

## ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ/ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

I. Τρυπαναγνωστόπουλος<sup>1</sup>, Σ. Τσελεπή<sup>2</sup>, Μ. Σουλιώτης<sup>1</sup>, J. K. Tonui<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Πάτρα, 26500 Ελλάδα

Τηλ./Fax: +30 2610 997472, e-mail: yiantrip@physics.upatras.gr

<sup>2</sup>Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 19<sup>ο</sup> χλμ. Λ. Μαραθώνα, 19009, Πικέρμι, Αθήνα, Ελλάδα

Τηλ.:+30 210 6603369, Fax:+30 210 6603318, e-mail: stselep@cres.gr

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Τα υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά ηλιακά συστήματα (φβ/θ) αποτελούνται από φωτοβολταϊκές γεννήτριες και μονάδες παραγωγής θερμότητας ενσωματωμένες σε ενιαίες συσκευές, μετατρέποντας την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική, καθώς και σε θερμική ενέργεια μέσω ρευστού απομάκρυνσης της θερμότητας που κυκλοφορεί στην πίσω επιφάνεια του φωτοβολταϊκού (φβ). Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η ενεργειακή συμπεριφορά υβριδικών ηλιακών φβ/θ συστημάτων για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού χρήσης. Η μελέτη αφορά διατάξεις δύο βασικών μεγεθών ως προς την επιφάνεια εγκατάστασης συσκευών, ενός μεγάλου 40 m<sup>2</sup> και 2000 l ζεστού νερού και ενός μικρού μεγέθους 4 m<sup>2</sup> και 200 l ζεστού νερού, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά αντί των διαδεδομένων θερμοσιφωνικών ηλιακών συστημάτων σε εγκαταστάσεις διασυνδεδεμένες με το ηλεκτρικό δίκτυο αλλά και σε αυτόνομες ενεργειακά εφαρμογές. Επιπλέον, μελετάται η βελτίωση της προτεινόμενης διάταξης με την χρήση πρόσθετου γυάλινου καλύμματος για την αύξηση της αποδιδόμενης θερμότητας καθώς επίσης και η εφαρμογή ενός συμπληρωματικού διάχυτου ανακλαστήρα, ο οποίος αυξάνει την ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των φβ/θ συσκευών και ισορροπεί κατά έναν τρόπο τη μείωση της ηλεκτρικής παραγωγής λόγω των οπτικών απωλειών από την πρόσθετη τοποθέτηση υαλοπινάκων. Γίνεται επίσης οικονομική ανάλυση σχετικά με τον χρόνο αποπληρωμής των υβριδικών φβ/θ συστημάτων με μια επιδότηση του κόστους αγοράς 40%, ο οποίος κρίνεται ικανοποιητικός σε σχέση με τα συμβατικά φβ και θερμικά συστήματα.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μεγαλύτερο μέρος της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τα φωτοβολταϊκά (φβ) κύτταρα δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό αλλά σε θερμότητα, η οποία συντελεί στην αύξηση της θερμοκρασίας τους με συνέπεια την μείωση της ηλεκτρικής τους απόδοσης. Η παραγωγή της θερμότητας από τα φβ πλαίσια βοηθά όχι μόνο στη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας τους αλλά μπορεί και να αξιοποιηθεί αυξάνοντας τη συνολική ενεργειακή τους απόδοση. Τα ηλιακά συστήματα που έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν τόσο ηλεκτρική όσο και θερμική ενέργεια είναι τα υβριδικά φωτοβολταϊκά / θερμικά (φβ/θ ή PV/T) συστήματα, τα οποία αναπτύσσονται τελευταία και έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται σε επιδεικτικές εφαρμογές.

Τα υβριδικά φβ/θ συστήματα συνίστανται από φβ πλαίσια με ενσωματωμένη θερμική μονάδα απολαβής της θερμότητας του φβ, όπου ένα κυκλοφορούν ρευστό χαμηλότερης θερμοκρασίας αυτής του φβ θερμαίνεται ψύχοντάς το. Η χρήση του νερού ως ρευστού απολαβής της θερμότητας είναι αποδοτική όλο το έτος, κυρίως σε χώρες με ήπιο ή θερμό κλίμα. Αυτές οι υβριδικές διατάξεις μπορούν να αξιοποιηθούν για την θέρμανση του νερού σε χαμηλές θερμοκρασίες (μέχρι 40° C) ώστε να επιτυγχάνεται παράλληλα και η διατήρηση χαμηλής θερμοκρασίας στα φβ πλαίσια. Η παραγωγή θερμότητας με κυκλοφορία αέρα απαιτεί απλούστερη και φθηνότερη διάταξη, αλλά η ψύξη του φωτοβολταϊκού είναι λιγότερο αποδοτική. Όταν ο αέρας του περιβάλλοντος έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη των 20 °C τα φβ/θ συστήματα αέρα έχουν περιορισμένες δυνατότητες εφαρμογής (κυρίως φυσικός αερισμός σε κτίρια και θέρμανση αέρα για ορισμένες βιομηχανικές και αγροτικές διεργασίες).

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

Αν το ρευστό απολαβής της θερμότητας δεν χρησιμοποιείται μόνο για την ψύξη του φβ αλλά και για άλλες πρακτικές εφαρμογές τότε οι συσκευές αυτού του τύπου συνιστούν τα υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά (φβ/θ) συστήματα. Στις συσκευές αυτές τα φβ πλαίσια και οι θερμικές μονάδες αποτελούν ενιαίες συσκευές και μπορούν να μετατρέπουν την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία ταυτόχρονα σε ηλεκτρισμό και θερμότητα. Οι υβριδικές φβ/θ συσκευές παρέχουν ποσότητα θερμότητας επιπλέον της ηλεκτρικής ενέργειας και κατά συνέπεια έχουν μεγαλύτερη ολική αποδιδόμενη ενέργεια

σε σχέση με τα απλά φβ πλαίσια και μπορεί να καταστούν οικονομικά αποδοτικές αν το κόστος της πρόσθετης θερμικής μονάδας είναι σχετικά μικρό. Τα υβριδικά φβ/θ συστήματα αέρα έχουν χρησιμοποιηθεί τελευταία σε εφαρμογές σε κτίρια (εγκατάσταση στην πρόσοψη ή στην επικλινή οροφή τους), ενώ τα φβ/θ νερού έχουν πολύ μικρότερη εφαρμογή και δεν έχουν ακόμη αναπτυχθεί πολλά εμπορικά μοντέλα<sup>(1)</sup>.

Από τις πρώτες εργασίες που αναφέρονται στην αξιοποίηση της θερμότητας στα φβ είναι των Kern και Russel<sup>(2)</sup>, της Hendrie<sup>(3)</sup>, του Florschuetz<sup>(4)</sup>, του Raghuraman<sup>(5)</sup> και των Cox και Raghuraman<sup>(6)</sup>. Σχετικά με τα υβριδικά συστήματα νερού, ξεχωρίζουν οι εργασίες των Bergene και Lovvik<sup>(7)</sup>, Kalogirou<sup>(8)</sup>, Huang κ.ά.<sup>(9)</sup>, Sandness και Rekstad<sup>(10)</sup>, Chow<sup>(11)</sup>, Coventry και Lovegrove<sup>(12)</sup> και πρόσφατα των Zondag κ.ά.<sup>(13,14)</sup>. Τέλος μεταξύ των ερευνητών που αναφέρονται σε φβ/θ συστήματα σε συνδυασμό με μικρής συγκέντρωσης ανακλαστήρες είναι ο Baali<sup>(15)</sup>, ο Garg κ.ά.<sup>(16)</sup>, ο Garg και Adhikari<sup>(17)</sup> και Brogren κ.ά.<sup>(18)</sup>.

