



«Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας»
«Καλλιέργειες υπό Κάλυψη και Υδροπονία»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία
*«Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην
παραγωγή»*

Νικόλαος Χριστόπουλος

Επιβλέπων καθηγητής: «Νικόλαος Κατσούλας»

Πάτρα, Ιούνιος 2025

*Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση
στο κλίμα και στην παραγωγή»*

© Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2025.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («Χριστόπουλος Νικόλαος») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του/της συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»



«Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Νικόλαος Χριστόπουλος

Επιτροπή Επίβλεψης Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Συν-Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Νικόλαος Κατσούλας

Ευαγγελινή Κίττα

Καθηγητής

Διδάκτορας

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πάτρα, Ιούνιος 2025

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η χρήση των θερμοκηπίων έχει αυξηθεί σημαντικά σε όλο τον κόσμο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το θερμοκήπιο παρέχει την δυνατότητα να προστατεύει τα φυτά που καλλιεργούνται στο εσωτερικό του και ταυτόχρονα εκμεταλλεύεται τη μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας υπό ελεγχόμενες συνθήκες για τη βελτίωση του περιβάλλοντος ανάπτυξης. Έτσι λοιπόν το υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα της κατασκευής του διότι ελέγχει δύο κύριες παραμέτρους, την ποσότητα του φωτός και της θερμότητας που διαχέεται από το περιβάλλον στον εσωτερικό χώρο.

Στην παρούσα μελέτη αρχικά γίνεται μια αναφορά στα βασικά υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων όπως είναι το γυαλί και τα πλαστικά φύλλα. Στην συνέχεια της μελέτης γίνεται αναφορά στις νέες τεχνολογίες υλικών κάλυψης των θερμοκηπίων και την επίδρασή που παρουσιάζουν τόσο στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου όσο και στην απόδοση των καλλιεργειών.

Πιο συγκεκριμένα με βάση την πιο πρόσφατη βιβλιογραφία γίνεται αναφορά στα εξελιγμένα φωτοεπιλεκτικά καλύμματα όπως είναι τα χρωματιστά καλύμματα, τα φωτεινά φωτοεπιλεκτικά καλύμματα, οι βαφές οργανικής βάσης και οι κβαντικές κουκίδες. Τα υλικά αυτά έχουν την ικανότητα να τροποποιούν επιλεκτικά το φάσμα του προσπίπτοντος φωτός και στη συνέχεια να προκαλούν φυσιολογικές αντιδράσεις των φυτών, με αποτέλεσμα την αυξημένη απόδοση των καλλιεργειών και την βελτιωμένη ποιότητα των καρπών.

Επίσης, γίνεται αναφορά σε μια άλλη κατηγορία υλικών κάλυψης των θερμοκηπίων όπως είναι τα αγροβολταϊκά. Η αγροβολταϊκή τεχνολογία είναι μια καινοτόμος ιδέα που έχει ως στόχο την κοινή χρήση ηλιακής ενέργειας μεταξύ της παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας και της γεωργικής παραγωγής. Η αγροβολταϊκή τεχνολογία στοχεύει στην προώθηση της ηλιακής ενέργειας, ενώ παράλληλα παράγει καλλιέργειες στην ίδια γη.

Ακόμη γίνεται αναφορά στα νανοσωματίδια ευρωπαϊού, ρουμπινιού και χρυσού. Τέλος γίνεται αναφορά στο υλικό κάλυψης <έξυπνο γυαλί>, και στα αλλοτροπικά υλικά με βάση τον άνθρακα, όπως το φουλερένιο και το γραφένιο και περιγράφεται πως αυτά τα υλικά επηρεάζουν το κλίμα των θερμοκηπίων και την παραγωγή των καλλιεργειών.

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Τα συμπεράσματα έδειξαν ότι τα νέα υλικά αυτά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων διότι επηρεάζουν σε γενικές γραμμές θετικά το κλίμα του θερμοκηπίου και κατ' επέκταση και την παραγωγή των καλλιεργειών. Παρόλα αυτά όμως δεν παρουσιάζουν ευρεία χρήση λόγω του υψηλού κόστους τους και της περιορισμένης έρευνας. Η περαιτέρω έρευνα αυτών των υλικών κάλυψης είναι απαραίτητη για να εξαχθούν καλύτερα συμπεράσματα.

Λέξεις – κλειδιά

Θερμοκήπιο, Νέα υλικά κάλυψης, Φωτοεπιλεκτικά καλύμματα, Αγροβολταϊκά, Νανοσωματίδια Κλίμα, Παραγωγή.

«New greenhouse covering materials. Impact on climate and production»

Abstract

In recent years, the use of greenhouses has increased significantly around the world. This is due to the fact that the greenhouse provides the ability to protect the plants grown inside and at the same time exploits the transmission of solar radiation under controlled conditions to improve the growth environment. Therefore, the greenhouse covering material is the most important factor in its construction because it controls two main parameters, the amount of light and heat that diffuses from the environment to the interior space.

In this study, a reference is initially made to the basic greenhouse covering materials such as glass and plastic sheets. The study then refers to new greenhouse covering material technologies and the effect they have on both the greenhouse microclimate and crop yield.

More specifically, based on the most recent literature, reference is made to advanced photoselective coatings such as colored coatings, luminous photoselective coatings, organic-based dyes and quantum dots. These materials have the ability to selectively modify the spectrum of incident light and subsequently induce physiological reactions in plants, resulting in increased crop yield and improved fruit quality.

Reference is also made to another category of greenhouse covering materials such as agrovoltatics. Agrovoltaic technology is an innovative idea that aims to share solar energy between photovoltaic energy production and agricultural production. Agrophotovoltaic technology aims to promote solar energy, while simultaneously producing crops on the same land.

There is also a reference to nanoparticles of europium, ruby, and gold. Finally, the covering material "smart glass" is mentioned, along with carbon-based allotropes such as fullerene and graphene, and it is described how these materials affect the greenhouse climate and crop production.

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

The findings indicate that these novel materials have the potential to be utilized as greenhouse covering materials, as they generally exert a positive influence on the greenhouse microclimate and, by extension, on crop productivity. Nevertheless, their widespread application remains limited due to their high cost and the relatively scarce body of research. Further investigation into these covering materials is essential in order to draw more definitive and comprehensive conclusions.

Keywords

Greenhouse, New covering materials, Photoselective covers, Agrovoltaic, Nanoparticles, Climate, Production.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iv
Abstract.....	vi
Περιεχόμενα.....	viii
Κατάλογος Εικόνων.....	xii
Κατάλογος Σχημάτων.....	xiii
Κατάλογος Ραβδογραμμάτων.....	xv
Κατάλογος Πινάκων.....	xv
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xvi
1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Ιστορική εξέλιξη θερμοκηπίου.....	2
1.2. Χρησιμότητα θερμοκηπίου.....	3
1.3. Θερμοκήπια ανά τον κόσμο.....	4
1.4. Θερμοκήπια στην Ελλάδα.....	6
1.5. Υλικά κατασκευής Θερμοκηπίου.....	8
2. Υλικά κάλυψης θερμοκηπίων.....	13
2.1. Εισαγωγή.....	13
2.2. Η σημασία των υλικών κάλυψης των θερμοκηπίων.....	16
2.3. Υαλοπίνακας.....	17
2.4. Πλαστικά φύλλα.....	18
2.5. Εύκαμπτα φύλλα πλαστικού.....	20
2.5.1. Πολυαιθυλένιο.....	20
2.5.2. Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC).....	23
2.5.3. Πολυεστερικά φύλλα.....	24
2.6. Επιφάνειες σκληρού πλαστικού.....	24
2.6.1. Ενισχυμένος πολυεστέρας.....	24
2.6.2. Πολυκαρβονικές επιφάνειες (PC).....	25

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

2.6.3. Ακρυλικές επιφάνειες.....	25
2.6.4. Σκληρό πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC).....	26
2.7.Πρόσθετα υλικά κάλυψης.....	26
2.8. Επίδραση φυτοφαρμάκων στα υλικά κάλυψης θερμοκηπίου.....	27
2.9. Σταθεροποιητές πλαστικών φύλλων.....	28
2.10. Οπτικές και θερμομονωτικές ιδιότητες υλικών κάλυψης θερμοκηπίου.....	30
2.10.1 Οπτικές ιδιότητες υλικών κάλυψης θερμοκηπίων.....	31
2.10.2.Θερμομονωτικές ιδιότητες υλικών κάλυψης θερμοκηπίων.....	33
2.11. Μηχανικές ιδιότητες πλαστικών φύλλων.....	34
2.11.1 Συνθήκες φόρτισης.....	34
2.11.2. Στατική σχεδίαση.....	35
2.11.3. Εγκατάσταση.....	37
2.12. Αξιολόγηση μηχανικών ιδιοτήτων υλικών κάλυψης.....	39
3. Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίου. Επιδράσεις στο κλίμα και την παραγωγή.....	45
3.1. Φωτοεπιλεκτικά καλύμματα.....	45
3.1.1 Χρωματιστά καλύμματα.....	45
3.1.2. Φωτεινά φωτοεπιλεκτικά καλύμματα.....	47
3.1.3. Βαφές οργανικής βάσης.....	49
3.1.4. Κβαντικές κουκίδες (QD).....	50
3.1.5.Επίδραση των φωτοεκλεκτικών καλυμμάτων στο κλίμα του θερμοκηπίου.....	53
3.1.6. Επίδραση των φωτοεπιλεκτικών καλυμμάτων στην παραγωγή.....	54
3.1.6.1. Βλαστική ανάπτυξη.....	54
3.1.6.2. Έκφραση δευτερογενούς μεταβολίτη.....	56
3.1.6.3. Επιπτώσεις των φωτοεπιλεκτικών καλυμμάτων στην ποιότητα των καρπών.....	57
3.1.7. Σύνοψη - Σχολιασμός.....	59
3.2. Φωτεινές μεμβράνες κβαντικών κουκίδων ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίου.....	59
3.2.1. Επίδραση των φωτεινών μεμβρανών κβαντικών κουκίδων στο κλίμα και στην παραγωγή.....	61
3.2.2. Σύνοψη - Σχολιασμός	67

3.3. Αγροβολταϊκά.....	68
3.3.1. Ενσωμάτωση μονάδων c-Si STPV σε θερμοκήπια.....	70
3.3.2. Ενσωμάτωση μονάδων STPV λεπτής μεμβράνης σε θερμοκήπια.....	71
3.3.3. Ενσωμάτωση μονάδων ημιδιαφανών οργανικών φωτοβολταϊκών (OPV) σε θερμοκήπια..	72
3.3.4. Ενσωμάτωση μονάδων STPV με χρήση συνθετικών ηλιακών κυττάρων βαφής DSSC σε θερμοκήπια.....	74
3.3.5. Ενσωμάτωση συγκεντρωτικών μονάδων STPV σε θερμοκήπια.....	75
3.3.6. Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών ηλιακών συμπυκνωτών (LSC) σε θερμοκήπια.....	77
3.3.7.Επίδραση των αγροβολταϊκών στο κλίμα του θερμοκηπίου.....	79
3.3.8. Επίδραση των αγροβολταϊκών στην παραγωγή.....	84
3.3.9. Σύνοψη – Σχολιασμός.....	86
3.4.Υλικά κάλυψης θερμοκηπίων με βάση τα νανοσωματίδια.....	88
3.4.1.Φωτοθερμικά πλασμονικά νανοσωματίδια.....	88
3.4.2. Οπτικές και θερμικές ιδιότητες των πλασμονικών νανοσωματιδίων	89
3.4.3. Επίδραση των πλασμονικών νανοσωματιδίων στη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR) και στην ανάπτυξη των φυτών.....	92
3.4.4. Σύνοψη - Σχολιασμός	93
3.5. Υλικά κάλυψης θερμοκηπίου με βάση το ευρώπιο.....	93
3.5.1. Οπτικές ιδιότητες.....	93
3.5.2. Επίδραση του ευρωπαϊού στην ανάπτυξη των φυτών.....	94
3.5.3.Επίδραση του ευρωπαϊού στην ανταλλαγή αερίων στα φύλλα.....	95
3.5.4. Ανθεκτικότητα των φυτών σε αβιοτικούς παράγοντες.....	96
3.5.5. Σύνοψη - Σχολιασμός	97
3.6. Υλικά κάλυψης θερμοκηπίου με βάση το Ρουμπίνι.....	97
3.6.1. Οπτικές ιδιότητες.....	98
3.6.2. Επίδραση των καλυμμάτων ρουμπινιού στην ανάπτυξη των φυτών.....	98
3.6.3. Σύνοψη - Σχολιασμός	100
3.7. Υλικά κάλυψης θερμοκηπίων με βάση μεμβράνες φθοροπολυμερούς φωτομετατροπής με επικάλυψη νανοσωματιδίων χρυσού.....	101

*Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση
στο κλίμα και στην παραγωγή»*

3.7.1. Οπτικές ιδιότητες φθοροπολυμερών με επικάλυψη νανοσωματιδίων χρυσού.....	102
3.7.2. Επίδραση μεμβρανών φθοροπολυμερούς φωτομετατροπής με επικάλυψη νανοσωματιδίων χρυσού στην απόδοση των καλλιιεργειών.....	104
3.7.2. Σύνοψη - Σχολιασμός.....	104
3.8. Υλικά κάλυψης Θερμοκηπίου με βάση το έξυπνο γυαλί (SG).....	105
3.8.1.Οπτικές ιδιότητες.....	105
3.8.2. Επίδραση του υλικού κάλυψης έξυπνου γυαλιού (SG) στο κλίμα του θερμοκηπίου.....	106
3.8.3. Επίδραση του υλικού κάλυψης έξυπνου γυαλιού (SG) στην απόδοση της καλλιέργειας..	107
3.8.4. Σύνοψη - Σχολιασμός	108
3.9. Υλικά κάλυψης θερμοκηπίων με βάση το γραφένιο και το φουλερένιο.....	109
4. Συμπεράσματα.....	110
Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία.....	114
Ξενόγλωσση βιβλιογραφία.....	114
Ιστοσελίδες.....	132

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Θερμοκήπια στην Ολλανδία. (πηγή: reddit.com).....	2
Εικόνα 2. Ποσοστά κάλυψης θερμοκηπίων ανά τον κόσμο (πηγή: Tong et al., 2024).....	5
Εικόνα 3. Έκταση θερμοκηπίων στην Ελλάδα και εκμεταλλεύσεις. (πηγή: https://www.ot.gr).....	7
Εικόνα 4 .Περιφερειακή κατανομή των θερμοκηπίων στην Ελλάδα (πηγή: https://www.ypaithros.gr).....	8
Εικόνα 5. Αλουμίνιο (σκελετός θερμοκηπίου). (πηγή: pipe.technoluxpro.com).....	10
Εικόνα 6: Χάλυβας σε μορφή σωλήνα (σκελετός θερμοκηπίου). (πηγή: ekadem.gr).....	12
Εικόνα 7. Περαιότητα του διαφανούς υλικού στο φως. (πηγή: Μαυρογιαννόπουλος, 2001).....	14
Εικόνα 8: Γυάλινο θερμοκήπιο. (πηγή: https://geotechnology.gr).....	19
Εικόνα 9. Φωτοεπιλεκτικά καλύμματα θερμοκηπίων. (πηγή: Pandey et al., 2023).....	45
Εικόνα 10. Η διατομή ενός LSC που δείχνει τις πιθανές μοίρες του προσπίπτοντος φωτός, μεγάλο μέρος του οποίου παγιδεύεται μέσα στο φύλλο πολυμερούς και οδηγείται στις άκρες, όπου ένα μικρό ηλιακό στοιχείο το μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια.(πηγή: Pandey et al., 2023).....	48
Εικόνα 11. Φωτεινή μεμβράνη θερμοκηπίου UbiGro600. (πηγή: Pandey et al., 2023).....	52
Εικόνα 12. Φωτεινές μεμβράνες κβαντικών κουκίδων. Αριστερή εικόνα, εγκατεστημένες στην οροφή, τον νότιο τοίχο και το πάνω μισό των ανατολικών και δυτικών τοίχων, του θερμοκηπίου.Δεξιά εικόνα, θερμοκήπιο χωρίς εγκατεστημένες πρόσθετες μεμβράνες. (πηγή: Hebert et al.,2022).....	61
Εικόνα 13: Αγροβολταϊκό θερμοκήπιο. (πηγή: https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1364032122000545-gr8.jpg).....	69
Εικόνα 14. a) Θερμοκήπιο ελέγχου και b) Θερμοκήπιο OPV (πηγή: https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1364032122000545-gr15.jpg).....	74

Εικόνα 15. a) Μια μονάδα DSSC $50 \times 50 \text{ cm}^2$, b) Διαπερατότητα της μονάδας σε όλο το ηλιακό φάσμα και c) Ένα πρωτότυπο θερμοκηπίου 100 m^2 με DSSC. (πηγή: Mourtzikou et al., 2020)...75

Εικόνα 16. a) Ένα θερμοκήπιο καλυμμένο με διαφανές γυαλί (αριστερά) και ένα θερμοκήπιο καλυμμένο με WSPV (δεξιά), (πηγή: Corrado et al., 2013), b) Εσωτερική όψη θερμοκηπίου που είναι καλυμμένο με WSPV (πηγή: Loik et al., 2017).....78

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Γράφημα για το LLEAF 600, που δείχνει τον βαθμό της φασματικής του επικάλυψης στο φάσμα διέγερσης (κάθετος άξονας) έναντι της εκπομπής (οριζόντιος άξονας). (πηγή: Pandey et al., 2023).....49

Σχήμα 2. Οι καμπύλες φασματικής μετάδοσης για το LLEAF 620 (κόκκινη γραμμή), το LLEAF 660 (μωβ γραμμή) και το διαφανές πολυαιθυλένιο (κίτρινη γραμμή) καλύπτουν όλο το εύρος του ορατού φωτός (συννεφιασμένη μέρα με σκίαση περίπου 40% από νεφοκάλυψη). Το LLEAF 620 αυξάνει το διαθέσιμο κόκκινο φως στην περιοχή 600–680 nm σε σχέση με αυτό του διαφανούς πολυαιθυλενίου χρησιμοποιώντας φθορισμό. Αντίθετα, το LLEAF 660 μειώνει το κόκκινο φως και αυξάνει αυτό του απώτερου κόκκινου. (πηγή: Pandey et al., 2023).....50

Σχήμα 3. Χάρτης εκπομπών για το Ubigo 600, με μέγιστη εκπομπή που εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων στα 600 nm. (πηγή: Pandey et al., 2023).....51

Σχήμα 4. Φασματικές κατανομές φωτονίων υπό τέσσερις φασματικές επεξεργασίες. Ο μάρτυρας είναι το μη φιλτραρισμένο ηλιακό φως του θερμοκηπίου. Επιπλέον, το φως φιλτραρίστηκε μέσω των ακόλουθων τριών τύπων φιλμ: φιλμ κβαντικών κουκκίδων κανονικής συγκέντρωσης (φιλμ reg QD), φιλμ κβαντικών κουκκίδων υψηλής συγκέντρωσης (φιλμ υψηλής QD) και φιλμ πολυαιθυλενίου (PE). (πηγή: Kang et al., 2023).....62

Σχήμα 5. Φασματική απόκριση γυαλιού που έχει ενσωματωμένες μονάδες STPV λεπτής μεμβράνης στο ορατό φάσμα. (πηγή: Thompson et al., 2020).....71

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Σχήμα 6. Φάσματα οπτικής απορρόφησης της χλωροφύλλης α , της χλωροφύλλης β και του καροτενοειδούς, και τα φάσματα μετάδοσης του ανεπτυγμένου πολυμερικού ηλιακού στοιχείου. (πηγή: Shi et al., 2019).....	73
Σχήμα 7. Φάσμα μετάδοσης της σχεδιασμένης διχρωματικής μεμβράνης. (πηγή: Liu et al., 2018).....	76
Σχήμα 8. Εμφανίζονται τα φάσματα απορρόφησης (συνεχής γραμμή, αριστερός άξονας) και τα φάσματα εκπομπής φωταύγειας (διακεκομμένη γραμμή, δεξιός άξονας) της χρωστικής στην έναρξη της δοκιμής σε θερμοκήπιο (μπλε) και μετά από δύο χρόνια στο χωράφι (κόκκινο). (πηγή: Corrado et al., 2013).....	77
Σχήμα 9. Τα φάσματα UV–Vis–NIR του PE και του PE-ATO4. (πηγή: Elmi et al., 2024).....	90
Σχήμα 10. Διαφορικά φάσματα («φάσμα μεμβράνης φωτομετατροπής» μείον «φάσμα κοινής μεμβράνης») διέγερσης (A , B) και φωταύγειας (C , D) των PCC-Eu ³⁺ :LaF ₃ (A , C) και PCC- Eu ₂ O ₃ (B , D) . Τα φάσματα διέγερσης φωταύγειας ανιχνεύθηκαν σε μήκη κύματος 591 nm (A) και 612 nm (B). Τα φάσματα φωταύγειας ελήφθησαν κατά τη διέγερση σε μήκος κύματος 395 nm (C , D) . (Paskhin et al., 2023).....	94
Σχήμα 11. Διαφορά φάσματος φωταύγειας 3D («φάσμα PCC-R8» μείον «φάσμα κοινής κάλυψης») σωματιδίων ρουμπινιού.(πηγή: (Paskhin et al., 2024).....	98
Σχήμα 12. Φάσμα απορρόφησης νανοσωματιδίων χρυσού. (πηγή: Gudkov et al., 2020).....	102
Σχήμα 13. Φάσματα απορρόφησης νανοσωματιδίων χρυσού (Au NP) σε ακετόνη και νανοσωματιδίων χρυσού ενσωματωμένων στο νανοςύνθετο που περιέχει φθόριο. (πηγή: Gudkov et al., 2020).....	103
Σχήμα 14. Φάσμα φωταύγειας του πολυμερούς φωτομετατροπής που περιέχει κβαντικές κουκκίδες και νανοσωματίδια χρυσού. (πηγή: Gudkov et al., 2020).....	103
Σχήμα 15. Γραφική παράσταση φωτονίων. Το φως που διέρχεται από την οροφή και τον τοίχο του θερμοκηπίου. (πηγή: Chavan et al., 2020).....	106

Κατάλογος Ραβδογραμμάτων

Ραβδόγραμμα 1. Φρέσκο βάρος βλαστών (A), ξηρό βάρος βλαστών (B), συνολική επιφάνεια φύλλων (C) και μάζα φύλλων ανά επιφάνεια (D), κόκκινου μαρουλιού romaine 'Outredgeous', πράσινου μαρουλιού butterhead 'Rex' και γλυκού βασιλικού 'Genovese' που καλλιεργήθηκαν υπό τέσσερις μεταχειρίσεις [μη φιλτραρισμένο ηλιακό φως θερμοκηπίου (μάρτυρας), μεμβράνη πολυαιθυλενίου (PE), μεμβράνη κβαντικών κουκκίδων κανονικής συγκέντρωσης (μεμβράνη κανονικής QD) και μεμβράνη κβαντικών κουκκίδων υψηλής συγκέντρωσης (μεμβράνη υψηλής QD)].(πηγή: Kang et al., 2023).....64

Ραβδόγραμμα 2. Φρέσκο βάρος φύλλων (A), ξηρό βάρος φύλλων (B), φρέσκο βάρος στελέχους (C), ξηρό βάρος στελέχους (D), ύψος φυτού (E) και αριθμός φύλλων (F) γλυκού βασιλικού «Genovese» που καλλιεργήθηκε υπό τέσσερις επεξεργασίες [μη φιλτραρισμένο ηλιακό φως θερμοκηπίου (μάρτυρας), μεμβράνη πολυαιθυλενίου (PE), μεμβράνη κβαντικών κουκκίδων κανονικής συγκέντρωσης (φιλμ κανονικής QD) και μεμβράνη κβαντικών κουκκίδων υψηλής συγκέντρωσης (φιλμ υψηλής QD)].(πηγή: Kang et al., 2023).....65

Ραβδόγραμμα 3. Περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη φύλλων του πράσινου μαρουλιού 'Rex' (A) και του γλυκού βασιλικού 'Genovese' (B) και ομαλοποιημένος δείκτης ανθοκυανίνης διαφοράς (NDAI) του κόκκινου μαρουλιού 'Outredgeous' (C) που καλλιεργήθηκε υπό τέσσερις επεξεργασίες [μη φιλτραρισμένο ηλιακό φως θερμοκηπίου (μάρτυρας), μεμβράνη πολυαιθυλενίου (μεμβράνη PE), μεμβράνη QD κανονικής συγκέντρωσης (μεμβράνη reg QD) και μεμβράνη QD υψηλής συγκέντρωσης (μεμβράνη υψηλής QD)]. (πηγή: Kang et al., 2023).....66

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.Τιμές εκπομπής. (πηγή: Elmi et al., 2024).....89

Πίνακας 2. Τιμές διαπερατότητας PAR διαφορετικών καλυμμάτων θερμοκηπίου. (πηγή: Elmi et al., 2024).....91

Πίνακας 3. Θερμικές ιδιότητες των καλυμμάτων του θερμοκηπίου. (πηγή: Elmi et al., 2024).....91

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

pH	Ενεργός οξύτητα
PAR	Φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία
DLI	Ολοκλήρωμα ημερήσιου φωτός
PVC	Πολυβινυλοχλωρίδιο
EVA	Οξικό αιθυλενοβινύλιο
UV	Υπεριώδης ακτινοβολία
PE	Πολυαιθυλένιο
LDPE	Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας
LLDPE	Γραμμικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας
mLLDPE	Μεταλλοκένιο γραμμικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας
EBA	Αιθυλένιο – Ακρυλικό βουτύλιο
PVC	Πολυβινυλοχλωρίδιο
PC	Πολυκαρβονικές επιφάνειες
HALS	Σταθεροποιητές φωτός με παρεμπόδιση αμίνης
HPPE	Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας
PVA	Πολυοξικό βινύλιο
PVOH	Πολυβινλική αλκοόλη
PEG	Πολυαιθυλενογλυκόλη
LSC	Φωτοβόλοι ηλιακοί συμπυκνωτές
QD	Κβαντικές κουκίδες

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

LED	Δίοδος εκπομπής φωτός
PV	Φωτοβολταϊκά
STPV	Φωτοβολταϊκές μονάδες
OPV	Οργανικό φωτοβολταϊκό
CPV	Φωτοβολταϊκό συγκέντρωσης
c – Si	Κρυσταλικό πυρίτιο
DSSC	Συνθετικά ηλιακά κύτταρα βαφής
TSS	Συνολικά διαλυτά στερεά
TA	Ολική οξύτητα
PPED	Πυκνότητα ροής φωτονίων
PL	Απόδοση φωταύγειας
LMA	Συνολική επιφάνεια φύλλου
PMMA	Πολύ(μεθακρυλικό μεθύλιο)
LSPR	Τοπικός συντονισμός πλασμονίου επιφάνειας
NIR	Φασματοσκοπία εγγύς υπέρυθρου
SHGC	Συντελεστής κέρδους ηλιακής θερμότητας
RZT	Θερμοκρασία ριζικής ζώνης
CO ₂	Διοξείδιο του άνθρακα
WUE	Απόδοση χρήσης νερού
TIR	Ολική εσωτερική ανάκλαση
H ₂ O	Νερό
ATO	Οξείδιο του κασσιτέρου αντιμονίου

*Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση
στο κλίμα και στην παραγωγή»*

Eu₂ O₃ Οξείδιο του ευρωπίου

PAH Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες

Al₂ O₃ :Cr³⁺ Οξείδιο του αργιλίου με πρόσμειξη χρωμίου

SG Έξυπνο γυαλί

Tr Ρυθμός διαπνοής

VPDL Έλλειμμα πίεσης ατμών φύλλου-αέρα

1. Εισαγωγή

Η συνεχής αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, ο οποίος αναμένεται να ξεπεράσει τα 9,6 δισεκατομμύρια έως το 2050, η περιορισμένη καλλιεργήσιμη γη και τα ακραία καιρικά φαινόμενα που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή (Chaurasia, 2020) έχουν σαν αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της ζήτησης των τροφίμων. (Van et al., 2021). Για την κάλυψη των συνεχόμενων αναγκών σίτισης εφαρμόζονται ολοένα και περισσότερες νέες μέθοδοι οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα να βοηθούν τα φυτά να αναπτυχθούν, καθώς και να προσαρμοστούν στην κλιματική αλλαγή που επικρατεί στις μέρες μας με απώτερο στόχο την παραγωγή γεωργικών προϊόντων. (Kocińska et al., 2023).

Ο άνθρωπος εφαρμόζει την γεωργία για πάνω από 12000 χρόνια. Η επίδραση που είχε η γεωργία στην ευημερία του ανθρώπου καθ' όλη την διάρκεια όλων αυτών των ετών ήταν τεράστια. Ενώ αρχικά η γεωργία περιορίστηκε σε έννοιες απλές όπως όργωμα, σπορά, άρδευση και λίπανση στην πορεία των χρόνων και ειδικότερα με την χημική επανάσταση η γεωργία άλλαξε και έννοιες όπως η φυτοπροστασία και οι σύγχρονες μέθοδοι άρδευσης και λίπανσης ήρθαν να προστεθούν στο οπλοστάσιο των παραγωγών. Οι διάφορες δυσμενείς παράγοντες του περιβάλλοντος όπως είναι οι υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες, βροχές και χιόνια έχουν σαν αποτέλεσμα να επηρεάζουν αρνητικά τις υπαίθριες καλλιέργειες. (Stanghellini et al., 2019).

Για την αντιμετώπιση όλων αυτών των κινδύνων εκτιμήθηκε από τα πολύ παλιά χρόνια η ανάγκη της κάλυψης των καλλιεργειών. Πηγές που υπάρχουν αναφέρουν ότι οι Ρωμαίοι καλλιεργούσαν εξωτικά φυτά σε ειδικούς διαμορφωμένους χώρους που καλύπτονταν από τη μαρμαρυγία (mica), το οποίο ήταν ένα διαφανές υλικό που χρησιμοποιούσαν για την κατασκευή παραθύρων. Με την πάροδο των χρόνων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας η κατασκευή γυαλιού βοήθησε στην κάλυψη διαφόρων καλλιεργειών. Έτσι λοιπόν μέχρι τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, ανάγκη για κάλυψη είχαν μόνο τα εξωτικά και πολύ ιδιαίτερα φυτά. Στην συνέχεια έγιναν προσπάθειες και για διάφορες εμπορικές ποικιλίες με την πρώτη που έλαβε χώρα να είναι η καλλιέργεια αμπελιού στην Ολλανδία. Τα αμπέλια στην Ολλανδία καλλιεργούνταν μέσα σε χώρους που καλύπτονταν από γυαλί και θερμαινότουσαν από σόμπες.

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Με την πάροδο των χρόνων και την τεχνολογία να εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς τα υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων εξελίχθηκαν με αποτέλεσμα να γίνεται χρήση πολύ φθηνότερων και αποτελεσματικών υλικών κάλυψης που αποτελούνται από πλαστικό. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι καλλιέργειες υπό κάλυψη να έχουν γίνει γνωστές σε όλο τον κόσμο και έτσι να έχουν φτάσει να καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις παγκοσμίως και ταυτόχρονα να έχουν πολύ καλές αποδόσεις. (Stanghellini et al., 2019).



Εικόνα 1. Θερμοκήπια στην Ολλανδία. (πηγή: reddit.com)

1.1. Ιστορική εξέλιξη θερμοκηπίου

Έλληνες συγγραφείς του 5^{ου} αιώνα π.Χ. ήταν οι πρώτοι που ανέφεραν την ύπαρξη θερμοκηπίων. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν αναφορές του Πλάτωνα στους «Κήπους του Άδωνη», οι οποίοι ήταν ειδικοί διαμορφωμένοι χώροι στους οποίους αναπτύσσονταν φυτά με ταχύτατους ρυθμούς. Επίσης, ο Θεόφραστος αναφέρονταν σε καλλιέργειες εκτός εποχής που καλλιεργούνταν μέσα σε καρότσια έτσι ώστε να μεταφέρονται για να προστατεύονται από το κρύο. (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Το πρώτο σύστημα θέρμανσης σε καλλιέργεια υπό κάλυψη εφαρμόστηκε στην αρχαία Κίνα. Καλάμια τα οποία ήταν καλυμμένα με λαδόχαρτο υπό γωνία 30-40° τοποθετούνταν στην νότια πλευρά του τοίχου και τα φυτά καλλιεργούνταν ανάμεσα στον τοίχο και τα καλυμμένα καλάμια με λαδόχαρτο έτσι ώστε να επωφελούνται από την θερμότητα του τοίχου. Επίσης, ένα άλλο σύστημα θέρμανσης παρατηρήθηκε στην αρχαία Πομπηία όπου βρέθηκαν μεγάλες κατασκευές που είχαν ως υλικό κάλυψης ένα είδους πρωτόγονου γυαλιού. Εντός των κατασκευών αυτών βρέθηκαν δοχεία με φυτά τα οποία τοποθετούνταν πάνω σε διάτρητα τραπέζια και από κάτω μπορούσαν να τοποθετηθούν αναμμένα κάρβουνα και έτσι με τον τρόπο αυτό μπορούσαν να θερμανθούν τα φυτά μέσα στα δοχεία. (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

Το θερμοκήπιο κατά την διάρκεια του μεσαίωνα δεν είχε καμία εφαρμογή, άρχισε να εφαρμόζεται πάλι από τον 17^ο αιώνα μ.Χ. και από εκείνη την περίοδο μέχρι και σήμερα εφαρμόζεται συνεχώς και ταυτόχρονα εξελίσσεται ακολουθώντας την εξέλιξη της τεχνολογίας. Η χρήση του φωτισμού για την ανάπτυξη των φυτών σε καλλιέργειες υπό κάλυψη άρχισε να κάνει την εμφάνισή της τον 18^ο αιώνα. Η θέρμανση ενώ στην αρχή γινόταν με θερμάστρες από το 1790 και μετά εξελίχθηκε και γινόταν με ατμό και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων παραγωγής προϊόντων. Στην πορεία των χρόνων (19^ο αιώνα) ο τρόπος κατασκευής των θερμοκηπίων εξελίχθηκε όπως επίσης εξελίχθηκε και η θέρμανση του θερμοκηπίου. Στον 20^ο αιώνα υπήρξε εξέλιξη κυρίως στα υλικά κατασκευής του θερμοκηπίου. Τέλος ακόμη και στις μέρες μας το θερμοκήπιο υπόκειται σε συνεχή εξέλιξη τόσο όσον αναφορά την κατασκευή του όσο και στο σύστημα λειτουργίας του. (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

1.2. Χρησιμότητα Θερμοκηπίου

Το θερμοκήπιο είναι μια κλειστή κατασκευή, η οποία καλύπτεται από διαφανή υλικά και έχει ως στόχο την δημιουργία ευνοϊκών συνθηκών του περιβάλλοντος για την καλλιέργεια φυτών. Η χρήση του θερμοκηπίου έγκειται στο γεγονός να ρυθμίζει το μικροκλίμα στο εσωτερικό του και να επιτρέπει με τον τρόπο αυτό να αναπτύσσονται φυτά που δεν θα μπορούσαν να αναπτυχθούν στην ύπαιθρο σε περιόδους που οι καιρικές συνθήκες δεν το επιτρέπουν. Η ρύθμιση του μικροκλίματος αφορά παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), η διάρκεια και η ένταση του φωτισμού. Απώτερος στόχος είναι όλοι αυτοί οι

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

παράγοντες να ρυθμιστούν κατάλληλα σε σχέση με την εκάστοτε καλλιέργεια για να επιτευχθεί η μέγιστη παραγωγή με το όσον το δυνατόν μικρότερο κόστος. (Σάββας, 2020).

Πέραν λοιπόν από την ρύθμιση του μικροκλίματος το θερμοκήπιο παρέχει και άλλα πλεονεκτήματα όπως είναι η προστασία των φυτών από τις έντονες βροχοπτώσεις, το χαλάζι και το χιόνι. Επίσης, το θερμοκήπιο παρέχει την δυνατότητα παραγωγής προϊόντων εκτός εποχής καθ' όλη την διάρκεια του έτους καθώς και προϊόντων που παράγονται από χώρες του εξωτερικού. Μια άλλη παράμετρος που έχει σαν αποτέλεσμα την ολοένα και μεγαλύτερη αύξηση των θερμοκηπίων είναι η δυνατότητα που έχουν να προσφέρουν μεγάλη παραγωγικότητα ανά μονάδα εδάφους και ταυτόχρονα η παραγωγή που προσφέρουν είναι σταθερή και δεν επηρεάζεται από το κλίμα που επικρατεί στον εξωτερικό χώρο των θερμοκηπίων. (Stanghellini et al., 2019). Επιπλέον, τα θερμοκήπια παρέχουν την δυνατότητα να προστατεύουν πιο αποτελεσματικά τις καλλιέργειες από εχθρούς και ασθένειες. Τέλος παρέχουν την ικανότητα στο να ρυθμίζουν παράγοντες όπως είναι η υγρασία, το pH, το οξυγόνο, η θερμότητα και τα θρεπτικά στοιχεία, οι οποίοι παράγοντες βοηθούν μέσω του ριζικού συστήματος στην ανάπτυξη των φυτών. (Σάββας, 2020).

