις για τα υβριδικά φ/β–θερμικά συστήματα φ/β–αέρα, φ/β–αέρα+κάλυψης, φ/β–αέρα+Δ.Ε.Α, φ/β–αέρα+κάλυψης+Δ.Ε.Α.

Όπως και στα συστήματα με νερό η θερμική αποδοτικότητα n_{th} είναι άμεσα εξαρτώμενη από την συνάρτηση αναλογίας $\Delta T / G$.

Στο Σχήμα 18 δίνονται οι ηλεκτρικές αποδόσεις n_{el} για τα συστήματα όπου χρησιμοποιείται αέρας.



Σχήμα 18 : Ηλεκτρικές αποδόσεις για τα υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα φ/β-αέρα, φ/β-αέρα+κάλυψης, φ/β-αέρα+Δ.Ε.Α, φ/β-αέρα+κάλυψης+Δ.Ε.Α.

Όπως και στο κεφάλαιο 4.3 τα πειραματικά δεδομένα τα οποία βρίσκονται στο αρνητικό άξονα οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος T_a έχει υψηλότερες τιμές από την θερμοκρασία εισόδου T_{in} , και ο λόγος $\Delta T/G$ αντιστοιχεί σε $0 \text{ KW}^{-1} \cdot \text{m}^2$ για την λειτουργία των συστημάτων.

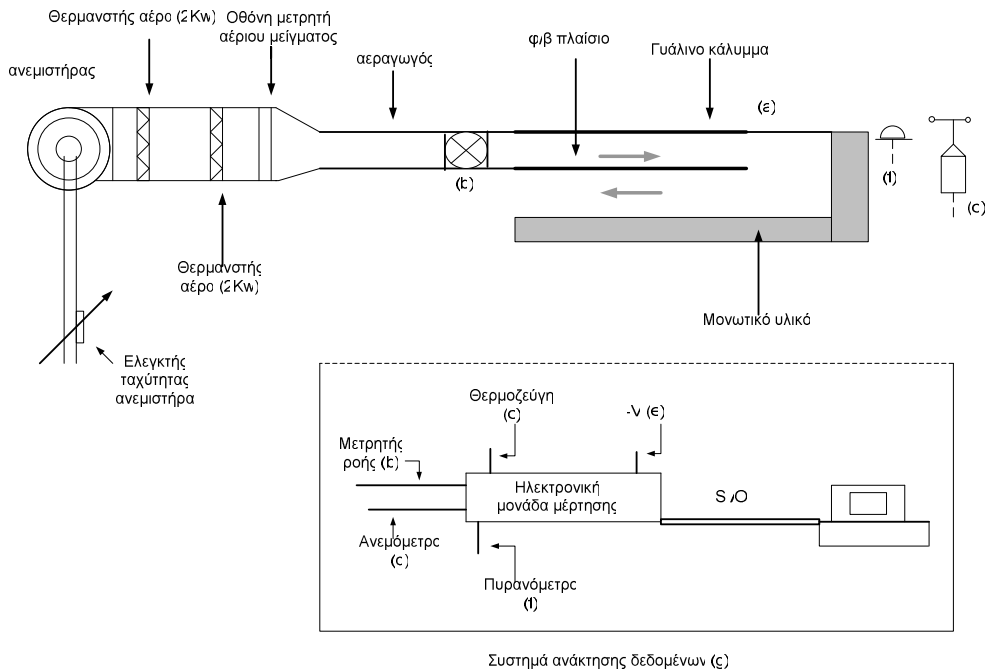
Στην θερμική απόδοση παρατηρείται ότι τις υψηλότερες τιμές καταλαμβάνει το υβριδικό σύστημα φ/β-αέρα+κάλυψης+Δ.Ε.Α ενώ τις υψηλότερες τιμές στην ηλεκτρική απόδοση καταλαμβάνει το σύστημα φ/β-αέρα+κάλυψης.

Λαμβάνοντας υπόψιν της θερμικές και ηλεκτρικές αποδόσεις για τα υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα που χρησιμοποιούν νερό ή αέρα ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας φαίνεται ότι αυξάνεται η θερμική απόδοση και ταυτόχρονα υπάρχουν υψηλότερες τιμές για την ηλεκτρική απόδοση ενός τέτοιου υβριδικού συστήματος σε σχέση με άλλα απλά φ/β-συστήματα που δεν χρησιμοποιούν μεταφορείς θερμότητας. Η χρήση Δ.Ε.Α και επιπρόσθετης κάλυψης γυαλιού σε ένα υβριδικό φ/β σύστημα παρέχει αύξηση της θερμικής απόδοσης αλλά μείωση της ηλεκτρικής του απόδοσης όπως δίνεται στα Σχήματα 17 και 18.

4.5 Ανάλυση υβριδικού φ/β-θερμικού συστήματος με αέρα

Οι αρχές λειτουργίας στα υβριδικά συστήματα όταν σε αυτό χρησιμοποιείται σαν ρευστό μεταφοράς θερμότητας νερό ή αέρα είναι ίδιες. Οι διαφορές των δύο συστημάτων βρίσκονται στην υψηλότερη θερμική απόδοση ενός υβριδικού συστήματος με νερό ενώ ένα υβριδικό σύστημα με αέρα μας προσφέρει υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση.

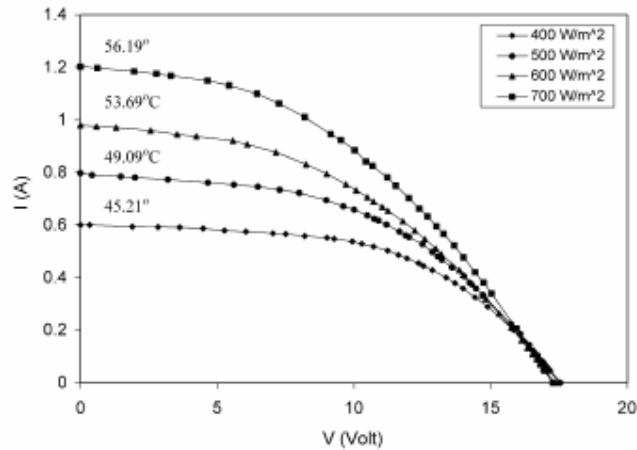
Στο Σχήμα 19 δίνεται η διάταξη ενός υβριδικού φ/β-αέρα με το σύστημα ανάκτησης δεδομένων του [2].



Σχήμα 19: Όπου (a) ο ηλιακός συλλέκτης διπλής διόδου του υβριδικού φ/β-θερμικού συστήματος, (b) το σύστημα μέτρησης ροής αερίου, (c) το σύστημα μέτρησης θερμοκρασίας, (d) το σύστημα μέτρησης ταχύτητας του ανέμου, (e) το σύστημα μέτρησης τάση και έντασης, (f) το σύστημα μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας, (g) το σύστημα ανάκτησης των δεδομένων.

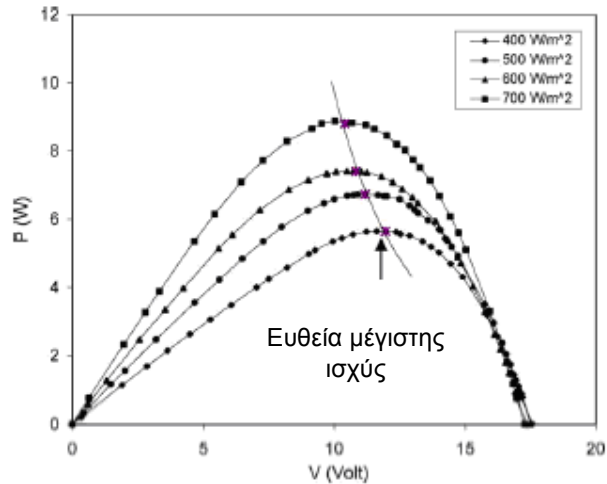
Οι διαστάσεις του συλλέκτη είναι 0.85m*1.22m. Το ύψος της άνω διόδου είναι 16,5 cm. Το ύψος της κάτω διόδου ποικίλει από 30 έως 120 mm. Η συνολική επιφάνεια που καλύπτεται από ηλιακές κυψέλες είναι 0,38 τετραγωνικά μέτρα. Ο Σ.Π.Σ που χρησιμοποιήθηκε έχει αναλογία συγκέντρωσης 1.86 και χρησιμοποιείται σαν ανακλαστήρας και εντοπίζεται παράλληλα με την ροή του αέρα. Ο συλλέκτης δοκιμάστηκε σε κατάσταση λειτουργίας σε εσωτερικές συνθήκες για να αποφασιστεί η ηλεκτρική και θερμική αποδοτικότητα για διαφορετικές και ποικίλες θερμοκρασίες λειτουργίας. Είκοσι-τρεις λάμπες αλογόνου βολφραμίου που η κάθε μια έχει φορτίο λειτουργίας 500W χρησιμοποιούνται για να εξομοιωθεί η ηλιακή ακτινοβολία κατά την διάρκεια του πειράματος. Η ένταση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας μετράται με ένα πυρανόμετρο Eppley το οποίο τοποθετείται παράλληλα στον συλλέκτη. Η ταχύτητα του ανέμου μετράται από ένα ανεμόμετρο. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος και άλλες θερμοκρασίες σε διάφορες θέσεις του συστήματος όπως στην είσοδο (T_{in}), έξοδο(T_{out}), φ/β κυψέλη($T_{\phi/\beta}$), αέρας στον αγωγό(T_f), κλπ μετρούνται από ένα θερμοζεύγος [2].

