

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΦΑΚΩΝ FRESNEL ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Μ. Σουλιώτης¹, Α. Κανγά² και Ι. Τρουπαναγνωστόπουλος¹

¹Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, 26504, Ρίο Πάτρας
Τηλ./Fax: 2610 997472, e-mail: msouliot@physics.upatras.gr

²Τμήμα Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών και Ανθοκομίας, ΤΕΙ Μεσολογίου, 30200, Μεσολόγγι, Τηλ.:
26310 58234, e-mail: akavga@tei.mes.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια καινοτόμος ιδέα για τον έλεγχο του φωτισμού στα θερμοκήπια με τη χρήση των φακών Fresnel ως εναλλακτικά διαφανή καλύμματα. Αναπτύσσεται η αρχή λειτουργίας τους και οι δυνατότητες εφαρμογών τους για τη μείωση της θερμοκρασίας εντός του θερμοκηπίου λόγω απορρόφησης και κατάλληλης εξαγωγής μεγάλου μέρους της ηλιακής ενέργειας. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συνδυασμού των γραμμικών φακών Fresnel με θερμικά (T), φωτοβολταϊκά (PV) ή υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά (PV/T) συστήματα μετατροπής της πλεονάζουσας ηλιακής ακτινοβολίας εντός του θερμοκηπίου σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Τα συστήματα αυτά μελετούνται σχετικά με την απόδοσή τους στην κάλυψη των θερμικών και ηλεκτρικών αναγκών μιας χαρακτηριστικής θερμοκηπιακής μονάδας, δίνοντας τα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή τους αλλά και την επίδρασή τους στην κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας και της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας κάτω από το επίπεδο συγκέντρωσης των συστημάτων φακών Fresnel - απορροφητών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μεγαλύτερο μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στα θερμοκήπια αυξάνει την εσωτερική θερμοκρασία τους ως αποτέλεσμα της αδυναμίας των φυτών για πλήρη αξιοποίησή της. Από την άλλη μεριά το υψηλό επίπεδο φωτισμού δεν έχει πάντα θετικά αποτελέσματα για την παραγωγή επειδή υπερθερμαίνει τα θερμοκήπια και προκαλεί ανωμαλίες στην ανάπτυξη των φυτών. Οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες αποφεύγονται με τον εξαερισμό και την σκίαση, ενώ οι χαμηλές θερμοκρασίες αντιμετωπίζονται με τεχνητή θέρμανση. Η καύση βιομάζας, η χρήση διαφόρων τεχνικών αποθήκευσης θερμότητας την ημέρα για υποβοήθηση των θερμικών αναγκών την νύχτα, οι θερμοκουρτίνες οροφής και η γεωθερμία (όπου αυτή είναι διαθέσιμη) είναι ορισμένοι εναλλακτικοί τρόποι για την εξοικονόμηση συμβατικών ενεργειακών πηγών την περίοδο του χειμώνα. Για την θερινή περίοδο, οι υψηλές τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και οι αυξημένες θερμοκρασίες του αέρα αντιμετωπίζονται συνήθως με τεχνητή αποφυγή περίσσειας φωτισμού, περιορίζοντας τη διαπερατότητα του διαφανούς καλύμματος, με πλήρη αερισμό του θερμοκηπίου καθώς και με άλλους τρόπους δροσίσιμou.

Μεταξύ των χρησιμοποιηθέντων υλικών για την κάλυψη των θερμοκηπίων, το γυαλί είναι το σταθερότερο υλικό με ικανοποιητικές οπτικές και θερμικές ιδιότητες παρά το μεγαλύτερο κόστος σχετικά με τα διαφανή πλαστικά καλύμματα. Μια εναλλακτική πρόταση αποτελεί η χρήση γυάλινων φακών fresnel. Η χρήση των φακών fresnel ως διαφανή καλύμματα για τον έλεγχο φωτισμού και ενέργειας έχει εισαχθεί από τους Jirka et al, 1998 [1] και τα ληφθέντα αποτελέσματα σχετικά με την τοποθέτησή τους ως διαφανή καλύμματα στα θερμοκήπια δείχνουν τη θετική συμβολή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο [2]. Η χρήση των φακών fresnel, αντί των τυπικών υαλοπινάκων στη στέγη των θερμοκηπίων, είναι μια νέα ιδέα και στοχεύει στην αντιμετώπιση των φωτιστικών και ενεργειακών αναγκών των θερμοκηπίων.