Διάφορες μορφές διατάξεων φβ/θ συστημάτων με σκοπό την βελτίωση της συνολικής τους ενεργειακής απόδοσης μελετώνται στο Τμ. Φυσικής του Παν/μίου Πατρών. Η έρευνα αφορά συστήματα με νερό<sup>(19,20)</sup> καθώς και με αέρα για εφαρμογές ενσωμάτωσής τους στις προσόψεις κτιρίων<sup>(21,22,23)</sup>. Στο αντικείμενο αυτό μελετήθηκε και ο συνδυασμός φβ/θ με διάχυτο ανακλαστήρα για αύξηση της αποδιδόμενης συνολικής ενέργειας<sup>(24)</sup>. Επίσης, μια νέα σχεδίαση υβριδικών συστημάτων φβ/θ, στα οποία η απαγωγή της θερμότητας γίνεται με νερό ή με αέρα έδωσε ενδιαφέροντα αποτελέσματα<sup>(25)</sup>.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα από μοντέλα υβριδικών φβ/θ συστημάτων νερού, γίνεται μελέτη της αποδιδόμενης ηλεκτρικής και θερμικής τους ενέργειας και υπολογίζεται ο χρόνος αποπληρωμής τους για ενδεικτική εφαρμογή τους. Τα εξεταζόμενα φβ/θ συστήματα αφορούν μεγάλη εγκατάσταση 40 m<sup>2</sup> καθώς και μικρή μονάδα 4.0 m<sup>2</sup> ως εναλλακτική συσκευή των γνωστών ηλιακών θερμοσιφωνικών θερμαντήρων νερού.

## 2. ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΦΒ/Θ ΣΥΣΚΕΥΕΣ

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό κατά ένα μικρό ποσοστό (5%-15% ανάλογα τον τύπο του φβ) ενώ το μεγαλύτερο μέρος της μετατρέπεται σε θερμότητα, αυξάνοντας την θερμοκρασία λειτουργίας του φβ. Η αύξηση αυτή επιφέρει μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης του φβ και για τον λόγο αυτό επιδιώκεται η μείωση της θερμοκρασίας του ώστε να παραμείνει η ηλεκτρική του απόδοση σε αποδεκτό επίπεδο. Τα υβριδικά ηλιακά φβ/θ συστήματα βρίσκονται σε στάδιο εξέλιξης με πιο ανεπτυγμένα αυτά που χρησιμοποιούν αέρα ως ρευστό απολαβής της θερμότητας, που εφαρμόστηκαν κυρίως σε διατάξεις BIPV (Building Integrated PhotoVoltaics) για μείωση της μη επιθυμητής θέρμανσης του κτιρίου από την θερμική ενέργεια του φβ (κυρίως το καλοκαίρι) και χρήση του θερμαινόμενου αέρα για θέρμανση χώρων (την χειμερινή περίοδο).

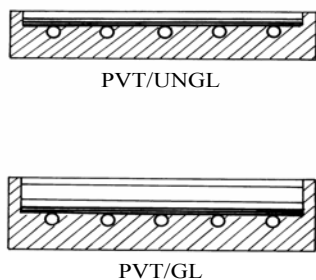
Στο εργαστήριό μας μελετούμε τα τελευταία χρόνια διάφορα υβριδικά φβ/θ συστήματα τόσο με κυκλοφορία νερού<sup>(21,24,25,26,27)</sup> όσο και με αέρα<sup>(21,22,23,25)</sup> για την βελτίωση της ηλεκτρικής η<sub>el</sub> και της θερμικής η<sub>th</sub> απόδοσης του φβ. Χρησιμοποιούμε εμπορικά φβ πλαίσια pc-Si ή a-Si, στα οποία προστίθεται κατάλληλα στο πίσω μέρος τους εναλλάκτης νερού από μεταλλική πλάκα χαλκού με σωλήνες ή αεραγωγός με προσαρτήσεις βελτίωσης της εναλλαγής θερμότητας για την κυκλοφορία αέρα<sup>(23)</sup>. Τα υβριδικά φβ/θ συστήματα μπορεί να θεωρηθούν πολύ κατάλληλα για εγκατάσταση σε κτίρια που έχουν ανάγκη τόσο σε ηλεκτρισμό όσο και σε θερμότητα (κατοικίες, πολυκατοικίες, ξενοδοχεία, νοσοκομεία, αθλητικά κέντρα, βιομηχανία). Αν και πιο πολύ έχει γίνει (επιδεικτική) χρήση υβριδικών φβ/θ συστημάτων σε επικλινείς οροφές ή σε προσόψεις κτιρίων σε χώρες της Ευρώπης, ΗΠΑ και αλλού, τα συστήματα αυτά είναι κατάλληλα και για εφαρμογή σε οριζόντιες οροφές των προαναφερθέντων τύπων κτιρίων.

Οι εγκαταστάσεις φβ/θ συσκευών σε παράλληλες σειρές στις οριζόντιες οροφές των κτιρίων είναι η καλύτερη αξιοποίηση της διαθέσιμης επιφάνειας σε πολλά κτίρια και ειδικά για την χώρα μας έχει μεγάλη σημασία λόγω της αυξημένης ηλιοφάνειας και των υψηλότερων τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φβ/θ πλαισίων. Από τις πειραματικές δοκιμές που έχουμε πραγματοποιήσει προκύπτει ότι η ουσιαστική αύξηση της ηλεκτρικής απόδοσης των φβ/θ συστημάτων δεν υπερβαίνει συχνά το 5% της αντίστοιχης απόδοσης των φβ πλαισίων χωρίς θερμομόνωση της πίσω επιφάνειάς τους. Βέβαια η θερμική απόδοση που μπορεί να φθάσει για μικρή θερμοκρασιακή άνοδο του ρευστού ακόμη και πάνω από 50%, είναι το ουσιαστικό όφελος των φβ/θ συσκευών. Όμως, η ηλεκτρική απόδοση των φβ έχει προτεραιότητα σε σχέση με τη θερμική απόδοση, επειδή η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα μπορεί να γίνει και με πιο απλό, φθινό και αποδοτικό τρόπο. Έτσι η βελτίωση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι το κύριο ζητούμενο και στην κατεύθυνση αυτή αναζητούνται ορισμένες λύσεις.

Τα υβριδικά φβ/θ συστήματα μπορούν να συμβάλλουν στην κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών των κτιρίων και διαχωρίζονται σε συστήματα χαμηλών, μέσων και υψηλών θερμοκρασιών. Οι εφαρμογές των χαμηλών θερμοκρασιών, μέχρι περίπου τους 45 °C, αφορούν την προθέρμανση νερού, τη θέρμανση νερού για κολυμβητικές δεξαμενές και για εφαρμογές σε συνδυασμό με αντλία θερμότητας. Οι εφαρμογές των μέσων θερμοκρασιών σχετίζονται με τη θέρμανση νερού μεταξύ 45°C και 65°C για κάλυψη αναγκών θερμού νερού οικιακής χρήσης, θέρμανση χώρων και άλλες ενεργειακές ανάγκες. Τα συστήματα που θερμαίνουν νερό πάνω από 65°C μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ψύξης χώρων και βιομηχανικές εφαρμογές, αλλά δεν έχουν γίνει τέτοιες χρήσεις μέχρι τώρα. Η ενσωμάτωση φβ στα κτίρια περιλαμβάνει την εγκατάστασή τους στις διαθέσιμες επιφάνειες του κτιρίου (οριζόντια ή επικλινή οροφή, πρόσοψη) και είναι ένας τομέας με αξιολογικά βήματα στην επίτευξη οικονομικά αποδοτικών φβ (ημιαφανή πλαίσια για στέγαστρα, φωτοβολταϊκά λεπτού φιλμ) καθώς επίσης και στις απαραίτητες συμπληρωματικές ηλεκτρονικές συσκευές (controllers, inverters).