Κατά την διάρκεια του πειράματος με την διάταξη που δόθηκε παραπάνω το σημείο μέγιστης ισχύος P_{max} αποκτάται από τις ενδείξεις της τάσης (I) και έντασης του ρεύματος (V). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 20 όταν μετρηθεί βάσει των χαρακτηριστικών τάσης-έντασης τότε παρουσιάζεται μια απώλεια στην ηλεκτρική απόδοση [2].



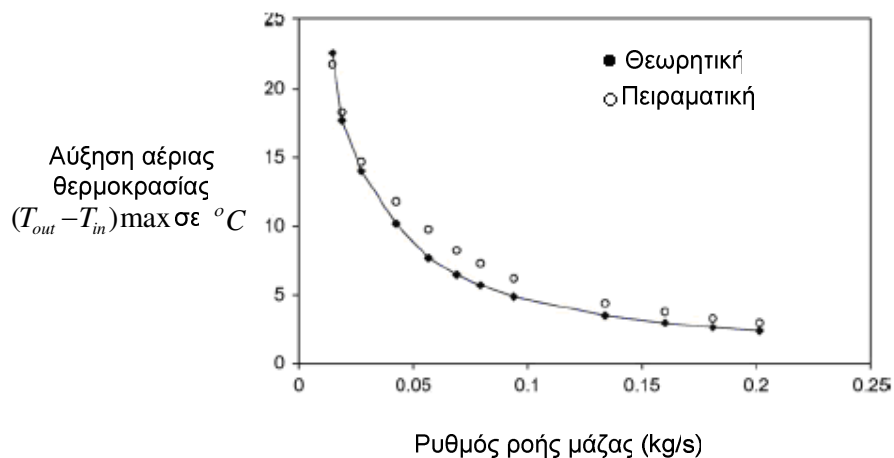
Σχήμα 20: Ποικίλες τιμές I-V σε ροή μάζας αερίου 0,027Kg/s

Αυτές οι απώλειες παρουσιάζονται με μια μείωση στο παράγοντα πλήρωσης του συστήματος σε υψηλές τιμές ρεύματος και με μείωση στην τάση ανοιχτοκύκλωσης του συστήματος (V_{oc}) σε υψηλές τιμές θερμοκρασίας για τις κυψέλες του φ/β. Ο παράγοντας πλήρωσης πέφτει από 0,54 σε ένταση ακτινοβολίας $400 W/m^2$ στο 0,42 σε ένταση ακτινοβολίας $700 W/m^2$ και μάζα ροής αέρα 0,027 kg/s. Ο κορεσμός της μονάδας ρεύματος προκαλεί την τάση ανοιχτοκυκλώματος να πέσει, ενώ όπου το ρεύμα βραχυκυκλώματος αυξάνει λίγο με την αύξηση της θερμοκρασίας στο ίδιο επίπεδο ακτινοβολίας (Σχήμα 21) [2].



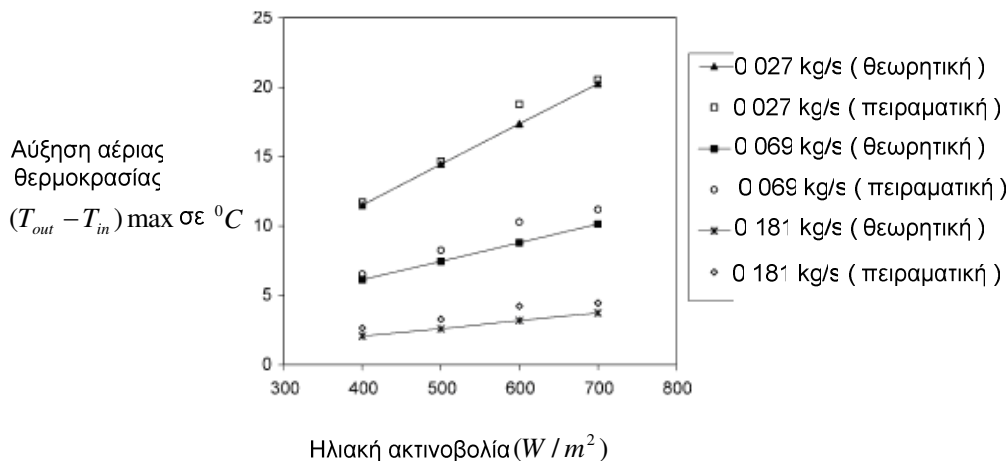
Σχήμα 21: Μέγιστη ηλεκτρική ισχύς του συλλέκτη η οποία αυξάνεται με την ένταση της ακτινοβολίας λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας των κυψελών σε σταθερή εισροή μάζας αέρα της τάξης 0.027 Kg/s.

Όσο αφορά την θερμική απόδοση του συστήματος στο Σχήμα 22 δίνεται η μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα $(T_{out} - T_{in})_{max}$ η οποία όμως μειώνεται με την αύξηση της ροής [2]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση της εισροής αέρα μειώνεται η θερμοκρασία και έτσι οδηγείται σε αύξηση της ηλεκτρικής απόδοσης αφού με την επιπλέον ροή αέριας μάζας που προσφέρεται υπάρχει μείωση της θερμοκρασίας στο γυάλινο κάλυμμα και στην πλάκα απορρόφησης.



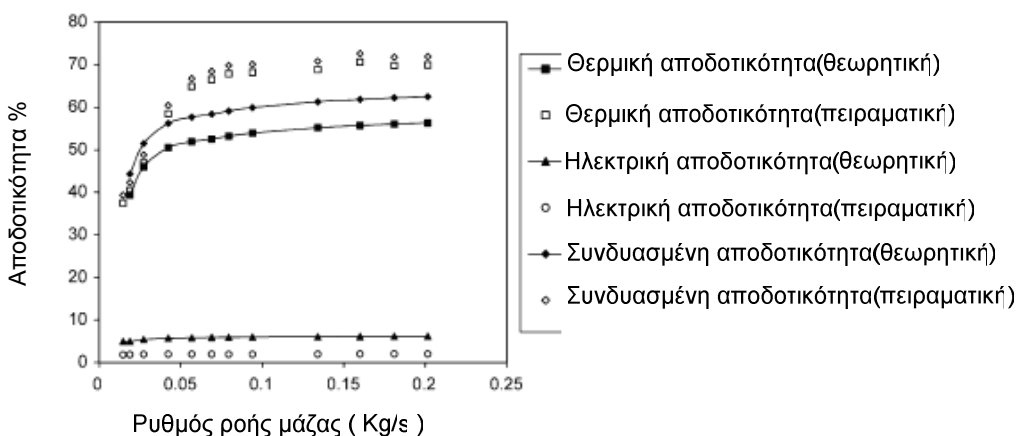
Σχήμα 22: Μεταβολές της μέγιστης θερμοκρασίας αερίου με συγκεκριμένη ροή μάζας αέρα σε επίπεδο ακτινοβολίας της τάξεως 500 W / m^2

Στο Σχήμα 23 δίνεται η αναλογία αύξησης της θερμοκρασίας σύμφωνα με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. σε συγκεκριμένες τιμές για την ροή της μάζας του αέρα.



Σχήμα 23: Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στην αύξηση θερμοκρασίας σε διαφορετικές ροές μάζας αερίου.

Οι αποδόσεις για το σύστημα (θερμικές και ηλεκτρικές) δίνονται στο Σχήμα 24 και μας δίνεται η εξάρτησή τους από τον ρυθμό ροής. Εδώ η ένταση της ακτινοβολίας είναι $500 W / m^2$ και παρατηρείται μια βοήθεια στην αύξηση της ηλεκτρικής αποδοτικότητας του συστήματος από 39% έως 70% για ρυθμό ροής της τάξης των 0.015–0.16 Kg/s [2].



Σχήμα 24 : επίδραση της ροής αέριας μάζας στην αποδοτικότητα σε ακτινοβολία $500 W / m^2$.

Όταν το σύστημα θέλει να αυξήσει την παραγωγή του σε θερμική απόδοση αυτό γίνεται εις βάρος της ηλεκτρικής του απόδοσης, ομοίως γίνεται και το αντίστροφο. Είναι βασικό το

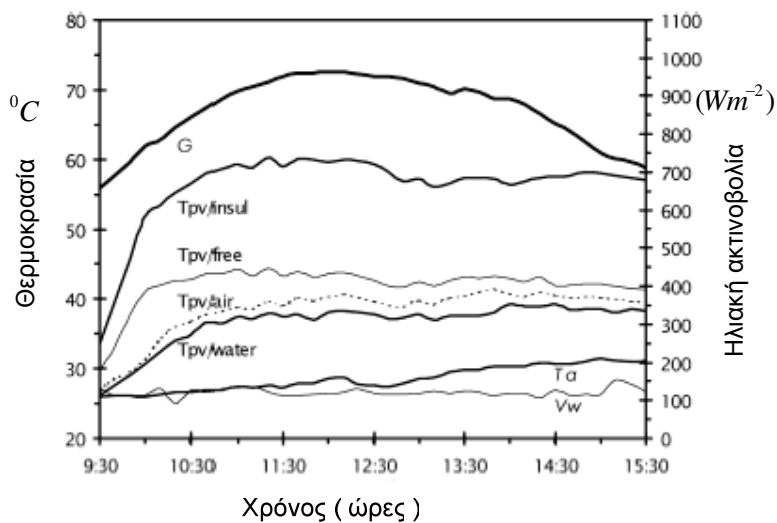
κριτήριο να είναι γνωστό εξ'αρχής και πριν από την χρήση ενός υβριδικού φ/β-θερμικού συστήματος τι ζητείται να παράγει το σύστημα έτσι ώστε να μπορέσουν να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες που προσφέρει ένα τέτοιο σύστημα.