Η μελέτη της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις παραμέτρους που σχετίζονται με το θερμοκήπιο παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον επειδή εκτός από την ρύθμιση του φωτισμού μπορεί να γίνει αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας για την κάλυψη μέρους των ενεργειακών αναγκών σε θερμότητα και ηλεκτρισμό. Προς την κατεύθυνση αυτή εξετάζεται η χρήση των γραμμικών ή δύο διαστάσεων (2D) φακών fresnel, οι οποίοι είναι οπτικά συγκεντρωτικά μέσα μικρού πάχους (~5mm), όσο δηλαδή μιας συνήθους γυάλινης πλάκας, τα οποία και συγκεντρώνουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε μια γραμμική εστία μικρού εύρους. Η διάταξη αυτή μπορεί να συνδυαστεί με απορροφητές της ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίοι μπορούν να μετακινούνται και να ακολουθούν την συγκλίνουσα δέσμη φωτός και η οποία σχετίζεται με την αλλαγή της θέσης του ήλιου. Όταν υπάρχει πλεόνασμα ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας, θα μπορεί να τίθεται σε λειτουργία ο μηχανισμός συλλογής ενός μέρους της, οπότε θα περιορίζεται η υπερέκθεση των φυτών και θα επιτυγχάνεται έτσι ένας αποτελεσματικός έλεγχος του φωτισμού. Η συλλεγόμενη από τους απορροφητές ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να μετατρέπεται σε θερμότητα, ηλεκτρισμό ή και τα δύο και να εξέρχεται του θερμοκηπίου, για να χρησιμοποιηθεί αργότερα για διάφορες ανάγκες του. Με τη συλλογή και την εξαγωγή από το θερμοκήπιο της πλεονάζουσας συλλεγόμενης ηλιακής ενέργειας επιτυγχάνεται και μείωση της θερμοκρασίας εντός του χώρου και του εδάφους του θερμοκηπίου, περιορίζοντας την υπερθέρμανσή του. Στην παρούσα εργασία αναλύεται η καινοτόμος εφαρμογή των φακών fresnel σε θερμοκήπια σε συνδυασμό με απορροφητές κατάλληλους για την θέρμανση νερού, αέρα ή άλλου ρευστού απολαβής της θερμότητας (T), με φωτοβολταϊκά (PV) για παραγωγή ηλεκτρισμού, ή ακόμη και υβριδικού τύπου απορροφητές όπως είναι αυτοί των φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων (PV/T), για ταυτόχρονη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό και θερμότητα.

2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

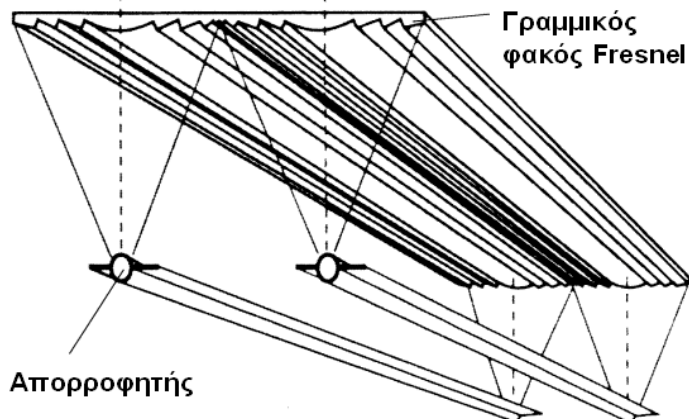
Αρκετές μέθοδοι έχουν προταθεί για τον έλεγχο των περιβαλλοντικών παραγόντων στα θερμοκήπια (ακτινοβολία, θερμοκρασία, υγρασία, κ.λ.π.), ανάλογα με τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες, την εφαρμογή και τις τεχνικές λεπτομέρειες κατασκευής τους. Κάθε ένας από τους παράγοντες αυτούς έχει επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών χωριστά ή σε συνδυασμό, και μεταξύ αυτών η εισερχόμενη στο θερμοκήπιο ηλιακή ακτινοβολία είναι ο βασικός παράγοντας για την φωτοσύνθεση και την ανάπτυξή τους. Τα διαφανή καλύμματα παίζουν σημαντικό ρόλο τόσο ως προς την ποσότητα όσο και ως προς την ποιότητα (φάσμα) της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες μελέτες για τη μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας [3, 4], την επίδραση των διαφανών καλυμμάτων [5, 6], των μεθόδων εξαερισμού [7, 8, 9], της εφαρμογής των καλυμμάτων πολυαιθυλενίου [10], των διαφανών καλυμμάτων zigzag [11] καθώς και για τους παράγοντες που επηρεάζουν την αρχιτεκτονική των θερμοκηπίων στις ευρωπαϊκές χώρες [12]. Στις χώρες μικρού γεωγραφικού πλάτους, όπως η Ελλάδα ή και άλλες Μεσογειακές χώρες, τη θερινή περίοδο αλλά και κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος μεταξύ άνοιξης και φθινοπώρου, η ακτινοβολία καλύπτει επαρκώς τις ανάγκες των καλλιεργούμενων φυτών στα θερμοκήπια. Το χειμώνα, η ηλιακή ακτινοβολία που εισάγεται στα θερμοκήπια δεν είναι επαρκής να καλύψει πλήρως τις ανάγκες των φυτών και στην περίπτωση αυτή ο τεχνητός φωτισμός συμβάλει ουσιαστικά σε αυτό. Στη χώρα μας, ακόμη και κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή και η θερμοκρασία αυξάνεται πολλές φορές πέρα από τα βιώσιμα όρια των φυτών. Κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου, θερμοκρασίες μέχρι περίπου 45 °C έχουν καταγραφεί στα θερμοκήπια, ενώ το καλοκαίρι τέτοιες θερμοκρασίες είναι πολύ κοινές. Ο παθητικός (φυσικός) και δυναμικός (τεχνητός) εξαερισμός, η μείωση των θερμοκρασιών αέρα στο θερμοκήπιο με την εξάτμιση ύδατος και την σκίαση είναι απαραίτητες μέθοδοι για τη μείωση της θερμοκρασίας. Για να αποφευχθεί η υψηλή ποσότητα

