

12^ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



ΤΟΜΟΣ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ

Θεσσαλονίκη

7-9 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2021

ΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΣΥΝΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΠΘ.

Υπό την αιγίδα της
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΤΟΥ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

<https://solarinstitute.gr>



12^ο ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΤΟΥ Ι.Η.Τ. ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ISSN 1108 - 3603

Επιμέλεια έκδοσης

Ε. Κυριάκη, Γ. Μαρτινόπουλος, Γ. Τσιλιγκιρίδης

Έκδοση

Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής
Τ.Θ. 487, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
541 24 Θεσσαλονίκη
Τηλ.: 2310 996081, 2310 996084 - Fax: 2310 996087
<http://solarinstitute.gr/>, e-mail: iht@eng.auth.gr

Σελιδοποίηση - Επιμέλεια εξωφύλλου

Δημήτρης Ε. Κατέρης

Εκτύπωση - Βιβλιοδεσία

Εκδόσεις Παχούδη



Κ. Μελενίκου 15, τ.κ. 546 36, Θεσσαλονίκη
Τηλ.: 2310 216 779, 2310 245 333

ΑΝΑΓΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ: ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΙ ΤΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Νικόλαος Κατσούλας*, Αικατερίνη Μπαξεβάνου, Δημήτριος Φειδαρος,

Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, ΠΘ, 38446 Φυτόκο, Νέα Ιωνία Μαγνησίας
e-mail: nkatsoul@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια λύση στο πρόβλημα της μείωσης της διαθέσιμης φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας (PAR) μέσα σε θερμοκήπια καλυμμένα με συμβατικά αδιαφανή φωτοβολταϊκά (PV) είναι η χρήση ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών. Ένα ερώτημα που τίθεται είναι σε τι ποσοστό μπορεί να καλύπτει το ημιδιαφανές φωτοβολταϊκό το θερμοκήπιο ώστε να μην προκαλεί προβλήματα στην ανάπτυξη των φυτών. Το παρόν άρθρο αξιολογεί, μέσω προσομοιώσεων, την επίδραση της ενσωμάτωσης ημιδιαφανών οργανικών φωτοβολταϊκών (Organic PhotoVoltaics-OPV) στο κάλυμμα της οροφής ενός τοξωτού θερμοκηπίου. Η αξιολόγηση γίνεται συναρτήσει της διαθέσιμης και πρακτικά αξιοποιήσιμης ηλιακής ακτινοβολίας για φωτοσύνθεση (PAR) εντός του θερμοκηπίου. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η προσομοίωση της μετάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του καλύμματος και της κατανομής της στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με υπολογιστική ρευστόδυναμική (CFD), χρησιμοποιώντας το μοντέλο Discrete Ordinates (DO). Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η τομή δύο διαστάσεων (2Δ) ενός τροποποιημένου τοξωτού θερμοκηπίου πλάτους 8 m. Εξετάστηκαν τρεις συνδυασμοί OPV / καλύμματος που δίνουν περατότητα σε κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία στο φάσμα της PAR ίση με 30%, 45% και 60%, κάτι που καθορίζει και το ποσοστό κάλυψης με OPV. Για το λόγο αυτό προσομοιώθηκε η μετάδοση ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια οκτώ ενδεικτικών ηλιακών ημερών στη διάρκεια του έτους. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τη διαθέσιμη PAR εντός του θερμοκηπίου στο επίπεδο των φυτών και του ρυθμού φωτοσύνθεσης των καλλιεργειών. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τα αποτελέσματα ενός καλύμματος πολυαιθυλενίου (PE) χωρίς OPV για τις ίδιες εξωτερικές κλιματικές συνθήκες. Παράλληλα, υπολογίστηκε η ετήσια παραγωγή ενέργειας από τα OPV για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η μείωση που παρατηρήθηκε στη μέση διαθέσιμη ημερήσια PAR για τις περιπτώσεις με περατότητα στην κάθετα προσπίπτουσα PAR 30%, 45% και 60% σε σύγκριση με την περίπτωση του PE χωρίς OPV, είναι 77%, 66% και 52%, αντίστοιχα, ενώ η αντίστοιχη μείωση στο μέσο ημερήσιο ρυθμό φωτοσύνθεσης είναι 33%, 21% και 12%. Τέλος, η ετήσια παραγωγή ισχύος από τα OPV, ανά μονάδα μήκους θερμοκηπίου, για τις περιπτώσεις με περατότητα στην κάθετα προσπίπτουσα PAR 30%, 45% και 60%, ήταν 323, 242 και 158 kWh/(m·y), αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του θερμοκηπίου για τη μεγιστοποίηση της PAR σε επίπεδο καλλιέργειας.

Λέξεις-κλειδιά: φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία, παραγωγή ενέργειας, υπολογιστική ρευστοδυναμική, ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά, ρυθμός φωτοσύνθεσης

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση φωτοβολταϊκών για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός θερμοκηπίου απαιτεί κατάληψη πιθανόν παραγωγικής γεωργικής γης για την εγκατάστασή τους [1]. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε να είναι η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) πάνω στο κάλυμμα των θερμοκηπίων. Ωστόσο αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση της διαθέσιμης φωτοσυνθετικά ενεργούς ακτινοβολίας (photosynthetically active radiation - PAR) στο επίπεδο των φυτών, εμποδίζοντας την ανάπτυξη των φυτών και τροποποιώντας και άλλες παραμέτρους του μικροκλίματος μέσα στο θερμοκήπιο (θερμοκρασία, πεδίο πίεσεων, ταχύτητας του αέρα κλπ), οι οποίες επηρεάζονται από την περατότητα του καλύμματος. Αυτό θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με τη χρήση ημιδιάφανων ΦΒ σε μορφή φιλμ τα οποία αφενός δεν επιβαρύνουν τη στατικότητα του θερμοκηπίου αφετέρου δε επιτρέπουν σημαντικές ποσότητες φυσικού φωτός να εισέλθουν στο θερμοκήπιο, καθώς δεν είναι αδιαφανή όπως τα συνήθη ΦΒ πλαίσια. Ωστόσο, περιορίζουν και αυτά την είσοδο της PAR και τροποποιούν το εσωτερικό μικροκλίμα με πολλούς μηχανισμούς (λιγότερη ποσότητα διαθέσιμης PAR στο επίπεδο των φυτών, μικρότερη μετάδοση θερμότητας μέσω του καλύμματος, μεταβολή του θερμικού και ροϊκού πεδίου μέσα στο θερμοκήπιο κ.α.).

Το ζήτημα της ενσωμάτωσης ΦΒ στο κάλυμμα θερμοκηπίων έχει απασχολήσει ευρέως την επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια με έρευνες σχετικά με τα: (α) σε ποιο βαθμό είναι σε θέση να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες του θερμοκηπίου και β) σε ποιο βαθμό επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών. Η πλειονότητα αυτών των ξεκινούν με πειράματα ή μετρήσεις πεδίου, την ισχύ των οποίων προσπαθούν να επεκτείνουν μέσω ανάπτυξης αναλυτικών μοντέλων βασισμένων στις μετρήσεις.

