

Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΩΤΕΑΣ: ΕΝΑ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ, ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΨΥΚΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

A. Παπαδόπουλος¹, N. Στεφανάκης²

¹ ΗΛΙΟΤΡΟΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΕΤΒΕΕ, Ηροδότου 15, Δiónυσος, Αττική,
alpapher@otenet.gr

² Ε.Μ.Π., Σχολή Χημικών Μηχανικών, Μονάδα Ηλιακής Μηχανικής nstefa@chemeng.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται το οπτικό τμήμα ενός καινοτομικού ηλιακού συστήματος (Φ/Β Σύστημα ΠΡΩΤΕΑΣ). Το υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα χρησιμοποιεί κάτοπτρα που εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε φωτοβολταϊκές κυψελίδες συγκεντρωτικού τύπου, από την υψύξη των οποίων παράγεται ζεστό νερό, ενώ με την χρήση κατάλληλων αντλιών θερμότητας η θερμική ισχύ του παραγόμενου ζεστού νερού μπορεί να μετατρέπεται και σε ψυκτική ισχύ για κλιματισμό. Ένα από τα καινοτομικά στοιχεία του συστήματος είναι τα ειδικά Κάτοπτρα Ολικής Ανάκλασης (ΚΟΑ) κατασκευασμένα από κοινό άχρωμο γυαλί. Η σχεδίαση των κατόπτρων βασίστηκε στην μέθοδο ray tracing τα αποτελέσματα της οποίας έδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας άνω των 1000 ήλιων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα αποτελούν σήμερα μία ώριμη τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Αν και το κόστος παραγωγής των Φ/Β κυψελίδων έχει μειωθεί αισθητά φθάνοντας σήμερα (Ιανουάριος 2006) κατά μέσο όρο τα 5,78Euro/Wp [1], περαιτέρω πτώση του κόστους πρέπει να πραγματοποιηθεί ώστε τα Φ/Β συστήματα να είναι οικονομικά βιώσιμα. Μια κατηγορία φωτοβολταϊκών που είναι πολλά υποσχόμενη είναι τα Φ/Β Συστήματα Συγκεντρωτικού Τύπου [2-4]. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά τα οποία έχουν χαμηλότερο κόστος και μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με συμβατικά φωτοβολταϊκά. Σύμφωνα με τις πρόσφατες εξελίξεις των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών ορισμένες κυψελίδες μπορούν να λειτουργούν αποδοτικά σε συνθήκες συγκέντρωσης 1500 ήλιων και παραπάνω [5-6].

Για να είναι όμως ένα Φ/Β Συγκεντρωτικό Σύστημα επιτυχημένο πρέπει να διαθέτει ένα αξιόπιστο και φθινό σύστημα συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Παρόλο που τα κάτοπτρα συγκέντρωσης έχουν υψηλή απόδοση (89-94%)[5] και κατασκευάζονται από σχετικά φθηνές πρώτες ύλες παρουσιάζουν δύο κύρια μειονεκτήματα: αφενός έχουν σχετικά μεγάλο μέγεθος με αποτέλεσμα να χρειάζονται ισχυρές και ακριβές μεταλλικές κατασκευές στήριξης-παρακολούθησης του Ήλιου ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν τον ισχυρότερο αναμενόμενο άνεμο της προσεχούς 30-ετίας και αφετέρου έχουν σχετικά μικρό χρόνο ζωής κάτω από την καθημερινή έκθεση στις συνθήκες υπαίθρου και στην ηλιακή ακτινοβολία. Για τους λόγους αυτούς μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν στο εμπόριο Φ/Β Συστήματα Συγκεντρωτικού Τύπου φθηνότερα από τα Επίπεδα Φ/Β Συστήματα.

Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος ENK6-CT-2002-00674 [7] αναπτύχθηκε το Φ/Β Σύστημα ΠΡΩΤΕΑΣ που αποτελεί το πρώτο Υβριδικό Φ/Β Σύστημα Συγκεντρωτικού Τύπου στην Ελλάδα και μοναδικό στο είδος του σε ολόκληρο τον κόσμο. Το Φ/Β Σύστημα ΠΡΩΤΕΑΣ χρησιμοποιεί Καινοτομικά Κάτοπτρα Ολικής Ανάκλασης που επιτρέπουν την άρση τα ανωτέρω μειονεκτημάτων των συμβατικών συγκεντρωτικών κατόπτρων. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με μια ειδική προηγμένη Αντλία Θερμότητας καθιστά το Φ/Β Σύστημα ΠΡΩΤΕΑΣ ικανό να παράγει ηλεκτρική, θερμική και ψυκτική ισχύ σε ανταγωνιστικό κόστος.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το Φ/Β Σύστημα ΠΡΩΤΕΑΣ είναι ένα υβριδικό ηλιακό σύστημα για την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής, θερμικής και ψυκτικής ενέργειας χρησιμοποιώντας κάτοπτρα ολικής ανάκλασης από γυαλί με εκτύπωση. Με την χρήση Φ/Β κυψελίδων συγκεντρωτικού τύπου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια με ταυτόχρονη παραγωγή ζεστού νερού 60ο - 90οC από την ψύξη των Φ/Β κυψελίδων ή υπέρθερμου λαδιού με την μερική εστίαση ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στις Φ/Β κυψελίδες και της υπόλοιπης ακτινοβολίας μέσα σε ειδικές εστιακές κοιλότητες παραγωγής υπέρθερμου λαδιού. Επίσης με την χρήση ειδικών αντλιών θερμότητας, οι οποίες μετατρέπουν την θερμική ισχύ του ζεστού νερού σε ψυκτική ισχύ, γίνεται δυνατή η απ' ευθείας χρήση του παραγόμενου ζεστού νερού για κλιματισμό [7-8].

Τα Καινοτομικά Κάτοπτρα Ολικής Ανάκλασης μπορούν να περιγραφούν σαν επίπεδα, παραβολικά ή ελλειψοειδή εκ περιστροφής κάτοπτρα, κατασκευασμένα από κοινό άχρωμο γυαλί, τα οποία έχουν την εμπρόσθια επιφάνειά τους λεία επίπεδη, παραβολική ή ελλειψοειδή εκ περιστροφής αντίστοιχα, ενώ η οπίσθια επιφάνειά τους είναι επίπεδη ή καμπύλη ανάγλυφη με παράλληλα ή συγκλίνοντα ορθογωνικά πρίσματα, αντίστοιχα. Οι ηλιακές ακτίνες, που εισέρχονται σε αυτά τα Κάτοπτρα Ολικής Ανάκλασης από την εμπρόσθια επιφάνειά τους, υφίστανται ολική ανάκλαση στα ορθογωνικά πρίσματα της οπίσθιας επιφάνειας και εξέρχονται πάλι από την εμπρόσθια πλευρά. Μέχρι σήμερα δεν είχε δοθεί καμία προσοχή σε αυτή την ελκυστική τεχνολογία, κυρίως επειδή τέτοια κάτοπτρα ολικής ανάκλασης χρειάζονται έκαστο τρεις άξονες περιστροφής για να εστιάσουν τις ανακλώμενες ηλιακές ακτίνες στο επιθυμητό εστιακό σημείο (σε σύγκριση με δύο άξονες περιστροφής για τα συμβατικά κάτοπτρα). Η έρευνα των Κατόπτρων Ολικής Ανάκλασης έδειξε ότι αν ένας από τους τρεις άξονες περιστροφής περνάει από την εστία τότε οι άξονες μειώνονται σε δύο, ενώ αν η στήριξη των Κατόπτρων Ολικής Ανάκλασης γίνει πάνω σε μια ειδική επιφάνεια τότε οι άξονες μειώνονται σε ένα ζεύγος μόνο κοινό για όλα τα Κάτοπτρα Ολικής Ανάκλασης ανεξαρτήτως αριθμού. Τα Κάτοπτρα Ολικής Ανάκλασης που αναπτύχθηκαν για την παρούσα εφαρμογή βασίζονται σε μια απλοποιημένη υποπερίπτωση εφαρμογής της γενικής τεχνολογίας των Κατόπτρων Ολικής Ανάκλασης απαιτούν μόνο ένα ζεύγος αξόνων περιστροφής και εστιάζουν σαν συμβατικά κάτοπτρα [9].