4.6 Σύγκριση υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων με απλά φ/β συστήματα

Τα απλά φ/β συστήματα διακρίνονται σε φ/β-ελεύθερων επιφανειών (PV/FREE) που έχουν και τις δύο πλευρές τους ελεύθερες στο περιβάλλον και σε συστήματα φ/β-μόνωσης (PV/INSUL) όπου η μια πλευρά του φ/β είναι καλυμμένη με μονωτικό υλικό.

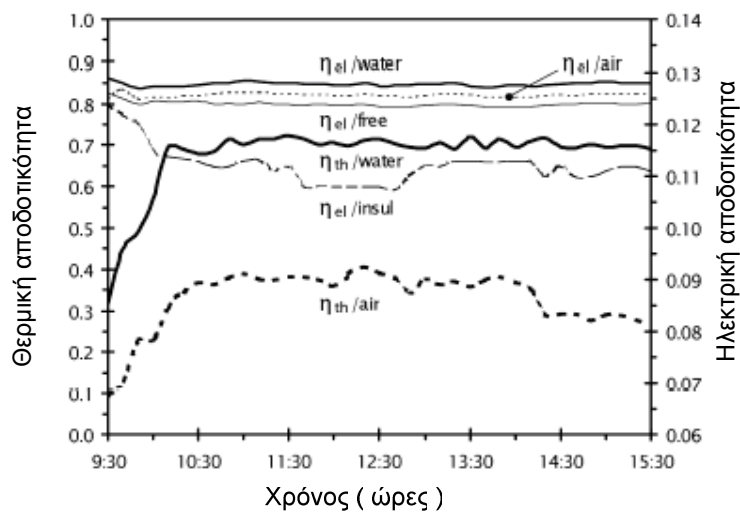
Για να δοθούν επαρκή συμπεράσματα στο ποιο είδος φ/β παρέχει περισσότερη ολική εξαγόμενη ενέργεια συγκρίθηκαν τα απλά φ/β συστήματα (φ/β-ελεύθερων επιφανειών, φ/β-μόνωσης) με τα υβριδικά συστήματα τα οποία παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Για γίνει σωστή αξιολόγηση στα απλά φ/β συστήματα χρησιμοποιούνται φ/β κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου (οι οποίες χρησιμοποιούνται τα υβριδικά συστήματα) και όλα τα συστήματα δοκιμάζονται ταυτόχρονα σε ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος, για την ίδια χρονική περίοδο 9:30 έως 15:30 όλα τα συστήματα είναι ακίνητα, έχουν την ίδια κλίση 40° και ίδιο νότιο προσανατολισμό (σαν ηλιακό μεσημέρι θεωρείται η ώρα 12:30) [12].

Έτσι λοιπόν παρουσιάζονται γραφικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 25, οι εναλλαγές στην θερμοκρασία για τα απλά φ/β συστήματα (φ/β-ελεύθερων επιφανειών, φ/β-μόνωσης) και για τα υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα (φ/β-νερού, φ/β-αέρα) βάση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_a , την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία G [12].



Σχήμα 25 : Θερμοκρασίες για τα φ/β συστήματα που χρησιμοποιούμε απλά και υβριδικά , συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ηλιακής ακτινοβολίας..

Ενώ στο Σχήμα 26 δίνονται οι αντίστοιχες ηλεκτρικές αποδόσεις για τις ίδιες περιόδους λειτουργίας και ίδιες παραμέτρους [12].



Σχήμα 26 : Σχέση της θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσης των απλών φ/β και υβριδικών φ/β – θερμικών συστημάτων για τις ίδιες ώρες λειτουργίας.

Στο Σχήμα 25 παρατηρείται ότι σε συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας, ταχύτητας ανέμου και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος το σύστημα το οποίο παρουσιάζει την υψηλότερη θερμοκρασία είναι το απλό σύστημα φ/β-μόνωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μονωτικό υλικό απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία η οποία και αυξάνει την θερμοκρασία του

υλικού. Το σύστημα του φ/β με τις δύο ελεύθερες επιφάνειες στο περιβάλλον (φ/β-ελεύθερων επιφανειών) δέχεται θερμότητα τόσο από το περιβάλλον και την θερμοκρασία που αποκτάει από την εισερχόμενη προσπίπτουσα σε αυτό ηλιακή ακτινοβολία. Τα υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός του ρευστού που χρησιμοποιείται ως μέσο μετάδοσης θερμότητας και απομακρύνει μέρος της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στις κυψέλες και το πλαίσιο.

Όπως είναι ήδη γνωστό η θερμοκρασία είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζει την ηλεκτρική απόδοση ενός φ/β. Έτσι λοιπόν στο Σχήμα 26 δίνεται ότι οι ηλεκτρικές αποδόσεις των υβριδικών φ/β συστημάτων (φ/β-νερού και φ/β-αέρα) είναι σημαντικά υψηλότερες από ότι οι αποδόσεις των απλών φ/β συστημάτων (φ/β-ελεύθερων επιφανειών και φ/β-μόνωσης). Οι ηλεκτρικές αποδόσεις n_{el} που μας δίνονται [12] σε αριθμούς είναι για το απλό φ/β-μόνωσης $n_{μόνωσης} = 0.113$, το φ/β-ελεύθερων επιφανειών $n_{ελ.επιφ.} = 0.124$ ενώ για τα υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα, φ/β-νερού $n_{νερού} = 0.128$ και φ/β-αέρα $n_{αέρα} = 0.126$,

Όλες οι παραπάνω μετρήσεις γίνονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_a = 29^\circ C$ και υπό τις ίδιες ήπιες καιρικές συνθήκες, γίνονται μετρήσεις στα ίδια συστήματα για θερμές καιρικές συνθήκες με $T_a = 35^\circ C$ και ψυχρές καιρικές συνθήκες με $T_a = 15^\circ C$. Αυτά τα αποτελέσματα δίνονται στο Πίνακα 2 [12].

Πίνακας 2: Αποτελέσματα για συγκρινόμενα συστήματα σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες ($T_{\phi/\beta}$ = θερμοκρασία φ/β, n_{el} = θερμική απόδοση).

T_a ($^\circ C$)	$G(W \cdot m^2)$	φ/β – νερού		φ/β – αέρα	
		$T_{\phi/\beta}$ ($^\circ C$)	n_{el}	$T_{\phi/\beta}$ ($^\circ C$)	n_{el}
15.0	850	32.0	0.134	31.9	0.134
29.0	910	38.1	0.128	41.2	0.126
35.0	898	47.2	0.123	48.4	0.121
T_a ($^\circ C$)	$G(W \cdot m^2)$	φ/β – ελ.επιφαν.		φ/β - μόνωσης	
		$T_{\phi/\beta}$ ($^\circ C$)	n_{el}	$T_{\phi/\beta}$ ($^\circ C$)	n_{el}
15.0	850	33.9	0.132	50.2	0.118
29.0	910	42.7	0.124	55.2	0.113
35.0	898	54.1	0.114	68.7	0.098

Βάση όλων αυτών των στοιχείων είναι προφανές ότι η χρήση υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων είναι συμφέρουσα αφού επιτρέπει την αύξηση της ηλεκτρικής απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος ενώ παράλληλα αξιοποιεί την αύξηση θερμοκρασίας στο φ/β πλαίσιο παρέχοντας καλές θερμικές αποδόσεις. Να σημειωθεί ότι τα υβριδικά φ/β συστήματα που χρησιμοποιούν νερό η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού πρέπει να είναι πολύ χαμηλότερη από την θερμοκρασία περιβάλλοντος έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργία του συστήματος.

Με παρουσίαση των αποτελεσμάτων στις παραπάνω παραγράφους και από τον πίνακα 2 γίνεται προφανές γιατί τα υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα είναι πιο αποδοτικά από τα συμβατικά φ/β συστήματα. Παρατηρείται πως στα υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα όσο αυξάνεται η θερμοκρασία στο φ/β πλαίσιο υπάρχει αύξηση στην ηλεκτρική απόδοση ενώ στα απλά φ/β λόγω αυτής της αύξησης της θερμοκρασίας υπάρχει μείωση της ηλεκτρική απόδοσης.

Τα υβριδικά συστήματα που χρησιμοποιούν επιπλέον κάλυψη γυάλινης επιφάνειας αυξάνουν την θερμική τους απόδοση κατά 30% ενώ μειώνουν ταυτόχρονα της οπτικές απώλειες τους κατά 16%. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν μεγαλύτερη θερμική απόδοση. Μπορεί η ηλεκτρική τους απόδοση να είναι μικρότερη σε σχέση με άλλα υβριδικά συστήματα όμως κινείται σε αποδεκτά επίπεδα.