Ένα σχετικό ζήτημα που έχει διερευνηθεί είναι πως η γεωμετρία του καλύμματος του θερμοκηπίου επηρεάζει την απόδοση των ΦΒ. Στην εργασία [2] μετρήθηκε η απόδοση τεσσάρων ΦΒ κυψελών άμορφης σιλικόνης και αναπτύχθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο. Τα εξεταζόμενα ΦΒ ήταν τοποθετημένα σε ένα Γοιθικού τύπου θερμοκηπίου με προσανατολισμό Βοράς-Νότος. Οι έρευνες που περιγράφονται στην εργασία [3] επικεντρώνουν στη δυνατότητα των ενσωματωμένων στην οροφή ΦΒ να καλύψουν την ενεργειακή ζήτηση για τη ρύθμιση του εσωτερικού μικροκλίματος ενός θερμοκηπίου κρεμμυδιών. Στην εργασία αυτή μετρήθηκε η παραγόμενη ενέργεια και η ηλιακή ακτινοβολία μέσα σε θερμοκήπιο με κάλυψη της οροφής κατά 12.9% από ΦΒ και παράλληλα αναπτύσσεται ένα αναλυτικό μοντέλο για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας σε συγκεκριμένες θέσεις μέσα στο θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στην εργασία [4] παρουσιάζονται μετρήσεις σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη θερμοκρασία και τη διαθέσιμη PAR μέσα σε πειραματική διάταξη στην οποία τα ΦΒ προκαλούν σκίαση κατά 20% και αναπτύσσεται ένα αναλυτικό μοντέλο προκειμένου τα συμπεράσματα από τις μετρήσεις να γενικευτούν. Στην εργασία [5] ερευνάται η παραγωγή ενέργειας από ΦΒ διπλής όψευς τα οποία καλύπτουν το 37% της επιφάνειας ενός θερμοκηπίου.

Ένα άλλο ζήτημα που έχει διερευνηθεί είναι η επίδραση των ΦΒ στο εσωτερικό μικροκλίμα ενός θερμοκηπίου. Σύμφωνα με μετρήσεις πεδίου σε θερμοκήπιο για τομάτες και λάχανα [1], η τοποθέτηση ημιδιάφανων ΦΒ σε απόσταση 8 cm πάνω από δිරριχτη οροφή, καλύπτοντας το 20% της επιφάνειας, προκαλεί μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά 35-40% και μείωση της θερμοκρασίας κατά 1-3°C. Στην εργασία [6] εξετάζεται η επίδραση της αντικατάστασης του 50% μιας δිරριχτης οροφής θερμοκηπίου με μονοκρυσταλλικά ΦΒ, στη θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία μέσα σε αυτό. Στην εργασία [7] εξετάζεται, μέσω μετρήσεων πεδίου, η επίδραση ενσωματωμένων ΦΒ στο ρυθμό εξατμισιοδιαπνοής και συνεπώς στη διαχείριση νερού του θερμοκηπίου. Προκύπτει [1, 3, 4] ότι η επίδραση της ενσωμάτωσης ΦΒ στην οροφή ενός θερμοκηπίου εξαρτάται και από την καλλιέργεια μέσα σε αυτό, με την καλλιέργεια τομάτας να είναι λιγότερο ευάλωτη από την καλλιέργεια κρεμμυδιών.

Ο υπολογισμός της διαθέσιμης PAR μέσα σε ένα θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια μιας ηλιακής μέρας απαιτεί εκτεταμένους και δύσκολους υπολογισμούς οι οποίοι γίνονται ακόμα πιο απαιτητικοί στην περίπτωση μιας τοξωτής οροφής. Για το λόγο αυτό η πλειονότητα των σχετικών ερευνητικών εργασιών αφορά είτε την απόδοση των ΦΒ [8] είτε το εσωτερικό μικροκλίμα σε θερμοκήπια με δිරριχτη οροφή [9]. Όταν ασχολούνται με θερμοκήπια με τοξωτή οροφή, συνήθως υιοθετούν απλοποιημένες παραδοχές σε ότι αφορά τη γεωμετρία της οροφής [10]. Αυτοί οι υπολογισμοί όμως μπορούν να γίνουν με αριθμητικές

μεθόδους όπως είναι η υπολογιστική ρευστομηχανική (computational fluid dynamics – CFD) [11], η οποία επιτρέπει λεπτομερή προσομοίωση ακόμα και τοξωτής οροφής .

Η παρούσα εργασία εξετάζει την επίδραση της χρήσης ημιδιάφανων ΦΒ ενσωματωμένων στο κάλυμμα ενός θερμοκηπίου στο εσωτερικό μικροκλίμα και στις παραμέτρους που επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών με αριθμητική προσομοίωση του μικροκλίματος. Συγκεκριμένα, εξετάζονται 3 επίπεδα πυκνότητας ΦΒ για τα οποία υπολογίζονται η διαθέσιμη PAR στο επίπεδο των φυτών καθώς και ο αντίστοιχος ρυθμός φωτοσύνθεσης. Για λόγους σύγκρισης γίνονται υπολογισμοί και για 'γυμνό' κάλυμμα δηλ. οροφή με μηδενική κάλυψη ΦΒ. Στόχος της εργασίας είναι να προσδιοριστεί το επίπεδο κάλυψης οροφής από ΦΒ, και συνεπώς και η εγκατεστημένη ισχύς, ανά μονάδα επιφάνειας οροφής, η οποία επιτρέπει φυσιολογική ανάπτυξη των φυτών, καθώς και ο ρυθμός μείωσης των παραγόντων ανάπτυξης που προκύπτει από την ενσωμάτωση ΦΒ. Για το λόγο αυτό αναπτύσσεται ένα CFD μοντέλο που μελετά το εσωτερικό μικροκλίμα και την κατανομή της ακτινοβολίας σε μια 2Δ γεωμετρία ενός θερμοκηπίου με τοξωτή οροφή κατά τη διάρκεια 8 τυπικών ηλιακών ημερών του έτους. Τέλος, υπολογίζεται η παραγωγή ενέργειας από τα ΦΒ που είναι ενσωματωμένα στην οροφή.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Οι προσομοιώσεις του μικροκλίματος έγιναν χρησιμοποιώντας ένα CFD μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους συγγραφείς [11-13].

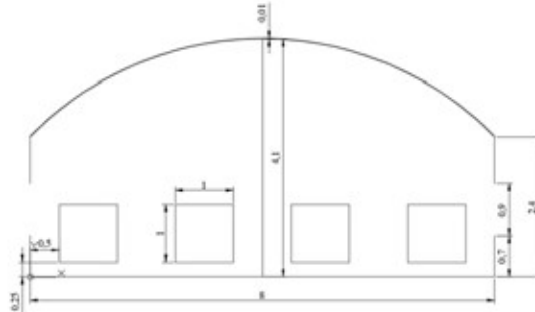
2.1. Μοντέλα και παραδοχές

Η ροή μέσα στο θερμοκήπιο θεωρείται 2Δ, μη-μόνιμη, ασυμπίεστη και τυρβώδης. Τα φαινόμενα μεταφοράς που αναπτύσσονται περιγράφονται από τις Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) εξισώσεις [14]. Η εξίσωση της ενέργειας επιλύεται και μέσα στην περιοχή του στερεού όπου και γίνεται εξίσωση Fourier. Η τύρβη προσομοιώνεται μέσω του μοντέλου k-ε υψηλού Re με συναρτήσεις τοίχου. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο κάλυμμα, η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία και η μετάδοση ακτινοβολίας μέσα στον υπολογιστικό χώρο προσομοιώνονται με το μοντέλο διακριτών κατευθύνσεων - Discrete Ordinates (DO) [15]. Τα φυτά θεωρούνται πορώδη υλικά μέσω της προσθήκης ενός όρου καταβόθρας στην εξίσωση της συνέχειας [11]. Το σύστημα των μερικών διαφορικών εξισώσεων επιλύεται με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων.