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Τα περισσότερα φβ/θ μοντέλα αποτελούνται από φβ πυριτίου και μονάδα παραγωγής της θερμότητας από μεταλλικό φύλλο και σωλήνες για την κυκλοφορία του νερού, ώστε να αποφεύγεται η άμεση επαφή του νερού με το φβ πλαίσιο. Ο εναλλάκτης θερμότητας είναι σε θερμική επαφή με την πίσω επιφάνεια του φβ πλαισίου και προστατεύεται θερμικά με μόνωση από το περιβάλλον. Η θερμότητα που απάγεται από το φβ καθιστά τα υβριδικά φβ/θ συστήματα ενδιαφέροντα για πρακτική εφαρμογή και κάτω από ορισμένες λειτουργικές συνθήκες πιο οικονομικά αποδοτικά σε σχέση με τα συνήθη φβ. Στις εφαρμογές των υβριδικών φβ/θ συστημάτων, η παραγωγή ηλεκτρισμού έχει προτεραιότητα και έτσι η λειτουργία των συσκευών σε χαμηλές θερμοκρασίες συμβάλλει στην πιο αποδοτική τους χρήση καθώς τα φβ παρέχουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια και παραμένουν σε αποδεκτό θερμοκρασιακό επίπεδο. Αυτή η απαίτηση περιορίζει το ενεργό θερμοκρασιακό εύρος αποδοτικής λειτουργίας και οι εφαρμογές αφορούν κυρίως την προθέρμανση νερού. Όταν χρησιμοποιούνται φβ χωρίς πρόσθετο γυάλινο κάλυμμα (PVT/UNGLAZED ή PVT/UNGL) η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι σε ικανοποιητικό επίπεδο, αλλά η θερμική ενέργεια δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη λόγω των μεγάλων θερμικών απωλειών.



**Σχ. 1** Τομή των δύο βασικών τύπων φβ/θ συσκευών, χωρίς πρόσθετο γυάλινο κάλυμμα (PVT/UNGL) και με πρόσθετο γυάλινο κάλυμμα (PVT/GL).

Η προσθήκη ενός γυάλινου καλύμματος (PVT/GLAZED ή PVT/GL) αυξάνει σημαντικά την θερμική απόδοση σε ένα μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας, αλλά οι πρόσθετες οπτικές απώλειες μειώνουν την ηλεκτρική απόδοση του φβ. Η ηλεκτρική απόδοση είναι πιο σημαντική από την θερμική καθώς το φβ κοστίζει μερικές φορές περισσότερο από την θερμική μονάδα. Η διαφορά στην απόδοση μεταξύ των δύο υποσυστημάτων (φβ και θερμικό) επηρεάζει την οικονομική θεώρηση των συσκευών και υπάρχει ανάγκη για βελτιώσεις. Τα φβ μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου (c-Si or pc-Si) έχουν σχεδόν το διπλάσιο κόστος ανά επιφάνεια ανοίγματος σε σχέση με τα φβ άμορφου (a-Si) πυριτίου. Έτσι η προσθήκη της θερμικής μονάδας κοστίζει σχετικά φθηνότερα για τα φβ c-Si ή pc-Si (περί το 8%-10%) σε σχέση με τα φβ a-Si (περί το 15%-20%) για ίδια επιφάνεια φβ πλαισίων. Ακόμη, θα πρέπει το επιπλέον κόστος της θερμικής μονάδας να υπερκαλυφθεί από την αύξηση της αποδιδόμενης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας για να καταστήσει τα φβ/θ συστήματα οικονομικά αποδοτικά.

### 4. ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΙΚΟ ΦΒ/Θ ΣΥΣΤΗΜΑ ΝΕΡΟΥ

Στην Ελλάδα τα τελευταία 30 χρόνια έχει αναπτυχθεί μια σημαντική αγορά ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού οικιακής χρήσεως, όπου ουσιαστική συμβολή είχε τα πρώτα χρόνια η επιδότηση από την Πολιτεία. Η ηλιακή θερμοσιφωνική συσκευή που αφορά μια οικογένεια είναι συνήθως 1.8 έως 4.0 m<sup>2</sup> συλλεκτική επιφάνεια και δοχείο αποθήκευσης θερμού νερού 120 έως 250 λίτρα. Από την άλλη πλευρά η αγορά δεν έχει διευρυνθεί ανάλογα με τις δυνατότητες και παραμένει στάσιμη τα τελευταία 5-10 χρόνια, καθώς έχει μειωθεί το ενδιαφέρον και επιπλέον σταμάτησε κάθε επιδότηση από το 2003.

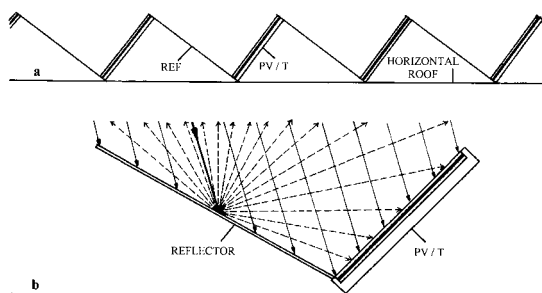
Η προοπτική εφαρμογής υβριδικών φβ/θ συσκευών θα έχει θετική συμβολή στην ευρύτερη αγορά των φβ και θα είναι πιθανόν ένας άλλος τρόπος για διευρυνση της αξιοποίησης των φβ, τα οποία θα έχουν την ευκαιρία να χρησιμοποιηθούν μέσω των υβριδικών φβ/θ συσκευών χωρίς την ανάγκη μεγάλης επιδότησης. Έτσι εκτιμάται ότι τα φβ/θ συστήματα είναι μια ευκαιρία για την ευρύτερη διάδοση των φβ, όπου ακόμη και στην περίπτωση που το 10% των θερμοσιφωνικών συλλεκτών αντικατασταθούν από υβριδικά φβ/θ συστήματα, αυτό θα οδηγήσει σε ετήσιες πωλήσεις περί το 1.0 έως 1.8 MWp, ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία των φβ. Έτσι, μια λίγο μεγαλύτερη επιφάνεια φβ θα δώσει το ίδιο σχεδόν ποσό θερμού νερού που προέρχεται από μια τυπική θερμική ηλιακή συσκευή. Στην περίπτωση αυτή, αν λάβουμε υπ' όψη ότι οι περισσότερες θερμικές ηλιακές συσκευές χρησιμοποιούνται για την θέρμανση νερού με αντικατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας, τότε η θέρμανση του νερού ισοδυναμεί με υποκατάσταση του ηλεκτρισμού. Επιπλέον, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο και έτσι έχουμε μια πιο αποτελεσματική λειτουργία της συσκευής. Όμως, πρέπει να τονίσουμε ότι η πιο αποδοτική παραγωγή ηλεκτρισμού επιτυγχάνεται για χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας του φβ και αυτό σημαίνει μεγάλη απόδοση αλλά μικρή ανύψωση της θερμοκρασίας του προς χρήση νερού.