Έτσι λοιπόν τα οφέλη που μπορεί να προσφέρει ένα σύγχρονο θερμοκήπιο είναι:

- α) Η προστασία που προσφέρει στην εκάστοτε καλλιέργεια.
- β) Παρέχει την δυνατότητα για μεγαλύτερη αύξηση της παραγωγής.
- γ) Λόγω των καλύτερων συνθηκών που επικρατούν στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και τα προϊόντα που παράγονται έχουν καλύτερη ποιότητα.
- δ) Παρέχει προστασία στην εκάστοτε καλλιέργεια από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες (αέρα, βροχή, χιόνι, χαλάζι).
- ε) Δίνει την δυνατότητα στον παραγωγό να προγραμματίζει το χρονικό διάστημα που επιδιώκει την παραγωγή ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών. (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

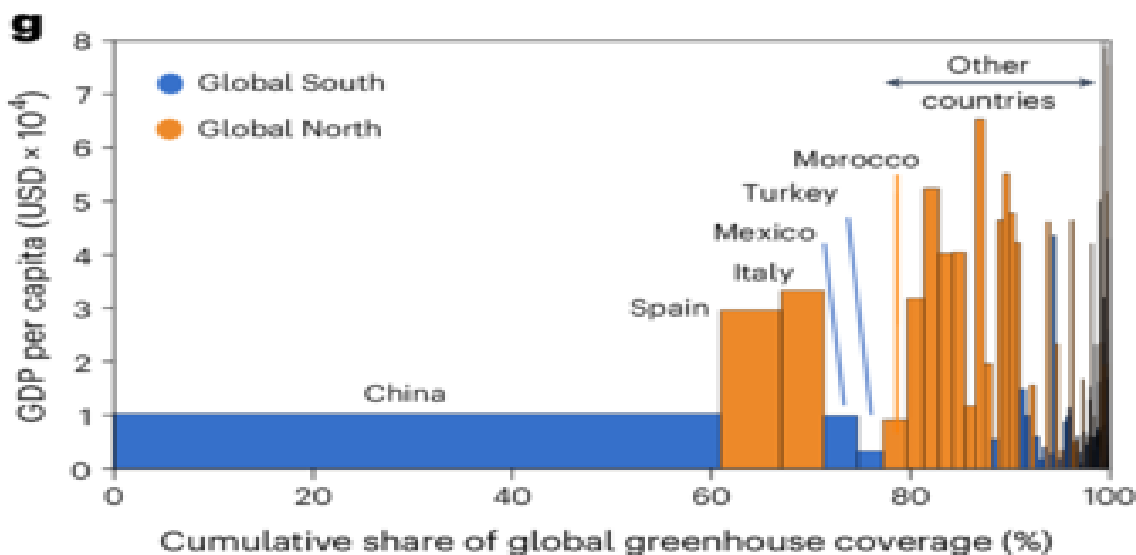
1.3 Θερμοκήπια ανά τον κόσμο

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση της έκτασης των θερμοκηπίων σε όλο τον κόσμο. Πιο συγκεκριμένα η έκταση των θερμοκηπίων ανά τον κόσμο όπου

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

καλλιεργούνταν λαχανικά το 1980 ήταν 371.000 στρέμματα, το 1995 ήταν περίπου 1.200.000 και το 2019 ήταν 1.228.000 στρέμματα. Από το 2018 και έπειτα το θερμοκήπιο σαν έννοια περιλάμβανε μόνο μεγάλες κατασκευές κάλυψης των καλλιεργειών. Το 2019 η συνολική έκταση των θερμοκηπίων ανά τον κόσμο ήταν περίπου 13.912.000 στρέμματα. (Πηγή: Ιστότοπος 1). Η ίδια έκταση παραμένει έως και σήμερα σύμφωνα με έρευνα των Tong et al. (2024). Πιο συγκεκριμένα η καλλιέργεια σε θερμοκήπια εκτείνεται σε 119 διαφορετικές χώρες ανά τον κόσμο, εκ των οποίων η Κίνα καλύπτει το 60,4% της συνολικής έκτασης. Η Ισπανία καταλαμβάνει την δεύτερη θέση με ποσοστό κάλυψης θερμοκηπίων 5,6 % και η Ιταλία καταλαμβάνει την τρίτη θέση με ποσοστό κάλυψης θερμοκηπίων 4,1%. (Tong et al., 2024).

Τα μεγάλα συγκροτήματα θερμοκηπίων στον Παγκόσμιο Βορρά ιδρύθηκαν στις δεκαετίες του 1970 και του 1980, ενώ στον Παγκόσμιο Νότο άρχισαν να εμφανίζονται δύο δεκαετίες αργότερα. Παρόλα αυτά όμως στον παγκόσμιο νότο τα θερμοκήπια αναπτύσσονται με ραγδαίο ρυθμό όπως για παράδειγμα στην Ασία, την Αφρική και την Κεντρική και Νότια Αμερική. Έτσι λοιπόν στις μέρες μας τα θερμοκήπια στον Παγκόσμιο Νότο καταλαμβάνουν 2,7 φορές μεγαλύτερη έκταση από ό,τι στον Παγκόσμιο Βορρά. (Tong et al., 2024).



Εικόνα 2. Ποσοστά κάλυψης θερμοκηπίων ανά τον κόσμο (πηγή: Tong et al., 2024).

1.4 Θερμοκήπια στην Ελλάδα

Τα πρώτα θερμοκήπια στην Ελλάδα άρχισαν να κατασκευάζονται το 1955. Ένας πολύ σημαντικός λόγος της εξάπλωσης των θερμοκηπίων στην Ελλάδα ήταν η χρήση του πλαστικού φύλλου πολυαιθυλενίου ως υλικού κάλυψης. Το γεγονός αυτό βοήθησε πολλούς παραγωγούς να κατασκευάζουν τα θερμοκήπια μόνοι τους με αρκετά χαμηλό κόστος και ταυτόχρονα να αυξάνουν και την πρώιμη παραγωγή κηπευτικών. (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια σημαντική αύξηση των εκτάσεων υπό κάλυψη στη Ελλάδα. Σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία σε σύνολο 28,2 εκατ. στρεμμάτων καλλιεργούμενης γης, τα θερμοκήπια καταλαμβάνουν τα 48.720 στρέμματα και οι εκμεταλλεύσεις είναι 8.319. Στην Κρήτη καλλιεργούνται 15.509 στρέμματα και οι εκμεταλλεύσεις είναι 2.932. Στην Κεντρική Μακεδονία καλλιεργούνται 5.333 στρέμματα και οι εκμεταλλεύσεις είναι 1470. Στη Δυτική Ελλάδα (Αχαΐα, Ηλεία και Αιτωλοακαρνανία) καλλιεργούνται 15.627 στρέμματα και οι εκμεταλλεύσεις είναι 774. Στην υπόλοιπη Πελοπόννησο καλλιεργούνται 3.400 στρέμματα και οι εκμεταλλεύσεις είναι 644 και στην Ήπειρο 534 εκμεταλλεύσεις με 1.633 στρέμματα. (<https://www.ot.gr>).

Την δεκαετία 2010 – 2020, παρόλο που παρατηρείται αύξηση των στρεμμάτων των θερμοκηπίων κατά 13,7% (48.720 από 42.864), υπάρχει μείωση των εκμεταλλεύσεων κατά 6% (8.319 από 8.894). (<https://www.ot.gr>).

Στην Ελλάδα το 3% της συνολικής καλλιεργούμενης έκτασης είναι κηπευτικά. Οι κύριες θερμοκηπιακές καλλιέργειες στη χώρα μας είναι η τομάτα (38%) η φράουλα (25%), τα αγγουράκια (15%), οι πιπεριές (15%) και οι μελιτζάνες (4%). (<https://www.ot.gr>).

Η Ελλάδα παράγει περίπου 10 δισ. ευρώ συνολική αξία από τα αγροτικά προϊόντα, που αντιστοιχεί στο 5% του ΑΕΠ, ένα μερίδιο από αυτό το ποσό περίπου το 39% αντιστοιχεί στα κηπευτικά και τα φρούτα. Σχεδόν το 50% αυτού, περίπου 18% ή κοντά στο 1,8 δισ. ευρώ αντιστοιχεί σε κηπευτικά. (<https://www.ot.gr>).

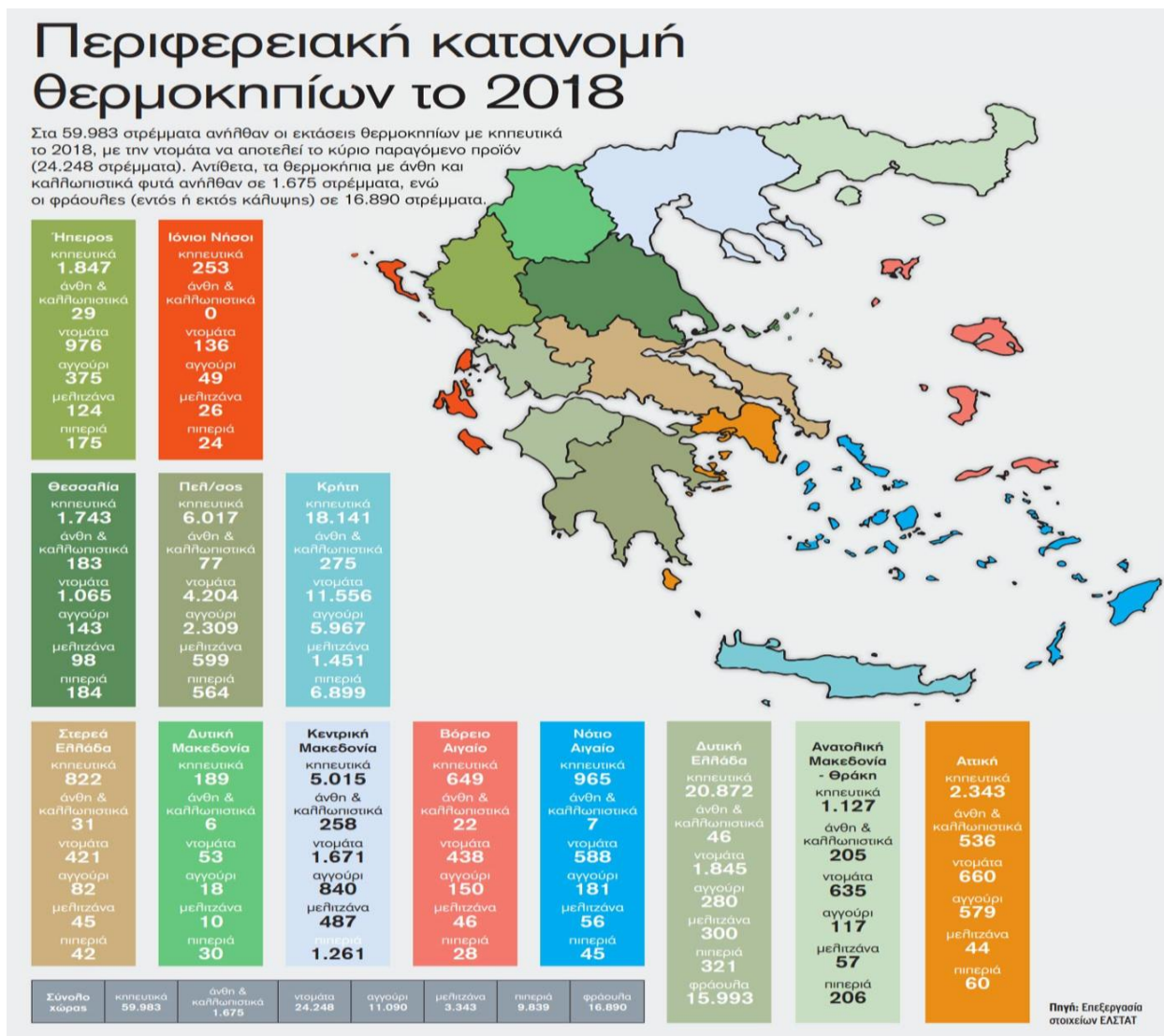
Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι οι καλλιέργειες που λαμβάνουν χώρα στα θερμοκήπια συνεισφέρουν στο 18% της συνολικής αξίας των παραγόμενων προϊόντων. (<https://www.ot.gr>).

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Τα θερμοκήπια στην Ελλάδα ανά περιφέρεια			
	2009	2020	%
ΕΛΛΑΔΑ			
εκμεταλλεύσεις	8.894	8.319	-6,5
στρέμματα	42.864,60	48.720,00	13,7
ΑΝΑΤ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΑΚΗΣ			
εκμεταλλεύσεις	252	280	11,1
στρέμματα	866,9	889,7	2,6
ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ			
εκμεταλλεύσεις	1.489	1.470	-1,3
στρέμματα	6.347,80	5.333,60	-16
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ			
εκμεταλλεύσεις	84	156	85,7
στρέμματα	187,1	167,3	-10,6
ΗΠΕΙΡΟΥ			
εκμεταλλεύσεις	455	534	17,4
στρέμματα	1.791,90	1.633,00	-8,9
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ			
εκμεταλλεύσεις	469	628	33,9
στρέμματα	1.702,80	1.725,80	1,4

ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ			
εκμεταλλεύσεις	104	130	25
στρέμματα	311,4	477,6	53,4
ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ			
εκμεταλλεύσεις	82	90	9,8
στρέμματα	158,7	193,3	21,8
ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ			
εκμεταλλεύσεις	679	774	14
στρέμματα	6.643,70	15.627,20	135,2
ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ			
εκμεταλλεύσεις	798	644	-19,3
στρέμματα	3.903,90	3.400,50	-12,9
ΑΤΤΙΚΗΣ			
εκμεταλλεύσεις	377	275	-27,1
στρέμματα	2.185,70	2.533,60	15,9
ΒΟΡΕΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ			
εκμεταλλεύσεις	147	182	23,8
στρέμματα	417,4	451,2	8,1
ΝΟΤΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ			
εκμεταλλεύσεις	288	226	-21,5
στρέμματα	905,9	778,3	-14,1
ΚΡΗΤΗΣ			
εκμεταλλεύσεις	3.670	2.932	-20,1
στρέμματα	17.441,40	15.509,00	-11,1

Εικόνα 3. Έκταση θερμοκηπίων στην Ελλάδα και εκμεταλλεύσεις. (<https://www.ot.gr>).



Εικόνα 4. Περιφερειακή κατανομή των θερμοκηπίων στην Ελλάδα. (<https://www.ypaithros.gr>).

1.5.Υλικά κατασκευής θερμοκηπίου

Για την κατασκευή του σκελετού του θερμοκηπίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υλικά, τα πιο σύνηθες είναι το ξύλο, το αλουμίνιο και ο χάλυβας. Το πιο υλικό θα προτιμηθεί κάθε φορά εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που έχουν να κάνουν με το κόστος των υλικών που

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

ως γνωστόν από περιοχή σε περιοχή διαφέρει, από τον μηχανολογικό εξοπλισμό που διαθέτει ο κατασκευαστής και από το επιθυμητό ελεύθερο πλάτος της κατασκευής.

Αλουμίνιο:

Το αλουμίνιο είναι το υλικό που χρησιμοποιείται πιο συχνά για την κατασκευή των λεπτών σκελετικών στοιχείων των θερμοκηπίων. Το αλουμίνιο παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μετάλλων τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- α) Οι διατομές των διαφόρων στοιχείων είναι μικρότερες, γεγονός που αν συνδυασθεί με το μικρό ειδικό βάρος, δίνει πολύ μικρού βάρους κατασκευή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κατασκευή αυτή να απαιτεί την χρήση λιγότερων τέτοιων στοιχείων. Το γεγονός αυτό έχει σαν συνέπεια τη μειωμένη σκίαση του θερμοκηπίου και την επίτευξη μεγαλύτερων ανοιγμάτων από στύλο σε στύλο.
- β) Παρουσιάζει μεγάλη ανθεκτικότητα στην επιφανειακή διάβρωση και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην χρειάζεται καθόλου συντήρηση.
- γ) Η χρήση του είναι πολύ συχνή για την κατασκευή ανοιγμάτων εξαερισμού, έτσι παρέχει πλαίσια που είναι πιο ελαφριά και δεν δημιουργούν προβλήματα λειτουργίας.
- δ) Τα διάφορα στοιχεία επειδή διαμορφώνονται με εξώθηση, μπορούν να κατασκευαστούν σε πολύπλοκες διατομές, ικανές να δώσουν καλή στεγανότητα και αποκομιδή του νερού της συμπύκνωσης. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).



Εικόνα 5. Αλουμίνιο (σκελετός θερμοκηπίου). (πηγή: pipe.technoluxpro.com)

Χάλυβας:

Ο χάλυβας είναι το υλικό που χρησιμοποιείται πιο συχνά για την κατασκευή των θερμοκηπίων. Στο πεδίο υπάρχουν θερμοκήπια τα οποία είναι κατασκευασμένα εξ ολοκλήρου από χάλυβα και υπάρχουν και άλλα θερμοκήπια τα οποία είναι κατασκευασμένα από χάλυβα μόνο κάποια μέρη του σκελετού τους, ενώ τα υπόλοιπα είναι κατασκευασμένα από συνδυασμό ξύλου η αλουμινίου. Ο χάλυβας λόγω της υψηλής αντοχής του, απαιτεί μικρές διατομές για δεδομένο φορτίο. Ο χάλυβας παραμορφώνεται σε τιμή τάσης 200 N/mm. Για την κατασκευή του σκελετού στα υαλόφρακτα θερμοκήπια οι διαμορφωμένες με κάμψη – ανοιχτές διατομές που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να έχουν πάχος τουλάχιστον 2 mm, έτσι ώστε να παρέχεται η επιθυμητή ακαμψία. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

Το κυριότερο μειονέκτημα που παρουσιάζει ο χάλυβας είναι η διάβρωσή του (οξείδωση), εξαιτίας των συνθηκών υψηλής υγρασίας που επικρατούν στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Ο πιο σύνηθες τρόπος να προστατευθεί ο χάλυβας από την οξείδωση είναι το γαλβάνισμα. Γαλβάνισμα είναι η επιψευδαργύρωση χαλύβδινων ή χυτοσιδηρών επιφανειών, με σκοπό κυρίως την

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

προστασία τους από την οξείδωση. Ο ρυθμός οξείδωσης του ψευδαργύρου είναι το 1/10 έως το 1/15 του ρυθμού οξείδωσης του χάλυβα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι γαλβανίσματος, οι οποίοι είναι οι εξής:

- 1) Το ηλεκτρολυτικό γαλβάνισμα (ανοδίωση, όπου άνοδος είναι ο ψευδάργυρος).
- 2) Το ψυχρό γαλβάνισμα όπου με κατάλληλο πιστόλι εκτοξεύεται σκόνη ψευδαργύρου.
- 3) Το Sherardizing όπου πραγματοποιείται θέρμανση των αντικειμένων και ανακάτεμα με οξείδιο του ψευδαργύρου και σκόνη ψευδαργύρου.
- 4) Το θερμό γαλβάνισμα. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

Το θερμό γαλβάνισμα είναι η καλύτερη μέθοδος γαλβανίσματος και αυτό γιατί παρέχει περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους. Τα πλεονεκτήματα που παρέχει είναι:

- α) Το χαμηλό κόστος σε σχέση με το χρόνο ζωής του.
- β) Δεν απαιτεί συχνή συντήρηση.
- γ) Υψηλή αξιοπιστία προστασίας.
- δ) Μεγάλο χρόνο ζωής. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).



Εικόνα 6. Χάλυβας σε μορφή σωλήνα (σκελετός θερμοκηπίου). (πηγή: ekadem.gr).

Ξύλο:

Το ξύλο χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή θερμοκηπίων με μικρό ελεύθερο πλάτος κατασκευαστικής μονάδας (κάτω από 6 m). Οι σκελετοί θερμοκηπίων που κατασκευάζονται από ξύλο παρουσιάζουν τόσο κάποια πλεονεκτήματα όσο και κάποια μειονεκτήματα. (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

Τα πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- α) Το ξύλο επειδή δεν υπερθερμαίνεται όπως το μέταλλο δεν προκαλεί σημαντικές φθορές στο πλαστικό.
- β) Έχει μικρό κόστος.
- γ) Για να επεξεργαστεί χρειάζεται απλό εξοπλισμό.

Τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- α) Το σχήμα το ξύλου μεταβάλλεται καθώς οι κλιματικές συνθήκες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου εναλλάσσονται από υγρές σε ξηρές.
- β) Απαιτεί μεγαλύτερες διατομές.

γ) Προσβάλλεται από βιολογικούς εχθρούς

δ) Έχει μικρότερη μηχανική αντοχή σε σχέση με το μέταλλο. (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

2. Υλικά κάλυψης θερμοκηπίων

2.1. Εισαγωγή

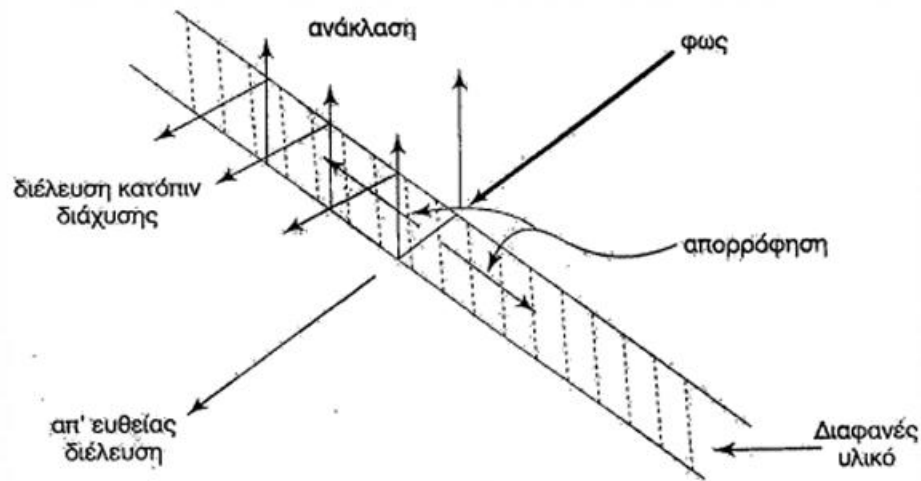
Η επιλογή του υλικού κάλυψης ενός θερμοκηπίου είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις συνολικές επιδόσεις των συστημάτων παραγωγής ενός θερμοκηπίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι ακτινοβολίες των υλικών παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο τόσο στην συμπεριφορά των καλλιεργειών όσο και στην απόδοση, στην οικονομία και στην βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας του θερμοκηπίου. Για την επιλογή ενός υλικού κάλυψης ενός θερμοκηπίου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν διάφοροι κρίσιμοι παράγοντες όπως είναι το τοπικό κλίμα, η παραγωγικότητα των καλλιεργειών, η αρχική επένδυση, το κόστος συντήρησης και οι τεχνολογικές εξελίξεις. (Ghoulem et. al., 2019).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι δεν υπάρχει το ιδανικό υλικό κάλυψης θερμοκηπίου. Το κάθε υλικό κάλυψης έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Παρόλα αυτά ένα καλό υλικό κάλυψης θα πρέπει να έχει ορισμένες ιδιότητες όπως είναι η υψηλή διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία και πιο συγκεκριμένα εντός της περιοχής της φωτοσυνθετικά ενεργούς ακτινοβολίας (PAR), να έχει υψηλή ακτινοβολία διάχυσης, να είναι όσο το δυνατόν μη περατό στη υπέρυθη ακτινοβολία (IR), να έχει αντί – συμπτκνωτικές ιδιότητες και καλή μόνωση. (Ahamed et. al., 2019).

Η ποιότητα και η ποσότητα του φωτός που εισέρχεται στον χώρο των φυτών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες του διαφανούς υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου. Ένα υλικό κάλυψης για να θεωρείται καλό θα πρέπει να επιτρέπει την διείσδυση όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ποσότητας από τον προσπίπτοντα σ' αυτό φωτισμό και να ευνοεί τη διάχυσή του στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, ώστε να υπάρχει ομοιογένεια φωτισμού σε όλο τον χώρο. Επίσης θα πρέπει να επιτρέπει από το φυσικό φως να διέρχονται όλα τα μήκη κύματος τα οποία είναι αναγκαία για την ανάπτυξη των φυτών. Το φως από την στιγμή που θα πέσει πάνω στο υλικό κάλυψης είναι δυνατόν να:

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

- 1)Ανακλασθεί από το υλικό.
- 2)Απορροφηθεί από το υλικό.
- 3)Διέλθει μέσα από το υλικό.



Εικόνα 7. Περατότητα του διαφανούς υλικού στο φως. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

Όλα τα μήκη κύματος του φωτός που πέφτουν πάνω στο υλικό κάλυψης δεν ανακλώνται αλλά απορροφώνται ή διέρχονται μέσω των διάφορων υλικών κάλυψης κατά τον ίδιο τρόπο. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ποιότητα φωτισμού που εισέρχεται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Τα μήκη κύματος που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών θα πρέπει να μην ανακλώνται ή απορροφώνται από το υλικό κάλυψης αλλά αντιθέτως θα πρέπει να διέρχονται μέσω του καλύμματος στο μέγιστο βαθμό στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

Η διέλευση της ακτινοβολίας ορίζεται ως ο λόγος της διερχόμενης ακτινοβολίας προς στην προσβάλλουσα επιφάνεια ακτινοβολίας.

$$\text{ποσοστό διέλευσης } 100\% = (\text{διερχόμενος φωτισμός} \div \text{προσβάλλον φωτισμός}) \times 100$$

Το φως έχει την ικανότητα να διέλθει μέσω ενός υλικού κάλυψης είτε απευθείας είτε με διάχυση. Στην περίπτωση που το φως διέρχεται απευθείας από το υλικό κάλυψης τότε έχει σχεδόν

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

την ίδια κατεύθυνση με εκείνη του προσβάλλοντος φωτισμού. Το γεγονός αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα να προκαλέσει ανομοιομορφία στον φωτισμό του θερμοκηπίου από την έντονη σκίαση που προκαλείται από τον σκελετό του θερμοκηπίου. Στην περίπτωση που η διέλευση του φωτός γίνεται με ταυτόχρονη διάχυσή του τότε περιορίζεται το πρόβλημα της έντονης σκίασης. Υλικά κάλυψης τα οποία μετατρέπουν μεγάλες ποσότητες του διερχόμενου φωτός σε διάχυτο είναι οι ενισχυμένες με ίνες υάλου πολυεστερικές επιφάνειες ή ο υαλοπίνακας με φοιδωτή η κυματοειδή την εσωτερική του επιφάνεια. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

Τα υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων παρουσιάζουν και μια άλλη ιδιότητα που έχει να κάνει με την περατότητα η μη της θερμικής ακτινοβολίας (μεγάλου μήκους κύματος). Όλα τα σώματα που έχουν συνήθεις θερμοκρασίες εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Έτσι λοιπόν υπάρχουν μερικά υλικά κάλυψης τα οποία επιτρέπουν την διέλευση της θερμικής ακτινοβολίας ενώ άλλα είτε δεν την επιτρέπουν καθόλου είτε την επιτρέπουν μερικώς. Τα υλικά κάλυψης που δεν επιτρέπουν την διέλευση της θερμικής ακτινοβολίας εκδηλώνουν την καλούμενη <<ιδιότητα του θερμοκηπίου>>. Τα υλικά αυτά κατά την διάρκεια της ημέρας έχουν την ικανότητα να επιτρέπουν την είσοδο ηλιακής ακτινοβολίας μικρού κύματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, ενώ δεν επιτρέπουν τη έξοδο της ηλιακής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπουν το έδαφος και τα φυτά με αποτέλεσμα η θερμότητα να παγιδεύεται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και έτσι να παρατηρείται μια αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κατά 30%. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

Οι τρεις τύποι υλικών κάλυψης που χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια είναι:

- Υαλοπίνακες.
- Εύκαμπτα πλαστικά φύλλα.
- Φύλλα σκληρού πλαστικού. (Σάββας, 2020).

Για την επιλογή των διαφόρων υλικών κάλυψης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν διάφοροι παράγοντες που είναι οι εξής:

- Η μηχανική αντοχή.

- Η θερμοπερατότητα.
- Η περατότητα στο φως.
- Η περατότητα στη μεγάλους μήκους ακτινοβολία.
- Το μέγεθος της διαφανούς επιφάνειας που μπορεί να κατασκευαστεί.
- Η ευαισθησία στην γήρανση.
- Η αντίσταση στο σχίσσιμο.
- Η αντίσταση στα χτυπήματα από χαλάζι.
- Η περατότητα στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV μέχρι 0,4 nm).
- Η ευαισθησία στην συγκράτηση σκόνης. (Σάββας, 2020).

2.2. Η σημασία των υλικών κάλυψης στα θερμοκήπια

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι η κύρια πηγή ενέργειας για την φωτοσύνθεση των φυτών και έχει σαν αποτέλεσμα να επηρεάζει τις αποδόσεις των καλλιεργειών.(Langhans and Tibbitts, 1997). Ερευνητές έχουν αποδείξει ότι όταν μειώνεται η μετάδοση κατά 1% της φωτοσυνθετικής ενεργού ακτινοβολία (PAR) που διέρχεται μέσα από υλικό κάλυψης θερμοκηπίου τότε μειώνεται κατά 1% και η απόδοση της καλλιέργειας. Το ολοκλήρωμα ημερήσιου φωτός (DLI, σε $\text{mol/m}^2 \cdot \text{ημέρα}$) το οποίο είναι γνωστό ως η αθροιστική μέτρηση των συνολικών ημερήσιων φωτονίων που φθάνουν στα φυτά εξηγεί την γραμμική σχέση που υπάρχει μεταξύ του ρυθμού ανάπτυξης των φυτών και του φωτός που απαιτείται για τον κορεσμό του καθαρού φωτοσυνθετικού ρυθμού των φύλλων. (Kozai et al., 2015). Παρόλο που το θερμοκήπιο έχει την δυνατότητα να βελτιώνει τις συνθήκες καλλιέργειας μέσω της αποδοτικότερης χρήσης των θρεπτικών ουσιών και του νερού, παρόλα αυτά όμως επικρατεί μειωμένη μετάδοση του φωτός στο εσωτερικό του θερμοκηπίου γεγονός που οφείλεται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά των υλικών κάλυψης του θερμοκηπίου. (Critten and Bailey, 2002).

Για την επιλογή ενός υλικού κάλυψης σε ένα θερμοκήπιο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν διάφορες παράμετροι όπως είναι η μεταδοτικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας του υλικού

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

κάλυψης, οι μονωτικές ιδιότητες, το βάρος, η αντοχή και οι διάφορες δομικές τους ανάγκες. (Proksch, 2017). Ορισμένες από αυτές τις παραμέτρους όπως είναι για παράδειγμα η μεταδοτικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτώνται από τον χρόνο και είναι ειδικές για κάθε υλικό κάλυψης και έχουν σαν αποτέλεσμα να επηρεάζουν άμεσα το μεταβολισμό του θερμοκηπίου καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του (συμπεριλαμβανομένου του μεταβολισμού των φυτών και των αποδόσεων παραγωγής). Έτσι λοιπόν όλα αυτά τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το κλίμα και την απόδοση της καλλιέργειας από την χρήση ενός υλικού κάλυψης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν και να συγκρίνονται με κάθε εναλλακτικό υλικό κάλυψης που χρησιμοποιείται. (Max et al., 2012).

2.3. Υαλοπίνακας

Το υλικό που αποτελείται ο υαλοπίνακας και που χρησιμοποιείται για την κάλυψη του θερμοκηπίου μπορεί να διαδραματίσει πολύ σημαντικό ρόλο στο περιβάλλον του θερμοκηπίου. Αποτελεί το μόνο εμπόδιο που χωρίζει τα φυτά του θερμοκηπίου από το εξωτερικό περιβάλλον. Ανάλογα με τον τύπο του υλικού υαλοπινάκων, η κατανομή και η μετάδοση της θερμοκρασίας του αέρα, της σχετικής υγρασίας και του φωτός μπορεί να ποικίλει μέσα σε ένα θερμοκήπιο. Στις μέρες μας στα θερμοκήπια βρίσκουν εφαρμογή δύο τύποι υαλοπίνακα, είναι ο υαλοπίνακας που είναι διαφώτιστος με την μια επιφάνεια φολιδωτή η κυματοειδή και ο διαφανής με τέλεια λείες και διαφανείς και τις δύο πλευρές. (Max et al., 2012). Παρόλο που η μετάδοση του φωτός δεν ποικίλει, έχει παρατηρηθεί ότι ο διαφώτιστος υαλοπίνακας διευκολύνει περισσότερο την διάχυση του φωτός σε σχέση με τον διαφανή υαλοπίνακα. Ο διαφώτιστος υαλοπίνακας είναι κατάλληλος για τροπικά κλίματα με έντονο ηλιακό φως. (Victoria et al., 2012).

Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι στα θερμοκήπια χρησιμοποιούνται τόσο οι σκληρυμένες όσο και οι ανοπτημένες εκδόσεις γυαλιού. Παρόλα αυτά όμως το σκληρυμένο γυαλί έχει την ικανότητα να αντέχει περισσότερο στην τάση ή την συμπίεση από το ανοπτημένο γυαλί, το οποίο μπορεί να σπάσει σε μικρότερα κομμάτια που όμως πολύ σπάνια μπορεί να προκαλέσουν κίνδυνο για τους ανθρώπους. Έτσι λοιπόν, το σκληρυμένο γυαλί βρίσκει εφαρμογή στην κάλυψη της οροφής του θερμοκηπίου. Στα σύγχρονα θερμοκήπια χρησιμοποιείται τόσο το μονό όσο και το διπλό γυαλί (στρώμα αέρα μεταξύ των υαλοπινάκων). Η θερμική μετάδοση που παρουσιάζουν οι διπλοί

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

υαλοπίνακες (λόγω ενός στρώματος αέρα μεταξύ των υαλοπινάκων) είναι χαμηλότερη, το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μειωμένο κόστος θέρμανσης. Ωστόσο, το μονό γυαλί είναι αυτό που χρησιμοποιείται πιο πολύ στα σύγχρονα θερμοκήπια λόγω του χαμηλότερου κόστους σε σχέση με το διπλό γυαλί. (Wageningen, 2018).

Το μεγάλο πλεονέκτημα του υαλοπίνακα είναι ότι με το πέρασμα των χρόνων δεν φθείρεται και ταυτόχρονα διατηρεί τις ιδιότητές του. Ένας υαλοπίνακας θερμοκηπίου έχει την ικανότητα να διατηρεί και μετά από 50 χρόνια την ίδια περατότητα στο φως όπως έχει και ένας καινούριος υαλοπίνακας, γεγονός που δεν έχει την δυνατότητα να συμβεί με κανένα άλλο υλικό κάλυψης. Ακόμη το γυαλί παρουσιάζει την ικανότητα να είναι αδιαπέραστο στους υδρατμούς και τα αέρια. Η διαπερατότητα του γυαλιού κυμαίνεται σε ένα φάσμα από τα 320 έως τα 2900 nm. Έτσι λοιπόν το γυαλί είναι αδιαπέραστο στην υπεριώδη και την θερμική ακτινοβολία με μήκος κύματος μεγαλύτερο των 3000nm. Αν η επιφάνεια του υαλοπίνακα είναι σκονισμένη τότε η διαπερατότητά του μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Στην περίπτωση που η επιφάνεια του υαλοπίνακα είναι σκονισμένη τότε το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει μείωση της διαπερατότητάς του κατά 20%. Ένα σημαντικό πρόβλημα που μπορεί να εμφανίσουν τα υαλόφρακτα θερμοκήπια έχει να κάνει με την στεγανότητα, όπου προέρχεται από δυο κυρίως λόγους. Ο ένας λόγος οφείλεται στην κακή επαφή που έχουν τα σημεία στήριξης του υαλοπίνακα με τον σκελετό και ο άλλος οφείλεται στο σπάσιμο των υαλοπινάκων είτε από απροσεξία είτε από χαλάζι. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).



Εικόνα 8. Γυάλινο θερμοκήπιο. (πηγή: <https://geotechnology.gr>).

2.4. Πλαστικά φύλλα

Οι πλαστικές μεμβράνες είναι ο ποιο διαδιδόμενος τύπος κάλυψης των θερμοκηπίων. Σε αυτό σημαντικό ρόλο παίζουν το χαμηλό τους βάρος και το χαμηλό τους κόστος. Τα πλαστικά υλικά κάλυψης διακρίνονται σε μαλακά και σκληρά και διάφοροι τύποι πλαστικών μεμβρανών όπως είναι το πολυαιθυλένιο, το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και το οξικό αιθυλενοβινύλιο (EVA). Τα υλικά αυτά κάλυψης λόγω της συνεχούς εξέλιξης έχουν την ικανότητα να παρέχουν ένα ευρύ φάσμα επιλογών. Επίσης οι μεμβράνες αυτές μπορούν να χρησιμοποιούν και διάφορα πρόσθετα και να παρέχουν έτσι επιπλέον χρήσιμες ιδιότητες στο περιβάλλον του θερμοκηπίου. Για παράδειγμα ορισμένα πλαστικά κάλυψης είναι χρωματισμένα και έτσι με τον τρόπο αυτό έχουν την ικανότητα είτε να εμποδίζουν τις ακτίνες UV για το έλεγχο των παρασίτων χωρίς την χρήση φυτοφαρμάκων, είτε να μπορούν να αντανακλούν το μεγάλο μήκος κύματος υπέρυθρο φως για να διατηρούν στο εσωτερικό του θερμοκηπίου την θερμότητα κατά την διάρκεια της νύχτας. (Espejo et al., 2012).