φωτισμού το καλοκαίρι και σε άλλες περιόδους στη διάρκεια του έτους και για να κρατηθεί η θερμοκρασία των θερμοκηπίων σε ένα βιώσιμο όριο είναι απαραίτητος ο έλεγχος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Έχουν εφαρμοστεί διάφοροι μέθοδοι σκίασης για τη μείωση της προσπίπτουσας εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, μερικοί απλοί και άλλοι που χρειάζονται μηχανισμούς και κατανάλωση υψηλών ποσοτήτων ενέργειας. Η σκίαση μπορεί να συμβάλει στη γενική μείωση της θερμοκρασίας εδάφους και αέρα των θερμοκηπίων επειδή μειώνει την ποσότητα της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας εντός του χώρου του.

Η αυξημένη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας πέρα από το επίπεδο που τα φυτά μπορούν να εκμεταλλευτούν δεν είναι επιθυμητή ενώ συνοδεύεται ταυτόχρονα από μια υψηλή αύξηση στη θερμοκρασία, που όταν ο φωτισμός είναι επαρκής, είναι ο κύριος παράγοντας επηρεασμού της ανάπτυξης των καλλιεργημένων φυτών. Οι πιο κοινές μέθοδοι μείωσης του φωτισμού στα θερμοκήπια είναι η χρήση ειδικών λευκών χρωμάτων και η χρήση κουρτινών, οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν με το δυναμικό εξαερισμό και ένα σύστημα ψύξης μέσω της εξάτμισης του νερού. Εκτός από την ένταση, η διάρκεια του φωτισμού έχει σημαντική επίδραση στην παραγόμενη ποσότητα και την ποιότητα των προϊόντων. Η μεγαλύτερη διάρκεια του φωτισμού και η υψηλότερη ενεργειακή διαθεσιμότητα για τη φωτοσύνθεση αυξάνουν την παραγωγή. Δεδομένου ότι η διάρκεια του φυσικού φωτισμού διέπεται από χρονικούς και κλιματολογικούς περιορισμούς, η προσθήκη τεχνητού φωτισμού (νυκτερινός φωτισμός) έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην παραγωγή. Τα διαφανή καλύμματα των θερμοκηπίων καθορίζουν το εσωτερικό μικροκλίμα με κύριες παραμέτρους το μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας, το επίπεδο έντασης της και το εσωτερικό επίπεδο θερμοκρασίας. Το γυαλί, σε αντίθεση με το πλαστικό (PC, PMMA, GRP, PVC, RDPE, EVA), θεωρείται κατάλληλο υλικό για διαφανή κάλυψη λόγω των πολύ καλών ιδιοτήτων του σχετικά με τη μετάδοση ακτινοβολίας και τη σταθερότητα. Όσον αφορά το κόστος, το γυαλί έχει σχεδόν το ίδιο κόστος με τα πλαστικά καλύμματα μετά από περίπου δέκα έτη λειτουργίας λόγω αντικατάστασής τους 2-3 φορές. Τα διαφανή καλύμματα απορροφούν μέρος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία εξαρτάται όχι μόνο από την εποχή και το γεωγραφικό πλάτος της θέσης, αλλά και από το είδος του υλικού και τη γωνία της πρόσπτωσης της ακτινοβολίας.

3. ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΦΑΚΩΝ FRESNEL ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Με την προτεινόμενη χρήση των γραμμικών φακών Fresnel επιδιώκεται ο έλεγχος του φωτισμού και της θερμοκρασίας των θερμοκηπίων και επίσης ενεργειακό όφελος από την αξιοποίηση της πλεονάζουσας εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Οι φακοί fresnel έχουν μικρό πάχος, χαμηλό κόστος και μικρό βάρος έναντι των συνηθισμένων συμπαγών φακών. Μεταξύ των εργασιών για τους φακούς Fresnel μπορούμε να αναφέρουμε τη μελέτη για την ελαχιστοποίηση του εστιακού τους βάθους [13] και αυτή των φακών Fresnel ως συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα [14]. Οι φακοί Fresnel συγκεντρώνουν κυρίως την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και ως εκ τούτου μπορούν να ελέγξουν το φωτισμό μέσα στα θερμοκήπια. Το ποσό της ενέργειας που απορροφάται μειώνει την ποσότητα φωτός που προσπίπτει τελικά στα φυτά και το έδαφος και έτσι μπορεί να επιτευχθεί χαμηλότερο επίπεδο φωτισμού και μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας του χώρου. Οι φακοί Fresnel μπορούν να συνδυαστούν με θερμικά (T), φωτοβολταικά (PV) ή υβριδικά φωτοβολταικά / θερμικά (PV/T) που μετατρέπουν την προσλαμβανόμενη ηλιακή ενέργεια ταυτόχρονα σε θερμότητα και ηλεκτρισμό, χρησιμοποιώντας την αργότερα για την κάλυψη διαφόρων ενεργειακών αναγκών των θερμοκηπίων [15]. Η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί ως θερμότητα (αποθήκευση ζεστού νερού ή υπόγεια αποθήκευση) και να χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της νύχτας ή ως ηλεκτρική ενέργεια (μπαταρίες ή ηλεκτρικό δίκτυο) για να καλύψει τις ηλεκτρικές ανάγκες καθώς επίσης και για την επέκταση της περιόδου φωτισμού των φυτών.



Εικόνα 1: Σχηματική παράσταση του συστήματος φακού Fresnel – απορροφητή.

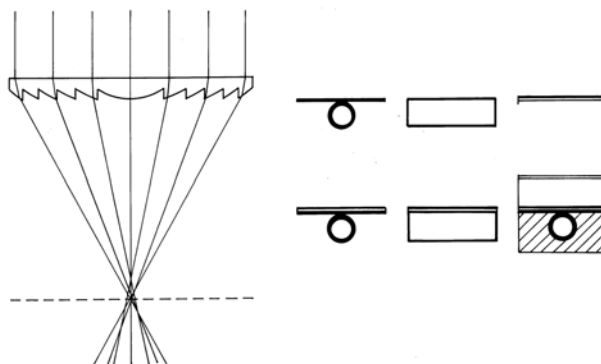
Διάφοροι τύποι φακών fresnel έχουν ερευνηθεί. Οι φακοί fresnel 2D (γραμμικοί φακοί) είναι πρακτικότεροι από τον τρισδιάστατο τύπο 3D (κυκλικό φακό) και δεδομένου ότι μπορεί να τοποθετηθούν με προσανατολισμό Ανατολή-Δύση χρειάζονται λιγότερες μετακινήσεις προσανατολισμού των συστημάτων στον ήλιο για την αποδοτική λειτουργία τους. Η εφαρμογή τους ως διαφανή καλύμματα στα θερμοκήπια έχει δώσει ενδιαφέροντα αποτελέσματα για τις μέσου γεωγραφικού πλάτους χώρες [1, 2] και θα μπορούσε να έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα και σε χώρες μικρότερου γεωγραφικού πλάτους όπως η Ελλάδα ή άλλες Μεσογειακές χώρες. Η συλλογή 60–80 % [15] της διαβιβασθείσας ηλιακής ακτινοβολίας μέσω των διαφανών καλυμμάτων στους απορροφητές αφήνει το υπόλοιπο ποσό να διανεμηθεί εντός του θερμοκηπίου για την κάλυψη αναγκών φωτισμού των φυτών. Το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει απορροφητές μικρού πλάτους (5-10cm), ανάλογα με την συγκέντρωση, οι οποίοι μετακινούνται απορροφούν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Όσον αφορά τη θερμική μετατροπή, η ηλιακή ακτινοβολία που συγκεντρώνεται μέσω των φακών fresnel απορροφάται σε ένα σωλήνα ή απορροφητή τύπου περυγίου με σωλήνα, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του (Εικ. 1). Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω ενός κυκλοφορούντος ρευστού, το οποίο συνήθως είναι νερό, ενώ το όλο σύστημα συνδέεται με ένα σύστημα αποθήκευσης. Η εφαρμογή αυτού του συστήματος συνίσταται τις ηλιόλουστες ημέρες της χειμερινής περιόδου και κυρίως κατά τη διάρκεια του μεσημεριού, όταν δηλαδή υπάρχει πλεόνασμα ηλιακής ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο. Το αποθηκευμένο ζεστό νερό μέσω συστήματος σωλήνων μπορεί να κυκλοφορήσει στη διάρκεια της νύκτας συμβάλλοντας στη θέρμανση του θερμοκηπίου. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά (PV) αντί των θερμικών απορροφητών, η παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει τις ηλεκτρικές ανάγκες του θερμοκηπίου είτε με διοχέτευσή της στο ηλεκτρικό δίκτυο είτε μέσω της αποθήκευσής της σε μπαταρίες.