Τα υβριδικά συστήματα που έχουν διαχεόμενους ενισχυτικούς ανακλαστήρες (Δ.Ε.Α) παρουσιάζουν αυξημένη ηλεκτρική απόδοση από τα απλά φ/β ενώ παράλληλα έχουν και καλή θερμική απόδοση.

Τέλος τα υβριδικά συστήματα που χρησιμοποιούν και επιπλέον γυάλινη επικάλυψη και Δ.Ε.Α παρουσιάζουν την καλύτερη παραγωγή ενέργειας εάν συγκριθούν με τα βασικά υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα (φ/β-θερμικά συστήματα νερού ή αέρα)

Τα υβριδικά φ/β-νερού συστήματα μπορούν να χρησιμοποιούνται για προθέρμανση νερού σε κατοικίες, βιομηχανίες, σε πισίνες κ.α. Ενώ τα υβριδικά φ/β-αέρα κυρίως εξυπηρετούν την θέρμανση χώρων και τον φυσικό εξαερισμό κατοικιών, βιομηχανιών κ.α.

Φυσικά ένας σημαντικός παράγοντας στην επιλογή του συστήματος είναι ο οικονομικός. Το κόστος λοιπόν για μια τέτοια θερμική υβριδική φ/β μονάδα νερού είναι 10% παραπάνω από ένα απλό φ/β ενώ μια υβριδική θερμική φ/β μονάδα αέρα είναι περίπου 8% ακριβότερη από ένα απλό φ/β σύστημα [12].

Στον Πίνακα 3 δίνονται συνοπτικά οι συγκρίσεις των παραπάνω συστημάτων.

Πίνακας 3: Συγκρίσεις υβριδικών συστημάτων

Συμβατικά φ/β συστήματα	Υβριδικά με επιπλέον κάλυψη γυαλιού	Υβριδικά με Δ.Ε.Α	Υβριδικά με επιπλέον κάλυψη γυαλιού και Δ.Ε.Α
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ενέργειας. ➤ Παραγωγή μόνο θερμικής ενέργειας. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας ➤ Αυξημένη θερμική απόδοση ➤ Ηλεκτρική απόδοση μειωμένη, αλλά σε αποδεκτά επίπεδα.. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας ➤ Αυξημένη ηλεκτρική απόδοση. ➤ Θερμική απόδοση σε αποδεκτά επίπεδα. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας ➤ Αυξημένη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσης, αυξημένη ολική απόδοση.

Κεφάλαιο 5

Εφαρμογές υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων

5.1 Εφαρμογές υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων στην βιομηχανία

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκαν τα υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα και πως τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αύξηση της ηλεκτρικής καθώς και της θερμικής απόδοσης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς.

Στον τομέα της βιομηχανίας που απαιτούνται μεγάλα ποσά τόσο ηλεκτρικής ενέργειας ενώ ταυτόχρονα χρειάζονται και σημαντικά ποσά θερμικής ενέργειας, τα υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα μπορούν να καλύπτουν κατά ένα μέρος επαρκώς τις ανάγκες μια βιομηχανικής μονάδας.

Τα υβριδικά συστήματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το ρευστό που χρησιμοποιούν ως μέσο μετάδοσης θερμότητας. Τα υβριδικά φ/β-αέρα είναι ιδανικά για χρήση μεταξύ άνοιξης και χειμώνα και για περιοχές που βρίσκονται σε μικρό γεωγραφικό πλάτος και η περιβάλλουσα θερμοκρασία είναι άνω των 20° C [25]. Τα υβριδικά φ/β-νερού μπορούν να χρησιμοποιούνται καθ'όλη την διάρκεια ενός έτους σε χώρες με μικρό γεωγραφικό πλάτος όπου η θερμοκρασία του νερού από τους αγωγούς δεν ξεπερνάει τους 20° C [25].

Από οικονομικής πλευράς ένα υβριδικό φ/β-αέρα είναι οικονομικότερο από ένα φ/β-νερού, όμως στην περίπτωση που επιθυμείται η χρήση του για βιομηχανική χρήση και για όλη την διάρκεια ενός έτους θα προτιμήσουμε το δεύτερο είδος.

Προτού κατασκευαστεί και τοποθετηθεί ένα υβριδικό σύστημα θα πρέπει να έχει αποφασιστεί εάν ζητείται αυξημένη θερμική ή ηλεκτρική απόδοση, συνήθως στις βιομηχανίες ζητείται αύξηση ηλεκτρικής απόδοσης χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η θερμική απόδοση είναι αμελητέα. Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως με την τοποθέτηση υβριδικών συστημάτων με μέσο μεταφοράς θερμότητας το νερό. Εάν σε αυτό τοποθετηθεί και επιπλέον κάλυψη γυαλιού θα υπάρξει αύξηση της θερμικής απόδοσης του συστήματος και θα μειωθεί η ηλεκτρική απόδοση, λόγω αυξημένων οπτικών απωλειών. Αν δεν υπάρξει η τοποθέτηση επιπλέον γυαλιού θα συμβεί το αντίστροφο.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμική απόδοση των υβριδικών συστημάτων είναι καταλληλότερη για διεργασίες που απαιτούν θερμότητα 60° C–80° C όπως επίσης και για διεργασίες σε θερμοκρασίες κάτω των 50° C. Ο λόγος είναι ώστε τόσο η θερμική αλλά και η ηλεκτρική απόδοση των συστημάτων να διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα [25].

Η θερμική απόδοση ενός υβριδικού συστήματος το οποίο βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας δίνεται από [25]:

$$n_{th} = \dot{m} \cdot C_p (T_{out} - T_{in}) / G \cdot A_a \quad \text{Εξ.}(19)$$

Η ηλεκτρική απόδοση ενός υβριδικού συστήματος εξαρτάται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και δίνεται από [25]:

$$n_{el} = I_m \cdot V_m / G \cdot A_a \quad \text{Εξ.}(20)$$

Η θερμοκρασία του φ/β (T_{pv}) επηρεάζεται τόσο την ηλεκτρική και την θερμική απόδοση του συστήματος [25] :

$$T_{pv} = 30 + 0.0725 \cdot (G - 150) + 1.14 \cdot (T_a - 25) \quad \text{Εξ.}(21)$$

Τα υλικά τα οποία αποτελούν τα φ/β στοιχεία μπορεί να είναι είτε a-Si ή pc-Si και οι αποδοτικότητές τους δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις [25]:

$$\begin{aligned} \text{Για το a-Si} \quad n_{th} &= 0.71 - 9.04 \cdot (\Delta T / G) \\ n_{el} &= 0.1457 - 0.00094 \cdot (T_{pv})_{eff} \end{aligned} \quad \text{Εξ.}(22)$$

$$\begin{aligned} \text{Για το pc-Si} \quad n_{th} &= 0.75 - 8.83 \cdot (\Delta T / G) \\ n_{el} &= 0.0485 - 0.00011 \cdot (T_{pv})_{eff} \end{aligned} \quad \text{Εξ.}(23)$$

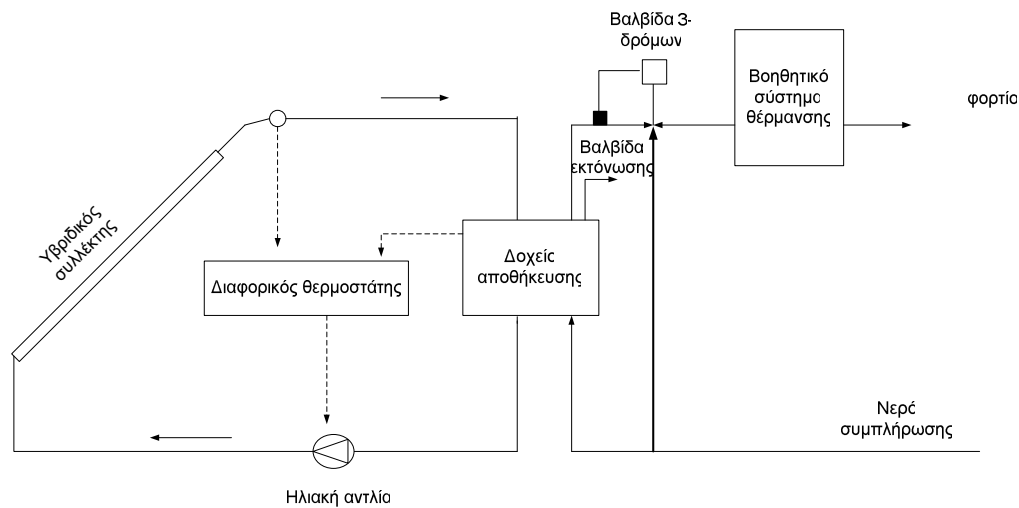
Όπου $(T_{pv})_{eff}$ είναι η ηλεκτρική απόδοση σε σχέση με την θερμοκρασία του φ/β στοιχείου και δίνεται [26]:

$$(T_{pv})_{eff} = T_{pv} + (T_{pv/t} - T_a) \quad \text{Εξ.}(24)$$

Επίσης η ύπαρξη εναλλακτών ρεύματος και άλλων βοηθητικών συσκευών μπορεί να επηρεάσει την ηλεκτρική και θερμική απόδοση του συστήματος και για αυτό θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν [26].