Η ταχύτητα του αέρα στο αριστερό άνοιγμα του θερμοκηπίου θεωρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της ηλιακής ημέρας με κατακόρυφη κατανομή που αντιστοιχεί σε πλήρως αναπτυγμένη τυρβώδη ροή και μέση τιμή που λαμβάνεται από τοπικά κλιματικά δεδομένα θεωρώντας συντελεστή παροχής των ανοιγμάτων ίσο με 0.6 και επίπεδο τύρβης 3%. Η θερμοκρασία στην είσοδο θεωρείται ότι ακολουθεί ημιτονοειδή μεταβολή κατά τη διάρκεια της ημέρας [11]. Σε κάθε χρονική στιγμή της ημέρας υπολογίζεται η προσπίπτουσα ακτινοβολία (συνολική, άμεση και διάχυτη) σε οριζόντιο επίπεδο. Στη συνέχεια υπολογίζεται η κάθετη προσπίπτουσα ακτινοβολία σε κάθε υπολογιστικό κελί του καλύμματος σύμφωνα με την κλίση του τμήματος.

2.2. Γεωμετρία προσομοίωσης

Ο υπολογιστικός domain της προσομοίωσης συμπίπτει με τα όρια μιας τομής του τοξωτού θερμοκηπίου όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Ο κύριος άξονας του θερμοκηπίου θεωρείται ότι έχει προσανατολισμό Ανατολή-Δύση. Το εξεταζόμενο θερμοκήπιο έχει συνολικό μήκος 20 m, πλάτος 8 m ύψος πλευρικών 2.4 m και μέγιστο ύψος οροφής 4.1 m [11-13]. Μέσα σε αυτό βρίσκονται 4 διπλές σειρές φυτά τομάτας. Ο αερισμός του θερμοκηπίου είναι φυσικός και γίνεται μέσω δύο σειρών πλευρικών ανοιγμάτων. Εφόσον το μήκος του θερμοκηπίου είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με το πλάτος είναι ασφαλές να θεωρήσουμε αντιπροσωπευτική μια 2Δ τομή. Εξετάστηκαν δύο γεωμετρίες. Η πρώτη αντιστοιχεί σε θερινούς μήνες κατά τους οποίους τα πλευρικά ανοίγματα είναι πλήρως ανοιχτά (ύψος ανοίγματος 0.9 m) και η δεύτερη αντιστοιχεί σε χειμερινούς μήνες όταν τα ανοίγματα είναι μερικώς ανοιγμένα (ύψος ανοίγματος 0.2 m).



Σχήμα 1. Εξεταζόμενη γεωμετρία θερμοκηπίου

2.3. Αρχικές και οριακές συνθήκες

Η εξωτερική επιφάνεια του καλύμματος θεωρείται ημιδιάφανος τοίχος στον οποίο επιβάλλεται μικτή οριακή συνθήκη (μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία και συναγωγή). Η επιφάνεια αυτή είναι θερμικά και οπτικά συζευγμένη με στερεό ημιδιάφανο υλικό (που αντιστοιχεί στο πάχος του καλύμματος) το οποίο επιτρέπει τη μετάδοση θερμότητας και ακτινοβολίας ανάλογα με τις οπτικές και θερμικές ιδιότητές του. Η εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος είναι επίσης ημιδιάφανος τοίχος θερμικά και οπτικά συζευγμένη από τη μια πλευρά με το ημιδιάφανο στερεό υλικό και από την άλλη με τον αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Οι πλαϊνοί τοίχοι θεωρούνται ισόθερμες επιφάνειες με θερμοκρασία ίση με την εξωτερική θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Το έδαφος θεωρείται αδιαβατικός τοίχος. Η οριακή συνθήκη τοίχου αντιστοιχεί σε συνθήκες μη-εισχώρησης και μη-ολίσθησης. Η καλλιέργεια τομάτας θεωρείται πορώδες υλικό το οποίο εισάγει όρο καταβόθρας στην εξίσωση συνέχειας ενώ συμμετέχει και στη μετάδοση θερμότητας. Προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι οπτικές ιδιότητες της καλλιέργειας μεταβάλλονται τοπικά οι οπτικές ιδιότητες του συμμετέχοντος στο πορώδες υλικό ρευστού (αέρα). Τέλος ένας όρος πηγής προστίθεται στην εξίσωση της ενέργειας ο οποίος αντιστοιχεί στη θερμική ακτινοβολία από το φυτό. Ο αέρας θεωρείται ότι εισέρχεται από το αριστερό άνοιγμα όπου επιβάλλεται συνθήκη εισόδου και εγκαταλείπει το υπολογιστικό πεδίο από το δεξί άνοιγμα όπου εφαρμόζεται συνθήκη εξόδου με γνωστή και σταθερή την πίεση ίση με την ατμοσφαιρική πίεση.

Η θερμοκρασία στο υπολογιστικό πεδίο ξεκινά από τιμή ίση με τη θερμοκρασία της εξωτερικής ατμόσφαιρας κατά την ανατολή. Η αρχική ταχύτητα του αέρα και η αρχικές τιμές των παραμέτρων της τύρβης μέσα στο υπολογιστικό πεδίο θεωρούνται ίσες με τις τιμές αντίστοιχες τιμές εισόδου του αέρα.

2.4. Πλέγμα και αριθμητικές λεπτομέρειες

Ο αλγόριθμος SIMPLE [14] χρησιμοποιείται για τη σύζευξη εξισώσεων πίεσης – ταχύτητας. Οι όροι συναγωγής των εξισώσεων ορμής και ακτινοβολίας διακριτοποιούνται χρησιμοποιώντας ένα δεύτερης τάξης ανάντι σχήμα (SOU) [16], ενώ κεντρικές διαφορές χρησιμοποιούνται για τη διακριτοποίηση των όρων διάχυσης. Για τους όρους συναγωγής του μοντέλου τύρβης και της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας χρησιμοποιείται το σχήμα QUICK [17] και σχήμα SOU για την εξίσωση ακτινοβολίας. Για τη χρονική διακριτοποίηση πάλι ένα 2ης τάξης ανάντι σχήμα χρησιμοποιείται. Το κριτήριο σύγκλισης είναι 10^{-5} για τη συνέχεια, τη διατήρηση της ορμής και τις εξισώσεις τύρβης, 10^{-8} για την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας και 10^{-6} για τις εξισώσεις ακτινοβολίας. Οι εξισώσεις ακτινοβολίας του μοντέλου DO επιλύονται για τέσσερα (4) φάσματα μήκους κύματος $\lambda = 0.1-0.4-0.76-1.4-1000 \mu\text{m}$. Το υπολογιστικό πεδίο διακριτοποιείται σε 19372 κελιά με τρόπο ώστε η αδιάστατη απόσταση y^+ κοντά στα στερεά όρια να μένει μεταξύ 30 και 40. Το χρονικό βήμα είναι 60 s. Η έναρξη της προσομοίωσης αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή της ανατολής του ηλίου κατά την εξεταζόμενη ημέρα και τελειώνει με τη δύση του ηλίου. Η αρχικοποίηση του πεδίου γίνεται από προηγούμενη λύση για συνθήκες μόνιμες.

2.5. Υλικά

2.5.1. Ημι-διάφανου φωτοβολταϊκού

Το ημι-διάφανο φωτοβολταϊκό αποτελείται από εναλλασσόμενες λωρίδες εκ των οποίων η μία περιέχει τα στοιχεία του ημιαγωγού (δομή I) και η άλλη είναι διάφανη (δομή II) έχοντας διαφορετικές οπτικές ιδιότητες η κάθε μια. Όταν επικολλάται πάνω σε 'γυμνό' κάλυμμα πολυαιθυλενίου πάχους 150μm δημιουργούνται τρεις συνδυασμοί: α) κάλυμμα+ δομή I, β) κάλυμμα + δομή II, γ) 'γυμνό' κάλυμμα.