Τα πρόσθετα νάνοσωματίδια και μικροσωματίδια στο πλαστικό έχουν σαν αποτέλεσμα να καθορίζουν την ικανότητα πρόληψης της απώλειας θερμότητας, την ικανότητα αποτροπής της προσκόλλησης σκόνης στο πλαστικό, την ικανότητα πρόληψης σχηματισμού σταγονιδίων και την ικανότητα μετάδοσης συγκεκριμένων μηκών κύματος φωτός. Οι απορροφητές UV (290 έως 400

nm) και οι σταθεροποιητές παρέχουν την ικανότητα της μεγαλύτερης αντοχής στα πλαστικά, επίσης δίνουν την δυνατότητα στα πλαστικά να ελέγξουν ορισμένες ασθένειες των φυτών και βοηθούν στην μείωση της πιθανότητας να επηρεάσουν τα βιολογικά συστήματα του θερμοκηπίου. Στην περίπτωση χρήσης απορροφητών υπερύθρων (700 έως 2500 nm), πραγματοποιείται μείωση της μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας και ελαχιστοποιείται η απώλεια θερμότητας (Allan et al., 2014). Στην περίπτωση χρήσης απορροφητών μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας (2500-40.000 nm), τα φυτά και τα συστατικά του θερμοκηπίου χάνουν λιγότερη θερμότητα. (Li, et al., 2021).

Οι δραστικές ουσίες που προστίθενται στην επιφάνεια των πλαστικών μειώνουν την επιφανειακή τάση του νερού με αποτέλεσμα να διασκορπίζεται η συμπύκνωσή του. Επίσης, οι αντιστατικές ενώσεις προκαλούν μείωση της τάσης συσσώρευσης σκόνης πάνω στα πλαστικά φύλλα. Επιπλέον, η φθορίωση των πλαστικών φύλλων έχει την ικανότητα να προωθεί την παραγωγή κόκκινου φωτός. Οι χρωστικές ουσίες έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν την αναλογία συγκεκριμένων περιοχών μήκους κύματος και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη ανάπτυξη των φυτών. Οι γυαλιστερές επιφάνειες των πλαστικών φύλλων έχουν την δυνατότητα να απωθούν τα έντομα. (Maraveas et al., 2023).

Η πολυστρωματική μέθοδος δημιουργίας ταινιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή σύνθετων πλαστικών μεμβρανών με διαφορετικές ιδιότητες. Τα χαρακτηριστικά που μπορούν να βελτιωθούν στις πλαστικές μεμβράνες είναι η σκληρότητα, η απορρόφηση της ακτινοβολίας μακρών κυμάτων και ο ερπυσμός δηλαδή η παραμόρφωσή του με την πάροδο του χρόνου. (Maraveas et al., 2023).

2.5.Εύκαμπτα πλαστικά φύλλα

2.5.1. Πολυαιθυλένιο (PE)

Το πολυαιθυλένιο είναι το υλικό που χρησιμοποιείται κατά κόρον για την κάλυψη των θερμοκηπίων. Το πολυαιθυλένιο ανακαλύφθηκε τυχαία το 1933 και αποτέλεσε έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για τα θερμοκήπια. (Gibson, 1964). Η παραγωγή του πολυαιθυλενίου γίνεται με πολυμερισμό μονομερών αιθυλενίου. Ο σχηματισμός του πολυαιθυλενίου

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

πραγματοποιήθηκε τυχαία όταν από ένα υπερθερμασμένο δοχείο δοκιμής διέρρευσε οξυγόνο και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να ενεργοποιηθεί η διαδικασία που απαιτείται για τον πολυμερισμό.(Jagger, 2008). Στον ανεπτυγμένο κόσμο η παραγωγή θερμοκηπίων ήταν περιορισμένη πριν από την ανακάλυψη του πολυαιθυλενίου και αυτό γιατί μέχρι τότε γινόταν χρήση του γυαλιού που ήταν πολύ ακριβό. Έτσι λοιπόν από την δεκαετία του 1950 άρχισε να γίνεται έντονη η χρήση του πολυαιθυλενίου στα θερμοκήπια. Το γεγονός ότι το υλικό αυτό έχει μικρό βάρος και χαμηλό κόστος βοήθησε στην επέκταση της βιομηχανίας του θερμοκηπίου σε πολλές χώρες του κόσμου. (Max et al., 2012). Στην σημερινή εποχή υπάρχουν θερμοκήπια σε περισσότερες από 115 χώρες και μάλιστα τα περισσότερα από αυτά έχουν ως υλικό κάλυψης το πολυαιθυλένιο. (Sabir and Singh,2013).

Το πολυαιθυλένιο που χρησιμοποιείται ως υλικό κάλυψης έχει υψηλή θερμική μετάδοση και χαμηλή ανθεκτικότητα. Για την μείωση της θερμικής μετάδοσης και την αύξηση της ανθεκτικότητας το υλικό αυτό περιέχει χημικά πρόσθετα όπως σταθεροποιητές υπεριώδους ακτινοβολίας, αναστολείς υπερύθρων (IR), αντιθαμβωτικά και χημικά κατά της σκόνης. Επίσης παρήχθησαν και μερικά πλαστικά φύλλα πολυαιθυλενίου τα οποία περιέχουν φθορίζουσες χρωστικές ουσίες που μετατρέπουν την ακτινοβολία υψηλής ενέργειας (π.χ. υπεριώδες φως) σε άλλα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται από τα φυτά (π.χ. μπλε και κόκκινο). Παρόλα αυτά όμως, λόγω του ότι δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα σχετικά με την αποτελεσματικότητά τους, τέτοια πλαστικά φύλλα δεν έχουν εφαρμοστεί ευρέως.(Max et al., 2012).

Στην περίπτωση που το πολυαιθυλένιο (PE) χρησιμοποιείται ως υλικό κάλυψης για θερμοκήπια τότε στο υλικό αυτό προστίθεται 2 με 3% άνθρακα έτσι ώστε να γίνεται καλύτερα η απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας. Επίσης προστίθεται έως και 10% ελαστικό βουτύλιο έτσι ώστε το πλαστικό να γίνεται πιο εύκαμπτο. Τέλος προστίθεται και 0,18% αντιοξειδωτικό.

Το πολυαιθυλένιο έχει την ικανότητα να διατηρεί τις φυσικές του ιδιότητες σε συνήθεις και σταθερές θερμοκρασίες. Στις περιπτώσεις όμως όπου επικρατούν ακραίες θερμοκρασίες όπως είναι για παράδειγμα +65°C η -40 °C τότε το υλικό αυτό ρευστοποιείται η χάνει την ελαστικότητά του αντίστοιχα. Ακόμη, όταν επικρατούν συνθήκες έντονης ακτινοβολίας τότε το υλικό αυτό μπορεί να χάσει αρκετές από τις ιδιότητές του και να καταστραφεί. Για τον λόγο αυτό είναι

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

σκόπιμο στο φύλλο πολυαιθυλενίου να προστίθεται υλικό που να το καθιστά ανθεκτικό στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία.

Γενικότερα οι ιδιότητες που παρουσιάζει το φύλλο πολυαιθυλενίου είναι οι εξής:

- Είναι περατό σε όλα τα μήκη της μεγάλου μήκους κύματος θερμικής ακτινοβολίας.
- Είναι αδιαπέραστο στους υδρατμούς και το νερό.
- Η μηχανική αντοχή του είναι πολύ καλή.
- Παρουσιάζει σχετικά καλή περατότητα στα αέρια και ιδιαίτερα στο O_2 και στο CO_2 .
- Παρουσιάζει πολύ καλή περατότητα στο φως.
- Η επιφάνεια που έχει είναι υδρόφοβη και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι υδρατμοί που συμπυκνώνονται πάνω σε αυτό να είναι υπό μορφή σταγόνων, οι οποίες στις περιπτώσεις που το υλικό αυτό δονείται πέφτουν πάνω στα φυτά.
- Η διάθεσή του στο εμπόριο γίνεται σε φύλλα μεγάλου πάχους και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα θερμοκήπια που κατασκευάζονται να είναι στεγανά και να μην υπάρχουν μεγάλες διαρροές αέρα. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

Διάφορες μορφές πολυαιθυλενίου

Το πολυαιθυλένιο λόγω του υψηλού μοριακού βάρους και της χαμηλής πυκνότητας που διαθέτει μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μορφές. α) Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE). Αυτή η μορφή πολυαιθυλενίου παρουσιάζει δομή με πολλούς κλάδους (2 με 8 άτομα άνθρακα) που συνδέονται με την κύρια αλυσίδα, όπου δίνει την δυνατότητα στο υλικό αυτό να έχει καλή αντοχή στην κρούση και χαμηλή αντίσταση στην τάση εφελκυσμού. β) Γραμμικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LLDPE). Το υλικό αυτό έχει βραχείς κλάδους και δεν συνδέεται με γειτονικές αλυσίδες. Παρουσιάζει μεγάλη ελαστικότητα και χημική αντοχή και είναι πολύ εύκαμπτο. γ) Μεταλλοκένιο γραμμικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (mLLDPE). Το υλικό αυτό έχει πιο πολύ σχέση με καταλύτες μεταλλοκενίου και εμφανίζει μια ομοιογενή κατανομή των πολυμερών μοριακών αλυσίδων. Επίσης το υλικό αυτό παρουσιάζει μεγαλύτερη ελαστικότητα, διαφάνεια, ανακυκλωσιμότητα και ταχύτητα επεξεργασίας. δ) Το αιθυλένιο - ακρυλικό βουτύλιο (EBA) και το οξικό αιθυλενοβινύλιο (EVA), τα οποία είναι συμπολυμερή

παρουσιάζουν πολύ καλή ευκαμψία, αντοχή στην κρούση, πολύ καλή επεξεργασιμότητα και υψηλή συμβατότητα με άλλα πολυμερή, πρόσθετα και πληρωτικά. (Escrig Rondan, 2018).

2.5.2. Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)

Το πολυβινυλοχλωρίδιο είναι περισσότερο γνωστό με τα αρχικά PVC και είναι ένα από τα παλαιότερα θερμοπλαστικά πολυμερή. Το υλικό αυτό άρχισε να παράγεται από τις αρχές της δεκαετίας του 1930 και από τότε η παραγωγή του ολοένα και αυξάνεται. (PVC, 2022). Μια από τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την σύνθεση του PVC είναι το χλωριούχο νάτριο. Το 43% της μάζας του πολυμερούς προέρχεται από πετροχημικές πρώτες ύλες. (Jones et al., 2022).

Στις περιπτώσεις που το υλικό αυτό εκτίθεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, περίπου στους -10°C γίνεται εύθραυστο, ενώ σε περιπτώσεις που εκτίθεται σε θερμοκρασίες πάνω από 50°C τότε αλλοιώνεται. Όταν το υλικό αυτό χρησιμοποιείται ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίων θα πρέπει να εφαρμόζονται πρόσθετα υλικά, τα οποία θα το καθιστούν πιο ανθεκτικό στις υπεριώδεις ακτινοβολίες και θα του διευρύνουν την αντοχή του σε θερμοκρασίες από -20°C έως 60°C . (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

Έτσι λοιπόν το PVC παρουσιάζει τις εξής ιδιότητες:

- Έχει μεγαλύτερη διάρκεια από το πολυαιθυλένιο.
- Παρέχει πολύ καλή περατότητα στο φως, περίπου 90%, στις περιπτώσεις που είναι καινούριο.
- Έχει μεγαλύτερη διάρκεια από το πολυαιθυλένιο.
- Παρουσιάζει περατότητα περίπου 12%, άρα αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι λιγότερο περατό στην μεγάλη μήκους κύματος ακτινοβολία από το πολυαιθυλένιο.
- Παρουσιάζει μεγαλύτερη περατότητα στους υδρατμούς από το πολυαιθυλένιο και είναι αδιαπέρατο στο νερό.
- Παρουσιάζει μικρότερη θερμοαγωγιμότητα σε σχέση με το πολυαιθυλένιο, το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το θερμοκήπιο να παρουσιάζει καλύτερη θερμομόνωση. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

2.5.3. Πολυεστερικά φύλλα

Τα πολυεστερικά φύλλα διακινούνται στην αγορά με την εμπορική ονομασία Mylar και παρουσιάζουν δύο μεγάλα πλεονεκτήματα, το ένα είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής τους που κυμαίνεται από 4 έως 7 χρόνια και το άλλο είναι η μεγάλη περατότητα στο φως που πλησιάζει εκείνη του γυαλιού. Πέρα όμως από τα πλεονεκτήματα τα πολυεστερικά φύλλα παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα όπως είναι το υψηλό κόστος. Βέβαια εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι το υψηλό κόστος αντισταθμίζεται από την μεγάλη διάρκεια ζωής τους. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

Έτσι λοιπόν οι ιδιότητες που παρουσιάζουν τα πολυεστερικά φύλλα είναι τα εξής:

- Έχει περατότητα περίπου 19% στην μεγάλη μήκους κύματος ακτινοβολία.
- Δεν επηρεάζεται από τις ακραίες θερμοκρασίες είτε πολύ υψηλές είτε πολύ χαμηλές και ως εκ τούτου έχει καλή μηχανική αντοχή και διατηρεί τις θερμικές του ιδιότητες με την πάροδο των χρόνων.
- Έχει σχετικά χαμηλό συντελεστή συστολής και διαστολής. (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

2.6. Επιφάνειες σκληρού πλαστικού

2.6.1. Ενισχυμένος πολυεστέρας

Ο ενισχυμένος πολυεστέρας προέρχεται από πολυεστέρα στον οποίο έχουν προστεθεί ίνες γυαλιού σε ποσοστό από 20 έως 34% με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν καλύτερη διάχυση του φωτός στο θερμοκήπιο και αυξημένη μηχανική αντοχή. Επίσης η προσθήκη στον πολυεστέρα ακρυλικού σε ποσοστό 15% προσδίδει στον πολυεστέρα μεγαλύτερη αντοχή. Στις περιπτώσεις έντονων χαλαζοπτώσεων ο ενισχυμένος πολυεστέρας παρουσιάζει ανθεκτικότητα. Επίσης, όταν ο πολυεστέρας περιέχει προστατευτικό τότε η διάρκεια ζωής του είναι μέχρι και δέκα χρόνια με μικρή μείωση της περατότητάς του σε φως και μέχρι 25 χρόνια σε μηχανική αντοχή. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

Το μειονέκτημα αυτού του υλικού είναι η χημική μόλυνση που προκαλείται σε αυτό, όπως επίσης και η διάβρωση που προκαλείται με την πάροδο του χρόνου στην εξωτερική του επιφάνεια.

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Η διάβρωση που υπόκειται αυτό το υλικό έχει σαν αποτέλεσμα να καταστρέφει την λεία εξωτερική επιφάνεια και ως εκ τούτου να μαζεύεται σκόνη και έτσι να μειώνεται η περατότητα του υλικού. Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος κάθε δεύτερο χρόνο εφαρμόζεται ακρυλική βαφή. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

2.6.2. Πολυκαρβονικές επιφάνειες (PC)

Οι πολυκαρβονικές επιφάνειες διακινούνται στο εμπόριο υπό την μορφή είτε διπλών τοιχωμάτων, είτε απλών αυλακωτών επιφανειών. Η χρήση των διπλών τοιχωμάτων για την κάλυψη των θερμοκηπίων έγκειται στο γεγονός ότι μειώνονται οι απώλειες θερμότητας. Το υλικό αυτό έχει υψηλό κόστος ανά μονάδα επιφάνειας αλλά παρόλα αυτά έχει την ικανότητα να εξοικονομεί ενέργεια στο θερμοκήπιο. Η περατότητα στο φως που έχει το υλικό όταν είναι καινούριο ανέρχεται στο 73 με 77%. Παρατηρείται όμως με το πέρασμα των χρόνων ότι η περατότητα στο φως μειώνεται. Πιο συγκεκριμένα επιστημονικές έρευνες έχουν αποδείξει ότι όταν οι πολυκαρβονικές επιφάνειες που εκτίθενται στην υπεριώδη ακτινοβολία για πάνω από 15 χρόνια τότε παρατηρείται μείωση στην περατότητα του φωτός πάνω από 10 %. Επίσης, το υλικό αυτό από τα πρώτα χρόνια χρήσης του παρουσιάζει και ένα κιτρίνισμα. Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος γίνεται βαφή των επιφανειών με ακρυλικό διαφανές υλικό. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

2.6.3. Ακρυλικές επιφάνειες

Το υλικό αυτό είναι διαφανές και συνήθως έχει ποικίλους χρωματισμούς ή είναι άχρωμο. Στην αγορά διακινείται είτε σε σκληρές κυματοειδείς η επίπεδες επιφάνειες είτε σε επιφάνειες διπλών τοιχωμάτων. Η περατότητα στο φως που παρουσιάζουν οι ακρυλικές επιφάνειες είναι πολύ καλή και μάλιστα παρουσιάζει και διάρκεια. Πιο συγκεκριμένα έρευνες έχουν αποδείξει ότι η μείωση της περατότητας στο φως ήταν μόνο 2% μετά από χρήση 15 χρόνων αυτών των επιφανειών. Το μοναδικό μειονέκτημα που παρουσιάζουν οι ακρυλικές επιφάνειες είναι το μεγάλο τους κόστος. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

Οι ακρυλικές επιφάνειες παρουσιάζουν ορισμένες ιδιότητες οι οποίες είναι οι εξής:

- Παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια αντοχής.

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

- Έχουν μικρό συντελεστή θερμοαγωγιμότητας ($\lambda=0,2\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή.
- Σε ακραίες θερμοκρασίες από -70°C έως $+80^{\circ}\text{C}$ δεν μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά τους. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

2.6.4. Σκληρό πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)

Η αρχική χρήση του σκληρού πολυβινυλοχλωριδίου έγινε λόγω του χαμηλού κόστους που είχε. Με την πάροδο του χρόνου η χρήση του περιορίστηκε διότι ο χρόνος που το υλικό αυτό διατηρούσε τις ιδιότητές του ήταν μικρός, σε ορισμένες περιπτώσεις έφταναν και τα δύο χρόνια. Η αποδόμηση του υλικού αυτού πραγματοποιείται πολύ γρήγορα και πολύ εύκολα από την υπεριώδη ακτινοβολία. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το υλικό να γίνεται πιο σκούρο με άμεση συνέπεια να μειώνεται η περατότητα στο φως. Η περατότητα που έχει το υλικό αυτό στο φως εξαρτάται πάρα πολύ από τα πρόσθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του αλλά και από την μέθοδο που χρησιμοποιείται για την σύνθεσή του. Έτσι λοιπόν για τον λόγω αυτό η ποιότητα ποικίλει μεταξύ των διαφόρων προϊόντων που υπάρχουν στο εμπόριο. (Μαυρογιαννόπουλος, 2001).

2.7.Πρόσθετα υλικά κάλυψης

Τα πρόσθετα υλικά κάλυψης αναμιγνύονται με τα πλαστικά υλικά κάλυψης με στόχο να προσδώσουν στα πλαστικά καλύμματα συγκεκριμένα ραδιομετρικά, μηχανικά και αγρονομικά χαρακτηριστικά. Τα πρόσθετα περιλαμβάνουν: α) Σταθεροποιητές υπεριώδους ακτινοβολίας τύπου HALS (Παρεμποδισμένοι Σταθεροποιητές Φωτός Αμίνης), οι οποίοι είναι φωτοπροστατευτικοί παράγοντες που απορροφούν τις ελεύθερες ρίζες που προκαλούνται από τη φωτοαποικοδόμηση αλλά επιτρέπουν μεγαλύτερη μετάδοση του φωτός. (Martínez, Ramirez, 2008) β) Σταθεροποιητές UV τύπου βενζοφαινόνης η νικελίου που απορροφούν την υπεριώδη ακτινοβολία και προστατεύουν από τη φωτοαποικοδόμηση. Επίσης, το υλικό αυτό έχει την ικανότητα να προκαλεί μείωση της μετάδοσης του φωτός (Ruiz et al., 2004). γ) Φωτοεκλεκτικά πρόσθετα, τα οποία επιλέγουν και μετατρέπουν ορισμένα μήκη κύματος σε άλλα (Ordaz Baldera, 2007). δ) Θερμικά πρόσθετα, τα οποία συμβάλλουν στη συγκράτηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (Espí et al., 2002) ε) Αντιθερμικά πρόσθετα, τα οποία εμποδίζουν

τη διέλευση ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων, επιτυγχάνοντας έτσι πτώση της θερμοκρασίας (González Argandar, 2010). στ) Πρόσθετα κατά των σταγόνων νερού, τα οποία αποτρέπουν τη συμπύκνωση νερού στο εσωτερικό της οροφής του θερμοκηπίου. (Martínez Ramírez, 2008). (ζ) Πρόσθετα υλικά διάχυσης, τα οποία κατανέμουν πιο ομοιόμορφα το προσπίπτον φως. (Martínez Ramírez, 2008).

2.8. Επίδραση φυτοφαρμάκων στα υλικά κάλυψης θερμοκηπίου

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των πλαστικών μεμβρανών που χρησιμοποιούνται ως υλικά κάλυψης θερμοκηπίων είναι η γήρανσή τους. Στόχος λοιπόν είναι να επιβραδυνθεί η γήρανση της πλαστικής μεμβράνης έτσι ώστε να προσδώσει στον χρήστη μια εγγύηση για την διάρκεια ζωής της. Η αποδόμηση των υλικών κάλυψης υπό την επίδραση της υπερϊώδους ακτινοβολίας έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη υλικών κάλυψης με την χρήση διαφορετικών μειγμάτων σταθεροποιητών UV που έχουν ως στόχο τα υλικά κάλυψης να έχουν διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από δύο χρόνια. (Nijssens et al., 1990).

Ένα ακόμη πρόβλημα που παρουσιάζουν τα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων είναι η συμπύκνωση σταγόνων στην εσωτερική επιφάνεια των υλικών. Έτσι λοιπόν από αυτά τα σταγονίδια νερού μπορούν να προκύψουν διάφορες ανεπιθύμητες ενέργειες όπως είναι η μείωση της μετάδοσης της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της ολικής εσωτερικής αντανάκλασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και η συνένωση μικρών σταγόνων νερού σε μεγαλύτερες να προκαλέσουν την πτώση των σταγόνων στα φυτά γεγονός που μπορεί να προκαλέσει διάφορες ασθένειες στα φυτά. Επίσης, οι σταγόνες νερού έχουν την ικανότητα να λειτουργήσουν και ως φακοί, συγκεντρώνοντας το ηλιακό φως και προκαλώντας εγκαύματα στα φυτά. Για την αποφυγή όλων αυτών των προβλημάτων τα σύγχρονα υλικά κάλυψης περιέχουν διάφορα πρόσθετα, τα οποία αποσκοπούν στην αποφυγή της πτώσης μεγάλων σταγόνων νερού. Πιο συγκεκριμένα τα επιφανειοδραστικά πρόσθετα μετακινούνται στην επιφάνεια του υλικού κάλυψης προκαλώντας το συμπύκνωμα νερού να εξαπλωθεί ομοιόμορφα πάνω στην επιφάνεια του υλικού αντί να σχηματίσει μεγάλα σταγονίδια νερού που στην συνέχεια θα πέσουν πάνω στα φυτά. (Geoola et al., 1998).

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες τα επιφανειοδραστικά πρόσθετα και τα διάφορα μείγματα σταθεροποιητών UV που χρησιμοποιούνται σε μεμβράνες πολυαιθυλενίου μπορούν να αντιδράσουν με τα φυτοφάρμακα που χρησιμοποιούνται για την καταπολέμηση των παρασίτων και ιδιαίτερα με εκείνα τα φυτοφάρμακα που περιέχουν δραστικές ενώσεις με βάση το θείο και το αλογόνο. (Dilara and Briassoulis, 2000). Άμεση συνέπεια αυτής της αλληλεπίδρασης είναι ότι οι σταθεροποιητές UV θα μπορούσαν να χάσουν την ικανότητα που έχουν για φωτοπροστασία της πλαστικής μεμβράνης και να οδηγήσει και σε απώλεια των μηχανικών ιδιοτήτων της. Από πειράματα που έχουν διεξαχθεί έχει παρατηρηθεί ότι διάφοροι συνδυασμοί φυτοφαρμάκων έχουν σαν αποτέλεσμα να περιορίζουν την διάρκεια ζωής των υλικών κάλυψης. (Dilara and Briassoulis, 1998). Πιο συγκεκριμένα τα φυτοφάρμακα που περιέχουν θείο είναι πιο επιβλαβή και προκαλούν ταχεία υποβάθμιση των υλικών κάλυψης. (Shachar et al., 1997).

Πρακτικά, το πρόβλημα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος του φυτοφαρμάκου που εφαρμόζεται, από την συχνότητα και την μέθοδο εφαρμογής, από την δομή και τον εξοπλισμό του θερμοκηπίου, από τον τύπο και το πάχος του υλικού κάλυψης, από τον τύπο και την συγκέντρωση των σταθεροποιητών UV και τέλος από τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται κατά των σταγόνων. Με την χρήση των σωστών προσθέτων, τα υλικά κάλυψης μπορούν να προστατευθούν από την χρήση φυτοφαρμάκων. (Dilara and Briassoulis, 2000).

2.9. Σταθεροποιητές πλαστικών φύλλων

Το πολυαιθυλένιο που χρησιμοποιείται ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίων φθείρεται γρήγορα καθώς εκτίθεται συνεχόμενα στους διάφορους τύπους αποσύνθεσης όπως είναι η θερμική αποδόμηση, η φωτοαποδόμηση, η μηχανική αποδόμηση και η χημική αποδόμηση. Έτσι λοιπόν υπάρχουν συστήματα σταθεροποίησης όπως είναι τα αντιοξειδωτικά και οι φωτοσταθεροποιητές που βελτιώνουν την διάρκεια ζωής των πλαστικών φύλλων. (Dilara and Briassoulis, 2000).

Θεωρητικά το πολυαιθυλένιο (PE) πρέπει να είναι φωτοοξειδωτικά σταθερό. Παρόλα αυτά όμως στην πράξη οι μεμβράνες πολυαιθυλενίου παρουσιάζουν φωτοευαισθησία λόγω της ύπαρξης ακαθαρσιών πάνω τους. Επομένως απαιτείται η λήψη ειδικών μέτρων για την προστασία των πλαστικών μεμβρανών πολυαιθυλενίου από την ηλιακή ακτινοβολία με μήκη κύματος από 290 έως 1400 nm και ιδιαίτερα από το πιο ενεργό και κατά συνέπεια και πιο επιβλαβές τμήμα της,

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

που είναι η υπεριώδης ακτινοβολία που βρίσκεται μεταξύ 290 και 400 nm. (Dilara and Briassoulis, 2000).

Οι απορροφητές UV είναι η πρώτη κατηγορία φωτοσταθεροποιητών. Η κατηγορία αυτή των χημικών ουσιών έχει την ικανότητα να απορροφά την επιβλαβή υπεριώδη ακτινοβολία άνω των 290 nm και να την εμποδίζει έτσι να φτάνει στα χρωμοφόρα. Στην συνέχεια θα πρέπει να διαχυθεί με τέτοιο τρόπο χωρίς να προκληθεί φωτοευαισθητοποίηση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω διαφόρων μηχανισμών, όπως είναι ο σχηματισμός εσωτερικών δεσμών, ή με έναν εξαιρετικά γρήγορο μη ακτινοβολούμενο εκφυλισμό από την διεγερμένη κατάσταση στην θεμελιώδη κατάσταση. (Gugumus, 1979). Παρόλα αυτά, η κατηγορία αυτή σταθεροποιητών έχει παρατηρηθεί ότι αποδίδει καλύτερα σε πιο παχιά τμήματα πλαστικών μεμβρανών (πιο παχιά από 100 μm), και η περαιτέρω ανάπτυξη μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της απόδοσης και σε πιο λεπτές πλαστικές μεμβράνες. Επίσης, οι σταθεροποιητές UV έχουν την ικανότητα να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό και με άλλους σταθεροποιητές, όπως είναι οι φωτοσταθεροποιητές με φραγμένες αμίνες (HALS) και οι απορροφητές Ni, επιτυγχάνοντας έτσι με αυτόν τον τρόπο συνέργεια στα αποτελέσματα. (Dilara and Briassoulis, 2000).

Οι απορροφητές Ni είναι η δεύτερη κατηγορία φωτοσταθεροποιητών. Η κατηγορία αυτή χημικών βελτιώνει την αντίσταση των μεμβρανών πολυαιθυλενίου στην υπεριώδη ακτινοβολία. Οι απορροφητές Ni έχουν την ικανότητα να αποδεσμεύουν τις διεγερμένες καταστάσεις των χρωμοφόρων ομάδων που είναι υπεύθυνες για την φωτοεκκίνηση μέσω μεταφοράς ενέργειας, αντί να βασίζονται στην άμεση απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα φωτοσταθεροποίησης είναι αρκετά ικανοποιητικά αρκεί να γίνει η κατάλληλη επιλογή απορροφητή Ni. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι επειδή το Ni προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον, αναμένεται ότι στο άμεσο μέλλον θα περιοριστεί η χρήση του. (Dilara and Briassoulis, 2000).

Μια Τρίτη κατηγορία φωτοσταθεροποιητών είναι οι φωτοσταθεροποιητές με φραγμένες αμίνες (HALS). Η κατηγορία αυτή χημικών στην ουσία είναι σταθερές ελεύθερες ρίζες που είναι βασισμένες σε πιπεραζίνη ή πιπεριδίνη και έχουν την ικανότητα να παγιδεύουν τις ρίζες που παράγονται από την φωτοχημική οξείδωση. (Klemchuk, 1985). Οι συγκεκριμένοι σταθεροποιητές είναι άχρωμοι, σε σχέση με τους απορροφητές Ni που μετατρέπουν τις πλαστικές μεμβράνες σε

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

κίτρινες η πράσινες. Επιπλέον, φωτοσταθεροποιητές με φραγμένες αμίνες (HALS) έχουν την δυνατότητα να επιταχύνουν την ανάπτυξη της καλλιέργειας. Επίσης, έχουν ανώτερη σταθερότητα απέναντι στο φως και την θερμότητα και δεν προκαλούν περιβαλλοντικά προβλήματα. Ωστόσο, η λειτουργία των (HALS) μπορεί να ανασταλεί σε περίπτωση χρήσης φυτοφαρμάκων που περιέχουν θείο και αλογόνα και μπορούν να έχουν επιβλαβή επίδραση στη διάρκεια ζωής της πλαστικής μεμβράνης του θερμοκηπίου. Σε πειράματα που διεξήχθησαν στο πεδίο παρατηρήθηκε ότι οι πλαστικές μεμβράνες που είχαν σταθεροποιητές (HALS) είχαν διάρκεια ζωής 33% περισσότερο από τις πλαστικές μεμβράνες που είχαν σταθεροποιητές Ni και μάλιστα είχε γίνει και χρήση διαφόρων φυτοφαρμάκων. Τέλος τα (HALS) λειτουργούν ως σταθεροποιητές θερμότητας και ελαχιστοποιούν την επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών. (Henninger, 1992).

2.10. Οπτικές και θερμομονωτικές ιδιότητες υλικών κάλυψης θερμοκηπίου

Τα υλικά κάλυψης έχουν την ικανότητα να επιτρέπουν την διέλευση του φωτός, τόσο σε ορατά όσο και σε μεγάλα υπέρυθρα μήκη κύματος, στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, επηρεάζοντας έτσι την ατμόσφαιρα του θερμοκηπίου. (Emekli et al., 2016). Για τον υπολογισμό των ραδιομετρικών συντελεστών των υλικών κάλυψης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μέγιστη στα 500 nm στη ζώνη PAR (Φωτοσυνθετικά Ενεργός Ακτινοβολία, 400 έως 700 nm), όπου απελευθερώνεται περίπου το 40% της συνολικής ενέργειας και περισσότερο από το 50% της συνολικής ενέργειας εκπέμπεται στην περιοχή της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας (NIR) (700 έως 2500 nm) (Allan et al., 2014). Ο συντελεστής μεταδοτικότητας, ο οποίος αξιολογείται στην περιοχή μήκους κύματος από 300 nm έως 2500 nm, υποδεικνύει την συνολική ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που διέρχεται από το υλικό κάλυψης. Ο συντελεστής μεταδοτικότητας στην περιοχή PAR, δείχνει πόση ηλιακή ακτινοβολία PAR μεταδίδει το υλικό κάλυψης και έχει σαν αποτέλεσμα να επηρεάζει σημαντικά την ανάπτυξη και την απόδοση των καλλιεργειών. (Castilla et al., 2012). Η ποσότητα ενέργειας που χάνεται από την υπέρυθρη ακτινοβολία μεγάλων κυμάτων ποικίλλει ανάλογα με το κατά πόσο καλά το υλικό κάλυψης έχει την ικανότητα να μεταδίδει φως σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από 3000 nm. Παρόλα αυτά, σε κανονικές θερμοκρασίες, η μέγιστη εκπομπή ενέργειας του σώματος κυμαίνεται από 7500 έως 12.500 nm. Επιπλέον, η θερμοκρασία του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο επηρεάζεται σημαντικά από την εκπομπή του υλικού κάλυψης, το

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

οποίο μετρά τη θερμική ακτινοβολούμενη ενέργεια που εκπέμπεται στη μακρά υπέρυθρη ακτινοβολία. Το θερμοκήπιο χάνει σημαντική ενέργεια εάν το υλικό κάλυψης έχει υψηλή εκπομπή. (Ravishankar et al., 2012).

Οι ραδιομετρικές ιδιότητες που παρέχουν τα υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων είναι απαραίτητες για την μείωση της χρήσης ενέργειας στο εσωτερικό των θερμοκηπίων. Η εφαρμογή υλικών κάλυψης αιχμής μπορεί να κάνει τα θερμοκήπια πιο προσοδοφόρα, να παράγει καλλιέργειες με μεγαλύτερα κέρδη και να χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια για την ψύξη και την θέρμανση των θερμοκηπίων. Η χρήση υλικών κάλυψης που έχουν την ικανότητα να αλλάζουν την φασματική κατανομή του ηλιακού φωτός και έτσι με αυτόν τον τρόπο να επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών μπορεί να οδηγήσει στην αντικατάσταση της χρήσης αγροχημικών. (Barichello et al., 2021).

2.10.1 Οπτικές ιδιότητες υλικών κάλυψης θερμοκηπίων

Στις μέρες μας η βιομηχανία πλαστικών υλικών κάλυψης θερμοκηπίου βρίσκεται σε πλήρη άνθιση με αποτέλεσμα να υπάρχει διαθέσιμη στην αγορά μια τεράστια ποικιλία πλαστικών μεμβρανών. Τα πλαστικά υλικά αυτά παράγονται σε διάφορα μείγματα και διαφέρουν στην χημική τους σύσταση. Έτσι λοιπόν με βάση τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, τα υλικά αυτά διαφέρουν ως προς την πυκνότητα, τη θερμική διαστολή, τις καιρικές συνθήκες και την ευαισθησία στην δύναμη εφελκυσμού. Επίσης, η δομή μπορεί να είναι κατασκευασμένη από άμορφη, ημικρυσταλλική ή συνδυασμένη δομή. Επομένως τα οπτικά και θερμικά χαρακτηριστικά των πλαστικών μεμβρανών ποικίλλουν ανάλογα με τις χημικές και φυσικές τους ιδιότητες. Έτσι λοιπόν ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα ακτινοβολίας μέσα από κάθε υλικό είναι διαφορετικός. Παρόλα αυτά όμως συνεχίζει να υπάρχει μια έλλειψη πληροφοριών σχετικά με τις ακριβείς οπτικές και θερμικές ιδιότητες των σημερινών πλαστικών μεμβρανών. (Al-Mahdouri et al., 2013).

Για τον προσδιορισμό των οπτικών ιδιοτήτων των πλαστικών φύλλων υπάρχουν πολλές διαφορετικές μαθηματικές και πειραματικές μέθοδοι. Για να προσδιοριστούν οι ιδιότητες ακτινοβολίας θα πρέπει να γίνει μέτρηση της διάχυτης διαπερατότητας, της ανάκλασης και εκπομπής με διαφορετικές μεθόδους δοκιμής για διαφορετικά υλικά κάλυψης θερμοκηπίου.

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

(Papadakis et al., 2000). Σε έρευνα που έχει διεξαχθεί υπολογίστηκαν οι θερμικές ιδιότητες διαφόρων πλαστικών κάλυψης μετρώντας την εκπομπή, την μετάδοση και την ανάκλαση μέσω αυτοανεπτυγμένων συσκευών ανταλλαγής θερμότητας. (Horiguchi, et al., 1982).

Σε πολλές μελέτες χρησιμοποιείται η μέθοδος της φασματοσκοπικής ελλειψομετρίας για να προσδιοριστεί ο φασματικός δείκτης διάθλασης των λεπτών ταινιών και φύλλων. Πιο συγκεκριμένα σε έρευνα που διεξήχθη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της φασματοσκοπικής ελλειψομετρίας για να βρεθούν οι υπέρυθρες σταθερές ενός φύλλου πολυτετραφθοροαιθυλενίου (PTFE ή Teflon). (Korte and Roseler, 2003). Ένας σημαντικός περιορισμός της φασματοσκοπικής ελλειψομετρίας είναι η ανάγκη να μελετηθούν οι λεπτές ταινίες που είναι επικαλυμμένες σε υπόστρωμα, π.χ. σε πυρίτιο ή γυάλινα πλακίδια επικαλυμμένα με χρυσό, ή να παρασκευαστούν ως ελεύθερες ταινίες πάχους 12–15 μm , οι οποίες είναι λεπτότερες από το πραγματικό υλικό κάλυψης θερμοκηπίου (Gioti et al., 2004).