Η χρήση των φακών fresnel μπορεί να περιορίσει την κατανάλωση ενέργειας για τον εξαερισμό των θερμοκηπίων στη διάρκεια της ημέρας, είναι πρακτικά εύκολη η αποθήκευση της θερμότητας για τη θέρμανση του χώρου στη διάρκεια της νύκτας και στην περίπτωση χρήσης φωτοβολταϊκών είναι δυνατή η παράταση του χρόνου τεχνητού φωτισμού των φυτών τη νύκτα. Όταν παρατηρείται χαμηλή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, ο απορροφητής τίθεται εκτός της εστίας του φακού, αφήνοντας το φως να εισέλθει στο εσωτερικό και να διατηρήσει το φωτισμό σε αποδεκτό επίπεδο για τα καλλιεργούμενα φυτά. Το πλεονέκτημα των γραμμικών φακών Fresnel είναι ότι διαχωρίζουν την άμεση από τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία και είναι κατάλληλοι για τον έλεγχο φωτισμού στο εσωτερικό των θερμοκηπίων, παρέχοντας φως κατάλληλου επιπέδου έντασης και χωρίς έντονες διακυμάνσεις.

Τα φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου (a-Si), πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si) ή κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) είναι οι πιο κοινές περιπτώσεις PV, που παρουσιάζουν ηλεκτρικές αποδόσεις σε εύρος από 5% ως 14%, κατά σειρά. Τα PV λοιπόν μετατρέπουν ένα μικρό μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια, με το μεγαλύτερο μέρος αυτής να μετατρέπεται σε θερμότητα. Η ηλεκτρική απόδοσή τους μειώνεται καθώς η θερμοκρασία λειτουργίας τους αυξάνεται και η απαγωγή θερμότητας του PV είναι απαραίτητη για να κρατηθεί σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο απόδοσης. Τα φωτοβολταϊκά (PV) και τα θερμικά (T) συστήματα απορροφητών ηλιακής ενέργειας μπορούν να συνδυαστούν σε μια ενιαία συσκευή, που αποτελεί το υβριδικό φωτοβολταϊκό/θερμικό (PV/T) σύστημα, παρέχοντας ταυτόχρονα ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα και κρατώντας την ηλεκτρική απόδοση σε ικανοποιητικό επίπεδο. Στις εφαρμογές συστημάτων PV/T η ηλεκτρική ενέργεια έχει προτεραιότητα και η λειτουργία των PV σε χαμηλές θερμοκρασίες συμβάλλει να κρατηθεί η ηλεκτρική αποδοτικότητα κυττάρων σε αποδεκτό επίπεδο [16]. Αυτή η απαίτηση περιορίζει τη λειτουργία της θερμικής μονάδας των PV σε χαμηλή θερμοκρασία και η προσλαμβάνουσα θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως για θερμικές ανάγκες χαμηλής θερμοκρασίας. Για την εγκατάσταση των συστημάτων φακών fresnel – PV/T στη στέγη των θερμοκηπίων είναι απαραίτητο να συνεκτιμηθεί η αποδιδόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια με τα οφέλη στον έλεγχο του φωτισμού και του εξαερισμού.