Οι οπτικές ιδιότητες των δομών I και II λαμβάνονται από την εργασία [18], όπου επίσης παρουσιάζονται και οι οπτικές ιδιότητες του φύλλου πολυαιθυλενίου. Οι οπτικές ιδιότητες των (ολική περατότητα, τ , ολική απορρόφηση, α , και ανάκλαση, ρ) συνδυασμών υπολογίζονται με βάση τις ακόλουθες σχέσεις [19]:

$$\tau_t = \frac{\tau_{t1} \times \tau_{t2}}{1 - \rho_{t1} \times \rho_{t2}} \quad (1)$$

$$\rho_t = \rho_{t1} + \frac{\tau_{t1} \times \rho_{t2} \times \tau_{t1}}{\tau_{t2}} \quad (2)$$

$$\alpha_t = 1 - \rho_t - \tau_t \quad (3)$$

Όπου ο δείκτης t αντιστοιχεί στον όλο συνδυασμό δομη/κάλυμμα με το t_1 να αντιστοιχεί στη δομή και το t_2 στο κάλυμμα.

2.5.2. Ιδιότητες των υπολοίπων υλικών

Τα ενσωματωμένα ΦΒ δεν αναμένεται να τροποποιήσουν τις θερμοφυσικές ιδιότητες του καλύμματος πολυαιθυλενίου (PE) με πυκνότητα $\rho = 950 \text{ kg m}^{-3}$, θερμική αγωγιμότητα $k = 0.38 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, και ειδική θερμοχωρητικότητα $C_p = 1900 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Οι ιδιότητες των υπολοίπων υλικών δίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Θερμοφυσικές και οπτικές ιδιότητες των υπολοίπων υλικών

Ιδιότητα	Έδαφος	Τομάτα στερεό τμήμα	Τομάτα ρευστό τμήμα [20]	Αέρας
Συντελεστής απορρόφησης, α_s [1/m]	10,000/10,000/ 10,000/10,000	1.23	3.075/3.075/7.5/7.5	0.000582/0.00058 /0.0015/0.0015
Συντ. διάθλασης, n	1.92/1.82/2.03/2.03	2.77	2.69/2.69/1.58/1.58	1.009
Πυκνότητα, ρ [kg m ⁻³]	1300	700	Boussinesq (1.225)	Boussinesq (1.225)
Θερμική αγωγιμότητα, k, [W m ⁻¹ K ⁻¹]	1	0.173	0.0242	0.0242
Συντελεστής εκπομπής	0.92	0.5	0.00343	0.9
Συντελεστής σκέδασης	-10	0.46	1.7894×10^{-5}	0.15
ιδ.θερμοχωρητικότητα, C_p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	800	2130	1006	1.7894×10^{-5}

Οι οπτικές ιδιότητες δίνονται για τα τέσσερα φάσματα μήκους κύματος που εξετάζονται. Το πορώδες στην τομάτα είναι 40%. Τα πλευρικά τοιχώματα του θερμοκηπίου έχουν τις ίδιες θερμοφυσικές ιδιότητες με το κάλυμμα αλλά θεωρούνται αδιάφανα. Οι οπτικές ιδιότητες του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο έχουν υπολογιστεί για μίγμα αέρα/υδρατμών που αντιστοιχεί σε σχετική υγρασία HR 65% στους 25°C [21, 22].

2.6. Παραμετρική μελέτη

Στην παραμετρική διερεύνηση προσομοιώθηκαν 8 χαρακτηριστικές ημέρες. Τα κλιματικά δεδομένα για κάθε εξεταζόμενη ημέρα δίνονται στην πίνακα 2. Τα κλιματικά δεδομένα ελήφθησαν από την TOTEE 20701-3/2010 [23]. Το εξεταζόμενο θερμοκήπιο είναι εγκατεστημένο στο Βελεστίνο με $\varphi = 39^\circ 23.4'$ και $\lambda = 22^\circ 45'$. Για τις ημέρες με μέση εξωτερική θερμοκρασία ημέρας μικρότερη από 22°C χρησιμοποιείται η 'χειμερινή' γεωμετρία (μικρά ανοίγματα) ενώ για τις άλλες ημέρες χρησιμοποιείται η θερινή γεωμετρία.

Για κάθε ημέρα γίναν 4 προσομοιώσεις για τους 3 εξεταζόμενους συνδυασμούς OPV/κάλυμμα, οι οποίοι αντιστοιχούν σε περατότητα σε κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία στο φάσμα της PAR ίση με 30%, 45% και 60% και για την περίπτωση του 'γυμνού' καλύμματος η οποία αντιστοιχεί σε περατότητα σε κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία ίση με 89%. Οι εξεταζόμενοι συνδυασμοί OPV/κάλυμμα παρουσιάζονται στον πίνακα 3. Στην τελευταία στήλη δίνεται η αντίστοιχη εγκατεστημένη ΦΒ ισχύς ανά μέτρο μήκους θερμοκηπίου για συνολικό μήκος του τόξου της τομής της οροφής 8.93 m.

Πίνακας 2. Κλιματικά δεδομένα παραμετρικής μελέτης.

Ημέρα	Μέση ημερήσια θερμοκρασία [°C]	Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου [m s ⁻¹]	Μέση μηνιαία ελάχιστη θερμοκρασία [°C]	Μέση μηνιαία μέγιστη θερμοκρασία [°C]	Μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο [kWh m ⁻²]	Μέση μηνιαία διάχυτη ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh m ⁻²]
6 Φεβρουαρίου	9.1	2.9	3.5	12.3	74.3	30.9
21 Μαρτίου	11.3	2.7	4.9	14.4	112.5	49.1
6 Μαΐου	20.9	2.4	12.2	24	189.7	82.1
21 Ιουνίου	25.9	2.8	16.4	29	212.7	86.1
6 Αυγούστου	27.7	2.8	18.7	30.8	195.1	73.5
21 Σεπτεμβρίου	23.7	2.6	15.7	27.1	146.8	54.7
6 Νοεμβρίου	13.5	2.3	8.2	16.8	63.1	24.8
21 Δεκεμβρίου	9.4	2.7	4.5	12.5	51.5	20.5

Πίνακας 3. Εξεταζόμενοι συνδυασμοί OPV/κάλυμμα

PAR περατότητα σε κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία	OPV/PE Κάλυμμα [%]	Δομή I/PE κάλυμμα [%]	Δομή II/PE κάλυμμα [%]	'Γυμνό' PE κάλυμμα [%]	Εγκατεστημένη ισχύς ΦΒ [W/m]
T _{n,PAR} = 30%	96	75	21	4	278
T _{n,PAR} = 45%	72	56	16	28	209
T _{n,PAR} = 60%	47	37	10	53	136
T _{n,PAR} = 89%	0	0	0	100	0

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δίνονται με τη μορφή διαθέσιμης PAR και ρυθμού φωτοσύνθεσης. Ο ρυθμός φωτοσύνθεσης, P (σε μmol (CO₂) m⁻² s⁻¹) υπολογίστηκε από:

$$P = \frac{\alpha I + P_{\max} - \sqrt{(\alpha I + P_{\max})^2 - 4\theta \alpha I P_{\max}}}{2\theta} \quad (4)$$