Με την σημερινή τεχνολογία των φβ/θ συσκευών, η συνολική απόδοση είναι μικρότερη από αυτή δύο ξεχωριστών συσκευών (φβ και θερμική) για την περίπτωση ανύψωσης της θερμοκρασίας του νερού στο επίπεδο πρακτικής χρήσης (50 °C - 60 °C). Η βασική διαφορά βρίσκεται όμως στην ενέργεια που αποδίδεται από μια συγκεκριμένη επιφάνεια, όπου η φβ/θ συσκευή υπερτερεί των δύο ξεχωριστών συσκευών, με κριτήριο όμως την παραγωγή ηλεκτρισμού. Επίσης υπερτερεί σε εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών (π.χ. θέρμανση κολυμβητικών δεξαμενών, προθέρμανση νερού) και από πλευράς χρησιμοποιούμενων υλικών και αισθητικής, όπου οι δύο ξεχωριστές συσκευές διαφορετικής όψης έχουν αντικατασταθεί από μία ενιαία όψη. Στις περιπτώσεις εγκατάστασης στην πρόσοψη κτιρίων η ενιαία όψη πλεονεκτεί των ξεχωριστών συσκευών και η αποφυγή υπερθέρμανσης του κτιρίου το καλοκαίρι είναι μια σημαντική συμβολή στην μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Βέβαια στον βαθμό που υπάρξει τεχνολογική βελτίωση με μείωση του κόστους οι φβ/θ συσκευές αναμένεται να είναι πιο ελκυστικές. Όμως περισσότερη έρευνα είναι αναγκαία για την επίτευξη των βελτιώσεων αυτών.

## 5. ΔΙΑΧΥΤΟΙ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΕΣ

Τα κτίρια που βρίσκονται σε τοποθεσίες μικρού γεωγραφικού πλάτους διαθέτουν συνήθως οριζόντιες οροφές στις οποίες είναι εύκολη η εγκατάσταση διατάξεων αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας όπως είναι οι θερμικοί συλλέκτες και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η εγκατάσταση των ηλιακών συσκευών στις οριζόντιες οροφές κτιρίων διαφέρει από την εγκατάσταση στις επικλινείς οροφές ή στις προσόψεις των κτιρίων, επειδή αν και μπορεί να επιτευχθεί πιο καλός ενεργειακά προσανατολισμός (νότιος) των ηλιακών συσκευών, η εποχιακή διαφορά στο ύψος του ήλιου (κυρίως το χειμώνα) επιβάλλει την τοποθέτησή τους σε ορισμένη απόσταση για την αποφυγή σκίασης. Η σκίαση της μιας σειράς ηλιακών συσκευών από την άλλη μειώνει σε κάποιο βαθμό την απόδοση των θερμικών ηλιακών συλλεκτών αλλά πολύ περισσότερο των φβ πλαισίων. Τα φβ έχουν και τις δύο επιφάνειές τους εκτεθειμένες στο περιβάλλον, σε αντίθεση με τα φβ που εγκαθίστανται σε επικλινείς οροφές ή σε προσόψεις κτιρίων και που έχουν καλυμμένη την πίσω πλευρά τους. Το θετικό αποτέλεσμα της διάταξης των φβ σε παράλληλες σειρές είναι η διατήρησή τους σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία με συνέπεια την ικανοποιητική ηλεκτρική τους απόδοσή.

Στην περίπτωση που συνδυάζονται τα φβ με ακίνητα κάτοπτρα προτείνεται η χρήση διάχυτων ανακλαστήρων. Με τους ανακλαστήρες αυτούς εξασφαλίζεται μια σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή της πρόσθετης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φβ πλαισίων. Οι διάχυτοι ανακλαστήρες παρέχουν λιγότερη πρόσθετη ενέργεια σε σύγκριση με τις συνήθεις κατοπτρικές διατάξεις, αλλά αυτές προκαλούν έντονες διαφορές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φβ πλαισίων, που οδηγεί στη μείωση της ηλεκτρικής τους απόδοσης.



Σχ. 2 Συνδυασμός φβ/θ συσκευών με επίπεδους διάχυτους ανακλαστήρες σε διάταξη οριζόντιας οροφής κτιρίου.

Οι διάχυτοι ανακλαστήρες ακουμπούν στο πάνω μέρος των φβ/θ συσκευών της μιας σειράς και στο κάτω μέρος των φβ/θ συσκευών της πίσω σειράς. Με την διάταξη αυτή η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στα φβ πλαίσια είναι αυξημένη όλο το έτος και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας της εγκατάστασης. Οι διάχυτοι ανακλαστήρες προτείνεται αντί των συνήθων κατοπτρικών επιφανειών, επειδή εξασφαλίζει μια σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φβ πλαισίων<sup>(24)</sup> και κατά συνέπεια αποφεύγεται η μείωση της ηλεκτρικής

απόδοσης λόγω διαφορετικής έντασης φωτός στην επιφάνειά τους. Η εφαρμογή των διάχυτων ανακλαστήρων στις θερμοσιφωνικές συσκευές μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική καθώς είναι δυνατή η χρήση ρυθμιζόμενου ανακλαστήρα με συνέπεια την βέλτιστη συλλογή ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Η διάταξη αυτή μπορεί να είναι και πρακτικά λειτουργική, καθώς είναι αρκετά αποδοτική ακόμη και με 4-6 ρυθμίσεις κατά την διάρκεια τη χρονιάς.

## 6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η ηλεκτρική και θερμική απόδοση των υβριδικών φβ/θ συσκευών δείχνει την ικανοποιητική ενεργειακή συμπεριφορά τους για λειτουργία της συσκευής PVT/UNGL σε χαμηλές και της PVT/GL σε μέσες θερμοκρασίες. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι φβ πλαισίων (pc-Si and a-Si) σε δύο τύπους υβριδικών φβ/θ συσκευών ως προς τη χρήση πρόσθετου γυάλινου καλύμματος (PVT/UNGL και PVT/GL) και επιπλέον οι συσκευές δοκιμάστηκαν σε συνδυασμό με διάχυτο ανακλαστήρα. (+REF).

Οι πειραματικές δοκιμές των φβ/θ συσκευών έγιναν σε εξωτερικές φυσικές συνθήκες και με τα αποτελέσματα υπολογίστηκε η θερμική απόδοση ( $\eta_{th}$ ) σε συνάρτηση του λόγου  $\Delta T/G$ . Κατά τις δοκιμές τα φβ ήσαν συνδεδεμένα με φορτίο για να μην επηρεάζεται η θερμική συμπεριφορά τους από την μη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η  $\eta_{th}$  υπολογίζεται από την σχέση  $\eta_{th} = \dot{m} C_p (T_0 - T_i) / A_a G$  και ο λόγος  $\Delta T/G$  από την σχέση  $\Delta T/G = (T_i - T_a) / G$ . Τα μεγέθη που υπεισέχονται στις σχέσεις αυτές είναι:  $\dot{m}$  η ροή μάζας του ρευστού και  $C_p$  η ειδική θερμότητα του,  $T_i$  και  $T_0$  η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του ρευστού,  $T_a$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $G$  η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και  $A_a$  η επιφάνεια ανοίγματος του φβ πλαισίου. Σε όλα τα πειράματα το φβ συνδέετο με φορτίο για την κατανάλωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης γινόταν μέτρηση της ηλεκτρικής απόδοσης σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φβ. Η ηλεκτρική απόδοση υπολογίστηκε από την σχέση  $\eta_{el} = I_m V_m / A_a G$ , όπου  $I_m$ ,  $V_m$  το ρεύμα και η τάση για τη συνθήκη λειτουργίας του φβ στο σημείο μέγιστης ισχύος. Οι διάφορες θερμοκρασίες μετρώνται με θερμοζεύγη τύπου T (Cu-CuNi), η ηλιακή ακτινοβολία με πυρανόμετρο Kirpp & Zonen και η ροή του νερού ογκομετρικά. Οι πειραματικές δοκιμές γίνονται για διάφορες θερμοκρασίες εισόδου του νερού, με ελάχιστη θερμοκρασία του δικτύου ύδρευσης. Στα πειράματα η ροή μάζας του νερού ήταν συνήθως  $\dot{m} = 0.02 \text{ Kgs}^{-1}$ .