Ο Καλογιρίου [25] μελέτησε πειραματικά μια τέτοια διάταξη που μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανικές μονάδες. Σε μια κατασκευή για βιομηχανικές εφαρμογές η αρχή λειτουργίας της υβριδικής μονάδας που παράγει θερμική ενέργεια πρέπει να εφαρμόζεται απευθείας με το σύστημα της βιομηχανικής διεργασίας που το απαιτεί. Ο πιο εύκολος τρόπος για να γίνει αυτό είναι με το να χρησιμοποιείται η εξαγόμενη θερμική ενέργεια στο σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας της βιομηχανικής μονάδας κάτι τέτοιο επιτρέπει στο σύστημα να λειτουργεί ακόμα και σε περιόδους όπου η ηλιακή ακτινοβολία πάνω στο υβριδικό σύστημα είναι μικρή (π.χ νυχτερινή λειτουργία).

Ο Kalogirou δίνει μια σχηματική απεικόνιση, Σχήμα 27, ενός τέτοιου συστήματος όσον αφορά την εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας από μια βιομηχανική μονάδα για την παροχή ζεστού νερού ή ατμών χαμηλής θερμοκρασίας σε μια βιομηχανική διεργασία [25].



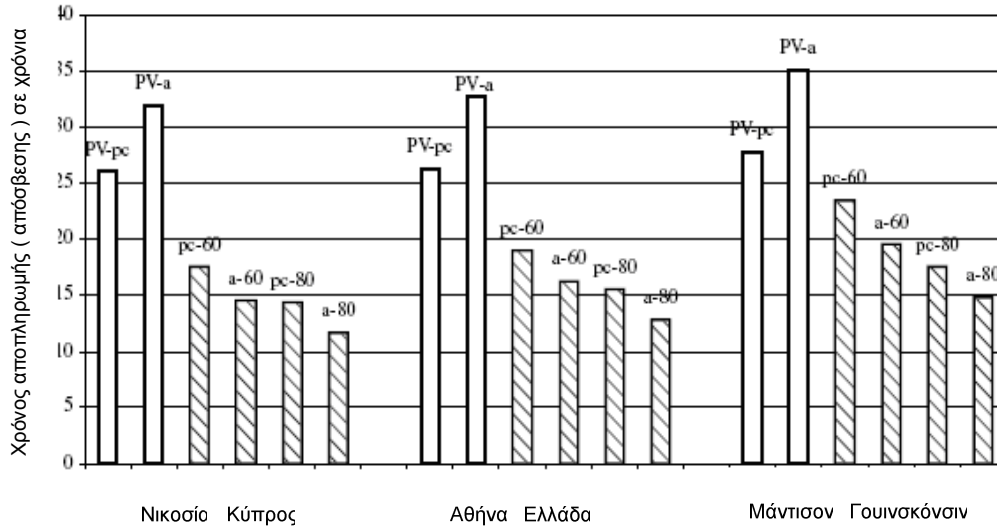
Σχήμα 27: Διάγραμμα τοποθέτησης ενός υβριδικού φ/β-θερμικού συστήματος νερού σε βιομηχανική εφαρμογή για χρήση της θερμικής ενέργειας του υβριδικού συστήματος.

Πιο αναλυτικά το λειτουργικό μέρος του συστήματος αποτελείται από μια διάταξη ή συστοιχία υβριδικών φ/β συλλεκτών, μια αντλία που ελέγχει την ροή, ένα δοχείο αποθήκευσης και μια βαλβίδα θερμικής εκτόνωσης όταν η θερμοκρασία στην δεξαμενή ξεπεράσει την τιμή την οποία έχουμε θέσει σαν μέγιστο όριο. Ένα τέτοιο σύστημα που χρησιμοποιείται σε βιομηχανίες εκμεταλλεύεται όλο το ποσό θερμικής ενέργειας που υπάρχει στην δεξαμενή αποθήκευσης ενώ νέο κρύο νερό εισέρχεται στο σύστημα με την βοήθεια αγωγών. Αυτή η διαδικασία βοηθάει να υπάρχει χαμηλή θερμοκρασία στην δεξαμενή και μεγάλη εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας που μας δίνεται από το υβριδικό φ/β σύστημα. Σε περίπτωση που το ρευστό δεν είναι τόσο ζεστό όσο πρέπει τότε το βοηθητικό σύστημα θέρμανσης μπαίνει σε λειτουργία και αποκτάτε η επιθυμητή θερμοκρασία για την διεργασία [25].

Στο πείραμα που έκανε ο Kalogirou [25] δίνεται ότι τα συστήματα με φ/β κυψέλες από pc-Si μας δίνουν υψηλότερες τιμές ολικής ενέργειας (ηλεκτρική και θερμική) με κύρια αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ τα φ/β στοιχεία από a-Si έχουν χαμηλότερη ολική ενέργεια αλλά υψηλότερη θερμική απόδοση.

Στην ίδια μελέτη του Kalogirou [25] το οικονομικό κόστος υπολογίζεται για τα υβριδικά συστήματα σε σχέση με απλά φ/β συστήματα και σαν διάρκεια ζωής των φ/β συστημάτων

ορίστηκαν τα 20 έτη και για εγκαταστάσεις σε τρεις διαφορετικές περιοχές τα στοιχεία δίνονται στο Σχήμα 28.



Σχήμα 28: Απεικόνιση της οικονομικής απόσβεσης διαφορετικών φ/β συστημάτων για διαφορετικές περιοχές με διαφορετική ηλιοφάνεια. (οι λευκές στήλες είναι τα απλά φ/β συστήματα που έχουν είτε στοιχεία από a-Si ή pc-Si, οι γραμμοσκιασμένες στήλες είναι τα υβριδικά φ/β συστήματα)

Φαίνεται ότι και στις τρεις περιοχές το χρονικό περιθώριο απόσβεσης μιας τέτοιας επένδυσης είναι από 26 έως 35 χρόνια σε αντίθεση με τα υβριδικά φ/β-θερμικά συστήματα νερού όπου το χρονικό περιθώριο είναι σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα και ποικίλει με βάση το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένα τα φ/β στοιχεία. Μια τέτοια εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί από βιομηχανίες βοηθώντας στα θερμικά φορτία και παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Τέτοιου είδους επενδύσεις επιδοτούνται από το κράτος, η επιδότηση μιας τέτοιας κατασκευής φτάνει έως και το 40 % επί του συνολικού κόστους μια κατασκευής [27].

5.2 Εφαρμογές υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων για οικιακή χρήση

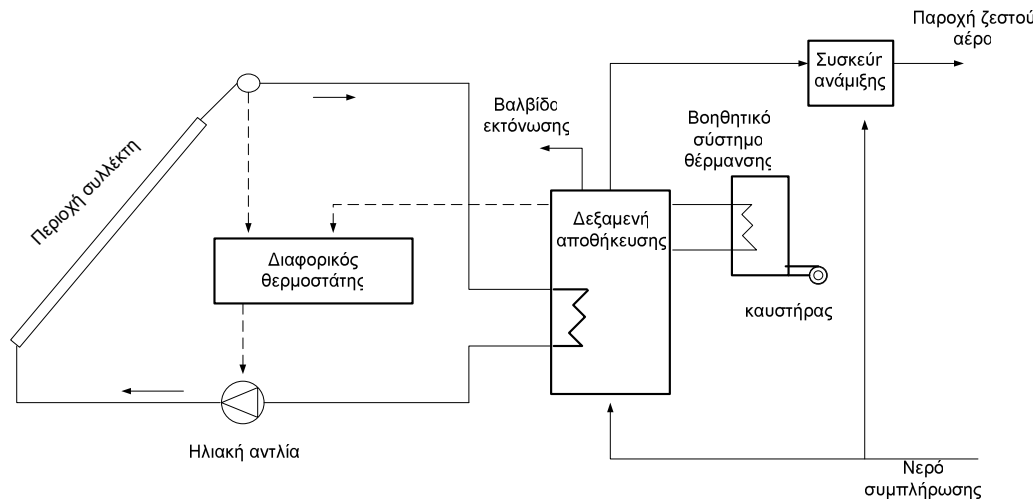
Τα υβριδικά φ/β συστήματα μπορούν και χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες εκεί όμως η λειτουργία τους δεν είναι απόλυτη αλλά βοηθάει κατά ένα μέρος σε ορισμένες βιομηχανικές εργασίες. Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιούνται όμως και για την κάλυψη αναγκών ενεργειακά μικρότερων από αυτές μιας βιομηχανίας όπως η εγκατάσταση τους σε κατοικίες, γραφεία, σύμπλοκα κατοικιών κ.α και να καλύπτουν σημαντικό μέρος των αναγκών σε θερμική και ηλεκτρική ενέργεια. Οι περισσότερες κατοικίες χρησιμοποιούν ήδη θερμοσίφωνες για παραγωγή ζεστού νερού, οι θερμοσίφωνες μπορούν να αναφερθούν ως το

πιο απλό σύστημα που εφαρμόζει τις αρχές των φ/β για την παραγωγή ζεστού νερού. Τα υβριδικά θερμικά συστήματα μας παρέχουν ηλεκτρική και θερμική ενέργεια για ιδιόχρηση.