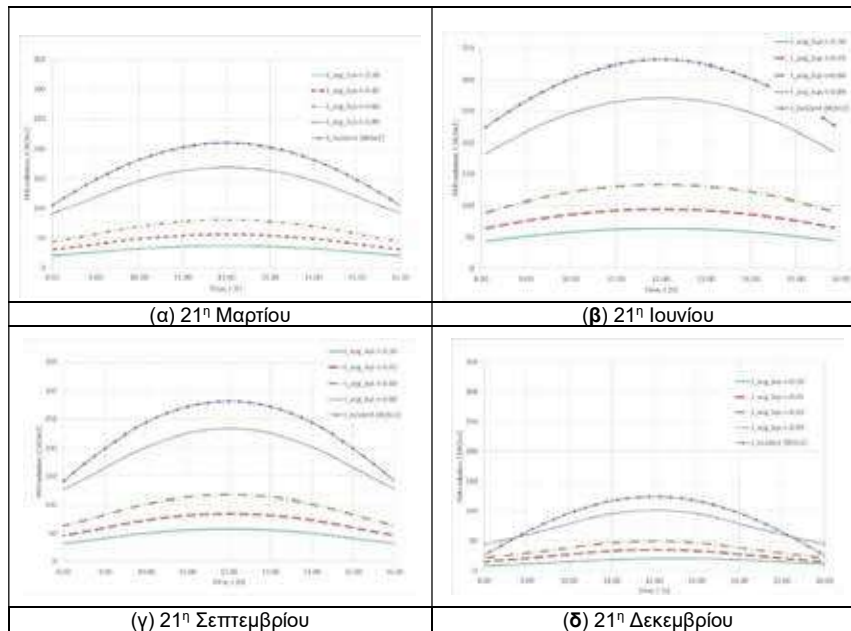
όπου α, ο φωτοπεριορισμός στην απόδοση φωτονίων (~0.5 μmol (CO₂) μmol⁻¹ (photons)), I, η προσπίπτουσα PAR ακτινοβολία σε μmol (photons) m⁻² s⁻¹ (στο φάσμα της PAR 1 W m⁻² ~ 2 μmol m⁻² s⁻¹), P_{max}, ο μέγιστος ρυθμός φωτοσύνθεσης (λαμβάνεται ίσως με 30 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), και θ, μια σταθερά κλιμάκωσης για καμπυλότητα (λαμβάνεται ίση με 0.7, αδιάστατο).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Μέση PAR στο επίπεδο των φυτών

Στο Σχήμα 2 δίνεται η ημερήσια μεταβολή της PAR, σε οριζόντιο επίπεδο 10 cm πάνω από το επίπεδο των φυτών, ενδεικτικά για τις ισημερινές και τα ηλιοστάσια. Η παρουσία του καλύμματος μειώνει πολύ λίγο την PAR στο επίπεδο των φυτών και επιτρέπει σημαντικές ποσότητες της τάξης των 100 W/m² το

Δεκέμβριο και 270 W/m^2 τον Ιούνιο, αντιθέτως η παρουσία των φωτοβολταϊκών επηρεάζει σημαντικά τα επίπεδα αυτής. Να σημειωθεί ότι σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται η μέση τιμή σε όλο το επίπεδο. Συνεπώς υπάρχουν περιοχές με αρκετά υψηλότερη ακτινοβολία και περιοχές που βρίσκονται στη σκιά των πλευρικών ανοιγμάτων. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει η γεωμετρία του τοξωτού, κάθε τμήμα του οποίου έχει διαφορετική κλίση από τα υπόλοιπα, τροποποιώντας ανάλογα την ακτινοβολία που διέρχεται από εκεί.



Σχήμα 2. Μέση PAR στο επίπεδο των φυτών για 4 ενδεικτικές μέρες. Πράσινη συνεχής γραμμή: $τη, PAR = 30\%$, κόκκινη διακεκομμένη γραμμή: $τη, PAR = 45\%$, πράσινη διακεκομμένη γραμμή με στιγμές: $τη, PAR = 60\%$, μαύρη γραμμή με τελείες: $τη, PAR = 89\%$ —'γυμνό' κάλυμμα, και κυανή συνεχής γραμμή με ομοιόχρωμους κύκλους: PAR προσπίπτουσα ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο σε ανοιχτό πεδίο.

Στον Πίνακα 4 δίνεται η ημερήσια ηλιακή ενέργεια PAR στο επίπεδο των φυτών για τους εξεταζόμενους συνδυασμούς ΦΒ/κάλυμμα. Οι τιμές στην παρένθεση αντιστοιχούν στη μέση ημερήσια περατότητα σε PAR.

Οι συνήθεις καλλιέργειες στα θερμοκήπια είναι λαχανικά με μέσες απαιτήσεις σε θερμοκρασία (τομάτα, πιπεριά, αγγούρι, πεπόνι, καρπούζι, πράσινα φασολάκια, μελιτζάνα). Ο στόχος είναι να αυξηθεί ο χρόνος κατά τον οποίο είναι εφικτή η καλλιέργεια σε ανοιχτό πεδίο. Η καλλιέργεια της τομάτας απαιτεί υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας, υπάρχουν όμως άλλες καλλιέργειες οι οποίες δεν έχουν ανάγκη από τόσο ηλιακό φως για να αναπτυχθούν. Για τις τομάτες ένα κάτω όριο ανεκτής PAR είναι τα 200 W m^{-2} . Φυσικά είναι δύσκολο να προσδιοριστούν βέλτιστα επίπεδα ακτινοβολίας δεδομένου ότι η παραγωγικότητα εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους όπως είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η συγκέντρωση CO_2 [22]. Από τα αποτελέσματα του σχήματος 3 προκύπτει ότι η PAR ακτινοβολία μέσα στο θερμοκήπιο για την περίπτωση του γυμνού καλύμματος είναι πάνω από το όριο των 200 W m^{-2} από τον Απρίλιο μέχρι το Σεπτέμβριο ενώ σε όλες τις περιπτώσεις στις οποίες εξετάζεται ενσωμάτωση ημιδιάφανων ΦΒ η PAR ακτινοβολία είναι πάντα κάτω του ορίου.

Εκτός από την ένταση της ακτινοβολίας, σημαντικό ρόλο παίζει και η χρονική διάρκεια της περιόδου φωτισμού. Έτσι, επιλέγεται να εξεταστεί και η συνολική PAR ηλιακή ενέργεια ολοκληρώνοντας την

ακτινοβολία στη διάρκεια της ηλιακής ημέρας. Επιπλέον ρόλο παίζει και το κλάσμα της διάχυτης προς την συνολική ακτινοβολία εφόσον η διάχυτη ακτινοβολία οδηγεί σε υψηλότερη αποδοτικότητα στη χρήση ακτινοβολίας. Τα κάτω όρια απαιτούμενης συνολικής ηλιακής ενέργειας για τα ανωτέρω λαχανικά είναι περίπου $8.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ το οποίο αντιστοιχεί σε περίπου $4.05 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ PAR [24].

Πίνακας 4. Συνολική PAR ηλιακή ενέργεια στο επίπεδο των φυτών για τους εξεταζόμενους συνδυασμούς ΦΒ/κάλυμμα και μέση PAR περατότητα.

Ημέρα	Ενέργεια PAR στο επίπεδο των φυτών [$\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$] και μέση PAR περατότητα του θερμοκηπίου			
	$T_{n,PAR} = 30\%$	$T_{n,PAR} = 45\%$	$T_{n,PAR} = 60\%$	$T_{n,PAR} = 89\%$
6 Φεβρουαρίου	0.84 (0.19)	1.25 (0.28)	2.13 (0.46)	4.48 (0.88)
21 Μαρτίου	1.08 (0.18)	1.64 (0.27)	2.33 (0.38)	4.92 (0.81)
6 Μαΐου	1.84 (0.18)	2.66 (0.27)	3.79 (0.39)	8.25 (0.81)
21 Ιουνίου	2.20 (0.19)	3.28 (0.29)	4.59 (0.40)	9.38 (0.82)
6 Αυγούστου	2.09 (0.20)	3.09 (0.29)	4.29 (0.41)	8.64 (0.82)
21 Σεπτεμβρίου	1.67 (0.20)	2.45 (0.30)	3.40 (0.42)	6.79 (0.83)
6 Νοεμβρίου	0.71 (0.20)	1.05 (0.30)	1.46 (0.42)	2.96 (0.85)
21 Δεκεμβρίου	0.50 (0.18)	0.82 (0.30)	1.14 (0.42)	2.34 (0.87)