Τα διάφορα μοντέλα φβ/θ συσκευών δοκιμάστηκαν πειραματικά για τον προσδιορισμό της θερμικής και ηλεκτρικής συμπεριφοράς τους με τη χρήση διάχυτου ανακλαστήρα. Πραγματοποιήθηκε πειραματική διάταξη που επιτυγχάνει μεταβλητό ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φβ πλαισίου. Μεταβάλλοντας την κλίση και το εύρος του ανακλαστήρα λήφθηκαν μετρήσεις της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού για ορισμένες συγκεντρώσεις CR της ηλιακής ακτινοβολίας (CR=1.0 έως 1.5, με CR=1.0 για την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, πλην αυτής από ανάκλαση). Με τον τρόπο αυτό έγινε εξομοίωση συστήματος ακίνητος διάχυτος ανακλαστήρας-φβ πλαίσιο για τα διάφορα ύψη του ήλιου, ώστε να εκτιμηθεί το

αποτέλεσμα για όλες τις εποχές του έτους. Τα αποτελέσματα δείχνουν την σημαντική επίδραση του διάχυτου ανακλαστήρα, ιδιαίτερα με την αύξηση του λόγου CR, που επιτυγχάνει ακόμη και αύξηση πάνω από 30% για την μέγιστη πρακτικά επιτυγχανόμενη συγκέντρωση CR=1.5. Για την μεγαλύτερη περίοδο του έτους και κυρίως από την άνοιξη έως το φθινόπωρο η λειτουργία της διάταξης γίνεται με λόγο CR~1.3, αυξάνοντας έτσι την αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ κατά τουλάχιστον 15% <sup>(24)</sup>.

**Πίνακας 1.** Ηλεκτρική και θερμική απόδοση των δοκιμασθέντων συσκευών φβ, φβ/θ και του θερμικού συστήματος

SYSTEM	EFFICIENCY
(pc-Si) PV	$\eta_{el} = 0.1659 - 0.00094 T_{PV}$
(a-Si) PV	$\eta_{el} = 0.0601 - 0.00011 T_{PV}$
(pc-Si) PVT/UNGL	$\eta_{el} = 0.1659 - 0.00094 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.55 - 11.99 (\Delta T/G)$
(pc-Si) PVT/GL	$\eta_{el} = 0.1457 - 0.00094 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.71 - 9.04 (\Delta T/G)$
(a-Si) PVT/UNGL	$\eta_{el} = 0.0601 - 0.00011 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.60 - 12.02 (\Delta T/G)$
(a-Si) PVT/GL	$\eta_{el} = 0.0485 - 0.00011 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.73 - 8.24 (\Delta T/G)$
THERMAL	$\eta_{th} = 0.78 - 7.5 (\Delta T/G)$

**Πίνακας 2.** Ηλεκτρική και θερμική απόδοση των δοκιμασθέντων φβ, φβ/θ και θερμικού συστήματος με 20% πρόσθετη ηλιακή ακτινοβολία από διάχυτο ανακλαστήρα

SYSTEM	EFFICIENCY
(pc-Si) PV+REF	$\eta_{el} = 0.1773 - 0.00098 T_{PV}$
(a-Si) PV+REF	$\eta_{el} = 0.0698 - 0.00014 T_{PV}$
(pc-Si) PVT/UNGL+REF	$\eta_{el} = 0.1773 - 0.00098 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.61 - 11.74 (\Delta T/G)$
(pc-Si) PVT/GL+REF	$\eta_{el} = 0.1560 - 0.00096 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.78 - 9.67 (\Delta T/G)$
(a-Si) PVT/UNGL+REF	$\eta_{el} = 0.0698 - 0.00014 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.68 - 11.98 (\Delta T/G)$
(a-Si) PVT/GL+REF	$\eta_{el} = 0.0565 - 0.00015 T_{PV,eff}$ $\eta_{th} = 0.82 - 8.41 (\Delta T/G)$
THERMAL+REF	$\eta_{th} = 0.92 - 8.18 (\Delta T/G)$

Ο υπολογισμός της θερμικής και ηλεκτρικής απόδοσης των συσκευών με διάχυτους ανακλαστήρες βασίστηκε στην ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει απ' ευθείας στο φβ πλαίσιο χωρίς την ανακλώμενη, για να είναι εμφανής η σύγκριση της συμπεριφοράς των δύο διατάξεων (με και χωρίς διάχυτο ανακλαστήρα). Σε ότι αφορά τις μεγάλες μονάδες συστημάτων υπολογίστηκε ο μέσος λόγος της επιτυγχανόμενης συγκέντρωσης για κάθε μήνα για εγκατάσταση σε οριζόντια οροφή κτιρίου στην Αθήνα, για κλίση συσκευών ίση προς το γεωγραφικό πλάτος και για ελάχιστη απόσταση μεταξύ των σειρών των συσκευών για την αποφυγή της σκίασης. Ο υπολογισμός έδωσε για κάθε μήνα τον ακόλουθο λόγο συγκέντρωσης: I: 1.05, Φ:1.10, M: 1.15, A: 1.20, M:1.25, I:1.30, I:1.25, A:1.20, Σ:1.15, O:1.10, N:1.05, Δ:1.00.

Στην περίπτωση της θερμοσιφωνικής φβ/θ συσκευής, όπου υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της κλίσης του κατόπτρου, θεωρούμε για απλοποίηση των υπολογισμών ότι η λειτουργία του ανακλαστήρα συμβάλλει κατ'ελάχιστον σε μια προσαύξηση 20% για κάθε μήνα του έτους και έτσι ο λόγος συγκέντρωσης λαμβάνεται CR=1.2 για όλο το έτος.

Τα αποτελέσματα από τα διεξαχθέντα πειράματα για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής και θερμικής απόδοσης περιλαμβάνονται στον Πίνακα 1. Στον ίδιο Πίνακα περιλαμβάνονται και τα αποτελέσματα των δύο τυπικών φβ πλαίσιων (PV pc-Si και PV a-Si) καθώς και ενός τυπικού επίπεδου ηλιακού συλλέκτη (THERMAL). Όλες οι συσκευές (φβ, φβ/θ, θερμική) δοκιμάστηκαν πειραματικά σε συνδυασμό με διάχυτο ανακλαστήρα. Λόγω της πληθώρας των αποτελεσμάτων για τις συσκευές με τον ανακλαστήρα (πολλές περιπτώσεις με διαφορετικό λόγο συγκέντρωσης) στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση που οι συσκευές δοκιμάστηκαν με λόγο συγκέντρωσης CR=1.2, που αφορά βέβαια όλες τις θερμοσιφωνικού τύπου συσκευές, αλλά είναι και αντιπροσωπευτική των άλλων συσκευών οριζόντιας οροφής επειδή η αύξηση κατά 20% είναι η μέση τιμή αν θεωρήσουμε όλους τους μήνες (από 0% τον Δεκέμβριο έως 30% τον Ιούνιο).