Τα υβριδικά συστήματα τοποθετούνται αποτελεσματικά σε μια οριζόντια ή επικλινή σκεπή όταν το κτίριο βρίσκεται σε χαμηλό γεωγραφικό πλάτος, ενώ η τοποθέτησή τους στην πρόσοψη κτιρίων είναι πιο αποτελεσματική σε περιοχές μεσαίου ή υψηλού γεωγραφικού πλάτους όπου οι ηλιακές ακτίνες έχουν χαμηλότερες γωνίες πρόσπτωσης. Στην περίπτωση όπου το σύστημα εγκατασταθεί για χρήση σε ένα σπίτι η επιφάνεια που απαιτείται από το φ/β είναι $3-5m^2$ και το μέγεθος της δεξαμενής αποθήκευσης είναι $150-300lt$ ενώ εάν επιθυμούμε την χρήση για συγκρότημα κατοικιών, ξενοδοχεία, νοσοκομεία κ.α. τότε η επιφάνεια κάλυψης του φ/β είναι $30-50m^2$ και η δεξαμενή αποθήκευσης έχει μέγεθος $1000-3000lt$ [28].

Η θερμική αποδοτικότητα ενός υβριδικού συστήματος το οποίο βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας, η ηλεκτρική απόδοση ενός υβριδικού συστήματος που εξαρτάται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του φ/β (T_{pv}) που επηρεάζει τόσο την ηλεκτρική και την θερμική απόδοση του συστήματος καθώς και τα υλικά τα οποία αποτελούν τα φ/β στοιχεία μας μπορεί να είναι είτε a-Si ή pc-Si και οι αποδοτικότητές τους δίνονται από τις Εξισώσεις (20) έως (25) [25].

Τα υβριδικά φ/β συστήματα θεωρούνται ενεργά συστήματα και χρησιμοποιούν αντλία για την κυκλοφορία του ρευστού από τον συλλέκτη στο δοχείο αποθήκευσης. Η κίνηση του ρευστού γίνεται βάση ενός θερμοστάτη ο οποίος είναι προγραμματισμένος να επιτρέπει την κυκλοφορία όταν το θερμό νερό φτάσει στο δοχείο αποθήκευσης, έπειτα κρύο ρευστό εισέρχεται στον συλλέκτη. Όταν η θερμοκρασία στην δεξαμενή αποθήκευσης ξεπεράσει το όριο τότε με την βοήθεια της βαλβίδας εκτόνωσης το σύστημα επανέρχεται σε ισοροπία. Με αυτή την διαδικασία έχουμε αύξηση της ηλεκτρικής απόδοσης και καλή θερμική απόδοση από το ρευστό που χρησιμοποιούμε σαν μέσο μετάδοσης θερμότητας. Ένα τέτοιο σύστημα δίνεται στο Σχήμα 29 [28].



Σχήμα 29: Διάγραμμα ενός ενεργού υβριδικού φ/β συστήματος.

Όταν ένα υβριδικό φ/β-θερμικό σύστημα χρησιμοποιείται πρέπει να προσδιοριστεί η αύξηση της ενέργειας η οποία ζητείται, δηλαδή εάν ζητείται αύξηση ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας. Τα υβριδικά συστήματα σε σχέση με τα απλά φ/β και τους απλούς φ/β θερμοσίφωνες παράγουν περισσότερη ολική ενέργεια.

Εάν όμως αυξηθεί η θερμική απόδοση σε ένα υβριδικό σύστημα τότε η ηλεκτρική του απόδοση θα είναι χαμηλότερη σε σχέση με ένα απλό φ/β σύστημα λόγω της αύξησης θερμοκρασίας στις φ/β κυψέλες του υβριδικού συστήματος. Σε γενικές γραμμές ανάλογα με την τοποθεσία το σύστημα μπορεί να δώσει ηλεκτρική ενέργεια από 222 – 532 kW h και η ηλιακή συνεισφορά είναι μεταξύ 29% έως 72% και αποφασίζετε από το ποσοστό του φορτίου του ζεστού νερού που καλύπτεται από την χρήση του υβριδικού συστήματος. Τα φ/β στοιχεία φτιαγμένα από pc-Si δίνει υψηλότερη ολική ενέργεια σε σχέση με τα φ/β στοιχεία από a-Si. Όμως τα στοιχεία από a-Si έχουν καλύτερη θερμική απόδοση [28].

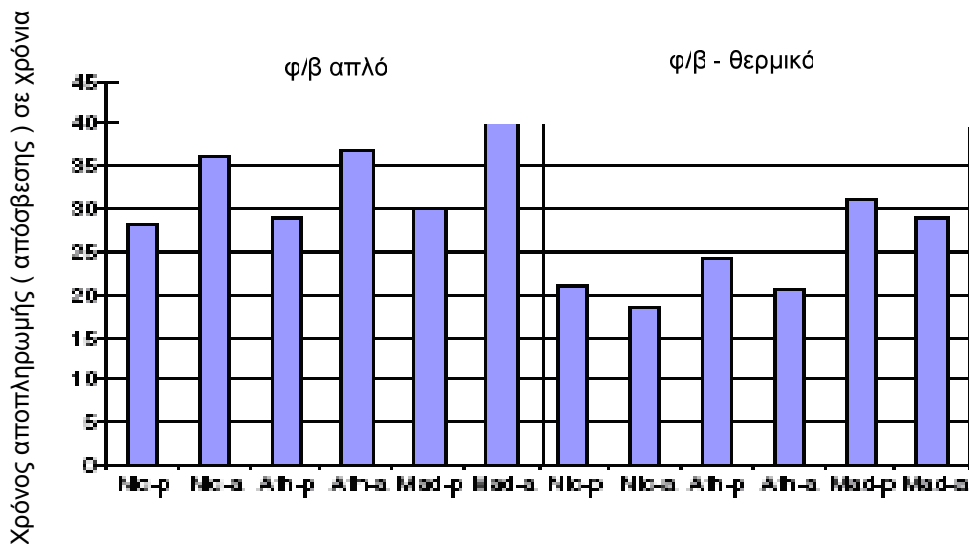
Όσον αφορά το κόστος της μιας τέτοιας κατασκευής πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν το κόστος των επιμέρους μηχανικών μερών που απαρτίζουν μια τέτοια εγκατάσταση (φ/β στοιχεία, μονάδα εξαγωγής θερμότητας, εναλλάκτες ρεύματος, καλώδια, αντλίες, σωλήνες κ.α). Τα συστήματα τα οποία απαιτούν μεγαλύτερες κατασκευές είναι πιο φθηνά λόγω της οικονομικής κλίμακας και δίνονται στον Πίνακα 4. Στο κόστος κατασκευής δεν περιλαμβάνεται το κόστος της δεξαμενής αποθήκευσης [28].

Πίνακας 4: Κόστος φ/β συστημάτων

Συγκεκριμένη κοστολόγηση συστημάτων			
Περιγραφή συστήματος	φ/β πλαίσιο	Κόστος(€)	Εξήγηση κόστους

Σύστημα θερμοσίφωνα (m^2)	-	900	1200€ για ολοκληρωμένο σύστημα – 300 € για δεξαμενή αποθήκευσης.
Θερμικό σύστημα(ανά m^2)	-	250	Περιλαμβάνει συλλέκτες , μόνωση και περιφερειακά υποστήριξης.
Μικρό φ/β σύστημα($4 m^2$)	pc - Si	3200	Τρέχουσα τιμή αγοράς περιλαμβάνει κόστος για BoS.
Μικρό φ/β σύστημα($4 m^2$)	a - Si	2000	Τρέχουσα τιμή αγοράς περιλαμβάνει κόστος για BoS
Μεγάλο φ/β σύστημα($40 m^2$)	pc - Si	28000	Τρέχουσα τιμή αγοράς περιλαμβάνει κόστος για BoS
Μεγάλο φ/β σύστημα($40 m^2$)	a - Si	16000	Τρέχουσα τιμή αγοράς περιλαμβάνει κόστος για BoS
Σύστημα θερμοσίφωνα με υβριδικό φ/β σύστημα($4 m^2$)	pc - Si	4100	4 X 800€ για φ/β + 900€ για ηλιακό θερμικό σύστημα
Σύστημα θερμοσίφωνα με υβριδικό φ/β σύστημα($4 m^2$)	a - Si	2900	4 X 500€ για φ/β + 900€ για ηλιακό θερμικό σύστημα
Μεγάλο υβριδικό φ/β –θερμικό σύστημα($40 m^2$)	pc - Si	38000	40 X 700€ για φ/β+40 X 250€ για ηλιακό θερμικό σύστημα
Μεγάλο υβριδικό φ/β –θερμικό σύστημα($40 m^2$)	a - Si	26000	40 X 400€ για φ/β+40 X 250€ για ηλιακό θερμικό σύστημα

Ο Kalogiou [28] στην εργασία του παρουσιάζει τον χρόνο που χρειάζεται ένα υβριδικό σύστημα να αποσβέσει το κόστος κατασκευή τους, και πήρε τρεις διαφορετικές τοποθεσίες. Στην συγκεκριμένη εργασία το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας θεωρήθηκε 0.1 €/kW h και το κόστος του πετρελαίου Diesel 0.62 €/Lt. Η έκπτωση στην αγορά θεωρήθηκε 6.5% και πληθωρισμός 5.2% και τέλος ο ρυθμός του πληθωρισμού για τα καύσιμα θεωρείται 10%. Τα υβριδικά συστήματα καθώς και τα απλά φ/β θεωρήθηκε ότι έχουν διάρκεια ζωής πάνω από 20 χρόνια. Στο Σχήμα 30 δίνονται τα χρόνια αποπληρωμής των συστημάτων.