Το πλαστικό περιέχει αρκετές αιχμές συντονισμού στις υπέρυθρες φασματικές περιοχές. Η πολυπλοκότητα αυτή μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση της μεθόδου φασματοσκοπικής φωτομετρίας. Οι μετρήσεις διαπερατότητας έχουν την ικανότητα να βοηθούν στον προσδιορισμό των οπτικών σταθερών μέσω της μεθόδου του μέσου όρου ζώνης. (Rubin, 1982). Μια άλλη μέθοδος που αναπτύχθηκε ήταν η μέθοδος Σχετικής Βάθους Παρεμβολής Διαπερατότητας για να προσδιορίζεται ο δείκτης διάθλασης για διάφορα πλαστικά υλικά. Παρόλα αυτά, αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύ λεπτά πλαστικά υλικά, όπου τα φαινόμενα παρεμβολής μπορούν να παρατηρηθούν με σαφήνεια. (Zhang and Ge, 1995).

Λεπτές ταινίες PVC, αναλύθηκαν φασματοσκοπικά με την μέθοδο μετασχηματισμού Φουριέ στην υπέρυθρη περιοχή (FTIR), και η παρεμβολή στα φάσματα μετάδοσης έχει την ικανότητα να προσδιορίζει το πάχος τους και το μέσο δείκτη διάθλασης. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας τη σχέση διασποράς χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Kramers–Kronig (KK), μπορούν να εκτιμηθούν ο δείκτης διάθλασης (n) και ο δείκτης απορρόφησης (k) σε ολόκληρη την περιοχή του μέσου υπέρυθρου φάσματος. (Graf et al., 1985).

Σε διάφορες μελέτες χρησιμοποιούν σφαίρες ολοκλήρωσης για να μετρήσουν την ημισφαιρική διάχυτη ανακλαστικότητα και διαπερατότητα διαφόρων πολυμερών μεμβρανών.

(Nikolon and Ivanov, 2000). Οι Oreski et al. (2008) χρησιμοποίησαν μια σφαίρα ολοκλήρωσης για να προσδιορίσουν τις ιδιότητες του υπέρυθρου μέσω της μεθόδου διαφοράς διαπερατότητας/ανακλαστικότητας που χρησιμοποιείται για διαφανείς και ημι-διαφανείς μεμβράνες.

2.10.2.Θερμομονωτικές ιδιότητες υλικών κάλυψης θερμοκηπίων

Οι θερμικές ιδιότητες των υλικών κάλυψης έχουν την ικανότητα να επηρεάζουν άμεσα το περιβάλλον ενός θερμοκηπίου. Μελέτες έχουν αποδείξει την ικανότητα των υλικών κάλυψης να μεταφέρουν την ηλιακή ακτινοβολία. Ως γνωστόν η ηλιακή ακτινοβολία είναι η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας και έχει την μεγαλύτερη επίδραση στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν διάφορα μοντέλα για να ελέγξουν πως τα υλικά κάλυψης επηρεάζουν την μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας. (Kurata, 1991).

Το πολυαιθυλένιο έχει την ικανότητα να μεταφέρει την υπέρυθρη ακτινοβολία πιο αποτελεσματικά από το γυαλί και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το θερμοκήπιο να διατηρεί λιγότερη θερμότητα. Όλες οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με το περιβάλλον του θερμοκηπίου περιλαμβάνουν δεδομένα σχετικά με την ανταλλαγή θερμικής ακτινοβολίας. (Nijssens, et al., 1984). Για την ανταλλαγή της θερμικής ακτινοβολίας πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν οι ιδιότητες των υλικών κάλυψης. (Silva et al., 1991).

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μέσω ενός διάφανου υλικού κάλυψης τότε πραγματοποιείται το φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπου η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και παγιδεύεται και στη συνέχεια δεν μπορεί να φύγει από το θερμοκήπιο ως θερμική ακτινοβολία επειδή το κάλυμμα είναι αδιαφανές στη θερμική ακτινοβολία. Όταν χρησιμοποιείται ως υλικό κάλυψης το πολυαιθυλένιο τότε παρατηρείται υψηλή μετάδοση θερμικής ακτινοβολίας. (Papadakis et al., 1994).

Επίσης η θερμοκρασία του υλικού κάλυψης κατά την διάρκεια της ημέρας αυξάνεται καθώς μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας απορροφάται από το υλικό κάλυψης. Ο ρυθμός με τον οποίο θερμαίνεται ο εσωτερικός αέρας του θερμοκηπίου καθώς έρχεται σε επαφή με αυτές τις επιφάνειες ποικίλλει και εξαρτάται από διάφορα χαρακτηριστικά, όπως είναι η ταχύτητα ανταλλαγής αέρα, η διαφορά θερμοκρασίας και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.(

Papadakis,1989). Το υλικό κάλυψης πολυαιθυλενίου απελευθερώνει θερμική ενέργεια στο περιβάλλον του για να ανταλλάξει ενέργεια με τον εξωτερικό και εσωτερικό αέρα κατά την διάρκεια της νύχτας. Κατά την διάρκεια των νυχτερινών ωρών όπου επικρατεί δροσιά το υλικό κάλυψης χάνει θερμότητα με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του να είναι χαμηλότερη από την θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι χαμηλότερη από την θερμοκρασία του αέρα στο εξωτερικό περιβάλλον λόγω της μεταφοράς στο υλικό κάλυψης χαμηλότερης θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία του υλικού κάλυψης παραμένει χαμηλότερη από εκείνη του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκήπιο επειδή ο ρυθμός απώλειας θερμότητας ακτινοβολίας μεγάλου κύματος από το κάλυμμα είναι μεγαλύτερος από την θερμότητα που μεταφέρεται από τον αέρα. (Silva et al., 1991).

2.11. Μηχανικές ιδιότητες πλαστικών φύλλων

2.11.1 Συνθήκες φόρτισης

Οι κατασκευές θερμοκηπίων σχεδιάζονται σύμφωνα με τις τυπικές διαδικασίες σχεδιασμού που εφαρμόζονται στους αντίστοιχους συμβατικούς τύπους κατασκευών (π.χ. μεταλλικές κατασκευές). Ομοίως, οι δυνάμεις που επενεργούν στα θερμοκήπια υπολογίζονται σύμφωνα με τα αντίστοιχα πρότυπα για συμβατικές κατασκευές πολιτικών έργων. Παρόλα αυτά, οι ιδιαιτερότητες που σχετίζονται με τις κατασκευές θερμοκηπίων έχουν οδηγήσει επίσης στη διαμόρφωση ειδικών προτύπων για θερμοκήπια που εκδίδονται σε εθνικό επίπεδο από ορισμένες χώρες. (Briassoulis et al., 1997a).

Τα πιο σημαντικά φορτία που λαμβάνονται υπόψη για την κατασκευή των θερμοκηπίων είναι τα φορτία ανέμου, τα φορτία από το χιόνι και το χαλάζι. Επίσης είναι τα φορτία εξοπλισμού και τα φορτία στήριξης των φυτών. Όσον αφορά τα υλικά κάλυψης, οι συνθήκες φόρτισης σχετίζονται με τον σχεδιασμό και την συμπεριφορά των υλικών κάλυψης με δύο τρόπους.

α) Άμεσα: τα φορτία μεταφέρονται από το υλικό κάλυψης, το οποίο λειτουργεί ως ένα δομικό στοιχείο που μεταφέρει φορτία. Έτσι λοιπόν, σε περίπτωση που τα φορτία προέρχονται από χαλάζι, το γεγονός αυτό μπορεί να σχετίζεται με την ανθεκτικότητα του υλικού κάλυψης στην πρόσκρουση. Σε περίπτωση που τα φορτία προέρχονται από τον άνεμο και το χιόνι τότε το γεγονός

αυτό μπορεί να σχετίζεται με τις ιδιότητες κάμψης, διάτμησης, σχισίματος και τάσης, και ενδεχομένως με τη δυναμική συμπεριφορά του υλικού. (Briassoulis et al., 1997a).

β) Έμμεσα: τα φορτία μεταφέρονται από το υλικό κάλυψης στο δομικό πλαίσιο του θερμοκηπίου μέσω της ανάπτυξης μηχανισμών μεταφοράς και ανακατανομής φορτίου. Οι λεπτομέρειες της εγκατάστασης του υλικού κάλυψης μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά το φορτίο που τελικά μεταφέρεται στα δομικά στοιχεία του συστήματος θερμοκηπίου. (Briassoulis et al., 1997a).

Υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις θερμοκηπίων και κυρίως τύπου τούνελ, όπου η θετική πίεση του ανέμου έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια επαφής μεταξύ του υλικού κάλυψης και μέρους της δομής του σκελετού του θερμοκηπίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το συνολικό φορτίο να μεταφέρεται στη δομή του σκελετού του θερμοκηπίου και στην θεμελίωση μέσω του μέρους του υλικού κάλυψης που βρίσκεται υπό αρνητική πίεση. (Hoxey and Robertson, 1993). Κατά την διαδικασία αυτή το υλικό κάλυψης αναλαμβάνει τόσο την μεταφορά του φορτίου (άμεσα), όσο και την ανακατανομή του φορτίου (έμμεσα). Οι λεπτομέρειες της προσαρμογής του υλικού κάλυψης στο σκελετό του θερμοκηπίου και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού κάλυψης μπορούν να επηρεάσουν τους μηχανισμούς μεταφοράς και ανακατανομής του φορτίου που αναπτύσσονται από το υλικό κάλυψης. (Briassoulis et al., 1997a).

Στα θερμοκήπια που η κάλυψή τους γίνεται με άκαμπτα ή ημι-άκαμπτα υλικά κάλυψης, τα υλικά αυτά μπορούν επίσης να μεταφέρουν την διάτμηση στο επίπεδο του πλαισίου (λειτουργώντας ως πάνελ διάτμησης), συμβάλλοντας έτσι με αυτόν τον τρόπο στην συνολική δομική απόδοση του θερμοκηπίου. (Briassoulis et al., 1997a).

2.11.2. Στατική σχεδίαση

Η πιο σημαντική λειτουργία της δομής του θερμοκηπίου και της κάλυψης είναι η προστασία των φυτών από τον άνεμο, την βροχή, το χαλάζι, το χιόνι, τις χαμηλές θερμοκρασίες, τους εχθρούς και τις ασθένειες. Επίσης θα πρέπει τα θερμοκήπια που κατασκευάζονται να έχουν μέγιστη ένταση φυσικού φωτός στο εσωτερικό τους, αυτό αφορά κυρίως περιοχές με χαμηλά επίπεδα φυσικού φωτισμού, όπως είναι για παράδειγμα η Βόρεια Ευρώπη. Επομένως, τα θερμοκήπια θα πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο που να προκαλούν την μικρότερη σκιά

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

στο εσωτερικό τους. Τα υλικά κάλυψης θα πρέπει να υποστηρίζονται όσο το δυνατό από μικρότερη επιφάνεια και να παρέχουν την μεγαλύτερη δυνατή διαφάνεια φωτός. Έτσι λοιπόν, τόσο οι δομές του θερμοκηπίου όσο και τα δομικά στοιχεία, περιλαμβανομένης και του υλικού κάλυψης, θα πρέπει να είναι αρκετά ισχυρά ώστε να αντέχουν στα φορτία από χιόνι, άνεμο, καλλιέργειες και εξοπλισμό και να παρέχουν έτσι ασφάλεια. Η ανάγκη για δομική σταθερότητα και προστασία έρχεται σε αντίθεση με την απαίτηση για μέγιστη διαφάνεια φωτός. Συμπερασματικά λοιπόν, ο τελικός σχεδιασμός ενός θερμοκηπίου θα πρέπει να αντιπροσωπεύει μια ισορροπία που να ενσωματώνει:

- Τον συνολικό δομικό σχεδιασμό και τις ιδιότητες των επιμέρους δομικών στοιχείων.
- Τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών κάλυψης που καθορίζουν τη δομική και τη λειτουργική συμπεριφορά τους.
- Την θερμοκρασία και το φως που απαιτείται για την εκάστοτε καλλιέργεια σε συνδυασμό με τις φυσικές ιδιότητες του υλικού κάλυψης. (Briassoulis et al., 1997a).

Γυαλί

Στην περίπτωση που το γυαλί χρησιμοποιείται ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίων τότε αναμένεται να υποστεί σοβαρή φόρτιση από τον άνεμο, το χαλάζι και το χιόνι. Έρευνες έχουν αποδείξει ότι η διάρκεια ζωής και η συμπεριφορά του γυαλιού εξαρτώνται από το μέγεθος του γυαλιού, το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί και από το ιστορικό φόρτισης. Οι διαστάσεις που έχουν τα πάνελ γυαλιού είναι περιορισμένες και αυτό λόγω της ευθραυστότητας του υλικού. Επίσης, οι διαστάσεις εξαρτώνται από το πάχος του πάνελ γυαλιού. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ανάγκη ύπαρξης περισσότερων δομικών στοιχείων για την στήριξη των μικρών πάνελ γυαλιού και ταυτόχρονα βαρύτερα στοιχεία λόγω των απαιτήσεων εγκατάστασης. (Briassoulis et al., 1997a).

Ημι-εύκαμπτα υλικά κάλυψης

Τα ημι-εύκαμπτα πλαστικά φύλλα που χρησιμοποιούνται ως υλικά κάλυψης θερμοκηπίων είναι αρκετά ελαφριά και διατίθενται σε μεγάλες διαστάσεις. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι ανάλογα με την δομική συμπεριφορά των πλαστικών πάνελ υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης υπάρχει η πιθανότητα να επιβληθεί περιορισμός των διαστάσεων. Γενικότερα η χρήση των ημι-

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

εύκαμπτων υλικών κάλυψης έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ελαφρών δομών με καλή διαπερατότητα στο φως. Τα διπλά πλαστικά φύλλα PMMA εφαρμόζονται κυρίως σε θερμοκήπια που παρουσιάζουν μεγαλύτερο άνοιγμα στην οροφή και στις πλευρικές όψεις. (Briassoulis et al., 1997a).

Πλαστικά υλικά

Τα πλαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται ως υλικά κάλυψης θερμοκηπίων είναι εύκαμπτα και διατίθενται σε πλάτη 10 με 12 μέτρα. Οι πλαστικές μεμβράνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα σχήματα και τύπους θερμοκηπίων και δεν έχουν την ανάγκη ισχυρών δομικών εξαρτημάτων. Οι περιορισμοί στην οποία υπόκεινται οι πλαστικές μεμβράνες στην περιοχή που δεν υποστηρίζονται σχετίζονται με την αντοχή της σε χαλάζι και άλλες στατικές ή δυναμικές φορτίσεις, σε θερμικές μεταβολές, την ικανοποιητική διαστολή της μεμβράνης και τις απαιτήσεις στερέωσης της πλαστικής μεμβράνης στην δομή του θερμοκηπίου. Επίσης, ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας έχει να κάνει με τους μηχανισμούς μεταφοράς και ανακατανομής των φορτίων που αναπτύσσονται από την πλαστική μεμβράνη κατά τη μεταφορά των φορτίων στη δομή του θερμοκηπίου. (Briassoulis et al., 1997a).

2.11.3. Εγκατάσταση

Η εγκατάσταση του υλικού κάλυψης στη δομή του θερμοκηπίου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην συνολική μηχανική απόδοση της κάλυψης. Για τον λόγο αυτό οι λεπτομέρειες της εγκατάστασης της κάλυψης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν για την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού κάλυψης. (Briassoulis et al., 1997a).

Γυαλί

Η σωστή χρήση του γυαλιού ως υλικού κάλυψης θερμοκηπίων το κάνει να είναι ανθεκτικό, αλλά ταυτόχρονα το γυαλί είναι και ένα εύθραυστο υλικό. Για να περιοριστούν οι όποιες πιθανότητες θραύσης των γυάλινων καλύψεων των θερμοκηπίων θα πρέπει να εφαρμόζονται κανόνες σχεδίασης στη δομή των γυάλινων πάνελ. (Briassoulis et al., 1997a).

Επίσης, για να παρέχονται οι κατάλληλες συνθήκες στήριξης για τα γυάλινα πάνελ, δίνονται κανόνες για τις αυλακώσεις στις ράβδους του γυαλιού, κ.λπ. Ακόμη δίνονται διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού για τα γυάλινα πάνελ ανάλογα με το αν στηρίζονται σε 2, 3 ή 4 πλευρές. Η αντοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αναλογία μήκους/πλάτους του πάνελ και από το πάχος του πάνελ, αλλά το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο πάχος είναι τα 4 χιλιοστά. (Briassoulis et al., 1997a).

Ημι-εύκαμπτα πλαστικά φύλλα

Στην περίπτωση των ημι-εύκαμπτων πλαστικών φύλλων εφαρμόζεται το Ολλανδικό πρότυπο, το οποίο έχει σαν στόχο τον περιορισμό της παραμόρφωσης των δομικών στοιχείων που υποστηρίζουν τα ημι-εύκαμπτα πλαστικά φύλλα. Έτσι λοιπόν αυτό το πρότυπο θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν τους περιορισμούς κάμψης του ημι-εύκαμπτου πλαστικού φύλλου και την θερμική διαστολή και συστολή του υλικού, λαμβάνοντας υπόψιν τις συνθήκες του θερμοκηπίου. Για τα ανοιχτόχρωμα στοιχεία οι θερμοκρασίες θα πρέπει να κυμαίνονται από 0 °C έως 40 °C και για τα σκουρόχρωμα στοιχεία οι θερμοκρασίες θα πρέπει να κυμαίνονται από 0 °C έως 60 °C. (Briassoulis et al., 1997a).

Πλαστικά υλικά

Οι πλαστικές μεμβράνες τοποθετούνται στην δομή του θερμοκηπίου με διάφορους τρόπους. Ένας γενικός τρόπος τοποθέτησης των πλαστικών μεμβρανών είναι η τοποθέτησή τους πάνω στην δομή του θερμοκηπίου με τη βοήθεια πλαστικών ή αλουμινένιων σφικτήρων ή κλιπς. Ένα πιθανό πρόβλημα του συγκεκριμένου τρόπου σύνδεσης έχει να κάνει με την δύναμη που πρέπει να εφαρμοστεί στους σφικτήρες ή τα κλίπς ή την δυνατότητα αποδέσμευσής τους. Ένα άλλο πρόβλημα σχετίζεται με τις αιχμηρές άκρες που μπορεί να έχουν κάποια κλιπς με αποτέλεσμα να προκαλούν το σχίσσιμο της πλαστικής μεμβράνης. Πάντως υπάρχουν ειδικοί σχεδιασμένοι ισχυροί σφικτήρες, οι οποίοι για να εφαρμοστούν σωστά απαιτούν η μεμβράνη να είναι συγκολλημένη σε όλο το μήκος των πλευρών του θερμοκηπίου. Βέβαια το κόστος αυτών των σφικτήρων είναι μεγαλύτερο. Στις περιπτώσεις ξύλινων θερμοκηπίων οι πλαστικές μεμβράνες στερεώνονται στα ξύλινα δομικά στοιχεία με τη βοήθεια σανίδων που καρφώνονται μαζί με τη μεμβράνη πάνω στα δομικά στοιχεία. Στα σημεία που η πλαστική μεμβράνη

καρφώνεται υπάρχει η πιθανότητα σχισίματος με την βοήθεια ισχυρών ανέμων. Στις περιπτώσεις των μεταλλικών θερμοκηπίων όπου η πλαστική μεμβράνη στερεώνεται με καρφίτσες στα δομικά στοιχεία του θερμοκηπίου προβλήματα σχισίματος της πλαστικής μεμβράνης παρατηρούνται στα σημεία που η μεμβράνη διατρύπате από τις καρφίτσες με την βοήθεια ισχυρού ανέμου. (Briassoulis et al., 1997a).

Η εξωτερική θερμοκρασία κατά την εγκατάσταση της πλαστικής μεμβράνης είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν και έχει να κάνει με το κατάλληλο τέντωμα της πλαστικής μεμβράνης πάνω από την δομή του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με κανονισμούς που έχουν υιοθετηθεί από την Ολλανδία η εγκατάσταση της πλαστικής μεμβράνης δεν επιτρέπεται όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι κάτω από 4°C. Στην περίπτωση που η πλαστική μεμβράνη εγκαθίσταται όταν η θερμοκρασία είναι από 5 έως 10 °C, τότε είναι απαραίτητο στην πορεία και με την αύξηση της θερμοκρασίας να τεντωθεί η μεμβράνη. (Briassoulis et al., 1997a).

2.12. Αξιολόγηση μηχανικών ιδιοτήτων υλικών κάλυψης

Για την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών κάλυψης που χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι. Οι μέθοδοι αυτοί περιλαμβάνουν μετρήσεις των γενικών ιδιοτήτων των πλαστικών υλικών όπως είναι η πυκνότητα και οι διαστάσεις. Έτσι λοιπόν έχουν οριστεί ορισμένα εθνικά πρότυπα σχετικά με τα υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων. Αυτά τα πρότυπα είναι το ιταλικό UNI 9298 (Άχρωμο διαφανές πλαστικό υλικό κατάλληλο για θερμοκήπια και παρόμοιο εξοπλισμό για την καλλιέργεια λαχανικών, φρούτων και ανθοκομίας. Απαιτήσεις και μέθοδοι δοκιμής) και το γαλλικό NFT 54-190 (Πλαστικά υλικά, μεμβράνες για τη γεωργία, προδιαγραφές και μέθοδοι δοκιμής). Επίσης υπάρχει και ένα Ευρωπαϊκό πρότυπο το οποίο αναφέρεται ως Σχέδιο CEN-TC 249. Πάνω σε αυτά τα τρία πρότυπα γίνεται η αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών κάλυψης των θερμοκηπίων. (Dilara and Briassoulis, 1998).

Οι μηχανικές ιδιότητες των πλαστικών φύλλων αφορούν κυρίως:

- Την πυκνότητά τους.
- Τις διαστάσεις τους.

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

- Την δοκιμή εφελκυσμού τους.
- Την αντοχή τους στην κρούση.
- Την αντοχή τους στο χαλάζι.
- Τον ερπυσμό τους.
- Την αντοχή τους στο σχίσιμο.
- Την αντοχή τους στην σκληρότητα.,
- Την αντοχή τους στην τριβή. (Dilara and Briassoulis, 1998).

Πυκνότητα

Η πυκνότητα των πλαστικών υλικών είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος διότι πολλές από τις ιδιότητες του υλικού ποικίλουν ανάλογα με την πυκνότητά του. Επίσης η πυκνότητα είναι και ένδειξη της κρυσταλλικότητας του υλικού. Έτσι λοιπόν τα πλαστικά φύλλα με μεγαλύτερη κρυσταλλικότητα θα παρουσιάσουν και μεγαλύτερη πυκνότητα από τα πλαστικά φύλλα που έχουν μικρότερη κρυσταλλικότητα. Επίσης τα υλικά που προστίθενται στις πλαστικές μεμβράνες όπως είναι οι χρωστικές, τα αντιοξειδωτικά κτλ. έχουν σαν αποτέλεσμα να επηρεάζουν και την πυκνότητα των πλαστικών υλικών. (Dilara and Briassoulis, 1998). Η πυκνότητα για παράδειγμα στο πολυαιθυλένιο κυμαίνεται από 0,910 έως 0,935 g/cm³. (Mills, 1993).

Διαστάσεις

Η μέτρηση των διαστάσεων των πλαστικών μεμβρανών είναι σχετικά απλή και μάλιστα η ακριβής μέτρηση του πάχους των υλικών είναι πολύ σημαντική επειδή από αυτήν την μέτρηση εξαρτώνται και άλλες ιδιότητες των πλαστικών υλικών όπως είναι η αντοχή στην κρούση, η αντίσταση στην διάδοση του σχισίματος, η επιμήκυνση κατά την θράυση κτλ. Υπάρχουν επτά κατηγορίες πάχους: ≥ 50 , ≥ 70 , ≥ 80 , ≥ 100 , ≥ 150 , ≥ 180 και ≥ 200 μm με διαφορετικές αποδεκτές τιμές τουλάχιστον για ορισμένες από τις ιδιότητες κάθε κατηγορίας. Γενικά, το πάχος των πλαστικών υλικών πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (LDPE) κυμαίνεται συνήθως από 50 μm έως περισσότερο από 200 μm και η τάση είναι οι μεμβράνες να είναι λεπτότερες έτσι ώστε όταν αποδομούνται να παράγουν λιγότερα απόβλητα. (Dilara and Briassoulis, 1998).

Δοκιμή εφελκυσμού

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Η δοκιμή εφελκυσμού είναι η συνηθέστερη μέθοδος με την οποία προσδιορίζεται η αντοχή ενός υλικού. Ουσιαστικά παρέχει μια μέτρηση της ικανότητας ενός υλικού να αντέχει σε δυνάμεις που ασκούνται με αντίθετη φορά και τείνουν να επιμηκύνουν το υλικό μέχρι να σπάσει.

Έτσι λοιπόν καθώς αυξάνεται η πυκνότητα του πλαστικού υλικού κάλυψης και η αντοχή στον εφελκυσμό, όπως και η ακαμψία, ταυτόχρονα μειώνεται η ευκαμψία και η επιμήκυνση.(Powell, 1977). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι κρυσταλλικές περιοχές αυξάνουν σημαντικά τόσο την ικανότητα του πλαστικού να υποστηρίξει φορτία σε υψηλές θερμοκρασίες, όσο και το μέτρο ελαστικότητας. (Gruenwald, 1992). Επίσης παρατηρείται ενίσχυση της πλαστικής μεμβράνης λόγω του μοριακού προσανατολισμού που μεταδίδεται κατά τη διάρκεια της εμφύσησης του υλικού. Το γεγονός αυτό συμβαίνει επειδή, σε μοριακό επίπεδο, οι ιδιότητες εφελκυσμού είναι υψηλότερες προς την κατεύθυνση της ομοιοπολικά συνδεδεμένης αλυσίδας άνθρακα-άνθρακα από ό,τι στην εγκάρσια κατεύθυνση που επικρατούν πολύ ασθενέστεροι δεσμοί van der Waals. Επειδή οι κρύσταλλοι των μεμβρανών LDPE είναι κατά προτίμηση προσανατολισμένοι παράλληλα προς την κατεύθυνση του μηχανήματος, το φορτίο που εφαρμόζεται στην κατεύθυνση του μηχανήματος μπορεί να αποδώσει υψηλότερες τιμές αντοχής εφελκυσμού από το φορτίο που εφαρμόζεται κάθετα προς αυτή την κατεύθυνση. (Gruenwald, 1992). Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι, όχι μόνο η κατεύθυνση της μεμβράνης, αλλά και οι παράμετροι της διαδικασίας, όπως η θερμοκρασία τήξης, ο λόγος έλξης, το ύψος και οι συνθήκες ψύξης μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες μεταξύ δύο μεμβρανών με την ίδια σύνθεση. (Patel et al., 1994).

Το μέτρο ελαστικότητας του LDPE κυμαίνεται μεταξύ 96,5 και 262 MPa και η αντοχή του στον εφελκυσμό κυμαίνεται μεταξύ 4,1-15,9 MPa. (Powell, 1977). Σε άλλες μελέτες έχει αναφερθεί ότι το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται μεταξύ 113 και 230 MPa και η αντοχή στο εφελκυσμό κυμαίνεται μεταξύ 11 και 37,9 MPa.(Briassoulis et al., 1997b). Το LDPE, παρά τις μεγάλες διακυμάνσεις που παρουσιάζει στις τιμές εφελκυσμού, εξακολουθεί να είναι ένα από τα ασθενέστερα πλαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται ως κάλυψη θερμοκηπίων (όσον αφορά την αντοχή στον εφελκυσμό). Η επιμήκυνση κατά τη θραύση είναι μεγάλη και επίσης ποικίλλει σημαντικά (90–800%). (Patel et al., 1994).

Αντοχή στην κρούση

Αντοχή στην κρούση είναι η ικανότητα του πλαστικού υλικού να απορροφά ενέργεια κρούσης. Η ενέργεια κρούσης αποτελείται από δύο μέρη: α) την ενέργεια που καταναλώνεται για την παραμόρφωση ενός ορισμένου όγκου του υλικού και (β) την ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση δεσμών. (Dilara and Briassoulis, 1998).

Η αντοχή του LDPE στην κρούση, έχει μετρηθεί με την μέθοδο των βελών ελεύθερης πτώσης και έχει βρεθεί σε δύο περιπτώσεις, ότι είναι 260 και 881 g (για μεμβράνη πάχους 0,20 mm). (Briassoulis et al., 1997). Η αντοχή στην κρούση εξαρτάται από τον προσανατολισμό του υλικού, την τραχύτητα της επιφάνειας, τα πρόσθετα υλικά των μεμβρανών και από τις συνθήκες επεξεργασίας. Επίσης, η αντοχή των πλαστικών στην κρούση εξαρτάται και από το πάχος του υλικού. (Vishu, 1984). Επομένως, η αντοχή στην κρούση μπορεί να συγκριθεί μόνο μεταξύ δειγμάτων που δεν διαφέρουν περισσότερο από 10% σε πάχος. Σε γενικές γραμμές το πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE) έχει καλή σκληρότητα που μειώνεται με την πυκνότητα του υλικού. (Dilara and Briassoulis, 1998).

Αντοχή σε χαλάζι

Παρόλο που η αντοχή στην κρούση είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα για μέτρηση, το πλήθος των γεγονότων που συμβαίνουν κατά την διάρκεια της πρόσκρουσης έχουν σαν αποτέλεσμα οι τιμές που λαμβάνονται να είναι εφαρμόσιμες μόνο σε περιορισμένες συνθήκες. Έτσι λοιπόν έχει αναπτυχθεί μια ειδική μέθοδος δοκιμών στο ινστιτούτο TNO στο Delf της Ολλανδίας όπου γίνονται μετρήσεις αντοχής σε χαλάζι σε πλαστικά υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή πάνω στην οροφή ενός θερμοκηπίου ρίχνονται τυχαία μπάλες από νάιλον. Ως υλικό αναφοράς ορίζεται μόνο το γυαλί που έχει πάχος 4mm και όλα τα άλλα υλικά συγκρίνονται με αυτό. Έτσι λοιπόν η αντίσταση στη κρούση χρησιμοποιείται και ως αντίσταση στο χαλάζι. (Waaijenberg, 1985).

Ερπυσμός

Ερπυσμός ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο στο πλαστικό υλικό στο οποίο ασκείται μια σταθερή δύναμη εκδηλώνεται αργή και συνεχής παραμόρφωση παρότι η τάση η οποία το

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

καταπονεί είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού. Ο ερπυσμός εκφράζεται ως το ποσοστό επέκτασης (ερπυσμός παραμόρφωσης%). (Dilara and Briassoulis, 1998).

Η πρακτική σημασία που έχει ο ερπυσμός για τα υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων είναι διττός, έχει να κάνει τόσο με την υπερβολική παραμόρφωση όσο και με την ρήξη του ερπυσμού. Για τα υλικά κάλυψης θερμοκηπίου που αποτελούνται από πλαστικά φύλλα πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας η υπερβολική παραμόρφωση και η ρήξη ερπυσμού είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες, καθώς έχει αποδειχθεί ότι το πλαστικό φύλλο πολυαιθυλενίου με ερπυσμό 8 με 23% έχει το δεύτερο υψηλότερο ποσοστό ερπυσμού από όλα τα άλλα πλαστικά υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων. Αυτή η σημαντική διακύμανση στο ποσοστό ερπυσμού του πλαστικού φύλλου πολυαιθυλενίου έγκειται στο γεγονός ότι η αντίσταση ερπυσμού του LDPE αυξάνεται με την περιεκτικότητα σε EVA στην σύνθεση του υλικού και με την πυκνότητα του υλικού. Επιπλέον, ο ερπυσμός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από την θερμοκρασία λειτουργίας του υλικού κάλυψης. (Briassoulis et al., 1997b).

Αντοχή στο σχίσμο

Η αντοχή που έχουν οι πλαστικές μεμβράνες στο σχίσμο αποτελεί μια πολύπλοκη λειτουργία της τελικής αντοχής που έχουν στη ρήξη. Για την μέτρηση αυτής της ιδιότητας οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί προορίζονται για να ελέγξουν δύο διαφορετικούς παράγοντες: α) τη δύναμη που απαιτείται για την έναρξη της ρήξης και β) τη δύναμη που απαιτείται για τη διάδοση της ρήξης. Από αυτούς τους δύο παράγοντες πιο σημαντικός για τις πλαστικές μεμβράνες θερμοκηπίων είναι η δύναμη που απαιτείται για την διάδοση της ρήξης και αυτό γιατί ενώ είναι πρακτικά αδύνατον μερικές φορές να αποτραπεί το σχίσμο μιας πλαστικής μεμβράνης είναι πολύ σημαντικό να διαπιστωθεί αν το σχίσμο διαδίδεται με δυσκολία. (Dilara and Briassoulis, 1998).

Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι αυτό που μετράτε με την έναρξη της ρήξης είναι η συνολική δύναμη που απαιτείται για την έναρξη και την διάδοση του σχισίματος. Η αντοχή που έχουν οι πλαστικές μεμβράνες στο σχίσμο δεν εξαρτάται από το πάχος τους. Επομένως δεν θα πρέπει να γίνεται σύγκριση της αντοχής στο σχίσμο πλαστικών μεμβρανών με διαφορετικό πάχος γιατί μπορεί να οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα. (Dilara and Briassoulis, 1998).

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Η αντίσταση στο σχίσσιμο των πλαστικών μεμβρανών αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα σε σχέση με την συνολική μηχανική συμπεριφορά τους. Για τις πλαστικές μεμβράνες η αντίσταση στην διάδοση του σχισίματος ποικίλει σημαντικά και εξαρτάται από το διαφορετικό πάχος των μεμβρανών, την χρήση διαφορετικών ταχυτήτων κατά την διάρκεια του σχισίματος τα αποτελέσματα της επιμήκυνσης και την ανισοτροπία. (Briassoulis et al., 1997b).

Αντοχή στην σκληρότητα

Η σκληρότητα ορίζεται ως το μέτρο της αντίστασης που προβάλλει ένα υλικό στην προσπάθεια εκδοράς ή παραμόρφωσης από ξένο σώμα. Για την μέτρηση της σκληρότητας των πλαστικών μεμβρανών οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι οι Rockwell και Shore. Η μέθοδος Rockwell βρίσκει εφαρμογή στα σκληρότερα πλαστικά και προκύπτει από την αύξηση του βάθους της εντύπωσης καθώς το φορτίο πάνω στον δειγματολήπτη αυξάνεται από ένα σταθερό μικρό φορτίο σε ένα μεγαλύτερο φορτίο. Η μέθοδος Shore βρίσκει πιο πολύ εφαρμογή στις πλαστικές μεμβράνες LDPE. Η μέθοδος Shore βασίζεται στη διεύδυση ενός συγκεκριμένου τύπου δειγματολήπτη όταν αυτός πιέζεται στο υλικό υπό καθορισμένες συνθήκες και προορίζεται για μαλακά υλικά. Η σκληρότητα ενός πλαστικού υλικού επηρεάζεται από την κατάσταση της επιφάνειας του δείγματος, την ανισοτροπία, τα πληρωτικά και τα πρόσθετα υλικά. (Dowling, 1993).

Αντοχή στην τριβή

Η τριβή έχει την ικανότητα να υποβαθμίζει τόσο τις φυσικές ιδιότητες των υλικών κάλυψης όπως είναι η θερμική επίδραση μέσω απώλειας πάχους, η μετάδοση του φωτός κτλ., όσο και ορισμένες μηχανικές ιδιότητες όπως είναι η αντοχή στο σχίσσιμο, η αντοχή στην κρούση κτλ. Έτσι λοιπόν η τριβή επηρεάζει άμεσα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των υλικών κάλυψης. Η τριβή επηρεάζεται από την σύνθεση της μεμβράνης όπως επίσης και από την προσθήκη πρόσθετων υλικών και χρωστικών ουσιών. Επιπλέον, κατά την διάρκεια της τριβής υπάρχει πιθανότητα να συμβεί ταχεία χημική οξείδωση των επιφανειακών στρωμάτων λόγω της συσσώρευσης τοπικών υψηλών θερμοκρασιών. (Dowling, 1993). Επιπροσθέτως, η τριβή μπορεί να προκαλέσει αυξημένη υποβάθμιση σε ένα πλαστικό υλικό κάλυψης καθώς γενικά δημιουργούνται περισσότεροι ενεργοί κόμβοι για φωτοοξείδωση μέσω αυτής της διαδικασίας.

Τέλος, με την αύξηση της πυκνότητας της μεμβράνης πολυαιθυλενίου, αυξάνονται η σκληρότητα και η αντίσταση στην τριβή. (Dilara and Briassoulis, 1998).

3. Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίου. Επιδράσεις στο κλίμα και την παραγωγή.

3.1. Φωτοεπιλεκτικά καλύμματα

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας του θερμοκηπίου που ξεκίνησε πριν από 40 περίπου χρόνια (Weber and Lambe, 1976), ξεκίνησαν ταυτόχρονα και έρευνες που διερευνούσαν πως το προσπίπτον φάσμα φωτός μπορεί να μεταβληθεί έτσι ώστε τα φυτά να μπορέσουν να επωφεληθούν και να έχουν καλύτερη απόδοση και ποιότητα καρπών. Μια σειρά από φωτοεπιλεκτικά καλύμματα φασματικής μετατόπισης έχουν προταθεί και δοκιμαστεί και έχουν αποτελέσει αντικείμενο επιστημονικών ερευνών. Οι αρχικές έρευνες είχαν επικεντρωθεί στις ιδιότητες εξαγωγής φωτός των μεμβρανών και στις δυνατότητες που προσφέρουν όσον αφορά τη βιώσιμη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόσφατες έρευνες όμως έχουν διερευνήσει την δυνατότητα που έχουν τα φωτοεπιλεκτικά καλύμματα να επηρεάσουν την μορφογένεση και την παραγωγή καλλιεργειών. (Hebert et al., 2022)



Εικόνα 9. Φωτοεπιλεκτικά καλύμματα θερμοκηπίων. (πηγη: Pandey et al., 2023).