Αυτή η τελευταία καινοτομία έχει πολλαπλές ευεργετικές επιπτώσεις:

Αφενός η μείωση της ενεργού επιφανείας των κατόπτρων από κάτοπτρα επιφάνειας δεκάδων τετραγωνικών μέτρων (όπως είναι οι τυπικές απαιτήσεις των συμβατικών κατόπτρων), σε ένα μικρό κλάσμα μόνο του τετραγωνικού μέτρου για τα Κάτοπτρα Ολικής Ανάκλασης, επιτρέπει την κατασκευή τους από υπάρχουσες πλήρως αυτοματοποιημένες μηχανές κατασκευής αντικειμένων από γυαλί με εκτύπωση με πολύ μικρό κόστος. Το μόνο που χρειάζεται είναι η κατασκευή του αντίστοιχου καλουπιού εκτύπωσης για την παραγωγή εκατομμυρίων αντιτύπων Κατόπτρων Ολικής Ανάκλασης με κόστος 1-2 Ευρώ ανά τεμάχιο.

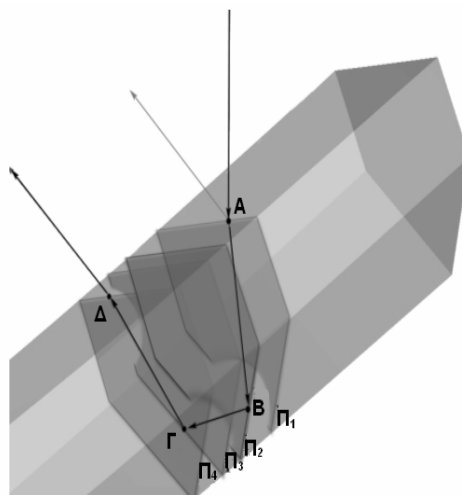
Αφετέρου η μικρή επιφάνεια των Κατόπτρων Ολικής Ανάκλασης επιτρέπει την κατασκευή σύνθετων συστημάτων κατόπτρων ολικής ανάκλασης με χαμηλό προφίλ, που τα κάνει αόρατα στον άνεμο και επιτρέπει σχεδίαση που υπομένει μικρό μόνο κλάσμα του μέγιστου αναμενόμενου φορτίου ανεμοπίεσης, με αποτέλεσμα μικρό και οικονομικό κόστος του φέροντος μεταλλικού συστήματος στήριξης των Κατόπτρων Ολικής Ανάκλασης.

Στην προκειμένη σχεδίαση έχουν επιλεγεί Κάτοπτρα Ολικής Ανάκλασης χαμηλού προφίλ έτσι ώστε να έχουμε μικρή ανεμοπίεση και οικονομικό κόστος κατασκευής, ενώ παράλληλα έχει προβλεφθεί και δυνατότητα να πλένονται αυτόματα τα Κάτοπτρα Ολικής Ανάκλασης σε τακτά χρονικά διαστήματα, έτσι ώστε να διατηρούν πάντα την μέγιστη τιμή του ούτως ή άλλως υψηλού δείκτη ανάκλασής τους και να επιτυγχάνουν την μέγιστη δυνατή ετήσια παραγωγή ενέργειας.

Τα Κάτοπτρα Ολικής Ανάκλασης υλοποιούνται ως κυκλικά επαναλαμβανόμενα πρίσματα της μορφής του Σχήματος 1



Σχήμα 1: Ειδικό πρίσμα ολικής ανάκλασης



Σχήμα 2: Αρχή λειτουργίας του ειδικού πρίσματος ολικής ανάκλασης

Η τομή της καμπύλης εσωτερικής επιφάνειας του πρίσματος με το κάθετο επίπεδο στην κάτω ακμή είναι καμπύλη που δίνεται από την διαφορική εξίσωση:

$$\frac{dy}{dx} = \tan\left(\frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{4}\right)$$