Σχήμα 30: Έτη αποπληρωμής για τα απλά φ/β συστήματα και τα υβριδικά φ/β συστήματα για τρεις διαφορετικές τοποθεσίες, και στα δύο συστήματα χρησιμοποιούνται διαφορετικά είδη φ/β στοιχείων.

Ανεξάρτητα από την τοποθεσία και το είδος του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των φ/β κυψελών τα υβριδικά φ/β συστήματα παρουσιάζουν μειωμένο χρόνο απόσβεσης, αυτό οφείλεται στην υψηλότερη ολική ενέργεια που προσφέρουν τα συστήματα αυτά καθώς και το γεγονός ότι προσφέρουν ηλεκτρική και θερμική ενεργεία καθιστώντας ικανά να ικανοποιούν τόσο τις ενεργειακές ανάγκες αλλά και τις ανάγκες σε ζεστό νερό χωρίς την χρήση άλλων συστημάτων.

5.3 Σύγκριση των υβριδικών φ/β συστημάτων νερού και αέρα

Στα παραπάνω κεφάλαια αναλύθηκαν οι δομές και η λειτουργία των υβριδικών φ/β συστημάτων . Στον παρακάτω Πίνακα 5 εμφανίζονται συγκεντρωμένα τα χαρακτηριστικά των δυο διαφορετικών υβριδικών συστημάτων.

Πίνακας 5 :Σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών υβριδικών φ/β-θερμικών συστημάτων που παρουσιάστηκαν

Φ/Β θερμικά ηλιακά συστήματα με νερό (pv-water).	Φ/Β θερμικά ηλιακά συστήματα με αέρα (pv-air).
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	
Με χρήση φ/β κυψελών από a-Si έχουμε μεγαλύτερη θερμική απόδοση και μικρότερη ηλεκτρική.	Με χρήση φ/β κυψελών από a-Si έχουμε μεγαλύτερη θερμική απόδοση και μικρότερη ηλεκτρική.

Με χρήση φ/β κυψελών από pc-Si έχουμε μικρότερη θερμική και μεγαλύτερη ηλεκτρική.	Με χρήση φ/β κυψελών από pc-Si έχουμε μικρότερη θερμική και μεγαλύτερη ηλεκτρική.
ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	
<ul style="list-style-type: none"> • Σε βιομηχανικές μονάδες όπου επιθυμούμε προθέρμανση νερού(60–80 °C). • Η θερμική λειτουργία μπορεί να συνεχιστεί όλο το βράδυ. • Λειτουργούν με αποδεκτή θερμική απόδοση όλο το έτος. • Διάρκεια ζωής πάνω από 20 έτη. 	<ul style="list-style-type: none"> • Χρήση σε σπίτια ή εγκαταστάσεις γραφείου κυρίως όπου επιθυμούμε φυσική ψύξη (θέρμανση–ψύξη). • Λειτουργούν σε βέλτιστες τιμές από άνοιξη έως φθινόπωρο. • Διάρκεια ζωής πάνω από 20 έτη.
ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	
<p>Θερμική και ηλεκτρική απόδοση ανάλογα με το υλικό κατασκευής.</p> <p>Ηλεκτρική απόδοση φ/β κυψελίδας με :</p> <ul style="list-style-type: none"> • pc-Si = 0.12 • a-Si = 0.06 <p>Θερμική απόδοση φ/β κυψελίδας με :</p> <ul style="list-style-type: none"> • pc-Si = 0.6 • a-Si = 0.7 	<p>Θερμική και ηλεκτρική απόδοση ανάλογα με το υλικό κατασκευής.</p> <p>Ηλεκτρική απόδοση φ/β κυψελίδας με :</p> <ul style="list-style-type: none"> • pc-Si = 0.12 • a-Si = 0.06 <p>Θερμική απόδοση φ/β κυψελίδας με :</p> <ul style="list-style-type: none"> • pc-Si = 0.4 • a-Si = 0.45
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	
<ul style="list-style-type: none"> • Πολυπλοκότερη κατασκευή. • Διάταξη φ/β συλλεκτών. • Αντλία ελέγχου ροής. • Σωλήνες ροής ρευστού. • Βαλβίδα θερμικής εκτόνωσης. 	<ul style="list-style-type: none"> • Απλούστερη κατασκευή. • Διάταξη φ/β συλλεκτών. • Σύστημα μέτρησης αέρα. • Σύστημα μέτρησης θερμοκρασίας. • Σύστημα μέτρησης ταχύτητας ανέμου.

<ul style="list-style-type: none"> • Δεξαμενή αποθήκευσης νερού. 	<ul style="list-style-type: none"> • Σύστημα μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας.
ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	
10% ακριβότερο από ένα απλό φ/β σύστημα.	8% ακριβότερο από ένα απλό φ/β σύστημα.
ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	
<ul style="list-style-type: none"> • Σύστημα από a-Si σε 13 έτη. • Σύστημα από pc-Si σε 14 έτη. 	<ul style="list-style-type: none"> • Σύστημα από a-Si σε 13 έτη. • Σύστημα από pc-Si σε 14 έτη.
ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	
<ul style="list-style-type: none"> • Το νερό παρουσιάζει ηλεκτρική αγωγιμότητα. • Το κόστος λειτουργίας αυξάνει με χρήση αντλιών. • Ακριβότερο κατασκευαστικά. 	<ul style="list-style-type: none"> • Δεν μπορεί να δώσει επαρκή θερμική απόδοση όλο το έτος. • Εάν τοποθετηθεί αντλία αέρα για εξαναγκασμένη ροή τότε έχουμε αύξηση κόστους και μειώνεται η ολική αποδοτικότητα.
ΑΙΣΘΗΤΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ	
<p>Και στις δύο περιπτώσεις η αισθητική εικόνα του χώρου δεν επηρεάζεται από τα συστήματα αυτά αφού η όψη και η τοποθέτηση τους είναι παρόμοια με αυτή των συμβατικών φ/β συστημάτων.</p>	

Συνομειύσεις

Π.Σ = πρότυπες συνθήκες

φ/β = φωτοβολταϊκό

Σ.Π.Σ = σύνθετος παραβολικός συγκεντρωτής (CPC=compound parabolic concentrator)

Η.Σ.Θ = ηλιακός συλλέκτης θερμότητας (SHC=solar heat collector)

Δ.Ε.Α = διαχεόμενος ενισχυτικός ανακλαστήρας

a-Si = άμορφη σιλικόνη

pc-Si = πολυκρυσταλλική σιλικόνη

lt = λίτρα

Min = λεπτά

Συμβολισμοί

I = ένταση ρεύματος.

V = τάση ρεύματος.

I_{sc} = ρεύμα βραχυκύκλωσης.

V_{oc} = τάση ανοιχτοκύκλωσης.

P_{max} = μέγιστη ισχύς.

P_m = ισχύ αιχμής.

I_m = ένταση ρεύματος φ/β σε μέγιστη ισχύ.

V_m = τάση ρεύματος φ/β σε μέγιστη ισχύ.

γ_{pm} = θερμικός συντελεστής.

P_p = μέγιστη ηλεκτρική ισχύς.

E = πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας.

E_{STC} = πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας σε Π.Σ.

$V_{m,STC}$ = τάση ρεύματος σε μέγιστη ισχύ και Π.Σ.

$I_{m,STC}$ = ένταση ρεύματος σε μέγιστη ισχύ και Π.Σ.

θ_{STC} = θερμοκρασία σε Π.Σ.

θ_C = θερμοκρασία λειτουργίας.

$P_{p\theta}$ = ενέργεια θέρμανσης.

G = ένταση ηλιακής ακτινοβολίας.

R = συντελεστής ανάκλασης του φ/β πλαισίου.

η = απόδοση μετατροπής ακτινοβολίας σε ενέργεια.

W_n = συνολική θερμότητα που παίρνει ο συλλέκτης.

n_C = θερμική απόδοση.

A_p = επιφάνεια φ/β κυψέλης.

A_C = επιφάνεια Η.Σ.Θ.

R_n = απόδοση συντελεστή ανάκλασης φ/β πλαισίου.

n_C^* = θερμική απόδοση του υβριδικού φ/β-θερμικού συστήματος.

W_{tot} = ολική ενέργεια.

A = έκταση επιφάνειας (m^2).

T_g = θερμοκρασία γυαλιού.

$h_{r_{gs}}$ = ύψος ακτινοβολίας περιβάλλοντος και της γυάλινης επιφάνειας.

$h_{c_{gw}}$ = συντελεστής θερμότητας περιβάλλοντος.

T_{f1} = θερμοκρασία ρευστού που κινείται στον πρώτο αγωγό.

$h_{r_{pg}}$ = ύψος ακτινοβολίας μεταξύ πλάκας και γυάλινου καλύμματος.

$h_{c_{pf1}}$ = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ρευστού στο πρώτο κανάλι.

T_p = θερμοκρασία πλάκας απορρόφησης.

T_{bp} = θερμοκρασία πίσω πλάκας.

T_{f2} = θερμοκρασία ρευστού που κινείται στον δεύτερο αγωγό.

$h_{r_{pbp}}$ = ύψος ακτινοβολίας μεταξύ πλάκας απορρόφησης και πίσω πλάκας.