3.1.1 Χρωματιστά καλύμματα

Τα πλαστικά καλύμματα, τα οποία είναι φωτοχημικά αδρανή και είναι είτε έγχρωμα είτε διαφανή έχουν ως στόχο την μείωση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στα φυτά. (Shahak et al., 2004). Τα χρωματιστά πλαστικά φύλλα μεταβάλουν τις σχετικές αναλογίες για παράδειγμα της κόκκινης ή της μπλε προσπίπτουσας ακτινοβολίας και αυτό το κάνουν μόνο μέσω μιας

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

διαδικασίας φιλτραρίσματος άλλων μήκος κύματος φωτός που διαφορετικά θα έπεφταν πάνω στα φυτά. Τα πλαστικά φύλλα που χρησιμοποιούνται ως υλικά κάλυψης θερμοκηπίων έχει βρεθεί ότι επηρεάζουν το φως που φτάνει στα φυτά μέσω της μετάδοσης, της διάχυσης, της απορρόφησης και της ανάκλασης. (Basile et al., 2012). Τα πλαστικά φύλλα κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο για να μειώσουν την φωτοσυνθετικά ενεργό ακτινοβολία (PAR) κατά 15% με 30% (Shahak, 2012). Βέβαια εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι η PAR επηρεάζεται περαιτέρω από εξωτερικούς παράγοντες που σχετίζονται με την ηλικία του καλύμματος. Η συσσώρευση σκόνης πάνω στα πλαστικά φύλλα μπορεί να προκαλέσει μείωση της PAR κατά 2% περίπου ετησίως. (Blanke, 2009).

Η ανθεκτικότητα των φωτοεπιλεκτικών μεμβρανών δεν παραμένει σταθερή καθ' όλη την διάρκεια ζωής τους. Για τις πλαστικές μεμβράνες πολυαιθυλενίου έχει παρατηρηθεί ότι μέσα σε έναν χρόνο η διαπερατότητα του φωτός μειώθηκε κατά 2%-4% σε ένα ευρύ φάσμα προσπίπτοντων μηκών κύματος ηλιακής ακτινοβολίας από 280 έως 2500 nm. (Nijsskens et al., 1990). Επίσης, έχει διαπιστωθεί ότι η συμπύκνωση υδρατμών στις πλαστικές μεμβράνες έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ημισφαιρικών σταγόνων νερού όπου μειώνουν την διαπερατότητα των πλαστικών μεμβρανών κατά 5% περίπου. (Abdel-Galil, 2014). Οι χρωστικές ουσίες οι οποίες υπάρχουν μέσα στα πλαστικά φύλλα υπόκεινται σε φωτοεπαγόμενη υποβάθμιση κατά την διάρκεια της ζωής τους ανάλογα με τον τύπο του πλαστικού φύλλου, το μέγεθός του και το χρώμα που έχει. (Middleton and McWaters, 2002). Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επηρεάζονται τόσο οι ιδιότητες μετάδοσης του φωτός όσο και το χρώμα του πλαστικού καλύμματος. Μέσα στα φωτοεπιλεκτικά καλύμματα προκαλούνται φωτοχημικές αλλαγές, οι οποίες έχουν να κάνουν τόσο με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας όσο και με την ποσότητα και την σταθερότητα της χρωστικής που χρησιμοποιείται. Η παρασκευή πλαστικών φύλλων υψηλότερης ποιότητας και χρωστικών ουσιών που είναι πιο ελαφριές και σταθερές έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της διάρκειας ζωής των πλαστικών μεμβρανών. (Blanke, 2009).

Η βελτιστοποίηση τόσο της φασματικής κατανομής όσο και της έντασης του φωτός για συγκεκριμένες καλλιέργειες είναι επιτακτική διότι έτσι η γεωργική παραγωγή θα παραμείνει βιώσιμη και θα παράγονται προϊόντα υψηλής ποιότητας. (Tafoya et al., 2018). Τα φωτοεπιλεκτικά φύλλα έχουν την ικανότητα να προσφέρουν μεγάλες δυνατότητες να επηρεάζουν τις φυσιολογικές αντιδράσεις των φυτών και να βελτιώνουν τις αποδόσεις. (Shahak et al., 2008). Από έρευνες που

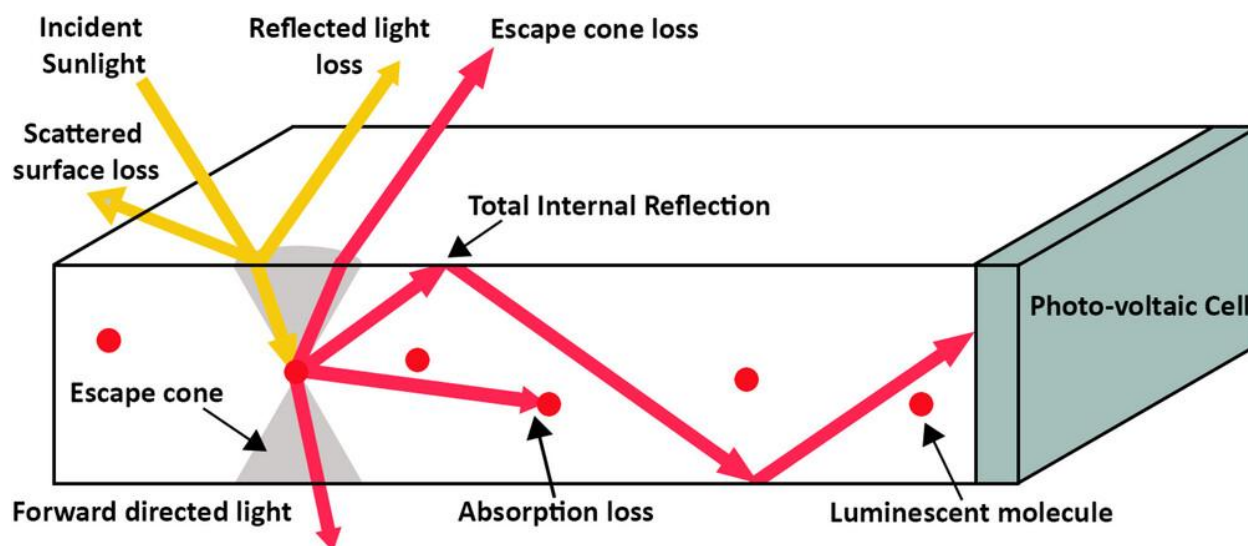
έχουν διεξαχθεί έχει παρατηρηθεί ότι τόσο το υπεριώδες κόκκινο όσο και το υπεριώδες μπλε φως αποτελούν πολύ σημαντικούς παράγοντες για τα φυτά διότι τα βοηθούν να αναπτύξουν δευτερογενείς μεταβολίτες όπως είναι για παράδειγμα τα φλαβονοειδή.. Επίσης, τα δύο αυτά φάσματα φωτός χρησιμοποιούνται σε κάθετα συστήματα καλλιέργειας όπου ενσωματώνονται συνήθως σε εξόδους διόδων εκπομπής φωτός (LED). (Wong et al., 2020). Παρότι στις μέρες μας τα φωτοεπιλεκτικά καλύμματα είναι μονόχρωμα, θα μπορούσε με περαιτέρω έρευνα πάνω στο κομμάτι αυτό να παραχθούν πλαστικές μεμβράνες με σχέδια έτσι ώστε να βοηθήσουν τα φυτά να αναπτύξουν δευτερογενείς μεταβολίτες όπως είναι για παράδειγμα τα φλαβονοειδή.

3.1.2. Φωτεινά φωτοεπιλεκτικά καλύμματα

Τα φωτεινά φωτοεπιλεκτικά καλύμματα χρησιμοποιούνται ως υλικά κάλυψης θερμοκηπίων για να βελτιώσουν τις ιδιότητες μετάδοσης φωτός των καλυμμάτων με βάση το πολυμερές και ταυτόχρονα να βελτιώσουν και τις αποδόσεις των καλλιεργειών. (Shen and Yin, 2022). Ο στόχος της χρήσης των φωτοεπιλεκτικών καλυμμάτων φωταύγειας είναι να διασφαλίσει ότι δεν θα υπάρχει μείωση του συνολικού αριθμού φωτονίων πέρα από αυτόν που μεταδίδεται μέσω διάφανων πολυμερών καλυμμάτων. (Hebert et al., 2022).

Τα φωτοεπιλεκτικά καλύμματα φωταύγειας ουσιαστικά είναι υποπροϊόν των φωτοβόλων ηλιακών συμπτυκνωτών (LSCs) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (Pearce, 2021). Τα φωτοεπιλεκτικά καλύμματα φωταύγειας και οι φωτοβόλοι ηλιακοί συμπτυκνωτές χρησιμοποιούν παρόμοια υλικά για να πραγματοποιήσουν μετατοπίσεις στα φάσματα προσπίπτοντος φωτός. Είναι γεγονός ότι και τα δύο συχνά αναθεωρούνται ταυτόχρονα. (Benetti and Rosei, 2022). Πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει αυτά τα υλικά σε θερμοκήπια τόσο για την ανάπτυξη των καλλιεργειών όσο και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (Kumar et al., 2022). Η αρχή λειτουργίας των LSCs περιλαμβάνει την συλλογή της ακτινοβολίας σε μια μεγάλη περιοχή όπου μέσω φθορισμού την μετατρέπει και την κατευθύνει σε μικρές εξόδους στις άκρες των πλαστικών φύλλων χρησιμοποιώντας την μήτρα πολυμερούς ως κυματοδηγό. (Papakonstantinou et al., 2021). Έτσι λοιπόν για τους κατασκευαστές των LSCs στόχος είναι να σχεδιάσουν κυματοδηγούς και φωτοφόρα που θα παγιδεύουν όσο το δυνατόν περισσότερα από τα παραγόμενα φωτόνια μέσω ολικής εσωτερικής ανάκλασης (TIR). Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι μεγιστοποίησης

της μεταφοράς φωτονίων στα φωτοβολταϊκά. (Portnoi et al., 2020). Τα επιτυχημένα LSCs απαιτούν μικρές περιοχές πλαστικών φύλλων έτσι ώστε να ελαχιστοποιούν τις απώλειες φωτονίων φωταύγειας με απορρόφηση σε εκτεταμένα μήκη διαδρομής. Όταν τα LSCs χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τότε οι επιφάνειες των φύλλων είναι μικρότερες από 1 m^2 . Σε αντίθεση με τα LSCs, ένα ιδανικό πλαστικό κάλυμμα θερμοκηπίου έχει πολύ μεγάλη επιφάνεια και το φως κατευθύνεται προς τις άκρες του πλαστικού, ειδικά αν στη συνέχεια χαθεί μέσω απορρόφησης. Επομένως, οι ανάγκες των LSC διαφέρουν από εκείνες των μεμβρανών με μετατόπιση φάσματος. (He et al., 2021).

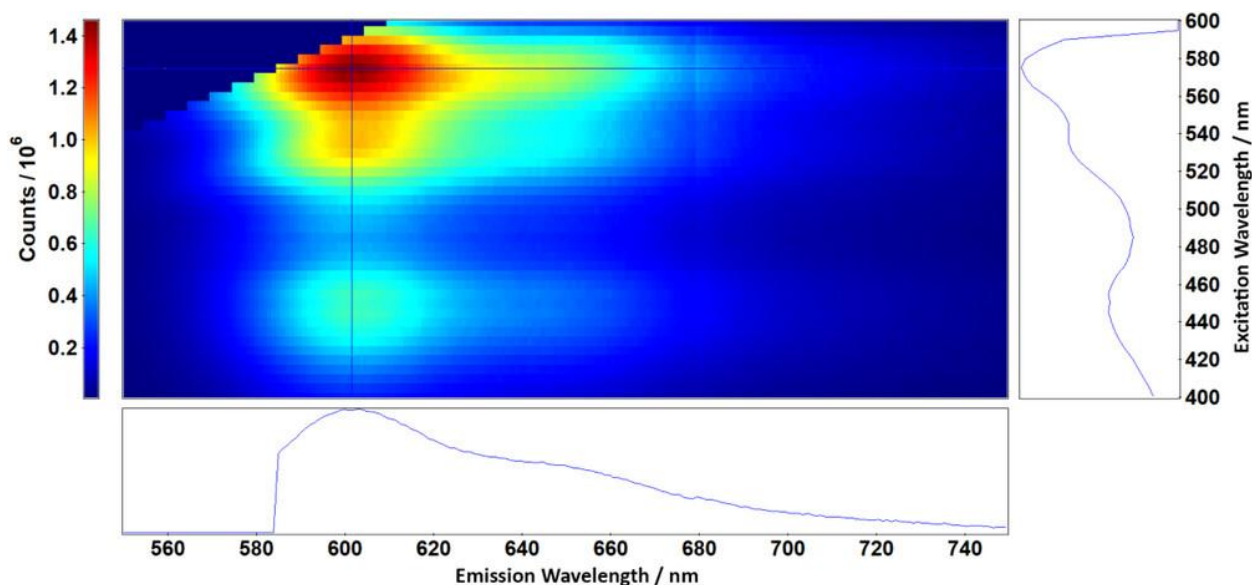


Εικόνα 10. Η διατομή ενός LSC που δείχνει τις πιθανές μοίρες του προσπίπτοντος φωτός, μεγάλο μέρος του οποίου παγιδεύεται μέσα στο φύλλο πολυμερούς και οδηγείται στις άκρες, όπου ένα μικρό ηλιακό στοιχείο το μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. (πηγή: Pandey et al., 2023).

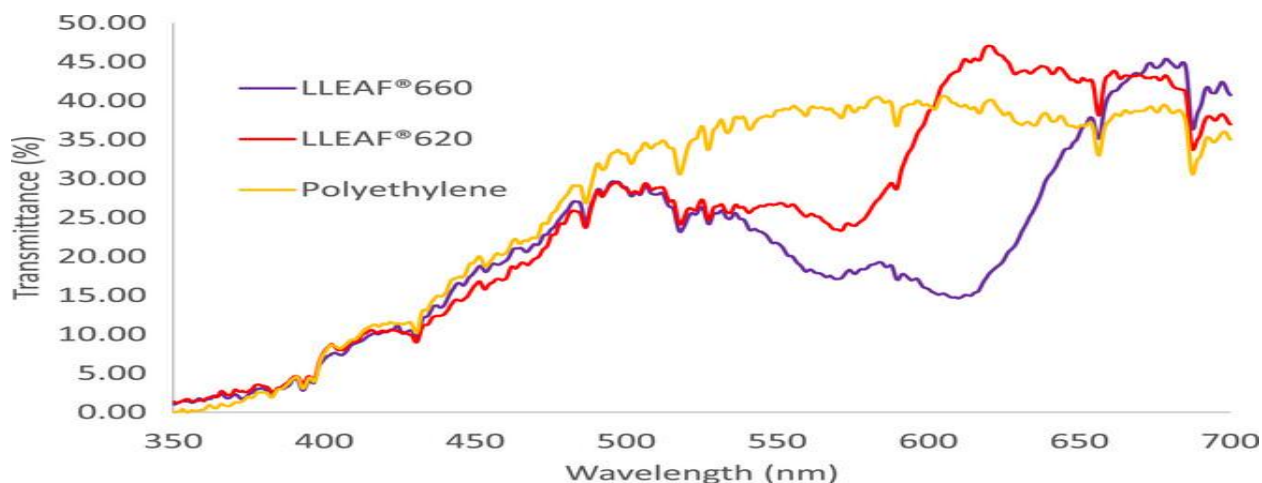
Παρόλο που το πεδίο της έρευνας LSC συνεχίζει να παράγει πολλά υποσχόμενα φωτοφόρα για τη μεγιστοποίηση της μεταφοράς ενέργειας τα επί του παρόντος διαθέσιμα υλικά εξακολουθούν να περιλαμβάνουν τρεις γενικές κατηγορίες υλικών: α) μόρια οργανικής βαφής, β) κβαντικές κουκκίδες (QDs) και γ) εκδόσεις σπάνιων γαιών. (Portnoi et al., 2020).

3.1.3. Βαφές οργανικής βάσης

Τα συσσωματωμένα σωματίδια και τα μόρια μετατόπισης φωτός που χρησιμοποιούνται στα καλύμματα φωταύγειας μπορούν να μετατρέψουν φωτόνια μόνο με ενέργειες πάνω από το χάσμα ζώνης τους, με το υπόλοιπο ηλιακό φάσμα να διέρχεται μέσα από τις μεμβράνες αναλλοίωτο ή να χάνεται μέσω παραγωγής θερμότητας και απορρόφησης. Οι βαφές οργανικής βάσης παρά την αλληλοεπικάλυψη που υπόκεινται μεταξύ των φασμάτων απορρόφησης παραμένουν πολλοί σημαντικές λόγω του χαμηλότερου κόστους και των υψηλών κβαντικών αποδόσεων φθορισμού. Οι βαφές οργανικής βάσης αντλούν το μεγαλύτερο μέρος του απορροφούμενου φωτός τους από την πράσινη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, η οποία είναι λιγότερο σημαντική στη φωτοσύνθεση από την υπεριώδη ακτινοβολία, το κόκκινο ή το μπλε. (Pandey et al., 2023).



Σχήμα 1. Γράφημα για το LLEAF 600, που δείχνει τον βαθμό της φασματικής του επικάλυψης στο φάσμα διέγερσης (κάθετος άξονας) έναντι της εκπομπής (οριζόντιος άξονας). (πηγή: Pandey et al., 2023).



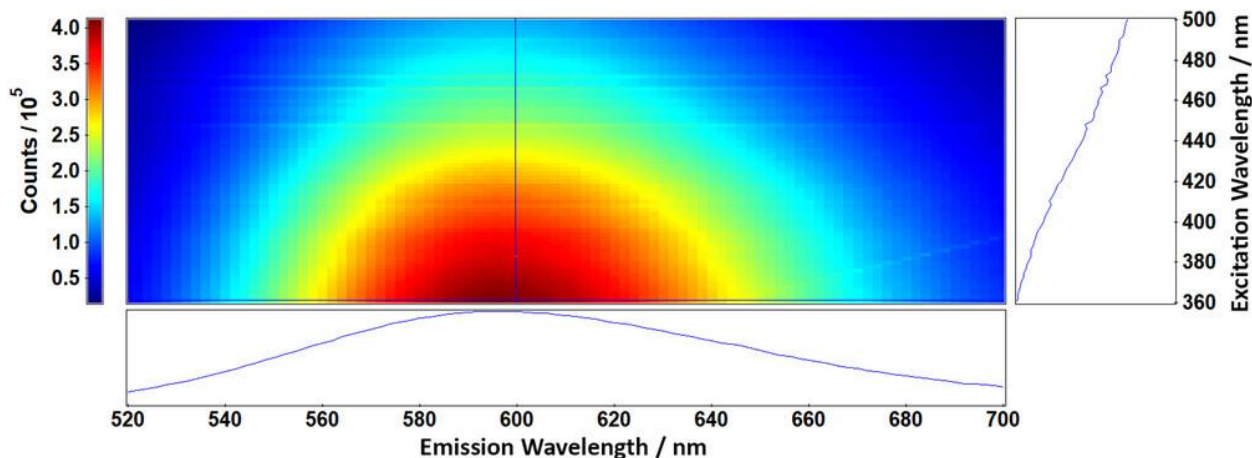
Σχήμα 2. Οι καμπύλες φασματικής μετάδοσης για το LLEAF 620 (κόκκινη γραμμή), το LLEAF 660 (μωβ γραμμή) και το διαφανές πολυαιθυλένιο (κίτρινη γραμμή) καλύπτουν όλο το εύρος του ορατού φωτός (συννεφιασμένη μέρα με σκίαση περίπου 40% από νεφοκάλυψη). Το LLEAF 620 αυξάνει το διαθέσιμο κόκκινο φως στην περιοχή 600–680 nm σε σχέση με αυτό του διαφανούς πολυαιθυλενίου χρησιμοποιώντας φθορισμό. Αντίθετα, το LLEAF 660 μειώνει το κόκκινο φως και αυξάνει αυτό του απώτερου κόκκινου. (πηγή: Pandey et al., 2023).

Όταν σαν βαφές οργανικής βάσης χρησιμοποιούνται παράγωγα περυλενίου, τότε οι ιδιότητες φασματικού φθορισμού και η διάρκεια ζωής τους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το χημικό τους περιβάλλον και τον βαθμό συσσωμάτωσης των μορίων (Banal et al., 2017). Οι ιδιότητες εκπομπής των βαφών με βάση το περυλένιο μπορούν να ρυθμιστούν μέσω της σύζευξης των διμιδίων του περυλενίου για την παραγωγή μιας σειράς διαφορετικών χρωματιστών βαφών φωταύγειας, αρκετές από τις οποίες είναι διαθέσιμες στο εμπόριο, όπως η σειρά Lumogen F (Yellow 083, Yellow 170, Violet 570, Orange 240 και Red 305, (<https://basf.com>), ή αλλιώς ως έτοιμα εμπορικά προϊόντα θερμοκηπίου. (<https://lleaf.com>).

3.1.4. Κβαντικές κουκίδες (QD)

Οι κβαντικές κουκίδες (QD) είναι σωματίδια ή νανοκρύσταλλοι ενός ημιαγώγιμου υλικού, το οποίο έχει διάμετρο 2-10 nm (Makarov et al., 2019). Τα σωματίδια αυτά λόγω των ασυνήθιστα υψηλών αναλογιών επιφάνειας προς όγκο, διαθέτουν μοναδικές ηλεκτρονικές ιδιότητες. (Alivisatos, 1996). Η πιο σημαντική ιδιότητα που εμφανίζουν είναι ο φθορισμός. Οι νανοκρύσταλλοι έχουν την ικανότητα να παράγουν διακριτικά χρώματα, τα οποία καθορίζονται

από την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. (Resch-Genger et al., 2008). Όσο το μέγεθος του κρυστάλλου μειώνεται, τόσο η διαφορά ενέργειας μεταξύ της υψηλότερης ζώνης σθένους και της χαμηλότερης ζώνης αγωγιμότητας αυξάνεται. Για να διεγερθεί η κουκίδα απαιτείται περισσότερη ενέργεια και περισσότερη ενέργεια απελευθερώνεται όταν ο κρύσταλλος επιστρέφει στη βασική του κατάσταση. Οι ημιαγώγιμες δομές έχουν την ικανότητα να συντονίζονται ώστε να εκπέμπουν οποιοδήποτε χρώμα φωτός. Η UbiGro μεμβράνη θερμοκηπίου (<https://ubigro.com>) είναι το εμπορικό διαθέσιμο προϊόν θερμοκηπίου, το οποίο μετατρέπει το μπλε και υπεριώδες φως στα κόκκινα και πορτοκαλί τμήματα του φάσματος, (Makarov et al., 2019). Οι κβαντικές κουκίδες έχουν μεγαλύτερο διαχωρισμό των φασμάτων εκπομπής και απορρόφησης, σε σύγκριση με τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAH), και επομένως χάνουν λιγότερη ακτινοβολία με την απορρόφηση.

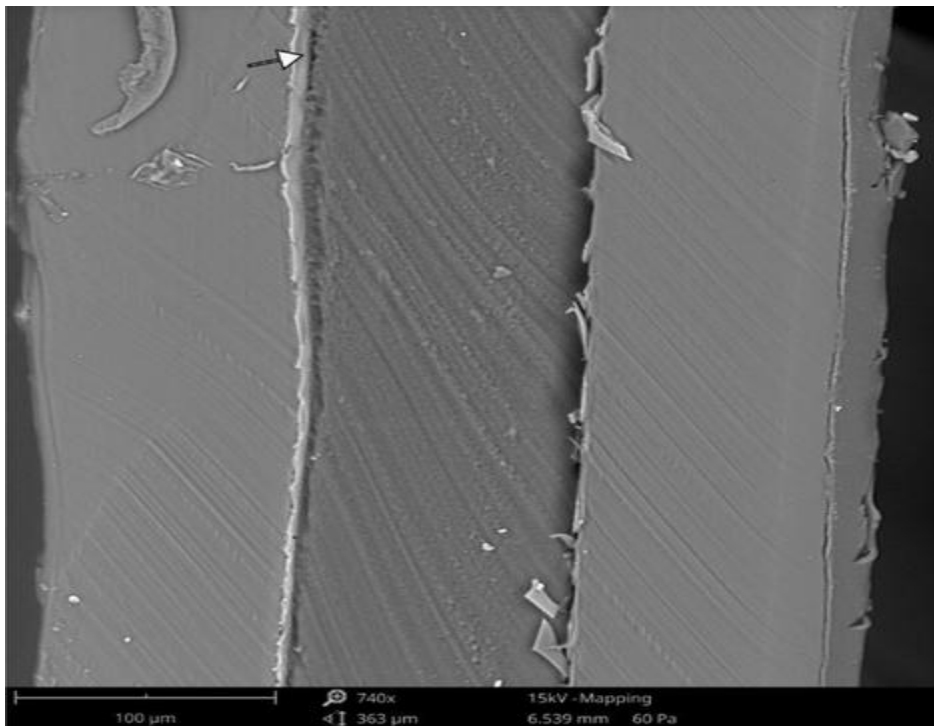


Σχήμα 3. Χάρτης εκπομπών για το Ubigro 600, με μέγιστη εκπομπή που εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων στα 600 nm. (πηγή: Pandey et al., 2023).

Η διαλυτότητα των διαθέσιμων πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAH) και η διασπορά των κβαντικών κουκίδων (QD) εντός των κυματοδηγών πολυμερών αποτελεί ίσως το μεγαλύτερο εμπόδιο στην ανάπτυξή τους ως φωτοεπιλεκτικά καλύμματα φασματικής μετατόπισης. Η πολικότητα των εμπορικά διαθέσιμων παραγώγων διιμιδίου του περυλενίου όπως το Lumogen 305 έχει περιορίσει την επιλογή της μήτρας πολυμερούς σε PC και ακρυλικά όπως είναι το PMMA (Li et al., 2019). Παρόλο που αυτά τα πολυμερή είναι ευπροσάρμοστα στα θερμοκήπια, το πάχος, το μέγεθος και η ακαμψία των μεμβρανών που μπορούν να

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

κατασκευαστούν είναι πιο περιορισμένα σε σχέση με τις μεμβράνες πολυαιθυλενίου (PE) που χρησιμοποιούνται σε σήραγγες θερμοκηπίων. Οι καλλιεργητές τα υλικά αυτά δεν μπορούν να τα χειριστούν εύκολα όσον αφορά την τοποθέτησή τους ή την αφαίρεσή τους από τα θερμοκήπια σε αντίθεση με τα τυποποιημένα διαφανή καλύμματα με βάση το πολυαιθυλένιο (PE) που είναι πιο εύχρηστα. (Pandey et al., 2023).



Εικόνα 11. Φωτεινή μεμβράνη θερμοκηπίου UbiGro600. (πηγή: Pandey et al., 2023).

Παρόλο που η έρευνα για τη διαλυτότητα τόσο των μητρών PAH όσο και των QD συνεχίζεται (Griffini, 2019), οι εξελίξεις στο πεδίο προσανατολίζονται προς εξειδικευμένα προϊόντα που είναι απίθανο να διατεθούν στο εμπόριο στις ποσότητες που απαιτούνται για καλλιέργειες υπό κάλυψη, τουλάχιστον βραχυπρόθεσμα. Εκτός εάν από μελέτες αποδειχθεί ότι η τρέχουσα γενιά φωτοεκλεκτικών μεμβρανών που μετατοπίζουν το φως έχει την ικανότητα να προσφέρει οφέλη στις αποδόσεις των καλλιεργειών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. (Pandey et al., 2023).

3.1.5. Επίδραση των φωτοεκλεκτικών καλυμμάτων στο κλίμα του θερμοκηπίου

Τα φωτοεκλεκτικά καλύμματα έχουν την ικανότητα να τροποποιούν το μικροκλίμα του θερμοκηπίου και πιο συγκεκριμένα επηρεάζει την θερμοκρασία του αέρα, την σχετική υγρασία, την θερμοκρασία και το φως του εδάφους. (Narjesi et al., 2023). Έχει παρατηρηθεί ότι ακόμα και τα συμβατικά διαυγή πολυμερή καλύμματα που χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια μπορούν να μειώσουν την φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία 30 με 40%. (Krishna et al., 2023).

Για την αξιολόγηση των φωτοεκλεκτικών μεμβρανών που χρησιμοποιούνται ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίου για την παραγωγή κηπευτικών η θερμοκρασία αποτελεί τον τελικό παράγοντα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν. Τα φωτοεκλεκτικά καλύμματα σκίασης ανάλογα με την διαμόρφωση και την εγκατάστασή τους μπορούν να μειώσουν, την θερμοκρασία των φύλλων, την θερμοκρασία του αέρα και την θερμοκρασία της ριζικής ζώνης (RZT). (Krishna et al., 2023). Τα αυξημένα επίπεδα σκίασης έχει αποδειχθεί ότι μειώνουν τόσο την θερμοκρασία της ριζικής ζώνης (RZT) όσο και την εξάτμιση του νερού, οδηγώντας σε μείωση τόσο την πρόσληψη νερού των φυτών από το έδαφος όσο και των ρυθμών διαπνοής των φυτών. (Diez et al., 2023). Σε έρευνα που διεξήχθη και η οποία μελέτησε τις επιπτώσεις των καλυμμάτων σκίασης στη θερμική καταπόνηση στη γλυκιά πιπεριά *Herminio* (*C. annuum*) κατά τη διάρκεια ενός κύκλου καλλιέργειας χειμώνα-καλοκαίρι, η μείωση της θερμοκρασίας που προκαλείται από τη σκίαση βρέθηκε να βελτιώνει τόσο την κατάσταση του νερού των φύλλων όσο και την βλαστική ανάπτυξη των φυτών. (López-Marín et al., 2013). Όλα αυτά αποτελέσματα πιστοποιούν ότι τα φωτοεπιλεκτικά καλύμματα είναι ένα αποτελεσματικό μέσο για τη διαχείριση της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό και τη βελτιστοποίηση των αποδόσεων των καλλιεργειών. Όλες οι μορφές φιλτραρίσματος φωτός παράγουν θερμότητα μέσω απορρόφησης. Τα φωσφοριζέ πολυμερή που μετατοπίζουν το φως παράγουν περαιτέρω θερμική ενέργεια μέσω της «ερυθρής μετατόπισης» των εκπομπών. Έτσι λοιπόν αυτά τα καλύμματα μεταβάλλουν τόσο την ισορροπία της ακτινοβολίας στα θερμοκήπια όσο και την θερμοκρασία στο εσωτερικό των θερμοκηπίων. Επομένως, έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τις νυχτερινές θερμοκρασίες και τη σχετική υγρασία του θερμοκηπίου χωρίς κατάλληλα συστήματα ελέγχου της θερμοκρασίας. Ανάλογα με την καλλιέργεια εξαρτάται αν όλα αυτά είναι επιβλαβή για τις αποδόσεις.

3.1.6. Επίδραση των φωτοεπιλεκτικών καλυμμάτων στην παραγωγή

3.1.6.1. Βλαστική ανάπτυξη

Η ένταση του φωτός είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην ρύθμιση των χαρακτηριστικών των φυτών και πιο συγκεκριμένα επηρεάζει τη συνολική επιφάνεια των φύλλων, το μέγεθος των φύλλων, τη δομή των φύλλων, το ύψος του φυτού και την περιεκτικότητα σε ξηρή μάζα. (Yao et al., 2017). Η ένταση του φωτός έχει την ικανότητα να επηρεάσει αυτά τα χαρακτηριστικά με αποτέλεσμα να διαμορφώνει την ικανότητα του φυτού να συλλαμβάνει και να χρησιμοποιεί αποτελεσματικά την φωτεινή ενέργεια (Qaderi et al., 2023). Τα υλικά κάλυψης του θερμοκηπίου έχουν την ικανότητα να τροποποιούν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στα φυτά με αποτέλεσμα να προκαλούν ποικίλες αλλαγές στην μορφολογία των φύλλων και στην βλαστική ανάπτυξη των φυτών. Από έρευνα που έχει διεξαχθεί από τους De Wit et al. (2016), έχει διαπιστωθεί ότι όταν τα φυτά αναπτύσσονται σε ένα μη βέλτιστο περιβάλλον φωτός, το οποίο προκαλείται από τη μείωση της φωτοσυνθετικά ενεργούς ακτινοβολίας (PAR), τότε τα φυτά αρχίζουν να παράγουν ορμόνες και να κατανέμουν τους πόρους για την επιμήκυνση των βλαστών τους, επιτρέποντάς έτσι τα φυτά να αναπτυχθούν έξω από τη σκιά και προς πιο ευνοϊκές συνθήκες ανάπτυξης.

Η νέα γενιά φωτοεκλεκτικών μεμβρανών κάλυψης «μετατόπισης κόκκινου» έχει παρατηρηθεί ότι αυξάνει την βιομάζα και προάγει την βλαστική ανάπτυξη. Τα μήκη κύματος του κόκκινου φωτός έχει διαπιστωθεί ότι παρότι έχουν χαμηλότερη ενέργεια (~1,82 eV), είναι τα πιο αποτελεσματικά για τη διέγερση των φωτοσυνθετικών διεργασιών (Hogewoning et al., 2012). Αυτή η νέα γενιά των φωτοεκλεκτικών μεμβρανών κάλυψης έχει την ικανότητα να μετατρέπει τα UV/μπλε (QD) και τα πράσινα μήκη κύματος (PAH) σε κόκκινο, με αποτέλεσμα να έχουν την τάση να αυξάνουν τη βλαστική ανάπτυξη σε διάφορες καλλιέργειες όπως είναι για παράδειγμα οι καλλιέργειες της φράουλας (Schettini et al., 2011) και του μαρουλιού (Yoon et al., 2017). Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι παρότι είναι τεκμηριωμένος ο θετικός αντίκτυπος που έχουν οι φωτοεκλεκτικές μεμβράνες «μετατόπισης κόκκινου» στην ανάπτυξη των φυτών, ακόμη δεν είναι γνωστός ο ακριβής λόγος πίσω από αυτήν την βελτίωση. Επομένως το ερώτημα που προκύπτει και δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως είναι εάν οι βελτιώσεις αυτές οφείλονται αποκλειστικά στην

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

αύξηση του κόκκινου φωτός ή οφείλονται στην αλληλεπίδρασης μεταξύ του μπλε και κόκκινου φωτός (Zhang et al., 2019). Η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας του κόκκινου φωτός διεγείρει την ανάπτυξη των φυλλωδών λαχανικών με αποτέλεσμα να αυξάνεται η φρέσκια και η ξηρή μάζα των λαχανικών. Επίσης, η προσθήκη του μπλε φωτός έχει την ικανότητα να ενισχύει την επιμήκυνση των φυτών και η έλλειψη του μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της φωτοσύνθεσης (Zhao et al., 2021). Η βλαστική ανάπτυξη των φυτών εξαρτάται από την αναλογία μήκους κύματος μπλε / κόκκινο, καθώς η κόκκινη μεμβράνη σκίασης μπορεί να αυξήσει τη βλαστική ανάπτυξη αυξάνοντας την αναλογία έντασης κόκκινου/μπλε φωτός χωρίς να αυξάνει την ένταση των προσπίπτων κόκκινων μηκών κύματος. Τα φωτοεπιλεκτικά καλύμματα «μετατόπισης κόκκινου» παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις κόκκινες μεμβράνες σκίασης. Pinheiro et al., 2020).

Το πόσο αποτελεσματικά είναι τα υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων στην βλαστική ανάπτυξη των φυτών εξαρτάται από την εποχή που καλλιεργούνται τα φυτά και από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. (Basche et al., 2016). Έτσι λοιπόν τα φυτά μαρουλιού, τα οποία καλλιεργήθηκαν σε θερμοκήπιο που είχε ως υλικό κάλυψης φωτοεπιλεκτικές μεμβράνες παρουσίασαν υψηλότερα επίπεδα ολικής χλωροφύλλης, χλωροφύλλης α και καροτενοειδών κατά τη θερινή συγκομιδή, σε σύγκριση με το χειμώνα όταν καλλιεργήθηκαν σε θερμοκήπιο που είχε ως υλικό κάλυψης συμβατικά καλύμματα (Sultana & Benedicto, 2017). Η διακύμανση στο διαθέσιμο προσπίπτον ηλιακό φως μπορεί να επηρεάσει μια σειρά από φυσιολογικές παραμέτρους στις καλλιέργειες, όπως είναι η στοματική αγωγιμότητα και η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη τα οποία επηρεάζουν τη φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών. Τα έγχρωμα φωτοεκλεκτικά καλύμματα είναι πιο αποτελεσματικά το καλοκαίρι, διότι η ένταση του φωτός είναι υψηλή, το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δίνει την δυνατότητα στους καλλιεργητές να τροποποιήσουν τη φασματική ένταση του διάχυτου φωτός. Από την άλλη πλευρά, παρατηρείται ότι τα φωτοεκλεκτικά καλύμματα μετατόπισης φωτός λειτουργούν καλύτερα σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού περιβάλλοντος.