$$\tan(\phi) = -\frac{x}{R + M - y}$$

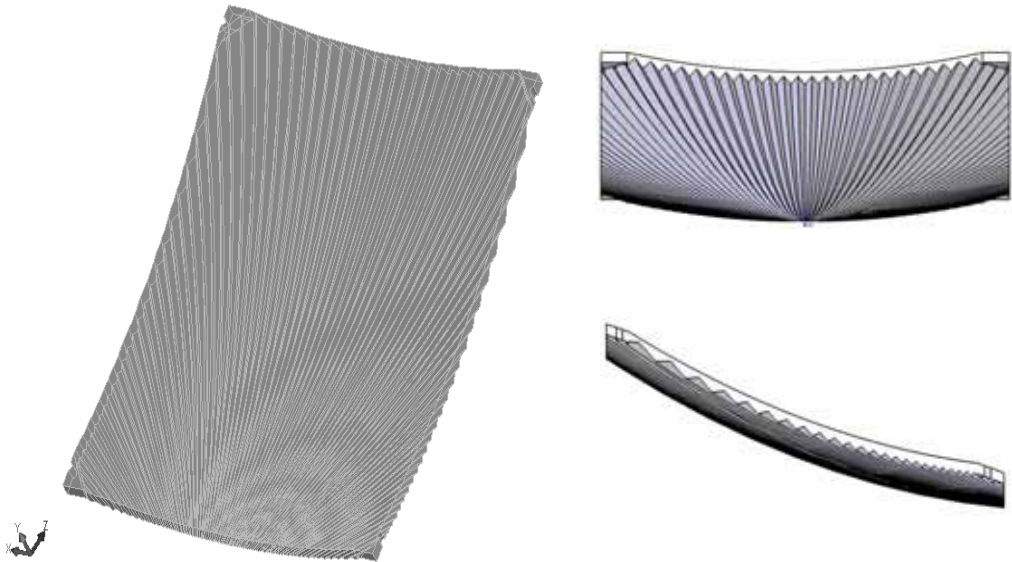
όπου:

M : το πάχος του υλικού

R : η απόσταση μεταξύ του οπτικού άξονα και του διάφανου υλικού

Η αρχή λειτουργίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Όταν μία ακτίνα εισέρχεται στο σημείο A του πρίσματος διασπάται σε δύο από τις οποίες η πρώτη ανακλάται προς την εστία, διότι η επιφάνεια είναι παραβολοειδής εκ περιστροφής, ενώ η δεύτερη εισέρχεται στο πρίσμα. Στα σημεία B και Γ η ακτίνα υφίσταται ολική ανάκλαση και στο σημείο Δ εξέρχεται από το πρίσμα και κατευθύνεται προς την εστία. Οι γωνίες των επιπέδων Π1, Π2, Π3 και Π4 είναι κατάλληλες και τέτοιες ώστε οι ακτίνες να συγκεντρώνονται σε μια πολύ μικρή περιοχή γύρω από την εστία. Για την ομογενοποίηση της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ένα ειδικό πρίσμα ομογενοποίησης που υλοποιείται ως ορθογωνικό που η μεν εγκάρσια διατομή του ισούται με 8mm x 8mm (ίση με επιφάνεια της Φ/Β Κυψελίδας) ενώ το μήκος του είναι ίσο με το πενταπλάσιο του μήκους της Φ/Β κυψελίδας. Χαρακτηριστικό γνώρισμα του συστήματος αποτελεί το γεγονός ότι η Εστία, ο Ομογενοποιητής και το Σύστημα εκμετάλλευσης της παραγόμενης ενέργειας βρίσκονται εκτός του πεδίου του Κατόπτρου, έτσι ώστε να μην το σκιάζουν και χειροτερεύουν τον βαθμό απόδοσής του.

Στο Φ/Β Σύστημα ΠΡΩΤΕΑΣ το Κάτοπτρο Ολικής Ανάκλασης υλοποιήθηκε σε κυκλική μορφή με διάμετρο 19cm και 24cm σύμφωνα με τους κατασκευαστικούς περιορισμούς που έθετε η βιομηχανία γυαλιού. Νέες εξελίξεις στην τεχνολογία του γυαλιού επιτρέπουν την κατασκευή ορθογώνιων κατόπτρων διαστάσεων 30cm x 35cm με αποτέλεσμα την αύξηση της ωφέλιμης επιφάνειας του συστήματος. Ένα τέτοιο ορθογώνιο κάτοπτρο σε διάφορες οπτικές γωνίες παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Ορθογώνιο κάτοπτρο ολικής ανάκλασης