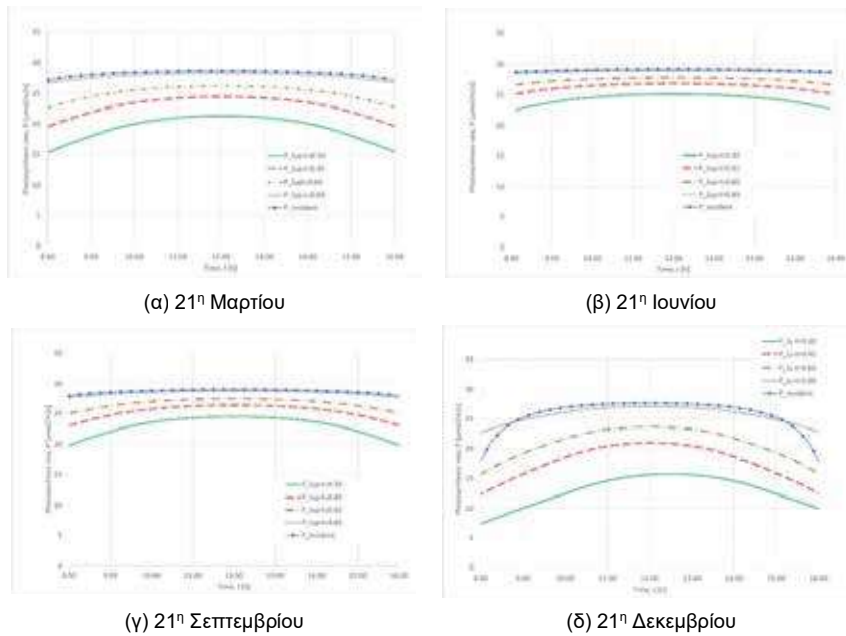
Η ενσωμάτωση ΦΒ στο κάλυμμα η οποία οδηγεί σε περατότητα της κάθετα προσπίπτουσας ακτινοβολίας 60% στο PAR φάσμα οδηγεί σε μείωση της ημερήσιας ηλιακής ενέργειας PAR κατά 52% σε σχέση με το γυμνό κάλυμμα. Αντίστοιχα οι περιπτώσεις ενσωμάτωσης ΦΒ με περατότητα της κάθετα προσπίπτουσας PAR 45% και 30% οδηγούν σε μείωση κατά 66% αι 77% αντίστοιχα, σύμφωνα με τον πίνακα 4. Λαμβάνοντας υπόψη το όριο των $4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ο συνδυασμός ΦΒ/κάλυμμα με PAR περατότητα σε κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία 60% ικανοποιεί αυτό το όριο από Μάιο μέχρι Σεπτέμβριο. Οι άλλοι δύο συνδυασμοί δίνουν συνολική PAR ενέργεια κάτω του ορίου σε όλο το έτος.

Ένα άλλο σημαντικό εύρημα που παρουσιάζεται στον πίνακα 4 είναι ότι ενώ για το γυμνό κάλυμμα η μέση ημερήσια περατότητα σε PAR είναι 87% δηλ. πολύ κοντά στην τιμή για κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία (89%) δε συμβαίνει το ίδιο και για τις άλλες περιπτώσεις. Στην περίπτωση της περατότητας σε κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία 60% η συνολική μέση ημερήσια περατότητα είναι της τάξης του 41% ενώ στις περιπτώσεις κάθετα προσπίπτουσας ακτινοβολίας 45% και 30% οι μέσες ημερήσιες PAR περατότητες γίνονται 29% και 19% αντίστοιχα.

Η διαφορά ανάμεσα στην περατότητα σε κάθετη προσπίπτουσα PAR ακτινοβολία και στη μέση ημερήσια περατότητα της PAR είναι 36%, 35%, 31% και 6 για κάθετη PAR 30%, 45%, 60% και 89% αντίστοιχα. Αυτή η μη γραμμικότητα οφείλεται αφενός μεν στη λογαριθμική σχέση που συνδέει το συντελεστή περατότητας (extinction coefficient) με τη διαδρομή του φωτός [16] και αφετέρου στο γεγονός ότι η μέση περατότητα είναι αποτέλεσμα και των ανακλάσεων εντός του θερμοκηπίου. Αυτή η διαφορά μειώνεται από τους εαρινούς προς τους χειμερινούς μήνες σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις κάτι που είναι σε συμφωνία με μετρήσεις [6] που έδειξαν ότι η μικρότερη διαφορά παρατηρείται το Δεκέμβριο και αυξάνεται το υπόλοιπο έτος με μέγιστο τον Ιούνιο και τον Ιούλιο. Πρακτικά η συνολική περατότητα του καλύμματος είναι μικρότερη από την ονομαστική τιμή που δίνουν οι κατασκευαστές για κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολία λόγω σκίασης των δομικών στοιχείων, σκόνης και της γωνίας πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών.

3.3 Μέσος ρυθμός φωτοσύνθεσης σε επίπεδο φυτού

Στο Σχήμα 3 δίνεται η μεταβολή του μέσου ρυθμού φωτοσύνθεσης κατά τη διάρκεια της ηλιακής μέρας σε επίπεδο 10 cm πάνω από τα φυτά για τις ισημερίες και τα ηλιοστάσια. Και σε αυτό το σχήμα σε κάθε γράφημα δίνονται πέντε (5) γραμμές οι οποίες αντιστοιχούν σε (i) $t_{n,PAR} = 30\%$ (πράσινη συνεχής γραμμή), (ii) $t_{n,PAR} = 45\%$ (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή), (iii) $t_{n,PAR} = 60\%$ (πράσινη διακεκομμένη γραμμή με στιγμές), (iv) $t_{n,PAR} = 89\%$ —'γυμνό' κάλυμμα (μαύρη γραμμή με τελείες), και (v) PAR προσπίπτουσα ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο σε ανοιχτό πεδίο (κυανή συνεχής γραμμή με μοιόχρωμους κύκλους). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτή την προσομοίωση τα πλαιινά θεωρούνται αδιάφανα και η ακτινοβολία εισέρχεται στο χώρο του θερμοκηπίου μόνο μέσω της τοξωτής οροφής.



Σχήμα 3. Μέσος ρυθμός φωτοσύνθεσης στο επίπεδο των φυτών σε ενδεικτικές μέρες

Στον πίνακα 10 δίνεται ο μέσος ημερήσιος ρυθμός φωτοσύνθεσης στο επίπεδο του φυτού για τις εξεταζόμενες ημέρες και τους εξεταζόμενους συνδυασμούς καλύμματος/ΦΒ σε $\mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ και αθροιστικά κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας ($\times 10^3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

Πίνακας 5. Ημερήσιος ρυθμός φωτοσύνθεσης στο επίπεδο των φυτών

Ημέρα	Μέσος ημερήσιος [$\mu\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$] και ημερήσιος αθροιστικός [στην παρένθεση, σε $10^3 \mu\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$] Ρυθμός Φωτοσύνθεσης			
	$T_{n,PAR} = 30\%$	$T_{n,PAR} = 45\%$	$T_{n,PAR} = 60\%$	$T_{n,PAR} = 89\%$
6 Φεβρουαρίου	17.71 (580)	21.45 (713)	24.04 (851)	26.74 (962)
21 Μαρτίου	19.41 (717)	22.95 (870)	25.15 (977)	27.83 (1122)
6 Μαΐου	23.20 (996)	25.63 (1073)	27.02 (1178)	28.64 (1358)
21 Ιουνίου	24.29 (1071)	26.30 (1197)	27.43 (1275)	28.80 (1373)
6 Αυγούστου	24.06 (1045)	26.10 (1174)	27.28 (1256)	28.70 (1363)
21 Σεπτεμβρίου	23.09 (877)	25.41 (990)	26.78 (1062)	28.46 (1157)
6 Νοεμβρίου	16.04 (523)	19.85 (655)	22.63 (756)	26.53 (910)
21 Δεκεμβρίου	13.09 (399)	17.97 (549)	21.05 (647)	25.74 (801)

Η μέση ετήσια τιμή του μέσου ρυθμού φωτοσύνθεσης για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις συνδυασμών καλύμματος/ΦΒ που αντιστοιχούν σε περατότητα σε κάθετη προσπίπτουσα ακτινοβολία στο PAR φάσμα 30%, 45%, 60% και 89% αντίστοιχα είναι 18.1, 21.2, 23.7 και 27.1 αντίστοιχα. Συνεπώς η μείωση του μέσου ρυθμού φωτοσύνθεσης από την ενσωμάτωση των ΦΒ για τις περιπτώσεις της κάθετης PAR

περατότητας 30%, 45% και 60% σε σύγκριση με το γυμνό κάλυμμα είναι 33%, 21% και 12% αντίστοιχα. Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και για την αθροιστική ημερήσια τιμή του ρυθμού φωτοσύνθεσης.

Σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα μείωση της ακτινοβολίας κατά 1% οδηγεί σε μείωση της παραγωγής τομάτας από 0.6 έως 1.1% [25] ή σύμφωνα με τους παραγωγούς από 0.7 έως 1%. Δεν είναι εύκολο να διερευνηθεί με ακρίβεια η μείωση του κέρδους. Σκίαση της καλλιέργειας όταν η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή μειώνει ελάχιστα τη φωτοσύνθεση στα ανώτερα φύλλα. Όμως σκίαση όταν ήδη η διαθέσιμη ακτινοβολία είναι χαμηλή είναι δυνατό να επηρεάσει δυσμενώς τα κατώτερα φύλλα. Συνεπώς η σκίαση αποτελεί πρόβλημα στις περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Σύμφωνα με μετρήσεις [26] μείωση της PAR κατά 57% και 34% οδηγεί σε μείωση της ανάπτυξης των φυτών κατά 31% και 19% αντίστοιχα. Άρα αυξάνεται το ποσοστό αξιοποίησης της ακτινοβολίας λόγω προσαρμογής του μεταβολισμού των φυτών. Σημαντική σκίαση μπορεί να μειώσει την παραγωγή τομάτας [27]. Όμως μικρή και μέση σκίαση δεν επιδρά στο τελικό κέρδος ενώ μπορεί να βελτιώσει την παραγωγή σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας [28]. Έχει βρεθεί ότι σκίαση της τάξης του 9.8% με ΦΒ δε μειώνει την ετήσια παραγωγή τομάτας [29]. Τέλος υπάρχουν και άλλες καλλιέργειες οι οποίες δε χρειάζονται τόσο υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας. Σε καλλιέργεια φράουλας και βατόμουρου οι παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα του προϊόντος δεν επηρεάζονται από τη σκίαση με ΦΒ [30]. Σε καλλιέργεια πιπεριάς με κάλυψη της οροφής κατά 20% επίσης δεν παρατηρήθηκε επίπτωση στην ποιότητα του προϊόντος [31].

3.4. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Στον υπολογισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ ενσωματωμένα στην οροφή τοξωτού θερμοκηπίου εμφανίζονται δύο προκλήσεις. Η πρώτη αφορά τη γεωμετρία της τοξωτής οροφής δεδομένου ότι κάθε σημείο αυτής έχει διαφορετική κλίση. Έτσι η απόδοση ενός πλαισίου θα καθορίζεται κάθε χρονική στιγμή από το ΦΒ κελί με τη δυσμενέστερη κλίση, ανάλογα με τη συνδεσμολογία των κελιών στο πλαίσιο. Γι' αυτό επιλέγονται στενόμακρα πλαίσια (0.15x0.82 m) τα οποία διατάσσονται κατά μήκος του άξονα του θερμοκηπίου με αποτέλεσμα η γωνία κλίσης από τη μία άκρη του πλαισίου μέχρι την άλλη να διαφέρει μόνο κατά 1.54°, επιτρέποντας τον υπολογισμό για μια μέση γωνία κλίσης. Τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου ΦΒ είναι $V_{oc} = 6V$, $I_{sc} = 1A$, $V_{mp} = 4.3V$, $I_{mp} = 0.9A$.

Η δεύτερη πρόκληση αφορά την επιλογή του αντιστροφέα λόγω του χαμηλού V_{mp} και της χαμηλής παραγόμενης ισχύος ανά πλαίσιο κάτι που καθιστά δύσκολη τη συνεργασία με την πλειοψηφία των υπαρχόντων αντιστροφέων (ελάχιστη τάση εισόδου 250 V, ή και υψηλότερο). Για να αντιμετωπιστεί αυτό επιλέχθηκε μίνι – αντιστροφέας με τάση εισόδου 3 W και ελάχιστη MPP τάση 28 V και με κατάλληλη διασύνδεση των πλαισίων. Υπολογίστηκε η ετήσια παραγωγή ενέργειας από τα ενσωματωμένα ΦΒ ανά μέτρο μήκους διατομής του θερμοκηπίου και παρουσιάζεται στον πίνακα 6 για τους τρεις εξεταζόμενους συνδυασμούς μαζί με την εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας και τη μείωση εκπομπών CO₂.

Πίνακας 6. Ετήσια παραγωγή ενέργειας ανά μέτρο μήκους θερμοκηπίου της εξεταζόμενης διατομής

PAR περατότητα σε κάθετη ακτινοβολία τ_n [-]	30%	45%	60%
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [kWh m ⁻¹ y ⁻¹]	323	242	158
Εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας [kWh m ⁻¹ y ⁻¹]	937	702	458
Μείωση εκπομπής CO ₂ [kg m ⁻¹ y ⁻¹]	319	239	156

Τελικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα ΦΒ ενσωματωμένων σε τοξωτό θερμοκήπιο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι ο τύπος της καλλιέργειας, η στρατηγική λειτουργίας και το μέγεθος του θερμοκηπίου που επηρεάζουν τις ενεργειακές του ανάγκες και η διαθέσιμη επιφάνεια του καλύμματος.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι συνδυασμοί διαφορετικών πυκνοτήτων ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών ενσωματωμένων στην οροφή θερμοκηπίου που εξετάστηκαν αντιστοιχούν σε περατότητα σε κάθετη προσπίπτουσα ακτινοβολία PAR 30%, 45% και 60% και συγκρίθηκαν με τη λειτουργία 'γυμνού' καλύμματος, δηλ. καλύμματος μόνο από φύλλο πολυαιθυλενίου χωρίς ενσωμάτωση ΦΒ το οποίο σε κάθετη προσπίπτουσα ακτινοβολία στο φάσμα της PAR έχει περατότητα 89%. Θεωρώντας ως κάτω ανεκτό όριο διαθέσιμης ημερήσιας PAR

για αρκετές καλλιέργειες τα $4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ προέκυψε ότι μόνο ο συνδυασμός ΦΒ/κάλυμμα που αντιστοιχεί σε περατότητα κάθετα προσπίπτουσας PAR 60% ήταν σε θέση να ικανοποιήσει αυτή την απαίτηση μεταξύ Μαΐου – Σεπτεμβρίου. Ο συνδυασμός αυτός αντιστοιχεί σε κάλυψη της οροφής του θερμοκηπίου κατά 47% από τα εξεταζόμενα ημιδιάφανα ΦΒ. Οι υπόλοιποι συνδυασμοί διατηρούν την διαθέσιμη ημερήσια PAR κάτω από αυτό το όριο κατά τη διάρκεια όλου του έτους. Η μείωση της διαθέσιμης ημερήσιας PAR που προκαλούν οι συνδυασμοί που αντιστοιχούν σε περατότητα της κάθετα προσπίπτουσας PAR 30%, 45% και 60% σε σχέση με το γυμνό φύλλο πολυαιθυλενίου είναι 77%, 66% και 52% αντίστοιχα ενώ οι μειώσεις του μέσου ημερήσιου ρυθμού φωτοσύνθεσης είναι 33%, 21% και 12% αντίστοιχα. Τέλος η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη διατομή του θερμοκηπίου ανά μέτρο μήκους θερμοκηπίου για περατότητα κάθετα προσπίπτουσας ακτινοβολίας 30%, 45% και 60% είναι 323, 242 και $158 \text{ kWh m}^{-1} \text{ y}^{-1}$, αντίστοιχα. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό θερμοκηπίων με στόχο τη μεγιστοποίηση της PAR στο επίπεδο των φυτών παράλληλα με κάλυψη των αναγκών τους σε ηλεκτρική ενέργεια.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ - ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου:Τ1ΕΔΚ-01701).