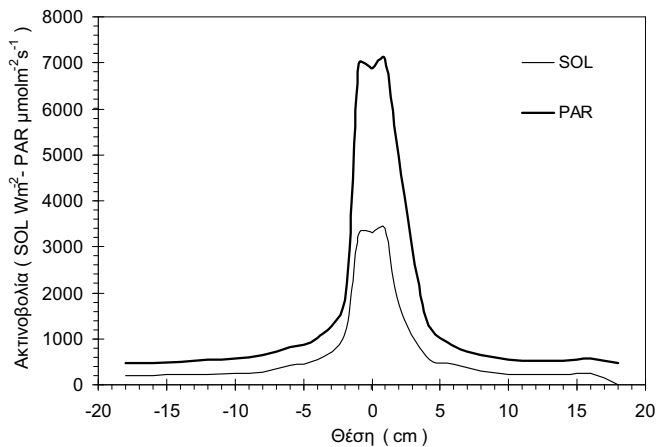
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ FRESNEL – PV/T ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

Στην Εικ. 2 παρουσιάζεται η αρχή σχεδίασης του φακού Fresnel (αριστερά), που με τις διαθλώμενες ακτίνες να διαμορφώνουν μια διασκορπισμένη εικόνα του ήλιου στο εστιακό εύρος (συγκεντρωτικό σύστημα μη ευκρινούς ειδώλου). Στο ίδιο σχήμα (δεξιά), δείχνονται έξι τύπου απορροφητών, όπου στην πρώτη γραμμή είναι το περύγιο με σωλήνες για τη θέρμανση νερού, ο αεραγωγός για τη θέρμανση του αέρα και το φωτοβολταϊκό. Στη δεύτερη γραμμή υπάρχουν τα υβριδικά συστήματα PV/T για τη θέρμανση νερού, αέρα και επίσης για τη θέρμανση νερού με την πρόσθετη τοποθέτηση διαφανούς καλύμματος και θερμικής μόνωσης. Από την πειραματική μελέτη του φακού fresnel [15] βρέθηκε ότι το βέλτιστο εστιακό μήκος είναι $f = 42 \text{ cm}$ και υπολογίστηκε η συλλεχθείσα ηλιακή ακτινοβολία με τη χρήση απορροφητών πλάτους 5 και 10 cm στην εστία. Η συλλογή 60-80% της διαβιβασθείσας ηλιακής ακτινοβολίας στους διάφορους τύπους απορροφητή αφήνει το υπόλοιπο ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας να διανεμηθεί στο χώρο του θερμοκηπίου για τις ανάγκες φωτισμού των φυτών. Από τα διεξαχθέντα πειράματα με μικρού μεγέθους εξομοιωτή θερμοκηπίου παρατηρήθηκε μια μείωση της θερμοκρασίας εντός του χώρου από $4 \text{ }^\circ\text{C}$ έως $6 \text{ }^\circ\text{C}$ στη διάρκεια λειτουργίας των συστημάτων το μεσημέρι [15].

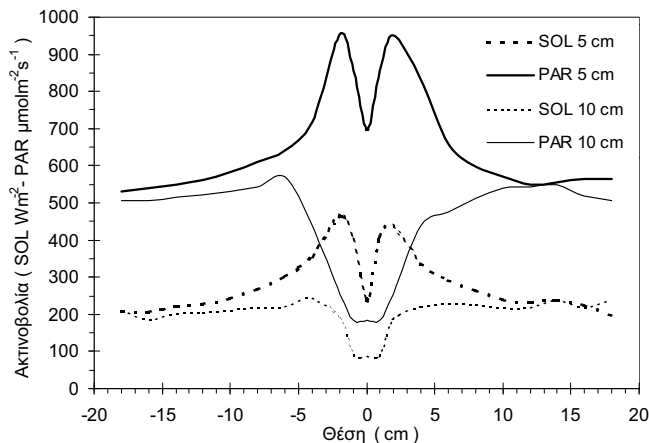


Εικόνα 2: Τομή του φακού Fresnel και των διαφόρων τύπων απορροφητών

Πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη προσδιορισμού της ποσότητας της ηλιακής ακτινοβολίας (SOL) που διέρχεται από τον φακό fresnel καθώς και του φωτοσυνθετικού φάσματος (PAR) σε δύο περιπτώσεις χρήσης απορροφητών (5 cm και 10 cm). Στην Εικ. 3 παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας (SOL σε $W \cdot m^{-2}$ και PAR σε $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) σε διάφορες θέσεις κατά πλάτος στο βέλτιστο εστιακό επίπεδο του χρησιμοποιηθέντος φακού fresnel και για κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας. Στην Εικ. 4 παρουσιάζονται οι κατανομές της SOL και PAR κάτω από τον απορροφητή για δύο περιπτώσεις, 5 cm και 10 cm. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως ο απορροφητής των 10 cm απορροφά μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας ενώ των 5 cm μικρότερο. Σε απόλυτες τιμές, τόσο οι ποσότητες της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (SOL) όσο και της φωτοσυνθετικής ακτινοβολίας (PAR) είναι σαφώς αποδεκτές για τον απορροφητή των 5 cm, αλλά εντελώς οριακές για τον απορροφητή των 10 cm. Αυτά τα αποτελέσματα είναι ενδεικτικά και δείχνουν τις δυνατότητες ελέγχου φωτισμού στο εσωτερικό χώρο των θερμοκηπίων με την εφαρμογή των φακών fresnel.