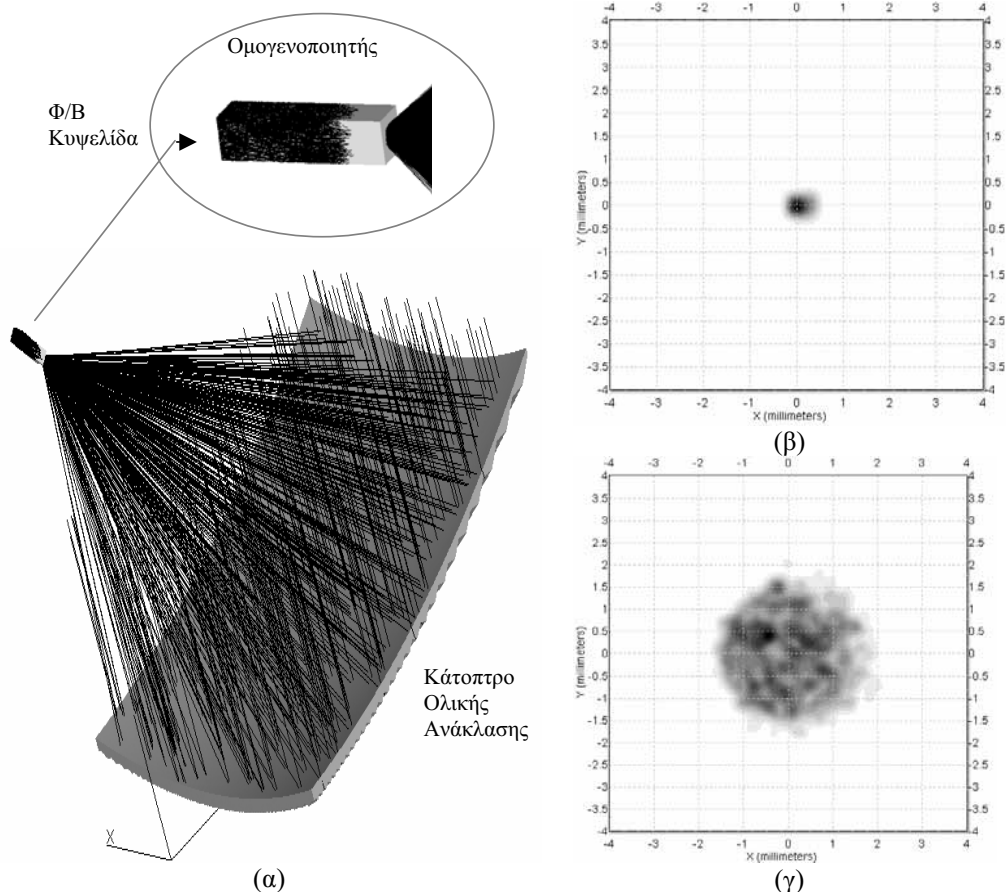
Για την επιτυχή ανάπτυξη του κατόπτρου διεξήχθη προσομοίωση με την μέθοδο ray tracing [10]. Η μέθοδος πραγματοποιεί πρόσπτωση ακτινοβολίας σε κάθε σημείο του κατόπτρου ξεχωριστά ακολουθώντας τις φωτεινές ακτίνες που εκπέμπονται από την πηγή φωτός, λαμβάνοντας υπόψη της όλες τις γραφικές παραμέτρους ανάκλασης, διαπερατότητας, σκίασης κ.α.. Η μέθοδος αυτή δίνει στο φως προσομοίωση πραγματικής οντότητας υπό όλες τις συνθήκες, σε οποιαδήποτε επιφάνεια του αντικειμένου, προσδίδοντας φυσικότητα και πραγματική εμφάνιση σε κάθε ξεχωριστό σημείο. Κατά την προσομοίωση επιλέχθηκε γεωμετρική κατανομή πρόσπτωσης καθώς και κατανομή πραγματικού ηλιακού ειδώλου, στην οποία λαμβάνεται υπόψη η φαινόμενη γωνία του ηλιακού δίσκου από την Γή. Για τον περιορισμό των στατιστικού σφάλματος σε τιμές κάτω του 1% επιλέχθηκε μεγάλος αριθμός προσπιπτουσών ακτίνων. Σε μία μαθηματική ανάλυση, όταν οι διαστάσεις εκάστου πρίσματος τείνουν στο μηδέν η επιφάνεια σύγκλισης των ανακλώμενων ακτινών (που προέρχονται από παράλληλες προσπιπτουσες ακτίνες) γύρω από την εστία τείνει να γίνει σημείο. Σε αυτή την οριακή περίπτωση η συμπεριφορά του οπτικού συστήματος ενός παραβολοειδούς ΚΟΑ τείνει προς την συμπεριφορά μιας συμβατικής ανακλαστικής παραβολικής επιφάνειας. Όταν όμως οι διαστάσεις εκάστου πρίσματος πάρουν φυσικές διαστάσεις, τέτοιες που επιβάλλει η τεχνολογία εκτύπωσης του γυαλιού, τότε οι αναδύμενες ανακλώμενες ακτίνες στο εσωτερικό εκάστου πρίσματος παρουσιάζουν μία ψαλίδα με δύο δέσμες ανάκλασης οι οποίες αποκλίνουν από την επιθυμητή εστία [11].