## 7. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΠΙ ΤΩΝ ΦΒ/Θ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Για την εκτίμηση της πρακτικής αξίας των προτεινόμενων φβ/θ συσκευών είναι χρήσιμος ο υπολογισμός της ενεργειακής απολαβής τους ώστε να είναι δυνατή η οικονομική τους θεώρηση. Μεταξύ των διαφόρων φβ/θ συστημάτων, στην παρούσα μελέτη εξετάζονται δύο βασικές περιπτώσεις, ενός συστήματος μεγάλης σχετικά επιφάνειας, π.χ. 40 m<sup>2</sup> και μιας μικρής μονάδας, π.χ. 4 m<sup>2</sup>. Η μεγάλη μονάδα θεωρείται ότι είναι εγκατεστημένη στην οροφή ενός κτιρίου και συνοδεύεται από μεγάλη θερμομονωμένη δεξαμενή 2000 l εντός του κτιρίου. Αν θεωρήσουμε την εγκατάσταση του συστήματος αυτού σε οριζόντια οροφή κτιρίου τότε μπορούμε να εξετάσουμε και την εφαρμογή των διάχυτων ανακλαστήρων μεταξύ των παράλληλων σειρών των φβ/θ συσκευών. Για εγκατάσταση στη περιοχή της Αθήνας, προσανατολισμό στον νότο και κλίση συσκευών 40° (1686.87 Wm<sup>-2</sup> ολική ηλιακή ακτινοβολία για κλίση 40°), τότε η αξιοποίηση των ανακλαστήρων διαφέρει κατά τη διάρκεια του έτους, συμβάλλοντας περισσότερο το καλοκαίρι και λιγότερο τον χειμώνα λόγω του διαφορετικού ύψους του ήλιου. Οι παράλληλες σειρές των συσκευών πρέπει να έχουν μια ορισμένη απόσταση μεταξύ τους, που συσχετίζεται με το ύψος και την κλίση τους, οπότε και η συμβολή των διάχυτων ανακλαστήρων εξαρτάται από τα γεωμετρικά στοιχεία της όλης διάταξης.

Στην περίπτωση της μικρής μονάδας των 4 m<sup>2</sup> το σύστημα περιλαμβάνει τις φβ/θ συσκευές και δοχείο αποθήκευσης θερμού νερού όγκου 200 l, το οποίο προσλαμβάνει με φυσική κυκλοφορία του νερού την θερμότητα που αποδίδουν τα φβ/θ πλαίσια. Οι θερμοσιφωνικές φβ/θ συσκευές μπορούν να εγκατασταθούν τόσο σε οριζόντιες όσο και σε επικλινείς οροφές κτιρίων. Στη χώρα μας οι θερμοσιφωνικές ηλιακές συσκευές επίπεδου συλλέκτη για

τη θέρμανση νερού εγκαθίστανται συνήθως σε οριζόντιες οροφές και έτσι είναι δυνατός ο συνδυασμός τους με ανακλαστικές ρυθμιζόμενης κλίσης. Με τέτοιες διατάξεις μπορεί να ληφθεί μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια του έτους, σε σχέση με τους ακίνητους ανακλαστές των μεγάλων μονάδων. Για πρακτικούς λόγους μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι αλλαγές της κλίσης θα είναι ελάχιστες μέσα στη χρονιά και η ελάχιστη συμβολή τους, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, θα είναι μια αύξηση 20% της επιπλέον λαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (CR=1.2).

Στους ενεργειακούς υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν τα μετεωρολογικά στοιχεία (σε ωριαίες τιμές) του αντιπροσωπευτικού έτους της Αθήνας. Οι υπολογισμοί της αποδιδόμενης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας βασίστηκαν στις πειραματικές αποδόσεις που αναφέρθηκαν προηγούμενα (Πίνακες 1 και 2) και στην στην μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί σε παρεμφερείς προηγούμενες εργασίες<sup>(26,27)</sup>. Στους υπολογισμούς, η ηλεκτρική απόδοση των φβ βασίζεται στην μεταβολή της ως προς την θερμοκρασία τους<sup>(28)</sup>, η οποία είναι συνάρτηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ενώ η αποδιδόμενη θερμότητα υπολογίζεται για επαρκή θέρμανση του νερού της δεξαμενής (περί τους 40 °C).

**Πίνακας 3.** Ηλεκτρική απόδοση των μελετηθέντων φβ πλαισίων για τις συνθήκες της Αθήνας.

ΜΗΝΑΣ	Ηλιακή ακτινοβ. κλίση 40° kWh/m <sup>2</sup>	Μέση Θερμ. αέρα °C	Μέση Θερμ. νερού °C	PV sys pc-Si kWh/m <sup>2</sup>	PV sys a-Si kWh/m <sup>2</sup>
ΙΑΝ	84.70	10.3	9.3	10.22	4.14
ΦΕΒ	101.31	10.6	9.4	12.78	5.23
ΜΑΡ	127.99	12.3	10.0	15.69	6.52
ΑΠΡ	147.92	15.9	12.2	18.48	7.73
ΜΙΑ	172.83	20.7	15.3	21.32	9.15
ΙΟΥΝ	175.98	25.2	18.7	21.08	9.33
ΙΟΥΛ	191.40	28.0	20.8	22.56	10.21
ΑΥΓ	197.43	27.8	22.7	23.32	10.54
ΣΕΠ	168.84	24.2	21.5	20.27	8.93
ΟΚΤ	131.33	19.5	18.5	16.14	6.88
ΝΟΕ	102.49	15.4	14.7	12.63	5.26
ΔΕΚ	84.66	12.0	12.1	10.36	4.21
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>1686.87</b>			<b>204.85</b>	<b>88.12</b>

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στους Πίνακες 3, 4 και 5, από όπου φαίνεται η διαφοροποίηση μεταξύ των διαφόρων εξεταζομένων τύπων συσκευών. Οι υπολογισμοί αφορούν τη μελέτη των συσκευών με επιπλέον γυάλινο κάλυμμα (PVT/GL), χωρίς επιπλέον γυάλινο κάλυμμα (PVT/UNGL), με επιπλέον διάχυτο ανακλαστήρα (+REF) και επίσης τα τυπικά φβ (PV, ίδιας επιφάνειας και κλίσης με τα φβ/θ) και συνδυασμό τους με ανακλαστήρα (PV+REF), καθώς και μια ίδιου μεγέθους τυπική θερμική μονάδα (THERMAL) και συνδυασμό της με διάχυτο ανακλαστήρα (+REF).

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τα συνήθη φβ και η ανάλυση αφορά όλους τους μήνες του έτους, όπου περιλαμβάνεται και η μηνιαία προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και η μέση μηνιαία

θερμοκρασία του αέρα και του νερού. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι αποδιδόμενες ενέργειες σε kWh όλων των μελετηθέντων συσκευών για την περίπτωση της μεγάλης εγκατάστασης των 40 m<sup>2</sup>. Τα ετήσια αποτελέσματα αφορούν την αποδιδόμενη για τελική χρήση ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, όπου έχει συμπεριληφθεί μείωση της αποδιδόμενης ενέργειας τόσο στον ηλεκτρισμό (απώλειες αντιστροφέα DC/AC, κλπ) όσο και στην θερμότητα (απώλειες σωλήνων, εναλλάκτη θερμότητας, κλπ), εκτιμώντας μείωση 15% και για τις δύο ενεργειακές μορφές. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την θερμοσιφωνική φβ/θ συσκευή των 4 m<sup>2</sup> (μείωση λόγω απωλειών 15% στον ηλεκτρισμό και 20% στην θερμότητα).