$h_{c_{bpf2}}$ = συντελεστής θερμότητας της πλάκας απορρόφησης και του δεύτερου αγωγού.

$h_{c_{gf1}}$ = συντελεστής θερμότητας του γυάλινου καλύμματος και του πρώτου αγωγού.

a_g = θερμοκρασία γυαλιού.

S_{tot} = ολική ακτινοβολία.

τ_g = μετάδοση στο γυαλί.

ρ_R = ανάκλαση ανακλαστήρα.

ρ_p = ανακλαστικότητα απορροφητικής πλάκας.

T = θερμοκρασία.

T_a = θερμοκρασία περιβάλλοντος.

C = συγκεκριμένο ποσό θερμότητας.

R = ανακλαστήρας.

T_s = θερμοκρασία φ/β στοιχείου.

T_w = θερμοκρασία πτερυγίου.

n_p = απόδοση πτερυγίου.

T_f = θερμοκρασία στον αγωγό.

$A_{ab(T)}$ = επιφάνεια επάνω πλάκας απορρόφησης.

A_{c1} = επιφάνεια μετάδοση θερμότητας.

W = πάχος συλλέκτη.

\tilde{n} = μέσος αριθμός ανακλάσεων για την ακτινοβολία που περνάει μέσω του Σ.Π.Σ στην αποδεκτή γωνία.

U = συντελεστής απώλειας θερμότητας.

d = διόρθωση απώλειας κενού.

a_p = απορροφητικότητα πλάκας.

S_U = συντελεστής απώλειας θερμότητας φ/β πλάκας.

n = απόδοση.

\tilde{n}_g = μέση τιμή απόδοσης γυάλινου καλύματος.

\tilde{n}_p = μέση τιμή απόδοσης απορροφητικής πλάκας.

\tilde{n}_R = μέση τιμή απόδοσης ανακλαστήρα.

a_{pv} = απορροφητικότητα φ/β.

$A_{ab(B)}$ = επιφάνεια κάτω απορροφητικής πλάκας.

s_D = ολική διαχέουσα ακτινοβολία.

s_B = ολική ακτίνα ακτινοβολίας.

h_f = ύψος πτερυγίου.

w_f = πάχος πτερυγίου.

h = συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.

L = μήκος συλλέκτη.

k_f =θερμική αγωγιμότητα πτερυγίου.

n_f = απόδοση πτερυγίου.

C_{f2} = συγκεκριμένο ποσό θερμότητας στον δεύτερο αγωγό.

m^o =ρυθμός ροής μάζας.

C_f = παράγοντας συγκέντρωσης.

T_{in} = θερμοκρασία εισόδου ρευστού.

T_{out} = θερμοκρασία εξόδου ρευστού.

n_{ref} = αναφερόμενη απόδοση φ/β.

n_{pv} = απόδοση φ/β.

$n_{pv/t}$ = απόδοση υβριδικού φ/β-θερμικού.

T_{pav} = ενδιάμεση θερμοκρασία.

T_{ref} = θερμοκρασία αναφοράς σε Π.Σ (25° C).

n_{th} = θερμική απόδοση.

n_{el} = ηλεκτρική απόδοση.

ΔT = διαφορά θερμοκρασίας.

L/R = αναλογία πλάτους φ/β.

I_{ref} = ένταση αναφοράς ενισχυτή ανάκλασης.

I_{net} = καθαρή ολική ηλιακή ακτινοβολία.

I_{tot} = ολική ηλιακή ακτινοβολία.

C_t = αναλογία συγκέντρωσης.

R = πλάτος ανακλαστήρα.

L = πλάτος φ/β στοιχείου.

$CR \cdot (1/\sin \theta)$ = αναλογία συγκέντρωσης Σ.Π.Σ.

\tilde{E} = μέση τιμή κλάσματος εκπέμπουσας ακτινοβολίας από Σ.Π.Σ.

U_m = ταχύτητα ανέμου.

•
 m = ρυθμός ροής μάζας υγρού.

T_{pv} = θερμοκρασία φ/β.

$T_{pv/t}$ = θερμοκρασία υβριδικού φ/β-θερμικού.

$(T_{pv})_{eff}$ = ηλεκτρική απόδοση φ/β σε σχέση με θερμοκρασία.

Βιβλιογραφία

- [1] Φραγκιαδάκης, I.E. (2004) 'Φωτοβολταϊκά συστήματα'
- [2] Mohd. Yusof Othman, Hj., Baharudin, Y., Kamaruzzaman, S., Mohd. Nazari Abu Bakar (2004) 'Performance analysis of a double-pass photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector with CPC and fins'
- [3] Kern, Jr.E., Russell, M. (1978) 'Combined photovoltaic and thermal hybrid collector system', Proceedings of 13th IEEE Photovoltaic Specialist pp. 1153–7.
- [4] Florschuetz, L. (1979) 'Extension of the Hottel–Whillier model to the analysis of combined photovoltaic thermal flat collector', Solar Energy, 22:361–6.
- [5] Hendrie, S. (1979) 'Evaluation of combined photovoltaic thermal collectors', In Proc. ISES Int.Congress, Atlanta USA, Vol. 3, 1865–1869.
- [6] Raghuraman, P. (1981) 'Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/thermal flat plate collector performance', Solar Energy Eng, 103:291–8.
- [7] Cox, C., Raghuraman, P. (1985) 'Design considerations for flat-plate photovoltaic/thermal collectors', Solar Energy, 35:227–45.
- [8] Lalovic, B. (1986) 'A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector', Solar cells 19, 131-138.
- [9] Loferski, J., Ahmad, J.and Pandey, A. (1988) 'Performance of photovoltaic cells incorporated into unique hybrid photovoltaic/thermal panels of a 2.8Kw residential', Solar energy conversion system In Proc. Of the 1988 Annual Meeting, American Solar Energy Society, Cambridge, Massachusetts.
- [10] Bhargava, A., Garg, H., Agarwal, R. (1991) 'Study of a hybrid solar system-solar air heater combined with solar cell', Solar Energy, 31(5):471–9.
- [11] Prakash, J. (1994) 'Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water', Energy Conv Manage, 35(11):967–72.
- [12] Tripanagnostopoulos, Y., Nousia, T., Souliotis, M. and Yianoulis, P. (2002) 'Hybrid photovoltaic/thermal solar systems', Solar energy Vol.72, No.3, pp 217-234
- [13] Takashima, T., Tanaka, T., Doi, T., Kamoshida, J., Tani, T., and Horigome, T. (1994) 'New proposal for photovoltaic–thermal solar energy utilization method', Solar energy 52, 241–245
- [14] Bergene, T., and Lovik, O. (1995) 'Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells', Solar Energy 55, 453-462

- [15] Garg, H., Agarwal, R., Bhargava, A. (1991) 'The effect of plane booster reflectors on the performance of a solar air heater with solar cells suitable for a solar dryer', *Energy Conv Manage*, 35(6):543–54
- [16] Garg, H., Adhikari, R. (2000) 'Hybrid photovoltaic/thermal utilisation systems', Final report submitted to All India Council of Technical Education. New Delhi, India
- [17] Garg, H., Adhikari, R. (1998) 'Transient simulation of conversional hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) air heating collectors', *Int J Energy Res* 22:547–62
- [18] Zakharchenko, R., Licea-Jimenez, L., Perez-Garcia, S., Vorobiev, P., Dehes-Carrascoc, U., Perez-Robles, J., Gonzalez-Hernandez, J., Vorobiev, Y. (2004) 'Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system', *Solar energy materials & Solar cells* 82, 253-261
- [19] Bosanac, M., Sorensen, B., Ivan, K., Sorensen, H., Bruno, N., Jamal, B. (2003) 'Photovoltaic/thermal solar collectors and their potential in Denmark', Final Report, EFP Project, 1713/00-0014
- [20] Coventry, S., Lovegrove, K. (2003) 'Development of an approach to compare the 'value' of electrical and thermal output from a domestic PV/thermal system', *Solar Energy* 75(1):63–72
- [21] Florschuetz, L. (1979) 'Extension of the Hottel–Whillier model to the analysis of combined photovoltaic thermal flat collector', *Solar Energy*, 22:361–6
- [22] Garg, H., Adhikari, R. (1979) 'Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs', *Int. J Energy Res*, 23:1295–304
- [23] Sopian, K., Yigit, K., Liu, H., Kakac, S., Veziroglu, T. (1996) 'Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters', *Energy Conv. Manage*, 37(11):1657–70
- [24] Anand Joshi, S., Arvind Tiwari 'Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic–thermal (PV/T) air collector', Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology Delhi, Hauz Khas, New Delhi 110016, India
- [25] Kalogirou, S., Tripanagnostopoulos, Y. (2006) 'Industrial application of PV/T solar energy systems', *Applied thermal engineering* 27, 1259-1270
- [26] Tripanagnostopoulos, Y., Souliotis, M., Battisti, R., Corrado, A. (2005) 'Industrial application of PV/T solar energy systems Energy, cost and LCA results of PV and hybrid PV/T solar systems', *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 13, 235–250
- [27] Ο αναπτυξιακός νόμος 2601/98 (1998) από την Π.Α.Ε www.rae.gr.
- [28] Kalogirou, S., Tripanagnostopoulos, Y. (2006) 'Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production', *Energy conversion and management* 47, 3368-3382

[29] Kalogirou, S. (2004) 'Solar thermal collectors and applications', Progress Energy Combust Sci, 30(3):231-95