Η έρευνα των ΚΟΑ προσδιόρισε την μαθηματική μορφή που πρέπει να έχουν οι πλευρές των ορθογωνικών πρισμάτων, ώστε και σε μεγάλες διαστάσεις των υλοποιημένων πρισμάτων οι δύο ξεχωριστές δέσμες αναδύμενων ανακλώμενων ακτινών από κάθε πρίσμα να συγκλίνουν στην επιθυμητή εστία. Η εξέλιξη αυτή έδωσε την δυνατότητα στα ΚΟΑ να έχουν πρίσματα με διαστάσεις αρκετών χιλιοστών έκαστο (όσο απαιτεί η τεχνολογία γυαλιού) και παρόλα αυτά η συμπεριφορά του υλοποιούμενου ΚΟΑ να παρουσιάζει την συμπεριφορά των γεωμετρικά τέλειων συμβατικών παραβολικών κατόπτρων.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης raytracing συμβάλλουν καθοριστικά στην επιτυχή ανάπτυξη των ΚΟΑ καθώς επιτρέπει στο σχεδιαστή να τροποποιεί τα σχεδιαστικά στοιχεία του κατόπτρου και να ελέγχει την απόδοση της συγκέντρωσης.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης raytracing του ορθογωνικού κατόπτρου ολικής ανάκλασης σε συνδυασμό με τον αντίστοιχο Ομογενοποιητή.



Σχήμα 4: Προσομοίωση ray tracing

Οι βαθμοί συγκέντρωσης που επιτυγχάνονται είναι της τάξεως του 1:90.000 (Σχήμα 4β) για γεωμετρικά παράλληλες προσπίπτουσες ακτίνες και της τάξης του 1:5.000 (Σχήμα 4γ) για συγκεντρώσεις πραγματικών ηλιακών ακτίνων από τον φυσικό φαινόμενο ηλιακό δίσκο. Τέτοιοι βαθμοί συγκέντρωσης μετά την επενέργεια του ομογενοποιητή επιτρέπουν βαθμούς συγκέντρωσης της τάξης των 1000 ήλιων με ομοιομορφία άνω του 96%, πράγμα απαραίτητο για την επίτευξη οικονομικά αποδεκτών βαθμών απόδοσης από τις Φ/Β Κυψελίδες συγκεντρωτικού τύπου (αν δεν υπάρχει ομοιομορφη πρόσπτωση της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην Φ/Β Κυψελίδα, τότε αυτή αποδίδει όσο αντιστοιχεί στην μικρότερη τιμή επιτυγχανόμενης συγκέντρωσης).