3.1.6.2. Έκφραση δευτερογενούς μεταβολίτη

Οι φωτοεπιλεκτικές μεμβράνες λόγω των τροποποιήσεων των φασμάτων προσπίπτοντος φωτός που προκαλούν διεγείρουν αλλαγές στην έκφραση των δευτερογενών μεταβολιτών των φυτών. (Shahak, 2012). Από πειράματα που έχουν διεξαχθεί έχει παρατηρηθεί ότι όταν τα επίπεδα φωτός είναι σε πλεόνασμα σε σχέση με αυτά που απαιτούνται για τη φωτοσύνθεση, τότε τα φωτοεκλεκτικά καλύμματα που έχουν χρώμα κίτρινο, κόκκινο, μπλε ή πράσινο μπορούν να φιλτράρουν συγκεκριμένα μήκη κύματος φωτός, προκαλώντας έτσι μορφοφυσιολογικές αλλαγές στα φυτά, ενισχύοντας τόσο την έκφραση των δευτερογενών μεταβολιτών όσο και την παραγωγή καρπών. (Shahak et al., 2018). Έτσι λοιπόν τα φωτοεκλεκτικά καλύμματα έχουν την ικανότητα να ενισχύουν τόσο την απόδοση του προϊόντος όσο και την θρεπτική του αξία. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και κάποια προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος.

Όπως είναι γνωστό τα φωτοεκλεκτικά καλύμματα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κηπευτικών επιτρέπουν μόνο περιορισμένη μετάδοση UV-A (315–400 nm) και ελάχιστη ή καθόλου UV-B (280–315 nm)

(Krizek & Chalker-Scott, 2005) που παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό δευτερογενών μεταβολιτών (Akula & Ravishankar, 2011). Η ανεπαρκής έκθεση των φυτών στην υπεριώδη ακτινοβολία έχει σαν αποτέλεσμα να οδηγεί σε μειωμένο μήκος των φύλλων και σε αυξημένη διακλάδωση τόσο των ριζών και των παχύτερων φύλλων όσο και των στελεχών. (Warner et al., 2021). Το υπεριώδες φως είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη πολλών φυτικών χρωστικών και για την έκφραση δευτερογενών μεταβολιτών όπως τα φλαβονοειδή (ανθοκυανίνη), τα φαινολικά και τα καροτενοειδή (ξανθοφύλλη). (Emus-Medina et al., 2023). Από πειράματα που έχουν διεξαχθεί έχει παρατηρηθεί ότι η αναστολή της υπεριώδους ακτινοβολίας από τα φωτοεπιλεκτικά καλύμματα έχει σαν αποτέλεσμα να καταστέλλουν τη συνολική περιεκτικότητα σε αντιοξειδωτικά και την έκφραση άλλων φυτοχημικών ουσιών που σχετίζονται με την υγεία. Πιο συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί ότι η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη τόσο των φύλλων ραπανάκι όσο και των φύλλων τομάτας μειώθηκε (Tezuka et al., 1993) και ότι η συνολική περιεκτικότητα της μελιτζάνας σε ανθοκυανίνη μειώθηκε (Chavan et al., 2023). Επίσης, σε άλλη έρευνα έχει παρατηρηθεί ότι σε καρπούς τομάτας οι συγκεντρώσεις σημαντικών φαινολικών

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

ενώσεων όπως είναι το καφεϊκό οξύ μειώθηκαν κατά 16%. (Tezuka et al., 1993). Επιπλέον τα αποτελέσματα μιας άλλης μελέτης που πραγματοποιήθηκε σε δύο σαλάτες ρόκα (Mormile et al., 2019) και σε πράσινο και κόκκινο μαρούλι και τα οποία καλλιεργήθηκαν κάτω από καλύμματα με βάση το πολυμερές που εμποδίζει την υπεριώδη ακτινοβολία έδειξαν μείωση μιας φαινολικής ένωσης που είναι γνωστή ως γλυκοσίδης κερκετίνης. (Tsormpatsidis et al., 2008). Τέλος, σε άλλη έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε φράουλες που καλλιεργήθηκαν κάτω από καλύμματα που εμποδίζουν την υπεριώδη ακτινοβολία παρατηρήθηκε ότι η συνολική περιεκτικότητα σε φλαβονοειδή μειώθηκαν κατά 15%-35%, σε σύγκριση με τις φράουλες που καλλιεργήθηκαν σε ανοιχτό αγρό (Josuttis et al., 2010).

Έτσι λοιπόν για να αποφευχθεί η μείωση των δευτερογενών μεταβολιτών των καλλιεργειών που καλλιεργούνται κάτω από πολυμερή θερμοκηπίου που φιλτράρουν το υπεριώδες φως, μια πιθανή λύση είναι η προσθήκη μπλε φωτός μήκους κύματος στην πηγή φωτισμού (Ouzounis et al., 2016).

3.1.6.3. Επιπτώσεις των φωτοεπιλεκτικών καλυμμάτων στην ποιότητα των καρπών

Η ποιότητα των καρπών είναι μια πολυδιάστατη και υποκειμενική έννοια που περιλαμβάνει διάφορες παραμέτρους, όπως είναι το μέγεθος, το φρέσκο βάρος και ο αριθμός των καρπών οι οποίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση και το μήκος κύματος του φωτός (Chavan et al., 2020). Έχει παρατηρηθεί ότι η μείωση της έντασης του φωτός κατά τα πρώτα στάδια της ανάπτυξης των καρπών μπορεί να έχει θετικό αντίκτυπο στο σχήμα, στο μέγεθος και την ομοιομορφία των καρπών (Manja and Aoun, 2019).

Γενικότερα, έχει παρατηρηθεί ότι η καλλιέργεια φυτών υπό κάλυψη για παρατεταμένες περιόδους ενέχει τον κίνδυνο να καταστείλει τους ρυθμούς ανθοφορίας και καρποφορίας την επόμενη σεζόν, οδηγώντας έτσι σε μια μείωση του διαλυτού στερεού, της ογκομετρούμενης οξύτητας, της ξηράς ουσίας, των ολικών πολυφαινολών και του μέσου βάρους των καρπών. (Mika et al., 2019).

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Η χρήση πολυμερών καλυμμάτων ως υλικά κάλυψης θερμοκηπίων που μεταδίδουν την υπεριώδη ακτινοβολία έχει βρεθεί ότι προάγουν την απόδοση της φράουλας (*Fragaria × ananassa*) (Anderson et al., 2019) και αγγουριού (*C. sativus*) (Allardyce et al., 2017). Πιο συγκεκριμένα κατάφεραν να αυξήσουν τόσο τον αριθμό των καρπών όσο και το φρέσκο βάρος και των δύο καλλιεργειών. Η απόδοση των καρπών φράουλας στα συνολικά διαλυτά στερεά ήταν υψηλότερη. Από την άλλη πλευρά το χρώμα των καρπών φράουλας όσο και η ανάπτυξη των φυτών που καλλιεργήθηκαν κάτω από πλαστικά καλύμματα που μεταδίδουν υπεριώδη ακτινοβολία ήταν σταθερά χαμηλότερα σε σύγκριση με τους καρπούς φράουλας και την ανάπτυξη των φυτών που καλλιεργήθηκαν στον αγρό. (Elfadly et al., 2016). Σε έρευνα που διεξήχθη παρατηρήθηκε ότι οι τομάτες που καλλιεργήθηκαν κάτω από καλύμματα αποκλεισμού της υπεριώδους ακτινοβολίας παρήγαγαν υψηλότερο μέσο βάρος και αριθμό καρπών. Αντίθετα οι παράγοντες ποιότητας όπως είναι το ασκορβικό οξύ, η περιεκτικότητα σε λυκοπένιο, το pH, η ογκομετρούμενη οξύτητα και τα ολικά διαλυτά στερεά, ήταν όλα χαμηλότερα (Katsoulas et al., 2020). Τα φωτοεπιλεκτικά καλύμματα αποκλεισμού UV έχει αποδειχθεί ότι οδηγούν σε υψηλότερη εμπορεύσιμη απόδοση και χαμηλότερη απώλεια βάρους και σφριγηλότητας στην αποθήκευση μετά τη συγκομιδή σε διάφορες καλλιέργειες όπως τομάτα (*S. lycopersicum*), μελιτζάνα (*S. melongena*), φράουλα (*Fragaria × ananassa*), και πιπεριά (*C. Annuum*). Το βασικό συστατικό για την βελτιστοποίηση της ποιότητας και της απόδοσης είναι η επιλογή του σωστού υλικού κάλυψης για συγκεκριμένες καλλιέργειες και τοποθεσίες. (Katsoulas et al., 2020).

Τα φωτοεπιλεκτικά καλύμματα χρώματος έχουν αποδειχθεί ότι παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγωγή καρπών. Μία από τις πιο σημαντικές αντιδράσεις που παρουσιάζουν οι καρποί των φυτών στις φασματικές μετατοπίσεις είναι η παραγωγή περισσότερων καρπών ανά φυτό, χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα των καρπών ή να γίνεται μείωση του μεγέθους των καρπών. (Ilić et al., 2017). Το γεγονός αυτό πιθανότατα να οφείλεται στην βελτίωση της κατάστασης του νερού των φυτών, στη μειωμένη διαπνοή και στους αυξημένους καθαρούς ρυθμούς φωτοσύνθεσης, που έχουν σαν αποτέλεσμα να οδηγούν σε αυξημένο μέγεθος καρπών. (Díaz-Pérez, 2013). Για παράδειγμα η χρήση φωτοεπιλεκτικών κόκκινων καλυμμάτων σε καλλιέργεια πιπεριάς έχει παρατηρηθεί ότι αυξάνει τη συνολική απόδοση και την ποιότητα των καρπών, συμπεριλαμβανομένης της μάζας, του πάχους του περικαρπίου και της περιεκτικότητας

σε βιταμίνη C, μειώνοντας παράλληλα τη ρωγμή των καρπών σε σύγκριση με τις καλλιέργειες που πραγματοποιούνται στον αγρό. Παρότι οι έρευνες έχουν δείξει ότι τα φωτοεπιλεκτικά καλύμματα βελτιώνουν την ποιότητα και την απόδοση των καρπών, από την άλλη πλευρά, οι αλλαγές που προκαλούνται στη σκίαση και τη σχετική υγρασία μπορεί να είναι επιβλαβείς και να προκαλέσουν την βλάβη των καλλιεργειών από βακτηριακές ή ιογενείς λοιμώξεις. (Ilić et al., 2017).

3.1.7. Σύνοψη - Σχολιασμός

Οι φωτοεπιλεκτικές μεμβράνες αποτελούν μια ελκυστική εναλλακτική λύση στην μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη εγκαταστάσεων LED σε θερμοκήπια. Έχουν την ικανότητα να παρέχουν αυξημένη απόδοση των καλλιεργειών και ταυτόχρονα μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Τα φωτοεπιλεκτικά καλύμματα έχουν διαπιστωθεί ότι είναι αποτελεσματικά στην προστασία των φυτών από περιβαλλοντικές πιέσεις και ταυτόχρονα βελτιώνουν την θρεπτική ποιότητα, τη γεύση και το χρώμα των φρούτων. Παρά την εξέλιξη που έχουν οι φωτοεπιλεκτικές μεμβράνες εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά εμπόδια στην ευρεία ανάπτυξη τους για τη δημιουργία πιο αποτελεσματικών και πιο οικονομικά αποδοτικών θερμοκηπίων. Οι φωτοεπιλεκτικές μεμβράνες δεν παρέχουν τα ίδια οφέλη με τα καλύμματα που μετατοπίζουν το φως όσον αφορά τον αυξημένο δείκτη φυλλικής επιφάνειας και τη βιομάζα της εκάστοτε καλλιέργειας. Έτσι λοιπόν σε περιόδους όπου τα οφέλη που προσφέρουν στην βλαστική ανάπτυξη των καλλιεργειών δεν είναι σημαντικά μπορούν να αφαιρεθούν.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η εφαρμογή αυτών των καλυμμάτων εξαρτάται κάθε φορά από διάφορους παράγοντες όπως είναι οι απαιτήσεις της αγοράς, τα συνολικά επίπεδα φωτός και η γεωγραφική θέση του θερμοκηπίου. Γενικότερα όμως οι παραγωγοί δυσκολεύονται να χρησιμοποιήσουν αυτά τα υλικά ως κάλυψη των θερμοκηπίων τους λόγω του υψηλού κόστους που έχουν, επομένως, αρκούνται σε τεχνολογίες που είναι οικονομικά συμφέρουσες.

3.2. Φωτεινές μεμβράνες κβαντικών κουκίδων ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίου

Η χρήση των φωτεινών μεμβρανών κβαντικών κουκίδων ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίου είναι μια καινοτόμος μέθοδος τροποποίησης του φάσματος φωτός του θερμοκηπίου. Οι μεμβράνες

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

κβαντικών κουκίδων έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν ένα μέρος των υπεριωδών και μπλε φωτονίων υψηλής ενέργειας σε φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας. (Kang et al., 2023)

Υπάρχουν αρκετές έρευνες οι οποίες έχουν εξετάσει την χρησιμότητα των φασματικών μεμβρανών μετατόπισης για τη μεταβολή της ηλιακής φασματικής ποιότητας για τη βελτίωση της φωτοσυνθετικής απόδοσης και της ανάπτυξης των καλλιεργειών χωρίς την κατανάλωση ενέργειας (Kang et al., 2023). Οι μεμβράνες φασματικής μετατροπής μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας διάφορα υλικά, όπως κβαντικές κουκίδες (QD) (Parrish et al., 2021) φωτονικές δομές (Shen et al., 2021) και φθορίζουσες βαφές (Arbeloa, 2007), με το καθένα να παρέχει ξεχωριστά χαρακτηριστικά φασματικής μετατόπισης. Προηγούμενες έρευνες σχετικά με τις μεμβράνες φασματικής μετατροπής για θερμοκηπιακές εφαρμογές επικεντρώθηκαν κυρίως σε μεμβράνες σχεδιασμένες να μετατρέπουν την υπεριώδη ακτινοβολία σε μπλε φως ή να μετατρέπουν το πράσινο φως σε κόκκινο φως. (Kang et al., 2023). Έχουν παρατηρηθεί αυξήσεις στις αποδόσεις πολλών καλλιεργειών που καλλιεργούνται σε θερμοκήπια που χρησιμοποιούν ως υλικό κάλυψης διάφορους τύπους φασματικών μεμβρανών μετατροπής. Οι καλλιέργειες στις οποίες έχουν παρατηρηθεί αυξήσεις στις αποδόσεις είναι το αγγούρι, το λάχανο, η τομάτα, το μαρούλι και το κινέζικο λάχανο, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες καλλιέργειες που καλλιεργούνται σε θερμοκήπια που έχουν ως υλικό κάλυψης μεμβράνες πολυαιθυλενίου ουδέτερης πυκνότητας (PE). (Kang et al., 2023).



Εικόνα 12. Φωτεινές μεμβράνες κβαντικών κουκίδων. Αριστερή εικόνα, εγκατεστημένες στην οροφή, τον νότιο τοίχο και το πάνω μισό των ανατολικών και δυτικών τοίχων, του θερμοκηπίου. Δεξιά εικόνα, θερμοκήπιο χωρίς εγκατεστημένες πρόσθετες μεμβράνες. (πηγή: Hebert et al., 2022).

3.2.1.Επίδραση των φωτεινών μεμβρανών κβαντικών κουκίδων στο κλίμα και στην παραγωγή

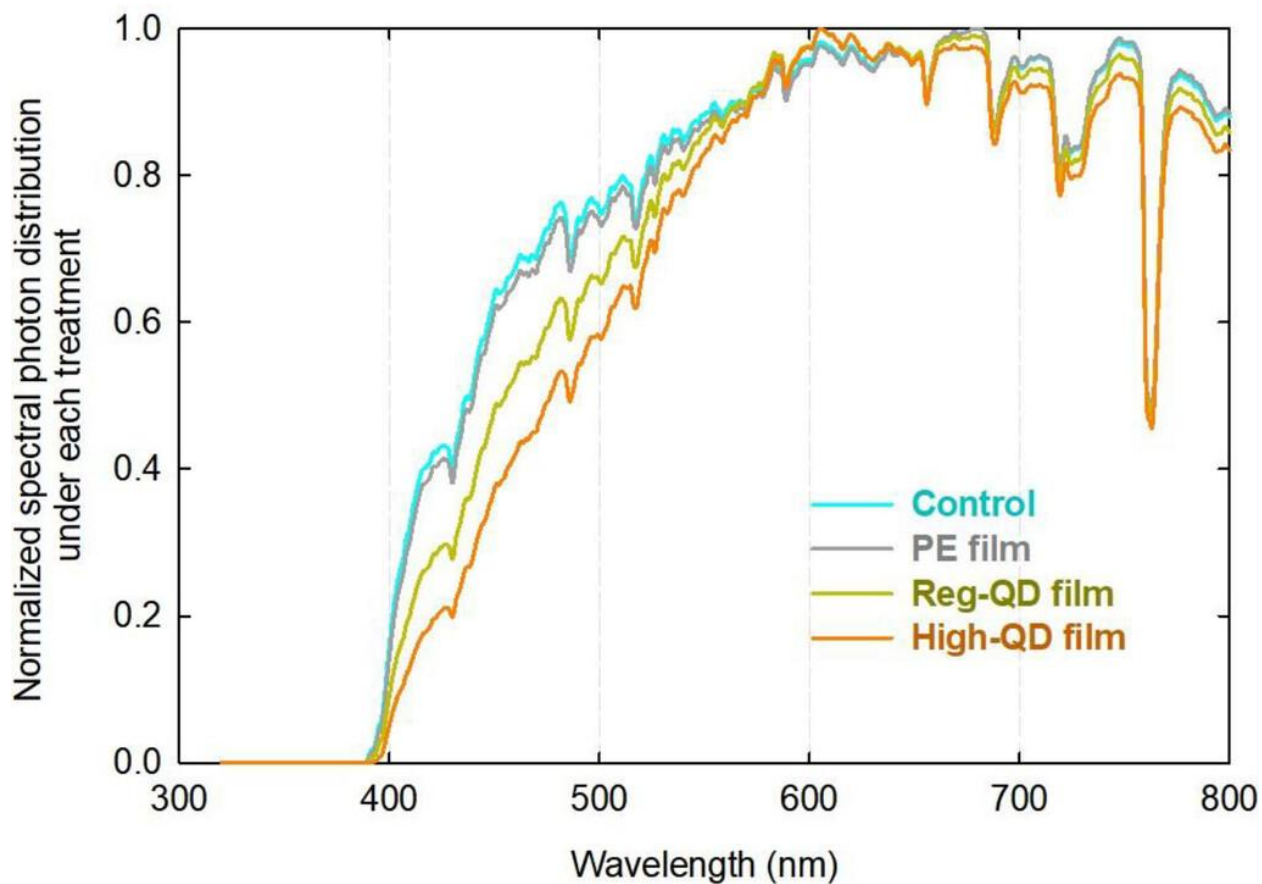
Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Kang et al. (2023), χρησιμοποίησαν τρεις καλλιέργειες γλυκό βασιλικό (*Ocimum basilicum* 'Genovese'), πράσινο μαρούλι (*Lactuca sativa* 'Rex') και κόκκινο μαρούλι romaine (*L. sativa* 'Outredgeous'). Κατά την διάρκεια αυτής της μελέτης οι καλλιέργειες αυτές καλλιεργήθηκαν κάτω από τέσσερις τύπους πλαστικών μεμβρανών. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε μεμβράνη κανονικής συγκέντρωσης CIS/ZnS QD, στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε μεμβράνη υψηλής συγκέντρωσης QD CIS/ZnS, στη τρίτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε πλαστικό φύλλο πολυαιθυλενίου PE (για τη δημιουργία ενός διάχυτου περιβάλλοντος φωτός με ελαφρώς μειωμένη ένταση φωτός παρόμοια με εκείνη κάτω από τις μεμβράνες QD). Στην τέταρτη περίπτωση δεν χρησιμοποιήθηκε μεμβράνη τροποποίησης του φωτός, η περίπτωση αυτή αποτέλεσε τον μάρτυρα. Από αυτήν την έρευνα διεξήχθησαν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την φασματική ποιότητα φωτός, με την θερμοκρασία, την μορφολογία φυτών και την παραγωγή βιομάζας και με την μελάγχρωση.

Φασματική ποιότητα του φωτός

Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντικές φασματικές μετατοπίσεις του φωτός κάτω από τους δύο τύπους φιλμ QD. Οι δύο μεμβράνες QD σε σύγκριση με τον μάρτυρα είχαν σαν αποτέλεσμα τη μερική μετατροπή της υπεριώδους ακτινοβολίας A και του μπλε φωτός σε πράσινη, κόκκινη και πολύ κόκκινη ακτινοβολία. Η υψηλή επεξεργασία των μεμβρανών QD είχε σαν αποτέλεσμα το κλάσμα του μπλε φωτός να μειωθεί κατά 33% (από 17,26% σε 11,64% της συνολικής πυκνότητας ροής φωτονίων εντός 320 έως 800 nm). Ενώ από την άλλη πλευρά τα κλάσματα του πράσινου, του κόκκινου και του πολύ κόκκινου είχαν σαν αποτέλεσμα να αυξηθούν κατά 4%, 10% και 6%, αντίστοιχα, σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Στην περίπτωση της μεμβράνης reg QD, το κλάσμα μπλε φωτός μειώθηκε κατά 18%, ενώ τα κλάσματα πράσινης, κόκκινης και πολύ κόκκινης ακτινοβολίας αυξήθηκαν κατά 3%, 6% και 3%, αντίστοιχα. Το πολυανθρακικό υλικό κάλυψης

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

θερμοκηπίου μεταδίδει ελάχιστα την υπεριώδη ακτινοβολία (η υπεριώδης ακτινοβολία Α ήταν μόνο το 0,21% της συνολικής πυκνότητας ροής φωτονίων στο μάρτυρα) σε αντίθεση με τις μεμβράνες QD που μετέτρεψαν αποτελεσματικά το 45% έως το 76% της υπεριώδους ακτινοβολίας που μεταδόθηκε στο θερμοκήπιο. Σε σύγκριση με τον μάρτυρα, το πλαστικό φύλλο πολυαιθυλενίου PE δεν μετέβαλε σημαντικά τη φασματική ποιότητα φωτός. (Kang et al., 2023).



Σχήμα 4. Φασματικές κατανομές φωτονίων υπό τέσσερις φασματικές επεξεργασίες. Ο μάρτυρας είναι το μη φιλτραρισμένο ηλιακό φως του θερμοκηπίου. Επιπλέον, το φως φιλτραρίστηκε μέσω των ακόλουθων τριών τύπων φιλμ: φιλμ κβαντικών κουκκίδων κανονικής συγκέντρωσης (φιλμ reg QD), φιλμ κβαντικών κουκκίδων υψηλής συγκέντρωσης (φιλμ υψηλής QD) και φιλμ πολυαιθυλενίου (PE). (πηγή: Kang et al., 2023).

Θερμοκρασία

Όσον αφορά την θερμοκρασία του αέρα τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μεμβράνες δεν την επηρέασαν σημαντικά συμπεριλαμβανομένων των ημερήσιων ελάχιστων, μέγιστων και

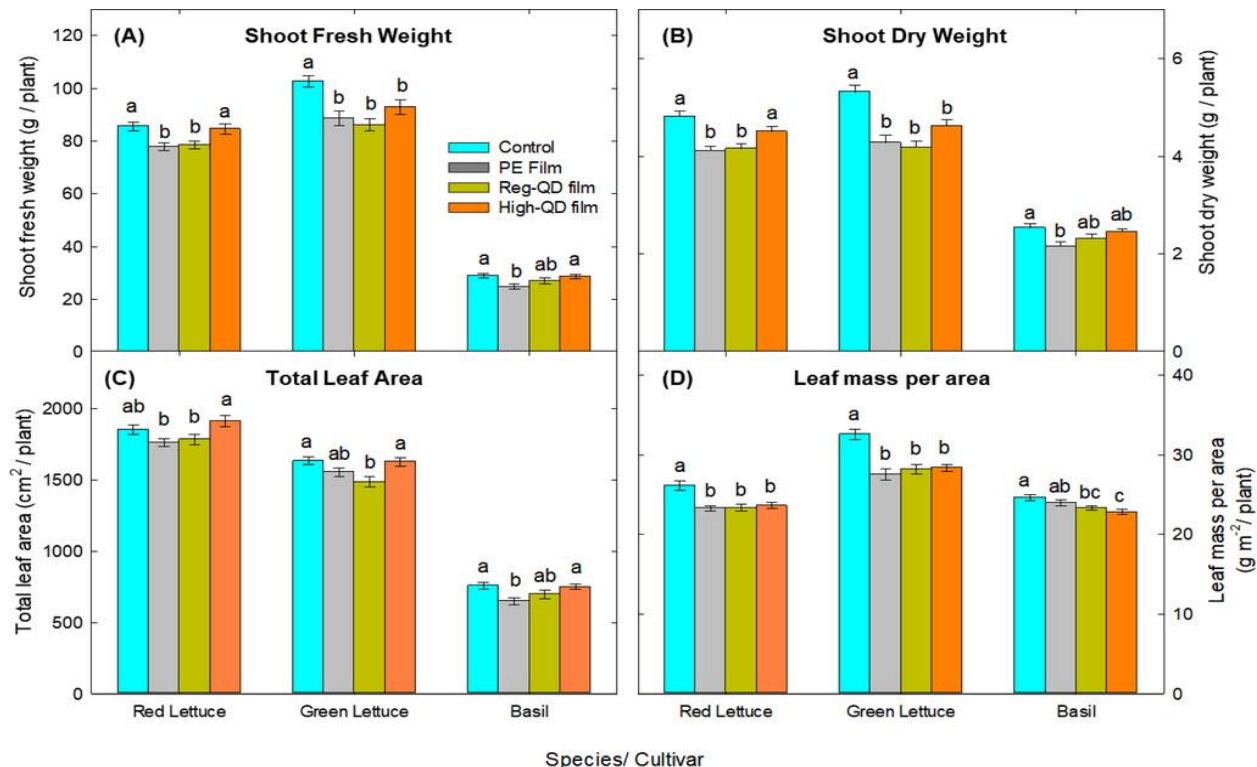
μέσων θερμοκρασιών. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων και στις τέσσερις μεταχειρίσεις οι μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες ήταν από 23,3 έως 23,5 °C. (Kang et al., 2023).

Μορφολογία φυτών και παραγωγή βιομάζας

Για τις δύο ποικιλίες μαρουλιού τα ξηρά βάρη των φυτών που καλλιεργήθηκαν κάτω από μεμβράνες PE και reg QD ήταν μικρότερα από εκείνα του μάρτυρα. Αυτό οφείλεται πιθανότατα λόγω των μειώσεων των DLIs που προκάλεσαν οι μεμβράνες PE και reg QD. Παρόλα αυτά, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στο ξηρό βάρος του βλαστού, στο φρέσκο βάρος του βλαστού και στη συνολική επιφάνεια των φύλλων μεταξύ του μάρτυρα και της υψηλής QD για το κόκκινο μαρούλι «Outredgeous» παρά τη μείωση κατά 23% του μέσου DLI των φυτών που καλλιεργήθηκαν κάτω από μεμβράνη υψηλής QD σε σύγκριση με εκείνη του μάρτυρα. Όσον αφορά την συνολική επιφάνεια των φύλλων και των δύο ποικιλιών μαρουλιού έτεινε να μειώνεται με την μεμβράνη PE και την μεμβράνη reg QD σε σύγκριση με εκείνη που σχετίζεται με την μεμβράνη υψηλής QD και το μάρτυρα. Το LMA ήταν σταθερά υψηλότερο στον μάρτυρα από ότι στις τρεις μεταχειρίσεις με μεμβράνες. (Kang et al., 2023).

Για το κόκκινο μαρούλι «Outredgeous» μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων με μεμβράνες παρατηρήθηκε ότι η μεμβράνη υψηλής QD απέδωσε σημαντικά υψηλότερη συνολική επιφάνεια φύλλων (κατά 7% έως 8%), υψηλότερο βάρος φρέσκου βλαστού (κατά 9% έως 10%) και υψηλότερο ξηρό βάρος βλαστών (κατά 8% έως 10%) από τις μεμβράνες PE και reg QD. Για το πράσινο μαρούλι «Rex», η συνολική επιφάνεια φύλλων στην περίπτωση της μεμβράνης υψηλής QD ήταν υψηλότερη (κατά 9%) από εκείνη της μεμβράνης reg QD. Ωστόσο, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στη μάζα των φύλλων στο φρέσκο βάρος του βλαστού και στο ξηρό βάρος του βλαστού μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων. (Kang et al., 2023).

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

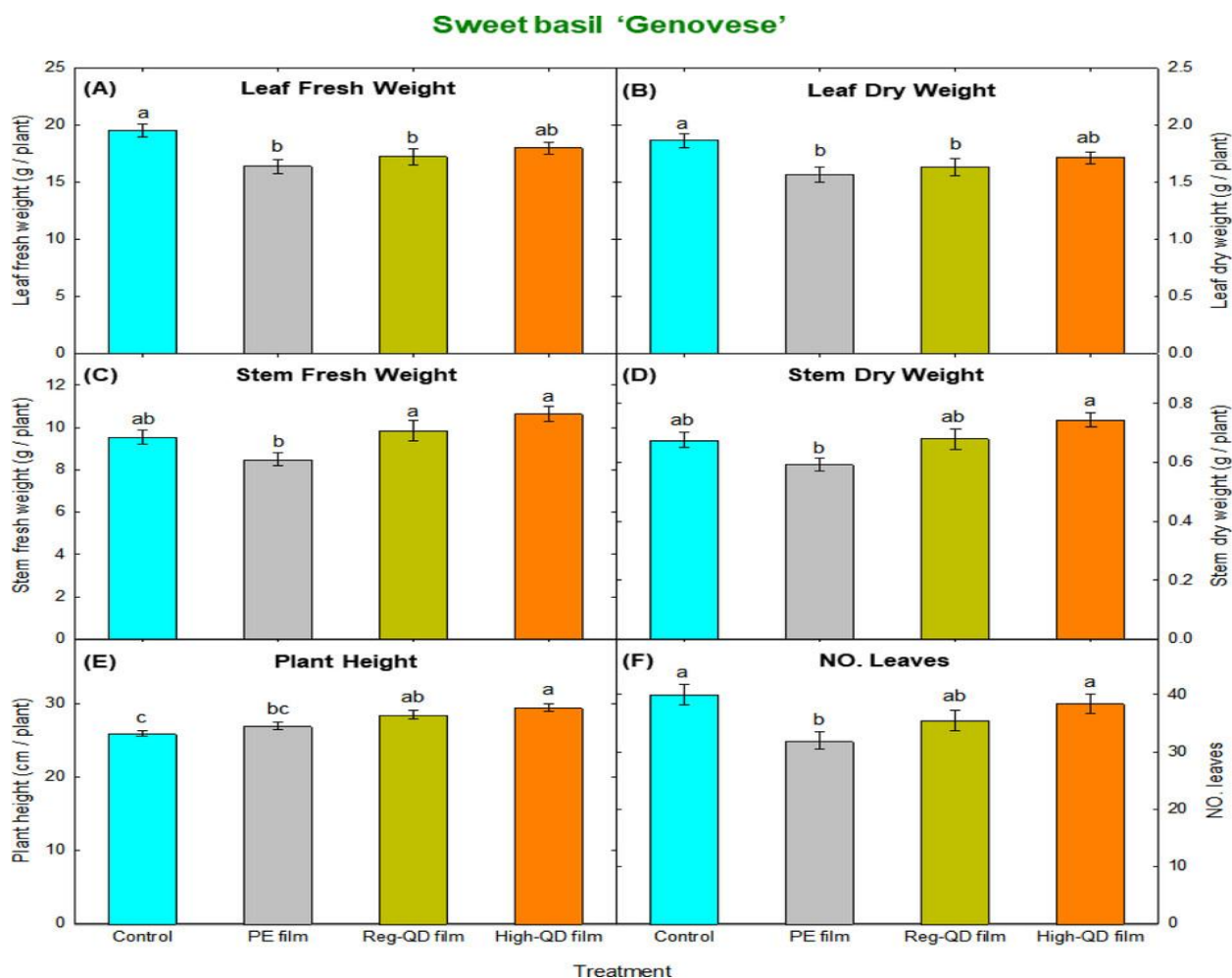


Ραβδόγραμμα 1. Φρέσκο βάρος βλαστών (**A**), ξηρό βάρος βλαστών (**B**), συνολική επιφάνεια φύλλων (**C**) και μάζα φύλλων ανά επιφάνεια (**D**) κόκκινου μαρουλιού romaine 'Outredgeous', πράσινου μαρουλιού butterhead 'Rex' και γλυκού βασιλικού 'Genovese' που καλλιεργήθηκαν υπό τέσσερις μεταχειρίσεις [μη φιλτραρισμένο ηλιακό φως θερμοκηπίου (μάρτυρας), μεμβράνη πολυαιθυλενίου (PE), μεμβράνη κβαντικών κουκκίδων κανονικής συγκέντρωσης (μεμβράνη κανονικής QD) και μεμβράνη κβαντικών κουκκίδων υψηλής συγκέντρωσης (μεμβράνη υψηλής QD)].(πηγή: Kang et al., 2023).

Όσον αφορά τον βασιλικό, τόσο στην μεταχείριση με την μεμβράνη υψηλής QD όσο και με την μεμβράνη reg QD τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συνολική επιφάνεια των φύλλων, το ξηρό βάρος βλαστών (μίσχοι και φύλλα) και το φρέσκο βάρος ήταν παρόμοια με εκείνα του μάρτυρα. Ενώ στην μεταχείριση με την μεμβράνη PE τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντικές μειώσεις σε αυτές τις παραμέτρους (συνολική επιφάνεια των φύλλων, ξηρό βάρος βλαστών και το φρέσκο βάρος) σε σύγκριση με εκείνες του μάρτυρα. Το LMA του βασιλικού στις μεταχειρίσεις με μεμβράνες QD ήταν σημαντικά χαμηλότερο από αυτό του βασιλικού στην μεταχείριση του μάρτυρα. Ωστόσο, δεν υπήρξε σημαντική διαφορά μεταξύ της μεταχείρισης με μεμβράνη PE και μάρτυρα. Το νωπό βάρος και το ξηρό βάρος των φύλλων του βασιλικού στις θεραπείες με μεμβράνες PE και reg QD ήταν χαμηλότερα από εκείνα του βασιλικού στην μεταχείριση του

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

μάρτυρα. Ωστόσο, δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων μεμβράνης υψηλής QD και μάρτυρα. Το νωπό βάρος και το ξηρό βάρος του στελέχους του βασιλικού ήταν υψηλότερα στην θεραπεία μεμβράνης υψηλής QD. Τα φυτά βασιλικού που καλλιεργήθηκαν κάτω από μεμβράνη υψηλής QD είχαν παρόμοια ύψη με εκείνα που αναπτύχθηκαν κάτω από μεμβράνη reg QD, αλλά ήταν ψηλότερα από εκείνα που καλλιεργήθηκαν κάτω από μεμβράνη PE και του μάρτυρα. Τα φυτά βασιλικού που αναπτύχθηκαν κάτω από τις μεμβράνες QD και τον μάρτυρα είχαν περισσότερα φύλλα από εκείνα που αναπτύχθηκαν κάτω από την μεμβράνη PE. (Kang et al., 2023).



Ραβδόγραμμα 2. Φρέσκο βάρος φύλλων (A), ξηρό βάρος φύλλων (B), φρέσκο βάρος στελέχους (C), ξηρό βάρος στελέχους (D), ύψος φυτού (E) και αριθμός φύλλων (F) γλυκού βασιλικού «Genovese» που καλλιεργήθηκε υπό

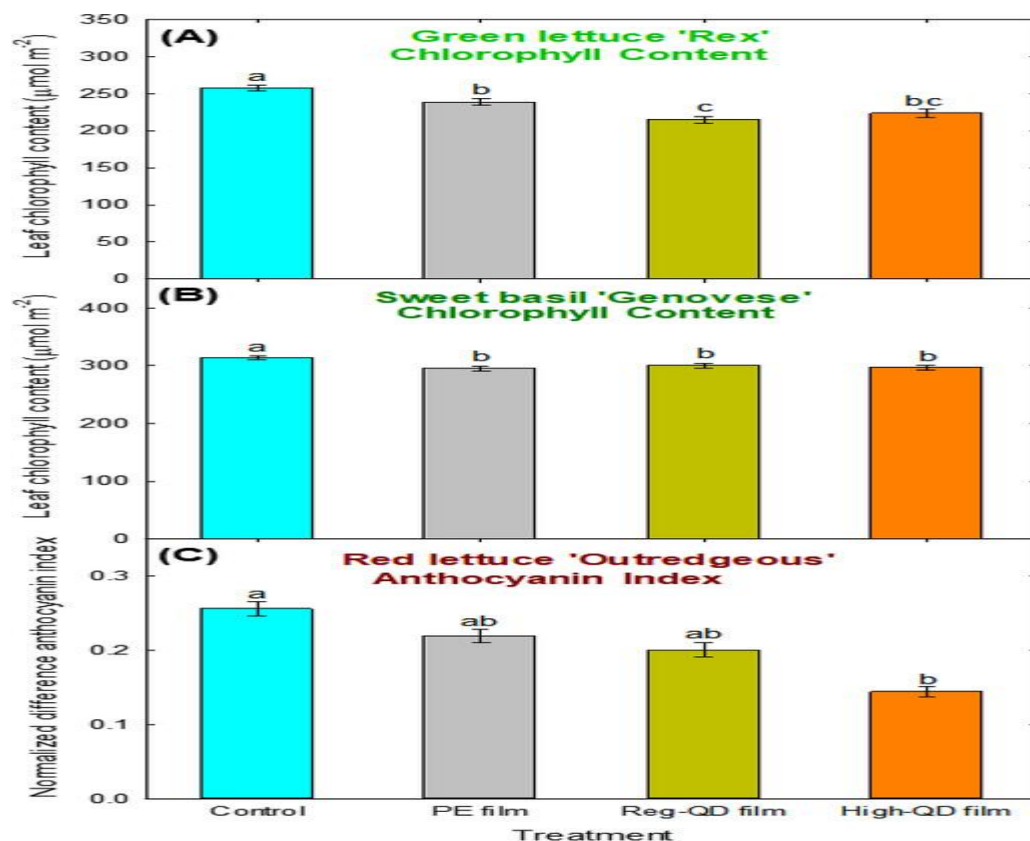
Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

τέσσερις επεξεργασίες [μη φιλτραρισμένο ηλιακό φως θερμοκηπίου (μάρτυρα), μεμβράνη πολυαιθυλενίου (PE), μεμβράνη κβαντικών κουκκίδων κανονικής συγκέντρωσης (φιλμ κανονικής QD) και μεμβράνη κβαντικών κουκκίδων υψηλής συγκέντρωσης (φιλμ υψηλής QD)]. (πηγή: Kang et al., 2023).