Βιβλιογραφία

- [1] Hassanien, R.H.E., Li, M. and Yin, F., 2018, "The integration of semi-transparent photovoltaics on greenhouse roof for energy and plant production", *Renew. Energy*, 121, pp. 377–388.
- [2] Yano, A., Furue, A., Kadowaki, M., Tanaka, T., Hiraki, E., Miyamoto, M., Ishizu, F. and Noda, S., 2009, "Electrical energy generated by photovoltaic modules mounted inside the roof of a north-south oriented greenhouse", *Biosyst. Eng.* 103, pp.228–238.
- [3] Kadowaki, M., Yano, A., Ishizu, F., Tanaka T. and Noda, S., 2012, "Effects of greenhouse photovoltaic array shading on Welsh onion growth", *Biosyst. Eng.*, 111, pp.290–297.
- [4] Trypanagnostopoulos, G., Kavga, A., Souliotis, M. and Tripanagnostopoulos, Y., 2017, "Greenhouse performance results for roof installed photovoltaics", *Renew. Energy*, 111, pp.724–731.
- [5] Yano, A., Onoe, M. and Nakata, J., 2014, "Prototype semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications", *Biosyst. Eng.*, 122, pp.62–73.
- [6] Cossu, M., Murgja, L., Ledda, L., Deligios, P.A., Sirigu, A., Chessa, F. and Pazzona, A., 2014, "Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity", *Appl. Energy*, 133, pp.89–100.
- [7] Marrou, H., Dufour, L. and Wery, J., 2013, "How does a shelter of solar panels influence water flows in a soilecrop system?", *Eur. J. Agron.*, 50, pp.38–51.
- [8] Friman Peretz, M. et al., 2019 "Testing organic photovoltaic modules for application as greenhouse cover or shading element". *Biosyst. Eng.*, 184, pp.24–36.
- [9] Teranaka, K., Ikeda, T. and Doi, M., 2018, "Simulation of seasonal changes in radiant flux energy in a greenhouse installed with light-transmitting organic photovoltaics", *Acta Hort.* 1208, pp.339–346.
- [10] Okada, K., Yehia, I., Teitel M. and Kacira, M., 2018, "Crop production and energy generation in a greenhouse integrated with semi-transparent organic PV film", *Acta Hort.* 1227, pp. 231–239.
- [11] Baxevanou, C., Fidaros, D., Bartzanas, T. and Kittas, C., 2018, "Yearly numerical evaluation of greenhouse cover materials" *Comput. Electron. Agric.*, 149, pp.54–70.

- [12] Baxevanou, C., Fidaros, D., Bartzanas T. and Kittas, C., 2010, "Numerical simulation of solar radiation, air flow and temperature distribution in a naturally ventilated tunnel greenhouse", *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, 12, pp.48–67.
- [13] Fidaros, D., Baxevanou, C., Bartzanas Th., and Kittas, C., 2010, "Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day", *Renew. Energy*, 35, 1380–1386.
- [14] Ferziger, J.H., Peric, M., 1996 *Computational Methods for Fluid Dynamics*; Springer: London, UK
- [15] Kim, S.H. and Huh, K.Y., 2000, "A new angular discretization scheme of the finite volume method for 3-D radiative heat transfer in absorbing, emitting and anisotropically scattering media", *Int. J. Heat Mass Tran.*, 43, 1233–1242.
- [16] Tamamidis, P. and Assanis, D.N., 1993, "Evaluation of various high order accuracy schemes with and without flux limiters", *Intl. J. Numer. Methods Fluids*, 16, pp.931–948.
- [17] Leonard, B.P., 1979, "A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation". *Comput. Methods Appl. Mech.*, 19, pp.59–98.
- [18] Baxevanou, C., Fidaros, D., Katsoulas, N., Mekeridis, E., Varlamis, Chr., Zachariadis, A. and Logothetidis, St., 2020, "Simulation of Radiation and Crop Activity in a Greenhouse Covered with Semitransparent Organic Photovoltaics", *Appl. Sci.*, 10, 2550
- [19] Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 2006, "Solar Engineering of Thermal Processes", 3rd ed.; Wiley: New Jersey, USA.
- [20] Kichah, A., Bournet, P.E. and Migeon, C., 2012, "Measurement and CFD simulations of the transpiration and leaf temperatures of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse", *Biosyst. Eng.*, 112, pp.22–34.
- [21] Mehra, R., 2003, "Application of refractive index mixing rules in binary systems of hexadecane and heptadecane with n-alkanols at different temperatures", *J. Chem. Sci.*, 115, pp.147–154.
- [22] Stanghellini, C., Van't Ooster, B. and Heuvelink, E., 2019, "Greenhouse Horticulture: Technology for Optimal Crop Production", Wageningen Academic Publishers: Wageningen, pp. 311.
- [23] ΤΟΤΕΕ 20701-3/2010, Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών
- [24] Nisen, A, et al., 1988, Cultures protégées en climat Méditerranéen. *FAO*, 90, 317 p, Rome.
- [25] Marcelis, L.F.M., Broekhuijsen, A.G.M., Meinen, E., Nij, E.M. and Raaphorst, M.G.M., 2006, "Quantification of the growth response to light quantity of greenhouse grown crops. *Acta Hortic.*, 711, pp.97–103.
- [26] Kläring, H.P., Krumbein, A., 2013 "The effect of constraining the intensity of solar radiation on the photosynthesis, growth, yield and product quality of tomato", *J. Agron. Crop Sci.*, 199, pp.351–359.
- [27] Lorenzo, P., García, M., Sánchez-Guerrero, M., Medrano, E., Caparros, I. and Giménez, M., 2006, "Influence of mobile shading on yield, crop transpiration & WUE", *Acta Hortic*, 719, pp.471–478.
- [28] Ezzaeri, K., et al., 2018, "The effect of photovoltaic panels on the microclimate and on the tomato production under photovoltaic canarian greenhouses", *Sol. Energy*, 173, pp.1126–1134.
- [29] Aroca-Delgado, R., Pérez-Alonso, J., Callejón-Ferre, A.J. and Díaz-Pérez, M., 2019, "Morphology, yield and quality of greenhouse tomato cultivation with flexible photovoltaic rooftop panels (Almería-Spain)", *Sci. Hortic.*, 257, pp.108768.
- [30] Blando, F., Gerardi, C., Renna, M., Castellano, S. and Serio, F., 2018, "Characterisation of bioactive compounds in berries from plants grown under innov. PV greenhouses", *J. Berry Res.*, 8, 55–69.
- [31] Kavga, A., Strati, I.F., Sinanoglou, V.J., Fotakis, C., Sotiroudis, G., Christodoulou, P. and Zoumpoulakis, P., 2019, "Evaluating the experimental cultivation of peppers in low energy-demand greenhouses. An interdisciplinary study", *J. Sci. Food Agric.*, 99, 781–789.