Εικόνα 3: Κατανομή ακτινοβολίας SOL (Wm^{-2}) και PAR ($\mu molm^{-2}s^{-1}$) κατά πλάτος στο βέλτιστο εστιακό βάθος του φακού fresnel



Εικόνα 4: Κατανομή ακτινοβολίας (SOL) και (PAR) κατά πλάτος κάτω από τον απορροφητή σε δύο περιπτώσεις πλάτους απορροφητών (5 cm και 10 cm)

Εξετάζοντας τις ενεργειακές ανάγκες των θερμοκηπίων, μπορούν να εξαχθούν μερικά συμπεράσματα από τα οφέλη που αποκομίζονται από τη χρήση των γραμμικών φακών fresnel αντί των τυπικών γυάλινων καλυμμάτων. Υπολογίστηκαν έτσι οι ενεργειακές ανάγκες μιας μονάδας θερμοκηπίου, που καλύπτει επιφάνεια 500 m². Το θερμοκήπιο διαθέτει απλές πλάκες γυαλιού ως διαφανές κάλυμμα και λειτουργεί κάτω από τις καιρικές συνθήκες ενός σημείου της Νοτιο-Δυτικής Ελλάδας κοντά στη θάλασσα. Όσον αφορά τις ανάγκες θέρμανσης του θερμοκηπίου εξετάστηκε η περίοδος από το Νοέμβριο μέχρι τον Απρίλιο και υπολογίστηκε ένα φορτίο θέρμανσης 25,9 MWh. Για τον εξαερισμό εξετάστηκε η περίοδος από το Μάρτιο μέχρι τον Οκτώβριο υπολογίστηκε ένα φορτίο 4,5 MWh και για την ψύξη από το Μάιο μέχρι τον Σεπτέμβριο με φορτίο 2,2 MWh. Επιπλέον, υπολογίστηκε το φορτίο για τεχνητό φωτισμό του θερμοκηπίου από το Σεπτέμβριο μέχρι τον Απρίλιο σε 3,2 MWh.

Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται οι γραμμικοί φακοί fresnel σε συνδυασμό με τους θερμικούς συλλέκτες υπολογίζεται ένα ενεργειακό όφελος 6,5 MWh, που αντιστοιχεί στο 25% του θερμικού φορτίου κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, θεωρώντας ότι οι θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες έχουν απόδοση 30%. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι θερμικές απώλειες των συλλεκτών είναι προς το εσωτερικό του θερμοκηπίου, δεδομένου ότι οι απορροφητές τοποθετούνται κάτω από τη στέγη και έτσι δεν υπάρχει σημαντική απόκλιση στην διακύμανση της θερμοκρασίας μέσα στο θερμοκήπιο. Επιπλέον, μπορεί να επιτευχθεί όφελος 50% (ή περίπου 3,5 MWh) από την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για τον εξαερισμό και ψύξη, κυρίως κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου. Εάν συνδυαστούν οι φακοί fresnel με τους απορροφητές φωτοβολταϊκών, μπορεί να ληφθεί μια ικανοποιητική κάλυψη 75% των ηλεκτρικών αναγκών (περίπου 7,5 MWh) στον τεχνητό φωτισμό, την ψύξη και τον εξαερισμό. Τέλος, σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται φακοί fresnel σε συνδυασμό με τους υβριδικούς απορροφητές PV/T, τότε μπορούν να προκύψουν συγκεντρωτικά όλα τα ανωτέρω οφέλη.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκαν οι πτυχές και τα αναμενόμενα αποτελέσματα σχετικά με την εφαρμογή των γραμμικών φακών Fresnel στα θερμοκήπια. Το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να συνδυαστεί με θερμικό, φωτοβολταϊκό ή και υβριδικό θερμικό / φωτοβολταϊκό απορροφητή με σκοπό τη μετατροπή της πλεονάζουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα και ηλεκτρισμό, συμβάλλοντας στον έλεγχο φωτισμού και θερμοκρασίας, τη θέρμανση και άλλες ενεργειακές ανάγκες των θερμοκηπίων σύμφωνα με τις τοπικές καιρικές συνθήκες και τις ανάγκες των καλλιεργούμενων φυτών. Υπολογίστηκε ότι το προτεινόμενο σύστημα με τους θερμικούς απορροφητές μπορεί να μειώσει κατά περίπου 25% τις θερμικές ανάγκες, κατά 50% το φορτίο εξαερισμού και ψύξης των θερμοκηπίων και το μεγαλύτερο μέρος των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια σε περίπτωση χρησιμοποίησης απορροφητών PV ή PV/T. Επιπλέον διαπιστώθηκε ότι η χρήση των συστημάτων φακού fresnel – απορροφητή δεν επηρεάζει σημαντικά την ένταση της φωτοσυνθετικά ενεργής ηλιακής ακτινοβολίας κάτω από το επίπεδο εστίασης όπου κρίνεται αποδεκτή για δύο περιπτώσεις χρήσης απορροφητών διαφορετικού πλάτους. Δεδομένου ότι στην Ελλάδα η παραγόμενη ενέργεια προέρχεται κατά 90% περίπου από συμβατικά καύσιμα (γαιάνθρακες και υδρογονάνθρακες) που προκαλούν από την καύση τους σημαντική επιβάρυνση του φυσικού περιβάλλοντος (φαινόμενο θερμοκηπίου, άνοδος θερμοκρασίας, υποβάθμιση μεγάλων περιοχών στις οποίες είναι εγκατεστημένες τέτοιες μονάδες παραγωγής ενέργειας, κλπ) γίνεται σαφές ότι, μακροπρόθεσμα, μια πιθανή εκτεταμένη χρήση των φακών στα θερμοκήπια μπορεί να βελτιώσει το περιβάλλον σε βαθμό και έκταση εξαρτώμενα από το ποσοστό των συμβατικών πηγών ενέργειας που κάθε θερμοκήπιο καταναλίσκει.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Jirka V., Kuceravy V., Maly M., Pokorny J. and Rehor E. 1998. The architectural use of glass raster lenses. In Proc. of WREC V, Part III:1595-1598.
2. Jirka V., Kuceravy V., Maly M., Pech F., Pokorny J. 1999. Energy flow in a greenhouse equipped with glass raster lenses. *Renewable Energy* 16:660-664.
3. Papadakis G., Manolakos D., Kyritsis S. 1998. Solar radiation transmissivity of a single-span greenhouse through measurements on scale model. *J. Agric. Engng. Res.* 71: 331-338.
4. Pollet I.V., Pieters J.G. 2000a. Condensation and radiation transmittance of greenhouse cladding materials, part 3: Results for glass plates and plastic films. *J. Agric. Engng. Res.* 77: 419-429.
5. Kittas C., Baille A., Giaglaras P. 1999. Influence of covering material and shading on the spectral distribution of light in greenhouses. *J. Agric. Eng. Res.* 73: 341-351.
6. Papadakis G., Briassoulis, Mugnozsa Scarascia G., Vox G., Feuilloley P., Stoffers J.A. 2000. Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. *J. Agric. Engng. Res.* 77: 7-38.
7. Tiwari G.N., Sutar R.F., Singh H.N., Goyal R.K. 1998. Performance studies of earth air tunnel cum greenhouse technology. *Energy Conv. Mgmt.* 39: 1497-1502.
8. Teitel M., Segal I., Shklyar A., Barak M. 1999. A comparison between pipe and air heating methods for greenhouses. *J. Agric. Engng. Res.* 72: 259-273.
9. Kittas C., Katsoulas N., Baille A. 2001. Influence of greenhouse ventilation regime on the microclimate and energy partitioning of a rose canopy during summer conditions. *J. Agric. Engng Res.* 79:349-360.
10. Dilara P.A., Briassoulis D. 2000. Degradation and stabilization of low-density polyethylene films used as Greenhouse covering materials. *J. Agric. Eng. Res.*76: 309-321.
11. Swinkels G.L.A., Sonneveld P.J., Bot G.P.A. 2001. Improvement of greenhouse insulation with restricted transmission loss through zigzag covering material. *J. Agric. Eng. Res.* 79: 91-97.
12. Von Elsner B., Briassoulis D., Waaijbergen D., Mistriotis A., Von Zabeltitz Chr., Gratraud J., Russo G., Suay-Cortes R. 2000a. Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries, part I: Designs requirements. *J. Agric. Eng. Res.* 75: 1-16.
13. Kritchman E.M., Friesem A.A., Yekutieli G. 1979. Efficient Fresnel lens for solar concentration. *Solar Energy* 22: 119-123.
14. Leutz R., Suzuki A., Akisawa A., Kashiwagi T. 1999. Design of nonimaging Fresnel lens for solar concentrators. *Solar Energy* 65: 379-387.
15. Tripanagnostopoulos Y., Souliotis M., Tonui J.K. and Kavga A. 2004. Illumination aspects for efficient greenhouses. Presented in Greensys2004 Int. Conference, Leuven, Belgium, 12-16 Sep. 2004.
16. Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M. and Yianoulis P. 2002. Hybrid Photovoltaic/Thermal solar systems. *Solar Energy* 72: 217-234.