Μελάγχρωση

Όσον αφορά την περιεκτικότητα σε φυλλική χλωροφύλλη τόσο στο βασιλικό όσο και στο μαρούλι «Rex» ήταν χαμηλότερη στις μεταχειρίσεις με μεμβράνη PE και στις μεμβράνες QD και υψηλότερη στην μεταχείριση του μάρτυρα.

Το κόκκινο μαρούλι «Outredgeous» είχε υψηλότερη συσσώρευση ανθοκυανίνης όταν καλλιεργήθηκε κάτω από μεμβράνη υψηλής QD, ακολουθούμενο από την μεμβράνη reg QD, την μεμβράνη PE και τον μάρτυρα. (Kang et al., 2023).



Ραβδόγραμμα 3. Περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη φύλλων του πράσινου μαρουλιού 'Rex' (A) και του γλυκού βασιλικού 'Genovese' (B) και ομαλοποιημένος δείκτης ανθοκυανίνης διαφοράς (NDAI) του κόκκινου μαρουλιού 'Outredgeous' (C) που καλλιεργήθηκε υπό τέσσερις επεξεργασίες [μη φιλτραρισμένο ηλιακό φως θερμοκηπίου

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

(μάρτυρας), μεμβράνη πολυαιθυλενίου (μεμβράνη PE), μεμβράνη QD κανονικής συγκέντρωσης (μεμβράνη reg QD) και μεμβράνη QD υψηλής συγκέντρωσης (μεμβράνη υψηλής QD)]. (πηγή: Kang et al., 2023).

3.2.2. Σύνοψη - Σχολιασμός

Συνολικά, διαπιστώθηκε ότι οι φασματικές μετατοπίσεις που προκαλούνται από τις μεμβράνες QD (δηλαδή, μείωση του κλάσματος μπλε φωτός και αυξήσεις στα κλάσματα πράσινου, κόκκινου και πολύ κόκκινου) προήγαγαν την επέκταση των φύλλων και την επιμήκυνση του στελέχους των κόκκινων και πράσινων μαρουλιών και του βασιλικού. Οι μορφολογικές αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν κάτω από την μεμβράνη υψηλής QD οδήγησαν σε βελτιωμένη δέσμευση ακτινοβολίας και απόδοση των φυτών σε σύγκριση με εκείνες των φυτών που καλλιεργούνται κάτω από μεμβράνη PE με παρόμοια ένταση φωτός αλλά χωρίς φασματικές μετατοπίσεις. Παρόλα αυτά και οι τρεις μεμβράνες (μεμβράνη PE, μεμβράνη reg QD και μεμβράνη υψηλού QD) οδήγησαν σε μείωση της έντασης του φωτός. Αυτή η μείωση της έντασης του φωτός κάτω από την μεμβράνη PE και την μεμβράνη reg QD μείωσε την απόδοση των φυτών σε σύγκριση με εκείνη υπό τον μάρτυρα (δηλαδή, μη φιλτραρισμένο ηλιακό φως θερμοκηπίου). Αντίθετα, με την χρήση της μεμβράνη υψηλού QD η απόδοση των φυτών ήταν συγκρίσιμη με αυτή του ελέγχου παρά τη μείωση του DLI κατά 23% κάτω από την μεμβράνη υψηλού QD. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι οι διεγερτικές επιδράσεις της φασματικής μετατόπισης από την μεμβράνη υψηλού QD αντισταθμίζουν τη μείωση του DLI.

Για τη βιομηχανία των θερμοκηπίων, η άμεση ενσωμάτωση των μεμβρανών QD στα υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων θα οδηγούσε σε ελάχιστη απώλεια έντασης αντί να εφαρμόζεται ως πρόσθετο εσωτερικό στρώμα μέσα σε ένα υπάρχον θερμοκήπιο. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει τη φασματική μετατόπιση προς το κόκκινο χωρίς την απώλεια DLI. Επίσης, οι μεμβράνες QD θα μπορούσαν ενδεχομένως να εφαρμοστούν ως εσωτερικό στρώμα ενός υαλοπίνακα θερμοκηπίου από γυαλί, ακρυλικό ή πολυανθρακικό.

Οι μεμβράνες με κβαντικές κουκίδες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά κάλυψης θερμοκηπίων διότι έχουν την ικανότητα να βελτιώνουν τη φωτοσυνθετικά ενεργό ακτινοβολία (PAR). Οι κβαντικές κουκίδες μπορούν να μετατρέπουν υπεριώδη (UV) και μπλε ακτινοβολία σε κόκκινο ή πορτοκαλί φως, το οποίο απορροφάται πιο αποδοτικά από τα φυτά για

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

φωτοσύνθεση. Επίσης, παρουσιάζουν την ικανότητα να αυξάνουν την απόδοση των καλλιεργειών. Μελέτες έχουν δείξει αύξηση της βιομάζας και της απόδοσης σε ορισμένα φυτά όπως το μαρούλι και το βασιλικό, ειδικά σε περιοχές με έντονη ηλιοφάνεια. Ακόμη έχουν την δυνατότητα να ρυθμίζουν την θερμοκρασία του θερμοκηπίου. Η μείωση της υπερϊώδους ακτινοβολίας μπορεί να βοηθήσει στον περιορισμό της θερμικής φόρτισης, διατηρώντας το θερμοκήπιο πιο δροσερό ιδιαίτερα σε ζεστά κλίματα. Παρέχουν προστασία από τις βλαβερές ακτινοβολίες. Οι μεμβράνες με κβαντικές κουκίδες μπορούν να μπλοκάρουν ή να μετασχηματίσουν την UV ακτινοβολία, προστατεύοντας τα φυτά.

Παρόλα την θετική επίδραση που παρουσιάζουν οι μεμβράνες με κβαντικές κουκίδες παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα όπως είναι το κόστος. Οι μεμβράνες με κβαντικές κουκίδες είναι 2 με τρεις φορές πιο ακριβές σε σχέση με τα συμβατικά πλαστικά (π.χ. πολυαιθυλένιο). Επίσης δεν έχει εξακριβωθεί ακόμη μέσα από την έρευνα αν η απόδοση των κβαντικών κουκίδων παραμένει σταθερή σε βάθος χρόνου. Τέλος υπάρχει η πιθανότητα σε περιοχές με περιορισμένο φυσικό φως, να μην είναι ωφέλιμη η αλλαγή του φάσματος.

Η χρήση των φωτεινών μεμβρανών με κβαντικές κουκίδες ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίου είναι μια καινοτόμα και πολύ υποσχόμενη λύση. Η χρήση τους δεν είναι ακόμη ευρέως διαδεδομένη λόγω του υψηλού κόστους τους (είναι 2 με 3 φορές πιο ακριβά σε σχέση με τα απλά φύλλα PE) και της διαθεσιμότητάς τους. Η χρήση τους προς το παρόν έχει περιοριστεί ως επί το πλείστον σε επιστημονική έρευνα και παρουσιάζει θετικά αποτελέσματα στην παραγωγικότητα των φυτών.

3.3. Αγροβολταϊκά

Τα φωτοβολταϊκά (PV) έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. (Gorjian et al., 2021). Τα τελευταία χρόνια σε παγκόσμιο επίπεδο έχει παρατηρηθεί η όλο και μεγαλύτερη χρήση της ηλιακής ενέργειας με αποτέλεσμα η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών να έχει κατακτήσει τον σύγχρονο τομέα ηλεκτρικής ενέργειας με παραγωγική ικανότητα σχεδόν 107 GW το 2020. (Bellini, 2020).

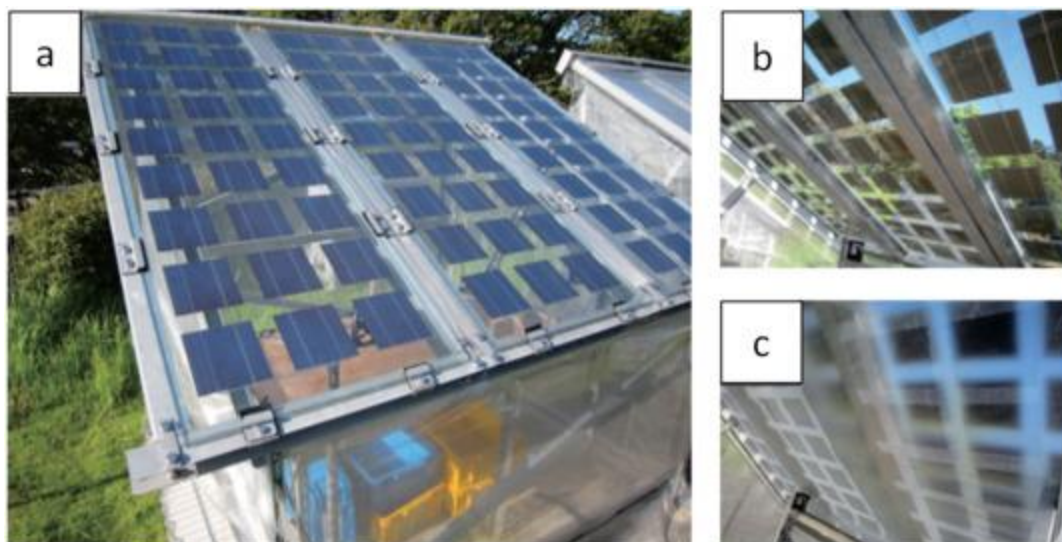
Τα φωτοβολταϊκά υλικά αποτελούν μια πάρα πολύ ενδιαφέρουσα τεχνολογία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και παρά την σχετικά υψηλή αρχική επένδυση έχουν μικρό κόστος

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

συντήρησης. (Fabrizio, 2012). Τα φωτοβολταϊκά που χρησιμοποιούνται για γεωργικούς σκοπούς ονομάζονται αγροβολταϊκά και ονομάζονται έτσι επειδή επιτυγχάνεται στο ίδιο σημείο της γης τόσο η παραγωγή φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας όσο και η καλλιέργεια της γης. Το πρόθεμα <<αγρο>> αναφέρεται στην επιστήμη και την τεχνολογία καλλιεργειών και το <<βολταϊκό>> αναφέρεται στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας. (Willockx et al., 2020).

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα που εγκαθίσταται στα θερμοκήπια χρησιμοποιούν ως επί των πλείστων ημιδιαφανοί φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία προκαλούν αλλαγή στο μικροκλίμα κάτω από το πάνελ αλλά και στην απόδοση των φυτών. Οι ημιδιαφανείς φωτοβολταϊκές μονάδες (STPV) που ενσωματώνονται στα θερμοκήπια βασίζονται σε φωτοβολταϊκά λεπτής μεμβράνης, σε οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV), σε κρυσταλικό πυρίτιο (c-Si), σε φωτοβολταϊκά συγκέντρωσης (CPV), σε φωτοβολταϊκούς συμπυκνωτές φωταύγειας (LSCs) και σε ευαισθητοποιημένα με βαφή ηλιακά κύτταρα (DSSC). (Gorjian et al., 2022).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η σκίαση των φωτοβολταϊκών στην οροφή του θερμοκηπίου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 50%, διότι τότε προκαλούνται αρνητικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών. Οι σωστές αναλογίες σκίασης των φωτοβολταϊκών θα πρέπει να κυμαίνονται από 20 έως 40%.



Εικόνα 13. Αγροβολταϊκό Θερμοκήπιο. (πηγή:<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1364032122000545-gr8.jpg>).

3.3.1. Ενσωμάτωση μονάδων c-Si STPV σε θερμοκήπια

Σε έρευνες που διεξήγαν οι Hassanien et al.(2018), διερεύνησαν τα αποτελέσματα πάνω σε μονάδες c-Si STPV που είναι εγκατεστημένες σε θερμοκήπιο στο οποίο καλλιεργούνται τομάτα και μαρούλι. Οι μονάδες αυτές εγκαταστάθηκαν πάνω στο θερμοκήπιο με νότιο προσανατολισμό και η αναλογία κάλυψης ήταν 20%. Επίσης οι μονάδες είχαν διαφάνεια 47%, ισχύ 170 Wp και απόδοσης 8,25%. Οι έρευνες αυτές έδειξαν ότι οι μονάδες αυτές μειώνουν την είσοδο του φωτός στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κατά 35% με 40% περισσότερο από το κάλυμμα πολυαιθυλενίου και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα και την μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Όσον αφορά την ανάπτυξη της καλλιέργειας τομάτας και μαρουλιού δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές σε σχέση με την ανάπτυξη αυτών των καλλιεργειών κάτω από το κάλυμμα πολυαιθυλενίου.

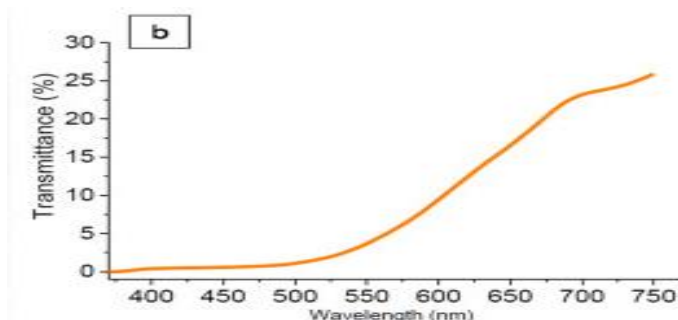
Σε μια άλλη έρευνα που διεξήγαν οι Tani et al. (2014), εξέτασαν την τάση ανάπτυξης της καλλιέργειας μαρουλιού κάτω από τρία διαφορετικά θερμοκήπια. Το πρώτο θερμοκήπιο δεν είχε αγροβολταϊκές μονάδες (περίπτωση μάρτυρα), το δεύτερο θερμοκήπιο είχε ενσωματωμένες μονάδες c-Si STPV με 50% διαφάνεια (PV-T) και το τρίτο θερμοκήπιο κάτω από τις φωτοβολταϊκές μονάδες είχε μεμβράνη διάχυσης φωτός (PV-D). Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων έδειξαν ότι η τάση ανάπτυξης της καλλιέργειας μαρουλιού στο θερμοκήπιο PV-D ήταν σχεδόν ίδια με αυτή του θερμοκηπίου μάρτυρα. Ενώ αντίθετα για το θερμοκήπιο PV-T παρατηρήθηκε ότι οι αποδόσεις της καλλιέργειας μαρουλιού ήταν χαμηλότερες σε σχέση με τα άλλα δύο θερμοκήπια. Οι διαφορές αυτές στις αποδόσεις, αποδόθηκαν στο ότι η πυκνότητα ροής των φωτονίων (PPFD) που έφταναν στα φυτά μαρουλιού από μετρήσεις που έγιναν παρατηρήθηκε ότι ήταν σταθερή στο θερμοκήπιο PV-D ενώ στο θερμοκήπιο PV-T ήταν κυμαινόμενη. Επίσης ένα άλλο συμπέρασμα που διεξήχθη ήταν ότι παρόλο που ο ρυθμός φωτοσύνθεσης των φυτών στο θερμοκήπιο PV-D ήταν χαμηλότερος, ο συνολικός αφομοιώσιμος άνθρακας ήταν υψηλότερος κάτω από συνθήκες διάχυτου φωτός με αποτέλεσμα την διείσδυση του φωτός και στα κατώτερα μέρη των φύλλων. Συμπερασματικά οι αποδόσεις των καλλιεργειών βελτιώνονται σημαντικά με την ενσωμάτωση στα θερμοκήπια διάχυτων μεμβρανών και μονάδων STPV.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία c-Si STPV είναι οι πιο συνηθισμένοι τύποι μονάδων που χρησιμοποιούνται σε θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία c-Si επιτρέπουν μέρος του ηλιακού φωτός να διέρχεται. Επιπλέον, η διάταξη των κυψελών, το χρώμα και ο τύπος του γυάλινου υποστρώματος και το επίπεδο διαφάνειας μπορούν να ρυθμιστούν, επιτρέποντας μεγάλη ευελιξία στο σχεδιασμό. Επιπλέον, τα στοιχεία αυτά έχουν υψηλότερο κόστος σε σύγκριση με τα αδιαφανή φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Οι μονάδες STPV λόγω της σκίασης που προκαλούν ενδέχεται σε ορισμένες περιπτώσεις να μην έχουν σημαντική επίδραση στο ρυθμό ανάπτυξης των καλλιεργούμενων φυτών. Για την βελτίωση της απόδοσης των καλλιεργειών μπορεί να γίνει χρήση των μονάδων STPV με μεμβράνες διάχυσης έτσι ώστε να γίνεται διείσδυση του ηλιακού φωτός στα χαμηλότερα μέρη των καλλιεργούμενων φυτών.

3.3.2. Ενσωμάτωση μονάδων STPV λεπτής μεμβράνης σε θερμοκήπια

Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε θερμοκήπιο που είχε ως υλικό κάλυψης γυαλί ενσωματώθηκαν μονάδες STPV λεπτής μεμβράνης και μελετήθηκε η επίδραση των χρωματισμένων μονάδων λεπτής μεμβράνης στην ανάπτυξη φυτών σπανακιού και βασιλικού. Οι μονάδες αυτές είχαν ισχύ 66 W/m^2 και απόδοση 8%. Οι μονάδες αυτές είχαν την ικανότητα να απορροφούν το φως στο μπλε και πράσινο μέρος του φάσματος και να αφήνουν να περάσει μόνο το φως στο κόκκινο μέρος του φάσματος, το οποίο τους προσδίδει μια πορτοκαλί απόχρωση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι οι αποδόσεις της βιομάζας μειώνονται τόσο για το σπανάκι όσο και για το βασιλικό κατά 26% και 15% αντίστοιχα. Επίσης παρατηρήθηκαν και κάποιες μορφολογικές αλλαγές, το σπανάκι είχε μεγαλύτερο στέλεχος και ο βασιλικός μεγαλύτερα φύλλα. (Thompson et al., 2020).



Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

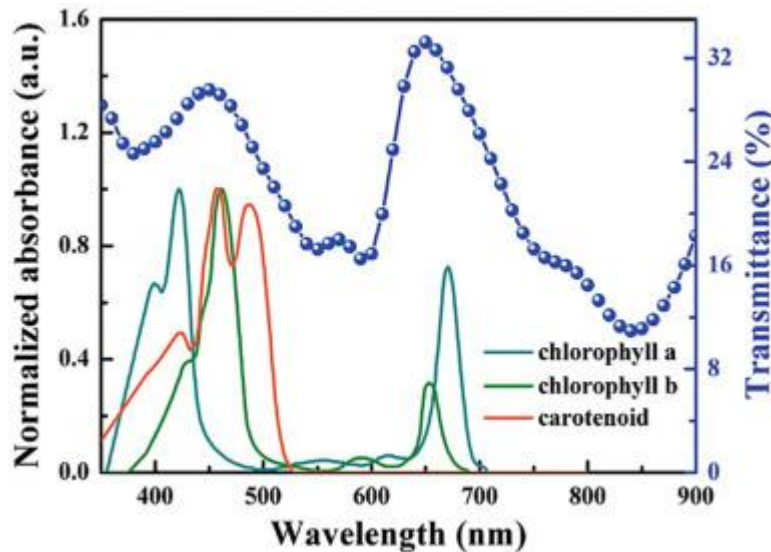
Σχήμα 5. Φασματική απόκριση γυαλιού που έχει ενσωματωμένες μονάδες STPV λεπτής μεμβράνης στο ορατό φάσμα. (πηγή: Thompson et al., 2020)

Σε μια άλλη έρευνα οι Aira et al. (2021), πραγματοποίησαν πείραμα σε θερμοκήπιο που είχε ως υλικό κάλυψης γυαλί. Το πρότυπο θερμοκήπιο είχε διαστάσεις (12 m × 2,5 m), δηλαδή 30 m². Το θερμοκήπιο χωρίστηκε σε δύο ίσα τμήματα από ένα διαφανές τοίχο με έκταση 15 m² το κάθε ένα. Το ένα τμήμα είχε καλυμμένη την οροφή με συμβατό γυαλί και το άλλο τμήμα είχε ενσωματωμένο πάνω στο γυαλί μονάδες STPV λεπτής μεμβράνης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το τμήμα του θερμοκηπίου που είχε πάνω στο γυαλί ενσωματωμένες μονάδες STPV λεπτής μεμβράνης παρουσίασε μια ελαφρώς μείωση στην παραγωγή της φυτικής μάζας και επιτάχυνε τον ρυθμό ανάπτυξης των ηλιόφιλων φυτών.

Η εφαρμογή μονάδων STPV λεπτής μεμβράνης αποτελεί μια πολύ ελπιδοφόρα λύση για τα θερμοκήπια, καθώς παρουσιάζουν την ικανότητα να μπορούν να αντικαταστήσουν τα γυάλινα καλύμματα που χρησιμοποιούνται σήμερα, το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια συνεργιστική δυνατότητα μείωσης του κόστους. Παρόλα αυτά όμως η χρήση αυτών των μονάδων STPV έχει περιοριστεί σε πειραματικά θερμοκήπια και ο λόγος πιθανότατα είναι η χαμηλή απόδοση των καλλιεργειών.

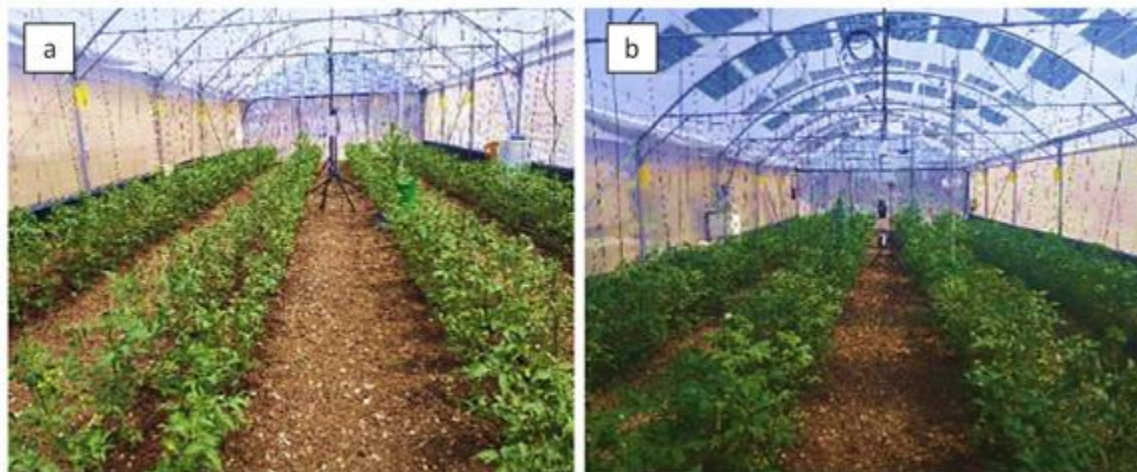
3.3.3. Ενσωμάτωση μονάδων ημιδιαφανών οργανικών φωτοβολταϊκών (OPV) σε θερμοκήπια

Τα ημιδιαφανή OPV παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των χαρακτηριστικών απορρόφησης που διαθέτουν και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συμπληρώσουν τις φασματικές ανάγκες φωτός για την ανάπτυξη των φυτών. Οι Shi et al. (2019), κατόρθωσαν και δημιούργησαν ένα εκλεκτικό αδιαφανές κύτταρο OPV μήκους κύματος, το οποίο είχε φάσμα μετάδοσης ίδιο με τα φάσματα απορρόφησης των κύριων φωτοποδοχέων, επιτρέποντας έτσι τα μήκη κύματος που απαιτούνται για την φωτοσύνθεση να φτάσουν στα φυτά. Οι ημιδιαφανείς OPV παρουσίασαν μια απόδοση της τάξης του 7,75% και συντελεστή ανάπτυξης καλλιέργειας 24,8%. Παρόλα αυτά, διαπιστώθηκε ότι είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί η ακριβής ικανότητα συντονισμού, γεγονός που απαιτεί περαιτέρω έρευνα.



Σχήμα 6. Φάσματα οπτικής απορρόφησης της χλωροφύλλης α, της χλωροφύλλης β και του καροτενοειδούς, και τα φάσματα μετάδοσης του ανεπτυγμένου πολυμερικού ηλιακού στοιχείου. (πηγή: Shi et al., 2019).

Σε άλλη μελέτη οι Friman-Peretz et al. (2020), μελέτησαν τις φυσιολογικές παραμέτρους, το μικροκλίμα και την απόδοση της καλλιέργειας τομάτας που καλλιεργείται σε δύο σήραγγες θερμοκηπίου. Η μία σήραγγα θερμοκηπίου (μάρτυρας) δεν είχε σίτες σκίασης το 2018 ενώ το 2019 είχε σίτες σκίασης σε ποσοστό 25% και η δεύτερη σήραγγα θερμοκηπίου ήταν καλυμμένη στην οροφή με εύκαμπτα ημιδιαφανοί OPV σε ποσοστό 37% και η σκίασή της ήταν 23%. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στην σήραγγα OPV χωρίς σίτες σκίασης ο αριθμός των τοματών και η μέση μάζα τους βρέθηκαν υψηλότερα κατά 9,36% και 21%, αντίστοιχα, παρά τη χαμηλότερη ηλιακή ακτινοβολία που εισήλθε στο θερμοκήπιο λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας περιβάλλοντος και φύλλων που μετρήθηκε στη σήραγγα OPV. Ενώ στη σήραγγα OPV με σκίαση 25%, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στο μικροκλίμα και στην απόδοση των φυτών τομάτας σε σύγκριση με τη σήραγγα του μάρτυρα (σκίαση με σίτες σε ποσοστό 25%). Συμπερασματικά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μονάδες OPV μπορούν να αντικαταστήσουν τις σίτες σκίασης, προστατεύοντας έτσι τα φυτά και παρέχοντας καθαρή ηλεκτρική ενέργεια.



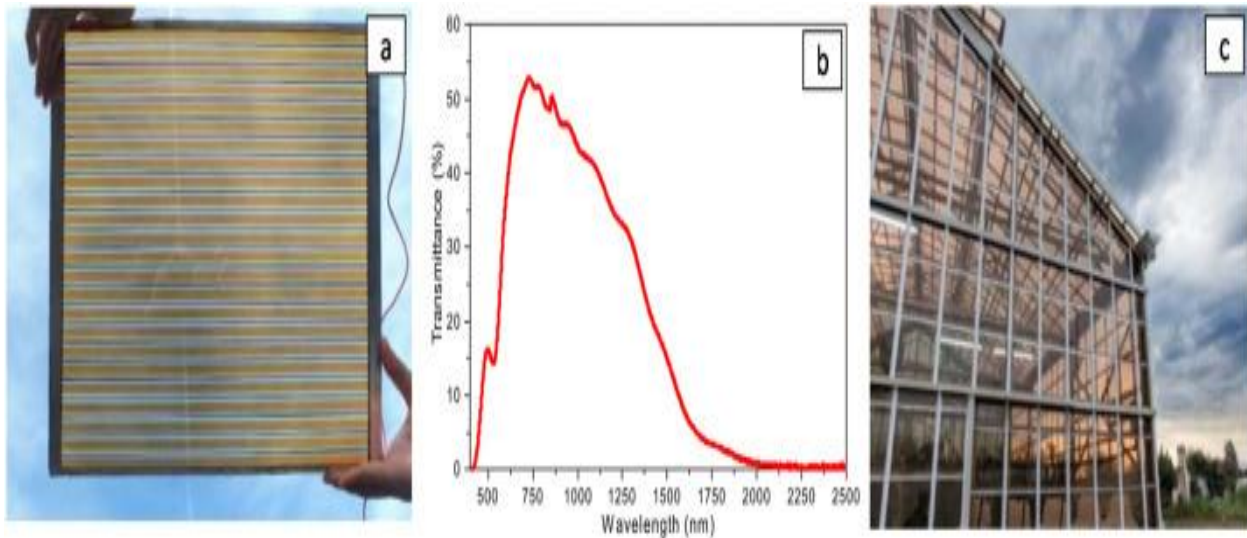
Εικόνα 14. α) Θερμοκήπιο μάρτυρα και β) Θερμοκήπιο OPV (πηγή: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1364032122000545-gr15.jpg>)

Στα OPV είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθούν υψηλές ηλιακές αποδόσεις αλλά έχουν την ικανότητα να επιτρέπουν την διέλευση του ορατού φάσματος, χρησιμοποιώντας μόνο αόρατη υπεριώδη ή υπέρυθη ακτινοβολία για την παραγωγή ενέργειας. Επίσης τα OPV είναι πολύ πιο εύκολο να ενσωματωθούν σε θερμοκήπια καθώς έχουν χαρακτηριστικά επιλεκτικής διαφάνειας ως προς το μήκος κύματος, όπως επίσης έχουν ευελιξία και χαμηλό βάρος. Τέλος το γεγονός ότι δεν έχουν ευρεία χρήση τα καθιστά ακριβά. Παρόλα αυτά όμως υπάρχει η δυνατότητα στο μέλλον να μειωθεί το κόστος των OPV καθώς βασίζονται σε άφθονα μη τοξικά υλικά και σε τεχνικές χαμηλής θερμοκρασίας, χαμηλού κόστους και γρήγορης κατασκευής.

3.3.4. Ενσωμάτωση μονάδων STPV με χρήση συνθετικών ηλιακών κυττάρων βαφής DSSC σε θερμοκήπια

Οι Kim et al.(2014), ανέπτυξαν ένα ειδικό συνθετικό ηλιακό κύτταρο βαφής (DSSC) κάνοντας χρήση νέων ευαισθητοποιητών ρουθηνίου (Ru), το οποίο βρίσκει εφαρμογή σε θερμοκήπια και έχει ως στόχο την ενίσχυση της μετάδοσης των μπλε και κόκκινων μήκος κύματος. Μέτρησαν και βρήκαν ότι η μετάδοση στα 440 nm (μπλε) ήταν 18% και στα 660 nm (κόκκινο) ήταν 62%. Οι Mourtzikou et al. 2020, χρησιμοποίησαν μονάδα STPV με χρήση DSSC σε πρότυπο θερμοκήπιο 100m² στο οποίο καλλιεργήθηκε τομάτα και έγινε σύγκριση με θερμοκήπιο μάρτυρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τομάτες που καλλιεργήθηκαν στο θερμοκήπιο DSSC

αναπτύχθηκαν καλύτερα σε σχέση με τις τομάτες που αναπτύχθηκαν στο θερμοκήπιο μάρτυρα. Επιπλέον, στο θερμοκήπιο DSSC παρατηρήθηκε μείωση της χρήσης φυτοφαρμάκων λόγω του αποκλεισμού του υπεριώδους φωτός.



Εικόνα 15. α) Μια μονάδα DSSC $50 \times 50 \text{ cm}^2$, β) Διαπερατότητα της μονάδας σε όλο το ηλιακό φάσμα και γ) Ένα πρωτότυπο θερμοκηπίου 100 m^2 με DSSC. (πηγή: Mourtzikou et al., 2020).

Τα DSSC είναι εύκαμπτα και ελαφριά υλικά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Τα DSSC έχουν την ικανότητα να λειτουργούν υπό συνθήκες διάχυτου φωτός καθώς η απόδοσή τους είναι ανεξάρτητη από τη γωνία πρόσπτωσης του φωτός. Έτσι τα DSSC βελτιώνουν τη διείσδυση του φωτός, βοηθώντας το φως να φτάσει σε όλο το καλλιεργούμενο φυτό.

3.3.5. Ενσωμάτωση συγκεντρωτικών μονάδων STPV σε θερμοκήπια

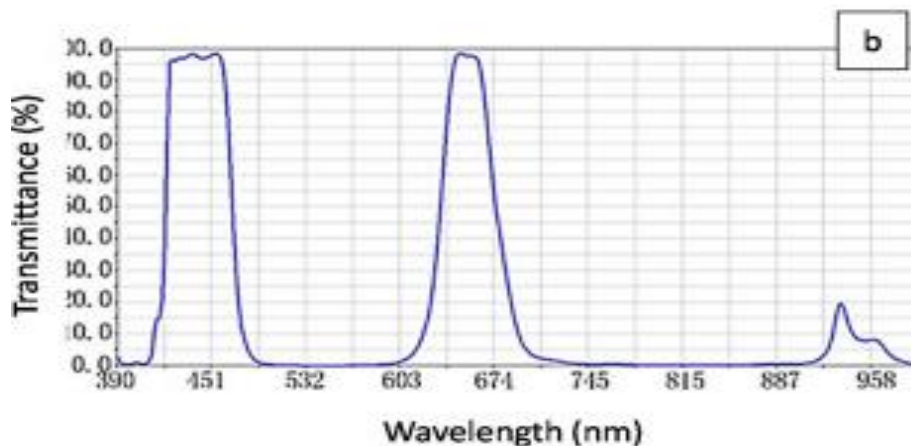
Τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά (CPV) χρησιμοποιούν διαθλαστές ή οπτικούς ανακλαστήρες για να συγκεντρώνουν το λαμβανόμενο ηλιακό φως σε ένα ηλιακό κύτταρο. Τα CPV ανάλογα με τον λόγο συγκέντρωσης διακρίνονται σε φωτοβολταϊκά υψηλής συγκέντρωσης (HCPVs) και σε φωτοβολταϊκά χαμηλής συγκέντρωσης PVs (LCPVs). (Wiesenfarth et al., 2017)

Τα ημιδιαφανή CPV μπορεί να έχουν διπλή χρήση ανάλογα με την οπτική του συμπεκνωτή. Όταν τα ημιδιαφανή CPV (STCPVs) χρησιμοποιούν φακούς Fresnel δίνουν την

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

δυνατότητα στο διάχυτο ηλιακό φως να περνάει μέσα από αυτά και έτσι να είναι διαθέσιμο για τα φυτά. Επίσης, όταν χρησιμοποιούν καμπύλα κάτοπτρα, μπορούν να εφαρμοστούν ειδικά δίχρωμα κάτοπτρα επιτρέποντας την επιλεκτική διαφάνεια του μήκους κύματος. (Miskin et al., 2019).

Οι Hirai et al. (2015), ανέπτυξαν μια πρωτότυπη μονάδα STCPVs και η απόδοσή της αξιολογήθηκε υπό εξωτερικές συνθήκες όπου συστοιχίες φακών συγκεντρώνουν το άμεσο ηλιακό φως σε ηλιακές κυψέλες τριπλής σύνδεσης. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η μέση απόδοση μετατροπής μονάδων ήταν 28,2% και η διάχυτη μετάδοση ηλιακού φωτός ήταν άνω του 70%. Επιπλέον, συνέκριναν την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στα φυτά με μονάδες CSTPV και παραδοσιακές μονάδες c-Si. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ποσότητα και η ομοιογένεια του φωτός είναι πολύ υψηλότερες στην περίπτωση του CSTPV.

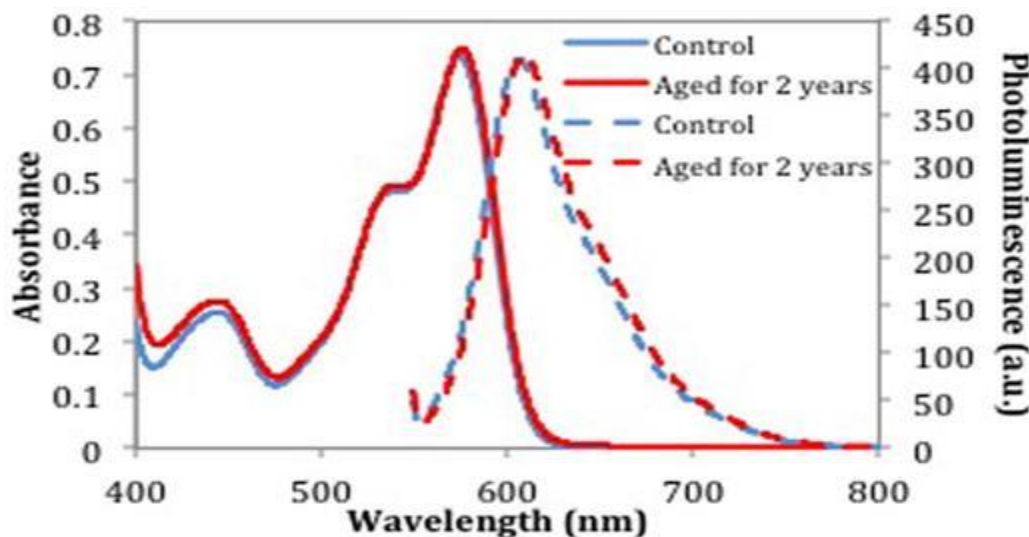


Σχήμα 7. Φάσμα μετάδοσης της σχεδιασμένης διχρωματικής μεμβράνης. (πηγή: Liu et al., 2018).

Οι μονάδες CSTPV που χρησιμοποιούν φακούς έχουν διπλή εφαρμογή. Έχουν την ικανότητα να χρησιμοποιούν το διάχυτο ηλιακό φως για την ανάπτυξη των φυτών και το άμεσο ηλιακό φως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλα αυτά όμως απαιτούνται περεταίρω μελέτες και έρευνες για την καλύτερη διερεύνηση των επιπτώσεων που έχουν οι μονάδες αυτές στην ανάπτυξη των φυτών.