**Πίνακας 4.** Υπολογισθείσα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια των συσκευών φβ, φβ/θ και θερμικού συλλέκτη για την μεγάλη εγκατάσταση των 40 m<sup>2</sup>

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΕΤΗΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡ ΕΝΕΡΓΕΙΑ kWh	ΕΤΗΣΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ kWh
(pc-Si) PV	6965	-----
PV + REF	7521	-----
(a-Si) PV	2996	-----
PV + REF	3258	-----
(pc-Si) PVT/UNGL	6702	9826
PVT/UNGL +REF	7250	11030
(pc-Si) PVT/GL	5627	23134
PVT/GL +REF	6001	23316
(a-Si) PVT/UNGL	2947	12440
PVT/UNGL +REF	3291	13461
(a-Si) PVT/GL	2329	25498
PVT/GL +REF	2620	26534
THERMAL	-----	28911
THERMAL + REF	-----	34736

**Πίνακας 5.** Υπολογισθείσα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια των συσκευών φβ, φβ/θ και θερμικού συλλέκτη για την θερμοσιφωνική μικρή μονάδα των 4 m<sup>2</sup>

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΕΤΗΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡ ΕΝΕΡΓΕΙΑ kWh	ΕΤΗΣΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ kWh
(pc-Si) PV	696.5	-----
PV + REF	761.2	-----
(a-Si) PV	299.6	-----
PV + REF	330.7	-----
(pc-Si) PVT/UNGL	670.2	924.8
PVT/UNGL +REF	734.1	1286.2
(pc-Si) PVT/GL	562.7	2177.3
PVT/GL +REF	607.0	2461.3
(a-Si) PVT/UNGL	294.7	1170.8
PVT/UNGL +REF	334.9	1582.7
(a-Si) PVT/GL	232.9	2399.8
PVT/GL +REF	267.4	2826.6
THERMAL	-----	2721.0
THERMAL + REF	-----	3353.7

**Πίνακας 6.** Κόστος φβ, φβ/θ και θερμικού συστήματος και χρόνος αποπληρωμής των συσκευών για την μεγάλη εγκατάσταση των 40 m<sup>2</sup>

ΣΥΣΤΗΜΑ 40 m <sup>2</sup> 2000 l water tank	ΚΟΣΤΟΣ €/system	CPBT (EMPI) years	CPBT (KAT) years
(pc-Si) PV PV + REF	32000 34000	12 11	17 17
(a-Si) PV PV + REF	20000 22000	15 15	22 22
(pc-Si) PVT/UNGL PVT/UNGL +REF	38000 40000	10 10	15 15
(pc-Si) PVT/GL PVT/GL +REF	42000 44000	9 9	14 14
(a-Si) PVT/UNGL PVT/UNGL +REF	26000 28000	10 10	15 15
(a-Si) PVT/GL PVT/GL +REF	30000 32000	8 8	12 12
THERMAL THERMAL + REF	12000 14000	6 6	10 10

**Πίνακας 7.** Κόστος φβ, φβ/θ και θερμικής συσκευής και χρόνος αποπληρωμής των συσκευών για την θερμοσιφωνική συσκευή των 4 m<sup>2</sup>

ΣΥΣΤΗΜΑ 4 m <sup>2</sup> - 200 l water tank	ΚΟΣΤΟΣ €/system	CPBT (KAT) years
(pc-Si) PV PV + REF	3600 3800	19 18
(a-Si) PV PV + REF	2400 2600	25 25
(pc-Si) PVT/UNGL PVT/UNGL +REF	4400 4600	12 10
(pc-Si) PVT/GL PVT/GL +REF	4800 5000	8 7
(a-Si) PVT/UNGL PVT/UNGL +REF	3200 3400	9 8
(a-Si) PVT/GL PVT/GL +REF	3600 3800	6 6
THERMAL THERMAL + REF	1400 1600	4 4

## 8. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Τα αποτελέσματα των Πινάκων 4, 5 χρησιμοποιήθηκαν για την οικονομική ανάλυση των συσκευών με σκοπό τον προσδιορισμό του χρόνου αποπληρωμής των συστημάτων (Cost Pay Back Time, CPBT), όπου χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που αφορούσε τα τυπικά φωτοβολταϊκά<sup>(29)</sup> και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6 για την μεγάλη μονάδα των 40 m<sup>2</sup> και στον Πίνακα 7 για την θερμοσιφωνική φβ/θ μονάδα των 4 m<sup>2</sup>. Όσον αφορά τη μεγάλη μονάδα θεωρήθηκε πως η παραγόμενη θερμότητα αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση πετρελαίου και για τη μικρή μονάδα σε εξοικονόμηση ηλεκτρισμού. Στην ανάλυση λαμβάνεται κόστος ηλεκτρικής ενέργειας 0.1 €/kWh και θερμικής ενέργειας 0.03 €/kWh και επιδότηση 40% στο κόστος του συστήματος. Στην ανάλυση για τη μεγάλη διάταξη των 40 m<sup>2</sup> ο CPBT υπολογίστηκε για εμπορική εφαρμογή (EMPI) όπου υπάρχουν πρόσθετες ελαφρύνσεις στην αποπληρωμή της επένδυσης και για εφαρμογή σε

κατοικίες ή πολυκατοικίες (KAT) όπου υπάρχει η επιδότηση μόνο του 40%. Στους Πίνακες 6 και 7 περιλαμβάνεται το κόστος των συστημάτων και οι υπολογισθέντες χρόνοι αποπληρωμής τους, οι οποίοι δείχνουν την μείωση του CPBT για τις φβ/θ συσκευές σε σχέση με τα τυπικά φβ. Ανάλογα αποτελέσματα έχουν παρουσιαστεί και από τον Leeders<sup>(30)</sup> και από τον Frank κ. ά.<sup>(31)</sup>

Οι υπολογισθείσες τιμές CPBT δείχνουν πως οι προτεινόμενες φβ/θ συσκευές έχουν καλές οικονομικές προοπτικές. Το πρόσθετο γυάλινο κάλυμμα και ο διάχυτος ανακλαστήρας επιδρούν θετικά στη μείωση του χρόνου αποπληρωμής (αν και δεν φαίνεται καθαρά στα διδόμενα αποτελέσματα λόγω λήψης του CPBT σε ακέραια έτη). Επίσης η χρήση ρυθμιζόμενου ανακλαστήρα στις θερμοσιφωνικές φβ/θ συσκευές δίνει ακόμη καλύτερα αποτελέσματα ως προς τον χρόνο αποπληρωμής. Συγκρίνοντας τις ληφθείσες τιμές για τους δύο τύπους φβ, παρατηρούμε πως τα φβ a-Si δείχνουν πιο μικρούς χρόνους αποπληρωμής, αν και παρέχουν λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια ανά m<sup>2</sup>.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν σχεδιαστικές, ενεργειακές και οικονομικές πλευρές ορισμένων τύπων υβριδικών ηλιακών φβ/θ συστημάτων για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού χρήσης. Η μελέτη αφορά διατάξεις φβ πολυκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου με ή χωρίς πρόσθετο γυάλινο κάλυμμα και δύο βασικών μεγεθών ως προς την επιφάνεια εγκατάστασης των συσκευών, ενός μεγάλου 40 m<sup>2</sup> και 2000 l ζεστού νερού για εμπορικές εφαρμογές και επίσης για κατοικίες και πολυκατοικίες και ενός μικρού μεγέθους 4 m<sup>2</sup> και 200 l ζεστού νερού, που αντιπροσωπεύει τις οικιακές φβ/θ συσκευές θερμοσιφωνικού τύπου.