Στην συγκεκριμένη σχεδίαση ο επιτυγχανόμενος βαθμός συγκέντρωσης δίνει μία επιπλέον παράμετρο ελευθερίας στην ακρίβεια του συστήματος παρακολούθησης του Ηλίου, αφού το προβαλλόμενο ηλιακό είδωλο πάνω στην επιφάνεια εισόδου του ομογενοποιητή, μπορεί να περιφέρεται γύρω από το ιδεατό κέντρο της επιφάνειας εισόδου κατά $\pm 2,0\text{mm}$ έως

$\pm 2,83\text{mm}$ χωρίς να διαταράσσεται η ομοιόμορφη κατανομή της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια εξόδου του ομογενοποιητή (οπότε και στην επιφάνεια της Φ/Β κυψελίδας). Μια τέτοια ανοχή στην ακρίβεια εστίασης η οποία μεταφράζεται σε ανοχή γωνίας σφάλματος σκόπευσης $\pm 0,265^\circ$ έως $\pm 0,375^\circ$ είναι πολύ μεγαλύτερη από την ακρίβεια εστίασης του συστήματος παρακολούθησης του Ηλίου που έχει αναπτυχθεί για το σύστημα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το αποτέλεσμα από την ανάλυση του οπτικού συστήματος είναι ότι προκύπτει ένα εξελιγμένο υβριδικό Φ/Β σύστημα συγκέντρωσης 1000 ήλιων με αναμενόμενο χρόνο ζωής άνω των 20-30 ετών, υψηλό βαθμό συγκέντρωσης και χαμηλό κόστος, που είναι συγκρίσιμο με το κόστος του ισοδύναμου ηλιακού θερμοσίφωνα. Επιπλέον ο συνδυασμός με μια εξελιγμένη Αντλία Θερμότητας χαμηλού κόστους, κατάλληλης για χαμηλές θερμοκρασίες ζεστού νερού αναγέννησης, δίνει την δυνατότητα στο συνολικό πακέτο να κάνει τριπλή εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ένας τριπλός στόχος:

α) γίνεται άμεση εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας ψύξης των Φ/Β κυψελίδων χωρίς την ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας.

β) αυξάνει κατά 200% τον ψαλιδισμό αιχμής επειδή υποκαθιστά διπλάσια ηλεκτρική ισχύ από το Φ/Β λόγω της λειτουργίας του κλιματισμού με ζεστό νερό αντί για ρεύμα.

γ) κατά την λειτουργία του κλιματισμού παράγεται ένα ενδιάμεσο ρεύμα χλιαρού νερού με θερμοκρασίες $32-45^\circ\text{C}$, (με θερμική ισχύ διπλάσια από την απορροφηθείσα από τον Ήλιο, διότι προστίθεται και η θερμότητα που απορροφήθηκε από τους κλιματιζόμενους χώρους), το οποίο είναι κατάλληλο για οικιακή χρήση, θέρμανση πισίνας κλπ. αυξάνοντας έτσι θεαματικά την ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. <http://www.solarbuzz.com/moduleprices.htm>
2. R. McConnell, Concentrator photovoltaic technologies – Review and market prospects, Refocus, July/August 2005.
3. R.M. Swason, The promise of concentrators, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 8, Pages 93-111, 2000.
4. L. Fraa, High power density photovoltaics – A path to cost competitive solar electric power, Renewable Energy World, September/ October 2002.
5. J. Jones, Time to Concentrate, Renewable Energy World, September/ October 2005.
6. B.L. Sater, N.D. Sater, High voltage silicon VMJ solar cells for up to 1000 suns intensities, Photovoltaic specialists conference - Conference record of the twenty-ninth IEEE, Page 1019-1022, May 2002.
7. European Commission, European Photovoltaics Projects 1999-2002 – Project Synopses, Pages 124-125, European Communities, 2003.
8. A.Papadopoulos et al., PROTEAS PV System: a hybrid device able to produce electricity, heat and cooling power, Presented at ENERGEX – 10th International Energy Forum 2004, Energy & Society, 3–6 May 2004.
9. Α. Παπαδόπουλος, Τριπλό υβριδικό ηλιακό σύστημα συγκεντρωτικού τύπου για την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής, θερμικής και ψυκτικής ενέργειας, Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας, Αριθμός 1003860, 2002.
10. A. Watt, M. Watt, Advanced Animation and Rendering Techniques: Theory and Practice, Addison-Wesley, Ontario, 1992.
11. A.Papadopoulos et al., Design of mirrors based on total reflection for concentration PV panels, Presented at ENERGEX – 10th International Energy Forum 2004, Energy & Society, 3–6 May 2004.