Τα συστήματα μελετήθηκαν ως προς την χρήση ενός συμπληρωματικού διάχυτου ανακλαστήρα, ο οποίος αυξάνει την ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των φβ/θ συσκευών και ισορροπεί κατά έναν τρόπο τη μείωση της ηλεκτρικής παραγωγής λόγω των οπτικών απωλειών από το πρόσθετο γυάλινο κάλυμμα. Τα ενεργειακά αποτελέσματα έδειξαν πως αν και το άμορφο πυρίτιο αποδίδει μικρότερη ηλεκτρική ενέργεια, εντούτοις παρουσιάζει λίγο καλύτερη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά σε σύγκριση με το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Από την οικονομική ανάλυση που γίνεται με κριτήριο τον χρόνο αποπληρωμής όλων των συστημάτων και με επιδότηση του κόστους αγοράς 40% προκύπτει πάλι η σχετική υπεροχή των φβ/θ συσκευών άμορφου πυριτίου.

Στους υπολογισμούς θεωρήθηκε πως στην μεγάλη εγκατάσταση υποκαθίσταται πετρέλαιο και στη μικρή ηλεκτρισμός για την αποδιδόμενη θερμότητα. Η χρήση του πρόσθετου γυάλινου καλύμματος συμβάλλει σε σημαντική αύξηση της αποδιδόμενης θερμότητας και των διάχυτων ανακλαστήρων είναι ελαφρώς θετική. Τέλος, οι χρόνοι αποπληρωμής κρίνονται ικανοποιητικοί καθώς είναι αρκετά μικρότεροι των αντίστοιχων των συνήθων φβ συστημάτων και συγκρίσιμοι με τις συνήθεις θερμικές συσκευές.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Elazari A. Multi Solar System – Solar multimodule for electrical and hot water supply for residentially building. In Proc. 2<sup>nd</sup> World Conf. on Photovoltaic Solar Energy Conversion. 6-10 July 1998, Vienna, Austria, pp 2430-2423
2. Kern E.C. Jr and Russel M.C., Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems. *Proc. of 13<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists*, Washington DC, USA, pp. 1153 – 1157, 1978.
3. Hendrie S.D., Evaluation of combined Photovoltaic/Thermal collectors. *Proc. of Int. Conf. ISES*, Atlanta, Georgia, USA, May 28 – June 1, Vol.3 pp. 1865- 1869, 1979. Huang B.J. Lin T.H.
4. Florschuetz L.W., Extension of the Hottel -Whillier model to the analysis of combined photovoltaic / thermal flat plate collectors. *Solar Energy*, Vol. 22, pp. 361-366, 1979.
5. Raghuraman P., Analytical Predictions of liquid and air Photovoltaic / Thermal, flat – plate collector performance. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol 103, pp. 291-298, 1981.
6. Cox C.H. III and Raghuraman P., Design considerations for flat - plate- photovoltaic/thermal collectors. *Solar Energy*, Vol. 35, pp. 227-241, 1985.
7. Bergene T. and Lovvik O.M., Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. *Solar Energy* Vol. 55, pp. 453-462, 1995.
8. Kalogirou S.A. Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid pv-thermal solar system for Cyprus. *Renewable Energy*, 2001; 23: 247-260.
9. Huang W.C. and Sun F.S. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. *Solar Energy*, 2001; 70: 443-448.
10. Sandness B., Rekstad J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate-experimental study and analytical model. *Solar Energy*, 2002; 72, 1: 63-73.
11. Chow T.T. Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*, 2003; 75: 143-152.
12. Coventry J.S., Lovegrove K. Development of an approach to compare the ‘value’ of electric and thermal output from a domestic PV/thermal system. *Solar Energy*, 2003; 75: 63-72.
13. Zondag, H. A., De Vries D.W., Van Helden W.G.J., Van Zolingen R.J.C. and Van Steenhoven A.A., The thermal and electrical yield of a PV-Thermal collector. *Solar Energy*, Vol. 72, pp 113-128, 2002.
14. Zondag, H. A., De Vries D.W., Van Helden W.G.J., Van Zolingen R.J.C. and Van Steenhoven A.A., The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*, Vol. 74, pp 253-269, 2003.
15. Baali A.A.AI. Improving the power of a solar panel by cooling and light concentrating. *Solar & Wind Technology* 3, pp. 241-245 (1986).
16. Garg H.P., Agarwal P.K., Bhargava A.K., The effect of plane booster reflectors on the performance of a solar air heater with solar cells suitable for a solar dryer. *Energy Conv. Mgmt.* 32, pp. 543-554 (1991).
17. Garg H.P. and Adhikari R.S., Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs. *Int. J. Energy Res.* 23 pp. 1295-1304 (1999)
18. Brogren M., Nostell P. and Karlsson B. Optical efficiency of a PV-Thermal hybrid CPC module for high latitudes. *Solar Energy*, 2000; 69, 1-6: 173-185.
19. Tripanagnostopoulos Y., Yianoulis P. and Patrikios D. "Hybrid PV-TC solar systems", *Proc. Int. Conf. WREC* Vol I, pp. 505-508, Denver Col. USA, 15-21 June 1996.
20. Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th. and Souliotis M. "Hybrid PV-ICS systems" *Proc. Int. Conf. WREC V*, Part III, pp. 1788-1791, Florence, Italy, 20-25 Sep. 1998
21. Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th. and Souliotis M. "Low cost improvements to building integrated air cooled Hybrid PV-Thermal systems", *Proc. Int. Conf. 6<sup>th</sup> Eur. PV Solar Energy Conf.* Vol II, pp. 1874-1877, Glasgow, UK, 1-5 May 2000.
22. Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th. and Souliotis M. Test results of air cooled modified PV modules. In *Proc. 17<sup>th</sup> PV Confer.* 22-26 Oct, Munich, Germany, pp 2519-2522 (2001a).
23. Tripanagnostopoulos Y., Bazilian M. and Zoulia I., Battisti R.. "Hybrid PV/T system with improved air heat extraction modification". Presented in *Int. Conf. PV in Europe*, Rome, Italy, 7-11 Oct. pp 718-721 (2002).
24. Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M. and Yianoulis P. Hybrid Photovoltaic/Thermal solar systems. *Solar Energy*, 2002; 72, 3: 217-234.
25. Tripanagnostopoulos Y., Tzavellas D., Zoulia I. and Chortatou M.. "Hybrid PV/T systems with dual heat extraction operation". *Proc. 17<sup>th</sup> European PV Solar Energy Conf.* Vol III, pp 2515-2518, Munich, Germany, 22-26 Oct (2001).
26. Tselepis S. and Tripanagnostopoulos Y. Economic analysis of hybrid photovoltaic/thermal solar systems and comparison with standard PV modules. In *Proc. Int. Conf. PV in Europe* 7-11 Oct. Rome, Italy, 2002; 856-859.
27. Tripanagnostopoulos Y. Tselepis S. Souliotis M. Tonui J.K. Design aspects of hybrid PVT/WATER solar systems. In *Proc. 19<sup>th</sup> European PV Solar Energy Conf.* 7-11 June, Paris, France, 2321-2324.
28. Lasnier F. and Ang T.G *Photovoltaic Engineering Handbook*, Adam Higler, 1990; 258.
29. Tselepis S. Financial analysis of grid connected photovoltaic systems in Greece, towards a national PV roof programme. In *Proc. 17<sup>th</sup> PV Solar Energy Conf.* Munich 22-26 Oct 2001, pp 919-922.
30. Leenders F. Shaap A.B, van der Helden B.G.C. Technology review on PV/Thermal concepts. In *Proc. 16<sup>th</sup> European PV Solar Energy Conference*, 1-5 May, Glasgow, U.K., 2000; pp1976-1980.
31. Frankl P., Gamberale M., Battisti R., Life Cycle Assessment of a PV Cogenerative System: Comparison with a Solar Thermal and a PV System. In *Proc. 16<sup>th</sup> European PV Solar Energy Conf.*, 1-5 May, Glasgow, U.K. 2000; 1910-1913.