3.3.6. Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών ηλιακών συμπυκνωτών (LSC) σε θερμοκήπια

Ερευνητές από το πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας δημιούργησαν ένα ημιδιαφανές σύστημα το οποίο συνδυάζει φωτοβολταϊκά ηλιακών συμπυκνωτών με συμβατικές ηλιακές κυψέλες c-Si το οποίο ονόμασαν Επιλεκτικό Φωτοβολταϊκό Σύστημα Μήκους Κύματος (WSPV). Οι ερευνητές αυτοί ισχυρίστηκαν ότι η φωταύγεια βαφή έχει την ικανότητα να απορροφά μερικά από τα πράσινα και μπλε μήκη κύματος που μεταφέρονται σε κόκκινα μήκη κύματος και οδηγούνται στις ηλιακές κυψέλες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ το υπόλοιπο ηλιακό φως είναι διαθέσιμο για τα φυτά. (Corrado et al., 2013).



Σχήμα 8. Εμφανίζονται τα φάσματα απορρόφησης (συνεχής γραμμή, αριστερός άξονας) και τα φάσματα εκπομπής φωταύγειας (διακεκομμένη γραμμή, δεξιός άξονας) της χρωστικής στην έναρξη της δοκιμής σε θερμοκήπιο (μπλε) και μετά από δύο χρόνια στο χωράφι (κόκκινο). (πηγή: Corrado et al., 2013).

Οι Loik et al. (2017), διεξήγαγαν πείραμα στο οποίο χρησιμοποίησαν δύο θερμοκήπια, το θερμοκήπιο μάρτυρας είχε ως υλικό κάλυψης γυαλί ενώ το δεύτερο θερμοκήπιο ήταν πλήρως καλυμμένο WSPVs και εξέτασαν τα αποτελέσματα διαφόρων ποικιλιών καλλιέργειας τομάτας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπό συνθήκες χαμηλού φωτισμού, ο ρυθμός φωτοσύνθεσης των τοματών βρέθηκε παρόμοιος και στα δύο θερμοκήπια. Όταν η φωτοσύνθεση ήταν κορεσμένη με

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

φως βρέθηκε ότι ήταν ελαφρώς χαμηλότερη για τις τομάτες στο θερμοκήπιο WSPV. Όσον αφορά τον συνολικό αριθμό καρπών και τη μάζα των καρπών ανά φυτό, παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των ποικιλιών. Ορισμένες ποικιλίες δεν είχαν διαφορές μεταξύ των δύο θερμοκηπίων. Αντιθέτως άλλες ποικιλίες παρουσίασαν ελαφρώς υψηλότερους ή χαμηλότερους αριθμούς. Τέλος, υπολόγισαν την φωτοσυνθετική απόδοση για 18 ποικιλίες τομάτας όπου τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η φωτοσυνθετική απόδοση για τις 13 ποικιλίες ήταν παρόμοια και στα δύο θερμοκήπια, ενώ 5 ποικιλίες παρουσίασαν βελτιωμένη απόδοση στο θερμοκήπιο WSPV.



Εικόνα 16. α) Ένα θερμοκήπιο καλυμμένο με διαφανές γυαλί (αριστερά) και ένα θερμοκήπιο καλυμμένο με WSPV (δεξιά), (πηγή: Corrado et al., 2013), β) Εσωτερική όψη θερμοκηπίου που είναι καλυμμένο με WSPV (πηγή: Loik et al., 2017).

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ WSPV έχουν την ικανότητα να αντικαταστήσουν άμεσα τα γυάλινα και πλαστικά καλύμματα που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα στα θερμοκήπια προσφέροντας την δυνατότητα ελέγχου του φωτός και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τα φυτά. Το υλικό φωταύγειας που χρησιμοποιείται στα WSPV μπορεί να αυξήσει την απόδοση του πάνελ, να προσαρμόσει το φως στις ανάγκες των φυτών και ταυτόχρονα είναι σχετικά φθηνό.

3.3.7.Επίδραση των αγροβολταϊκών στο κλίμα του θερμοκηπίου

Θερμοκρασία

Σε έρευνα που διεξήχθη από τους Teitel et al. (2023), χρησιμοποιήθηκαν τρία θερμοκήπια, τα οποία ήταν καλυμμένα με μεμβράνη πολυαιθυλενίου και καλλιεργήθηκαν φυτά τομάτας. Στα δύο θερμοκήπια τοποθετήθηκαν στις οροφές τους μονάδες οργανικών φωτοβολταϊκών (μπλε και κόκκινη μονάδα), ενώ το τρίτο θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας. Όσον αφορά την θερμοκρασία τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι θερμοκρασίες τόσο εντός όσο και εκτός των θερμοκηπίων στην αρχή της περιόδου ήταν περίπου 31–32 °C και σταδιακά μειώθηκαν στους 28 °C περίπου μέχρι το τέλος του καλοκαιριού στα θερμοκήπια (κόκκινο και μπλε). Στο μεγαλύτερο μέρος της καλλιεργητικής περιόδου, η θερμοκρασία στα θερμοκήπια (κόκκινο και μπλε) ήταν είτε παρόμοια είτε ελαφρώς χαμηλότερη από αυτή που υπήρχε στο εξωτερικό περιβάλλον. Παρόλα αυτά στο τέλος της περιόδου στο θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας, η θερμοκρασία του αέρα ήταν υψηλότερη τις περισσότερες ημέρες από ό,τι στο εξωτερικό περιβάλλον. Οι μέσες εποχιακές θερμοκρασίες αέρα στο μπλε, κόκκινο και θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας ήταν $31,0 \pm 1,8$, $30,3 \pm 1,7$ και $33,2 \pm 1,9$ °C, αντίστοιχα.

Οι Waller et al. (2021), διεξήγαγαν πείραμα σε θερμοκήπιο που είχε ως υλικό κάλυψης πλαστικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE). Στο θερμοκήπιο αυτό τοποθέτησαν στο βόρειο τμήμα οργανικά φωτοβολταϊκά ενώ το υπόλοιπο τμήμα του θερμοκηπίου χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας και διαπίστωσαν ότι η μέση ημερήσια θερμοκρασία τόσο στο τμήμα του θερμοκηπίου με τα οργανικά φωτοβολταϊκά όσο και στο τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας ήταν παρόμοια κατά την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, με διαφορές που ήταν μικρότερες από 0,5 °C κατά μέσο όρο (μικρότερη θερμοκρασία στο τμήμα του θερμοκηπίου με τα οργανικά φωτοβολταϊκά σε σχέση με το τμήμα του θερμοκηπίου στο τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας). Ανέφεραν ότι μια τέτοια μικρή διαφορά ήταν αναμενόμενη, δεδομένου ότι η απόσταση μεταξύ του τμήματος θερμοκηπίου OPV και του μάρτυρα ήταν μικρή και έτσι η κυκλοφορία αέρα που παρέχεται από το σύστημα εξαερισμού είχε σαν αποτέλεσμα να μειώσει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των τμημάτων.

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Σε άλλη έρευνα που διεξήχθη από τους Hassanien et al. (2018), οι οποίοι χρησιμοποίησαν δύο θερμοκήπια που καλύπτονταν από φύλλο πολυαιθυλενίου. Στο πρώτο θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκαν στην οροφή του ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου και το άλλο θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια μείωση της θερμοκρασίας 1-3 °C στο θερμοκήπιο που καλυπτόταν από ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου σε σχέση με το μάρτυρα.

Οι Ezzaeri et al. (2018), σε πείραμα που διεξήγαγαν χρησιμοποίησαν δύο θερμοκήπια που ήταν καλυμμένα από πλαστικό πολυαιθυλένιο. Το ένα θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας και στο άλλο τοποθετήθηκαν εύκαμπτα φωτοβολταϊκά πάνελ περίπου στο 10% της συνολικής επιφάνειας της στέγης. Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν ότι η διακύμανση των θερμοκρασιών ήταν πολύ υψηλή κατά τη διάρκεια της ημέρας και χαμηλή κατά την διάρκεια της νύχτας. Η διαφορά αυτή μεταξύ των μέγιστων θερμοκρασιών τόσο εντός όσο και εκτός των δύο θερμοκηπίων μπορεί να εξηγηθεί τόσο από τα θερμικά χαρακτηριστικά του καλύμματος όσο και από τις δραστηριότητες των φυτών. Έτσι λοιπόν, η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε στο θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά κυμαινόταν μεταξύ 30,19 °C και 33,17 °C ενώ η ελάχιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε κυμαινόταν από 11,91 °C έως 14,32 °C. Η μέγιστη θερμοκρασία στο θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας ήταν μεταξύ 31,07 °C και 34,64 °C, ενώ η ελάχιστη θερμοκρασία κυμαινόταν από 11,90 °C έως 14,37 °C. Συμπερασματικά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν παρατηρήθηκε διαφορά στις ελάχιστες θερμοκρασίες των δύο θερμοκηπίων σε αντίθεση με τις μέγιστες θερμοκρασίες όπου τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη θερμοκρασία στο θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά ήταν μικρότερη περίπου 1,5°C σε σχέση με το θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας.

Σε μια άλλη έρευνα οι Friman-Pertez et al. (2021), διεξήγαγαν πείραμα σε δύο σήραγγες θερμοκηπίου που ήταν καλυμμένες με φύλλο πολυαιθυλενίου. Η μια σήραγγα καλύφτηκε από μονάδες OPV (οργανικά φωτοβολταϊκά ενώ η άλλη σήραγγα καλύφθηκε μόνο από το φύλλο πολυαιθυλενίου (τμήμα θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία του αέρα στο θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας ήταν υψηλότερη κατά 0,8 °C σε σχέση με το τμήμα του θερμοκηπίου που ήταν καλυμμένο με μονάδες OPV.

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τις έρευνες που διεξήχθησαν παρατηρείται ότι η θερμοκρασία του αέρα των θερμοκηπίων με φωτοβολταϊκά είναι ελαφρώς μικρότερη σε σχέση με την θερμοκρασία αέρα των θερμοκηπίων που χρησιμοποιούνται ως μάρτυρες (συμβατά πλαστικά καλύμματα). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην σκίαση που προκαλούν τα φωτοβολταϊκά..

Σχετική υγρασία

Από έρευνα που διεξήχθη από τους Waller et al.(2021) (διαδικασία πειράματος αναφέρθηκε παραπάνω), διαπιστώθηκαν διαφορές στην σχετική υγρασία μεταξύ των τμημάτων OPV και μάρτυρα. Πιο συγκεκριμένα το τμήμα OPV είχε χαμηλότερη μέση σχετική υγρασία σε σύγκριση με το τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας τόσο την ημέρα όσο και τη νύχτα για όλους τους μήνες, με το μέγεθος της διαφοράς να αυξάνεται κυρίως τον Μάιο και τον Ιούνιο, διότι τους συγκεκριμένους μήνες αντιστοιχεί η υψηλότερη έντασης φωτός. Οι διαφορές στην σχετική υγρασία ήταν κατά 2 με 9% μεγαλύτερη στο τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας σε σχέση με το τμήμα OPV του θερμοκηπίου. Αιτιολόγησαν ότι η υψηλότερη σχετική υγρασία στο τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας οφειλόταν στην υψηλότερη ακτινοβολία και, ως εκ τούτου, στην υψηλότερη διαπνοή σε αυτό το τμήμα.

Σε μια άλλη έρευνα οι Hassanien et al. (2018), (διαδικασία πειράματος αναφέρθηκε παραπάνω), διαπίστωσαν μια σχετική αύξηση της σχετικής υγρασίας κατά 2% στο θερμοκήπιο που καλυπτόταν από ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου σε σχέση με το θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας.

Επίσης σε έρευνα που διεξήχθη από τους Ezzaeri et al. (2018), (διαδικασία πειράματος αναφέρθηκε παραπάνω), διαπιστώθηκε ότι σχετική υγρασία στο θερμοκήπιο με μονάδες OPV κυμαίνονταν μεταξύ 97,5–34,4%, ενώ στο θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας η σχετική υγρασία ήταν από 98,4 έως 30%. Άρα η μέγιστη διαφορά που παρατηρήθηκε για τη σχετική υγρασία ήταν ότι στο θερμοκήπιο με μονάδες OPV ήταν κατά 5% μεγαλύτερη από το θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας.

Από μια άλλη έρευνα από τους Friman-Pertez et al. (2021), (διαδικασία πειράματος αναφέρθηκε παραπάνω), διαπιστώθηκαν αμελητέες διαφορές στην σχετική υγρασία μεταξύ της

σήραγγας θερμοκηπίου που ήταν καλυμμένη με μονάδες OPV και της σήραγγας θερμοκηπίου . που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας.

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τις έρευνες που διεξήχθησαν παρατηρείται ότι η σχετική υγρασία των θερμοκηπίων με φωτοβολταϊκά είναι άλλοτε υψηλότερη, άλλοτε χαμηλότερη και άλλοτε ίδια με την σχετική υγρασία των θερμοκηπίων που χρησιμοποιούνται ως μάρτυρες. Το γεγονός αυτό πιθανότατα να οφείλεται στα διαφορετικά θερμικά χαρακτηριστικά των καλυμμάτων και στις δραστηριότητες των φυτών.

Ηλιακή ακτινοβολία

Σε έρευνα που διεξήχθη από τους Teitel et al. (2023), (διαδικασία πειράματος αναφέρθηκε παραπάνω), διαπιστώθηκε ότι η εισερχόμενη ακτινοβολία στο θερμοκήπιο με τις μπλε μονάδες ήταν παρόμοια με αυτή που μετρήθηκε στο θερμοκήπιο με τις κόκκινες μονάδες μέχρι τις 12:00 το μεσημέρι. Από τις 12:00 και μετά, παρατηρήθηκε ότι η ακτινοβολία στο θερμοκήπιο με τις μπλε μονάδες ήταν υψηλότερη από ό,τι στο θερμοκήπιο με τις κόκκινες μονάδες. Συμπερασματικά παρατηρήθηκε μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά 38% και στα δύο θερμοκήπια (μπλε και κόκκινη μονάδα) σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάστηκαν και από τους Friman-Pertez et al. (2021), (διαδικασία πειράματος αναφέρθηκε παραπάνω), οι οποίοι ανέφεραν ότι στο τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας σε καλλιέργεια τομάτας η ηλιακή ακτινοβολία ήταν $650\text{--}680 \text{ W m}^{-2}$, ενώ στις περιοχές του θερμοκηπίου που καλύπτονταν από φωτοβολταϊκές μονάδες η ηλιακή ακτινοβολία ήταν 400 W m^{-2} , άρα παρατηρήθηκε μια μείωση της τάξης του 40%.

Οι Hassanien et al. (2018), (διαδικασία πειράματος αναφέρθηκε παραπάνω), διαπίστωσαν ότι η ηλιακή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο που καλυπτόταν από ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου ήταν 30%-35%, ενώ στο θερμοκήπιο που ήταν καλυμμένο μόνο από πολυαιθυλένιο ήταν 75%-80% σε σύγκριση με την ηλιακή ακτινοβολία στο εξωτερικό περιβάλλον. Άρα παρατηρείται μια μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας 35 με 40% στο θερμοκήπιο που καλυπτόταν από ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου σε σύγκριση με το θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας.

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Σε μελέτη που διεξήχθη από τους Waller et al. (2021) (διαδικασία πειράματος αναλύθηκε πιο πάνω), η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο τμήμα θερμοκηπίου με φωτοβολταϊκές μονάδες μειώθηκε κατά 35 με 40% σε σχέση με το τμήμα του θερμοκηπίου θερμοκηπίου.

Σε άλλη έρευνα που διεξήχθη από τους Ezzaeri et al. (2018), (διαδικασία πειράματος αναφέρθηκε παραπάνω), διαπιστώθηκε ότι η ηλιακή ακτινοβολία στο εξωτερικό περιβάλλον ήταν 1050 W m^{-2} , ενώ στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με τα φωτοβολταϊκά ήταν 590 W m^{-2} και στο θερμοκήπιο ελέγχου ήταν 760 W m^{-2} . Συμπερασματικά λοιπόν παρατηρήθηκε ότι η ηλιακή ακτινοβολία που εισήλθε στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με τα φωτοβολταϊκά μειώθηκε κατά 44% σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία του εξωτερικού χώρου, ενώ η ηλιακή ακτινοβολία που εισήλθε στο εσωτερικό του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας μειώθηκε κατά 28% σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία του εξωτερικού χώρου.

Σε μελέτη που διεξήγαγαν οι Urena – Sanchez et al. (2012), ανέφεραν ότι η ηλιακή ακτινοβολία που εισήλθε στο εσωτερικό θερμοκηπίου με φωτοβολταϊκά ήταν μικρότερη κατά 35% σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία του εξωτερικού χώρου.

Επίσης, σε μελέτη που πραγματοποίησαν οι Cossu et al. (2014) χρησιμοποίησαν θερμοκήπιο με υλικό κάλυψης πολυαιθυλένιο και κάλυψαν το 50% της οροφής με φωτοβολταϊκές μονάδες πυριτίου. Παρατήρησαν ότι η ηλιακή ακτινοβολία μειώθηκε κατά 46% στο τμήμα του θερμοκηπίου που είχε ως στέγη μόνο το υλικό του πολυαιθυλενίου και κατά 82% κάτω από την στέγη με τις φωτοβολταϊκές μονάδες πυριτίου, σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Οι Fantasy et al. (2015), χρησιμοποίησαν δύο γυάλινα θερμοκήπια (Asymetrin και Velno) και τοποθέτησαν στις οροφές των δύο θερμοκηπίων φωτοβολταϊκές μονάδες και παρατήρησαν ότι η λαμβανόμενη ακτινοβολία μειώθηκε κατά 41,6% στο θερμοκήπιο Asymmetric και κατά 46% στο θερμοκήπιο Venlo.

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τις έρευνες που διεξήχθησαν παρατηρείται ότι η ηλιακή ακτινοβολία στα θερμοκήπια με φωτοβολταϊκά είναι μικρότερη σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία που επικρατεί στα θερμοκήπια που χρησιμοποιούνται ως μάρτυρες (συμβατά

πλαστικά καλύμματα). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην παρεμπόδιση που προκαλούν τα φωτοβολταϊκά στην είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό των θερμοκηπίων.

3.3.8. Επίδραση των αγροβολταϊκών στην παραγωγή

Η μελέτη των Teitel et al. (2023), (διαδικασία πειράματος αναλύθηκε πιο πάνω), απέδειξε ότι τα φυτά τομάτας αναπτύχθηκαν πιο γρήγορα στα θερμοκήπια με τα κόκκινα και μπλε πάνελ φωτοβολταϊκών σε σχέση με το θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας και στις δύο καλλιεργητικές περιόδους. Πιο συγκεκριμένα κατά την καλοκαιρινή καλλιεργητική περίοδο τις πρώτες 50 ημέρες τα φυτά τομάτας αναπτύχθηκαν με το ίδιο ρυθμό και στα τρία θερμοκήπια. Με το πέρας των 50 ημερών παρατηρήθηκε ότι τα φυτά τομάτας κάτω από τις κόκκινες μονάδες OPV αναπτύχθηκαν ελαφρώς πιο γρήγορα από εκείνα στα άλλα θερμοκήπια. Κατά την διάρκεια της χειμερινής καλλιεργητικής περιόδου παρατηρήθηκε ότι τις πρώτες 90 ημέρες τα φυτά αναπτύχθηκαν με τον ίδιο ρυθμό και στα τρία θερμοκήπια. Με το πέρας των 90 ημερών τα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από από τις μπλε και κόκκινες μονάδες OPV αναπτύχθηκαν πιο γρήγορα από εκείνα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας. Όσον αφορά το βάρος του καρπού τομάτας παρατηρήθηκε ότι κατά την διάρκεια του καλοκαιριού στο μπλε, κόκκινο και έλεγχος θερμοκήπια ήταν 74, 71,8 και 71,9 g αντίστοιχα. Ενώ το χειμώνα ήταν 68,4, 73,3 και 74,8 g, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι το βάρος του καρπού τομάτας στο μπλε θερμοκήπιο μειώθηκε από το καλοκαίρι στο χειμώνα, ενώ αντίθετα στα άλλα δύο θερμοκήπια αυξήθηκαν από το καλοκαίρι στο χειμώνα. Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τόσο για τα συνολικά διαλυτά στερεά (TSS) όσο και για την ολική οξύτητα (TA) κατά την θερινή και χειμερινή συγκομιδή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τιμές TA και TSS ήταν υψηλότερες το χειμώνα σε σχέση με το καλοκαίρι. Κατά την διάρκεια του χειμώνα δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στις τιμές αυτές και στα τρία θερμοκήπια, ενώ κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, υπήρχαν διαφορές μεταξύ των θερμοκηπίων σχετικά με το TSS. Παρόλα αυτά οι διαφορές αυτές δεν ήταν σημαντικές

Σε άλλη έρευνα οι Waller et al. (2021), ανέφεραν ότι τα φυτά τομάτας που αναπτύχθηκαν κάτω από τη σκιά του OPV εμφάνισαν γενικά μεγαλύτερη βλαστική ανάπτυξη και πιο συγκεκριμένα επιμήκυνση του στελέχους και μεγαλύτερο μήκος των φύλλων κατά μέσο όρο σε

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

σύγκριση με το τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο ότι τα φυτά τομάτας που αναπτύσσονται στο θερμοκήπιο με τις μονάδες OPV προσπαθούν να αποφύγουν την σκιά που δημιουργούν τα φωτοβολταϊκά, ιδιαίτερα τον πρώτο μήνα μετά την μεταμόσχευση των φυτών. Αργότερα στην καλλιεργητική περίοδο όταν τα φυτά τομάτας μπήκαν στο αναπαραγωγικό στάδιο τότε οι διαφορές στην επιμήκυνση στελέχους και στο μήκος των φύλλων μεταξύ των δύο τμημάτων ήταν λιγότερο έντονες. Όσον αφορά την ανάπτυξη των καρπών τομάτας παρατηρήθηκε ότι τις τρεις πρώτες εβδομάδες η απόδοση ήταν χαμηλότερη στο τμήμα του θερμοκηπίου OPV σε σχέση με το τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας ($24,6 \text{ kg m}^{-2}$ και $27,7 \text{ kg m}^{-2}$, αντίστοιχα). Από την τέταρτη εβδομάδα μέχρι και την δέκατη παρατηρήθηκε ότι οι αποδόσεις των φυτών τομάτα ήταν παρόμοιες και στα δύο τμήματα.

Επίσης, σε μελέτη που διεξήχθη από τους Hassanien et al. (2018), (διαδικασία πειράματος αναφέρθηκε παραπάνω), παρατηρήθηκε ότι το ύψος των φυτών τομάτας και ο αριθμός των φύλλων που καλλιεργήθηκαν κάτω από τα ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου ήταν ασημαντα υψηλότερα από αυτά των φυτών τομάτας που καλλιεργήθηκαν στο θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη των φύλλων των φυτών στο θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά ήταν υψηλότερη από αυτή των φυτών του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας. Επιπλέον, τα αποτελέσματα έδειξαν η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία του αέρα ήταν χαμηλότερες στο θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά από το θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας. Το γεγονός αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την κατανάλωση περισσότερου νερού από τα φυτά τομάτας επειδή ο ρυθμός διαπνοής της τομάτας αυξανόταν με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα. (θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας). Από την άλλη πλευρά, τα φυτά τομάτας που καλλιεργήθηκαν σε ζεστά κλίματα για όλη την καλλιεργητική περίοδο και σε σκιά σε ποσοστό 30%-40% παρουσίασαν υψηλότερες αποδόσεις και περισσότερους καρπούς από αυτά τα φυτά που καλλιεργήθηκαν χωρίς σκιά. Ακόμη παρατηρήθηκε ότι η πιο κατάλληλη ένταση φωτός για τα φυτά τομάτας ήταν τα $300 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$. Σε αυτήν την ένταση φωτός διαπιστώθηκαν τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά τη διάμετρο του στελέχους, το φρέσκο και ξηρό βάρος των καρπών τομάτας. Συμπερασματικά η ενσωμάτωση ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πάνελ

μονοκρυσταλλικού πυριτίου σε θερμοκήπια για την καλλιέργεια τομάτας θα μπορούσε να είναι πιο εφαρμόσιμη σε θερμά κλίματα.

Σε άλλη έρευνα που διεξήγαγαν οι Ezzaeri et al. (2018), (διαδικασία πειράματος αναφέρθηκε παραπάνω), διαπίστωσαν ότι μετά από 17 ημέρες από την ημερομηνία φύτευσης το ύψος του φυτού τομάτας κάτω από το θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά ήταν 19 cm σε σύγκριση με αυτό που μετρήθηκε στο θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας που ήταν 18 cm. Μετά από 101 ημέρες, παρατηρήθηκε ότι το μέσο ύψος των φυτών τομάτας που καλλιεργήθηκαν στο θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά είχε αυξηθεί σημαντικά κατά 25,4 cm σε σύγκριση με τα φυτά τομάτας του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες. Οι ερευνητές ανέφεραν ότι το γεγονός αυτό πιθανότατα να οφείλεται στο ότι τα φυτά που αναπτύσσονται υπό σκιά αναζητούν φως, το γεγονός αυτό λειτουργεί ως ένα είδος ερεθίσματος για την ανάπτυξη του στελέχους. Όσον αφορά την διάμετρο του στελέχους των φυτών τομάτας παρατηρήθηκε ότι δεν διαφέρει σημαντικά και στα δύο θερμοκήπια. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι ο αριθμός των καρπών τομάτας ήταν λίγο μεγαλύτερος στο θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας από ότι ήταν στο θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά. Πιθανότατα αυτό να οφείλεται στην επίδραση της σκίασης που έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνει την πρόσληψη νερού και θρεπτικών ουσιών από τα φυτά. Όσον αφορά την συνολική απόδοση παρατηρήθηκε ότι ήταν μεγαλύτερη στο θερμοκήπιο με τα φωτοβολταϊκά σε σχέση με το θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας.

Συμπερασματικά, σύμφωνα με τις έρευνες που διεξήχθησαν παρατηρείται ότι η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πάνελ σε θερμοκήπια μπορεί να βελτιώσουν τις αποδόσεις των καλλιεργειών, διότι έχουν την ικανότητα να μειώνουν την υπερβολική θερμοκρασία.

3.3.9. Σύνοψη - Σχολιασμός

Η χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις αυξάνεται παγκοσμίως. Αυτή την στιγμή τα περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα που εγκαθίστανται σε θερμοκηπιακές μονάδες είναι τα ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών μονάδων STPV, το c-Si είναι ευρέως διαθέσιμο υλικό για θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις. Το υλικό αυτό κυριαρχεί στην αγορά λόγω της υψηλής απόδοσης, του χαμηλού κόστους και της σταθερότητας που διαθέτει.

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Άλλες μονάδες STPV είναι οι μονάδες λεπτής μεμβράνης οι οποίες δεν παρουσιάζουν ευρεία χρήση. Τόσο οι τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης όσο και οι τεχνολογίες c-Si προσφέρουν διαφάνεια χωρίς επιλεκτικό μήκος κύματος, γεγονός που σημαίνει ότι υπάρχουν περιορισμοί στη μέγιστη διαφάνεια που μπορεί να επιτευχθεί. Ταυτόχρονα, υπάρχει μια άμεση αντιστάθμιση μεταξύ διαφάνειας και απόδοσης, καθιστώντας τις μονάδες STPV λιγότερο αποδοτικές και με υψηλότερο κόστος.

Λόγω των ημιδιαφανών ρυθμιζόμενων φασματικών ιδιοτήτων τους, τα οργανικά _ φωτοβολταϊκά (OPV) και τα φωτοβολταϊκά κύτταρα με σύνθεση χρωστικής (DSSC) συγκαταλέγονται στις τεχνολογίες επόμενης γενιάς που παρουσιάζουν καλύτερη χρήση ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίων. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν την ικανότητα να πετυχαίνουν επιλεκτική διαφάνεια ως προς το μήκος κύματος, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο στην φωτοσυνθετικά ενεργό ακτινοβολία (PAR) να διέρχεται και να χρησιμοποιεί το υπόλοιπο φάσμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι με αυτόν το τρόπο μπορούν να επιτευχθούν υψηλά επίπεδα διαφάνειας διατηρώντας παράλληλα σχετικά υψηλές αποδόσεις. Η χρήση μονάδων STPV που βασίζονται σε οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV) ή φωτοβολταϊκά κύτταρα με σύνθεση χρωστικής (DSSC) παρουσιάζει πλεονεκτήματα όπως είναι το χαμηλό βάρος, η ευελιξία, το ρυθμιζόμενο χρώμα και η επιλεκτική διαφάνεια, καθιστώντας τα μια πολύ υποσχόμενη λύση για θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις.

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα που χρησιμοποιούνται σε θερμοκήπια, η απόδοση των φωτοβολταϊκών εξαρτάται από την ποιότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία εξαρτάται από της έντασης του φωτός, η οποία είναι η ίδια συνάρτηση του καιρού, της νεφοκάλυψης, της ημέρας, του υψομέτρου και του γεωγραφικού πλάτους της τοποθεσίας, ενώ η απόδοση των καλλιεργειών εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή βιομάζας. Για την εφαρμογή φωτοβολταϊκών συστημάτων σε θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις οι κρίσιμοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η εύρεση των κατάλληλων τοποθεσιών για την κατασκευή θερμοκηπίων με φωτοβολταϊκά συστήματα, ο σχεδιασμός της καλύτερης δομής και διάταξης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών για τη μεγιστοποίηση της έκθεσης σε υψηλής ποιότητας ηλιακή ακτινοβολία για τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες και τη βέλτιστη φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας για τις καλλιέργειες, καθώς και

η επιλογή των κατάλληλων καλλιεργειών. Η ταυτόχρονη ανάπτυξη όλων αυτών των τεχνολογιών σε μαζική παραγωγή μπορεί να μειώσει σταδιακά το τρέχον υψηλό κόστος τους. Ταυτόχρονα με την τεχνολογική έρευνα, εξίσου σημαντική είναι η περαιτέρω μελέτη των αποκρίσεων των φυτών στις διαφορετικές τεχνολογίες, τόσο όσον αφορά τις φωτομορφογενείς όσο και τις φωτοσυνθετικές επιδράσεις.

3.4.Υλικά κάλυψης θερμοκηπίων με βάση τα νανোসωματίδια

3.4.1.Φωτοθερμικά πλασμονικά νανোসωματίδια

Η φωτοθερμική μετατροπή ή η μετατροπή φωτός σε θερμότητα είναι η διαδικασία κατά την οποία τα υλικά που απορροφούν το φως μετατρέπουν την ενέργεια του φωτός σε θερμότητα. Τα φωτοθερμικά υλικά υψηλής απόδοσης έχουν την ικανότητα να απορροφούν φως και να το μετατρέπουν σε θερμότητα (Cui et al., 2023). Τα φωτοθερμικά υλικά έχουν διαφορετικούς φωτοθερμικούς μηχανισμούς που εξαρτώνται από τις ηλεκτρονικές δομές που διαθέτουν. (Elmi and Wang, 2023).

Στα πλασμονικά νανোসωματίδια ο φωτοθερμικός μηχανισμός που λαμβάνει χώρα είναι η πλασμονική τοπική θέρμανση. Όταν η συχνότητα του εισερχόμενου φωτός ευθυγραμμίζεται με τη φυσική συχνότητα των ηλεκτρονίων των πλασμονικών νανোসωματιδίων που προκαλεί ταλαντώσεις ελεύθερων ηλεκτρονίων τότε εμφανίζεται τοπικός συντονισμός πλασμονίου επιφάνειας (LSPR). Έτσι λοιπόν σαν αποτέλεσμα της χαλάρωσης και της δημιουργίας θερμών ηλεκτρονίων πραγματοποιείται παραγωγή θερμότητας η οποία στην συνέχεια μεταφέρεται στο περιβάλλον μέσο. (Chen et al., 2019).

Επίσης τα πλασμονικά νανোসωματίδια έχουν την ικανότητα να είναι επιλεκτικά ως προς το φάσμα, το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να προσαρμόζουν το φάσμα απορρόφησης της επικάλυψης για να μεταδίδουν το βασικό φάσμα φωτός για τη φωτοσύνθεση και να απορροφούν το φως NIR. Η ανταπόκριση που έχουν στο φως τα πλασμονικά νανোসωματίδια εξαρτάται από το σχήμα, το μέγεθος, τη μορφολογία το σχήμα και το περιβάλλον μέσο τους (Indhu et al., 2023). Έτσι λοιπόν τα πλασμονικά νανোসωματίδια εκτός του ότι εμποδίζουν το φως NIR να περάσει μέσα από το κάλυμμα, ταυτόχρονα δεν μειώνουν το Συντελεστή Κέρδους Ηλιακής Θερμότητας

(SHGC) της επικάλυψης όσο άλλες επικαλύψεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην επηρεάζουν την θερμότητα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου τον χειμώνα. Επιπλέον, αυτά τα νανοσωματίδια έχουν την ικανότητα να τοποθετούνται εύκολα σε πλαστικά όπως το πολυαιθυλένιο (PE), το οποίο είναι το πιο κοινό πλαστικό που χρησιμοποιείται στα θερμοκήπια. (Katsoulas et al., 2020).

3.4.2. Οπτικές και θερμικές ιδιότητες των πλασμονικών νανοσωματιδίων

Σε πείραμα που διεξήγαγαν οι Elmi et al. (2024), χρησιμοποίησαν Πολυαιθυλένιο (PE) ως υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου. Στο πλαστικό πολυαιθυλενίου έγινε επικάλυψη με νανοσωματίδια οξειδίου του κασσιτέρου αντιμονίου (ATO). Για την διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά καλύμματα θερμοκηπίου: α) Κάλυμμα θερμοκηπίου Πολυαιθυλενίου (PE) μονής στρώσης. β) Κάλυμμα Πολυαιθυλενίου (PE) διπλής στρώσης και γ) Κάλυμμα Πολυαιθυλενίου (PE) με νανοσωματίδια οξειδίου του κασσιτέρου αντιμονίου (ATO) σε τέσσερις στρώσεις. (Elmi et al., 2024).

Η επιφανειακή εκπομπή είναι πολύ σημαντική διότι επηρεάζει την ενεργειακή απόδοση της θέρμανσης και της ψύξης και έχει άμεσο αντίκτυπο στις συνολικές θερμομονωτικές ικανότητες του υλικού κάλυψης. Οι τιμές της επιφανειακής εκπομπής του PE, του PE με μία στρώση ATO (PE-ATO1) και του PE με τέσσερις στρώσεις ATO (PE-ATO4) φαίνονται στο παρακάτω πίνακα. (Elmi et al., 2024).

Δείγμα	Τιμές εκπομπής
PE	0,86
PE-ATO1	0,71
PE-ATO4	0,42

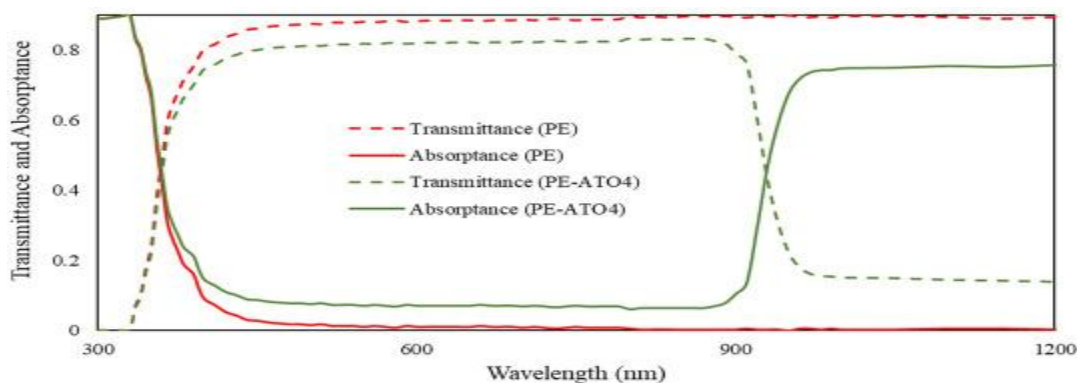
Πίνακας 1. Τιμές εκπομπής. (πηγή: Elmi et al., 2024).

Παρατηρείται ότι οι τιμές εκπομπής μειώνονται από την επίστρωση ATO. Η μείωση αυτή πιθανότατα να οφείλεται στα εγγενή χαρακτηριστικά των νανοσωματιδίων ATO, τα οποία είναι μεταλλικής φύσης και έχουν χαμηλή ικανότητα εκπομπής. Επίσης από τον παραπάνω πίνακα

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

παρατηρείται ότι η προσθήκη περισσότερων στρώσεων ΑΤΟ έχει σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση της ικανότητας εκπομπής του δείγματος, η οποία τελικά μείωσε τη μέγιστη τιμή της κατά το ήμισυ, προσθέτοντας τέσσερις στρώσεις, από 0,86 σε 0,42. Αυτή η μείωση της εκπομπής θα μπορούσε να βοηθήσει στη μείωση του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (συντελεστής U) της επικάλυψης, αυξάνοντας τη συνολική μόνωση της επικάλυψης και, κατά συνέπεια, εξοικονομώντας ενέργεια θέρμανσης και ψύξης τόσο τη χειμερινή όσο και τη θερινή περίοδο. (Elmi et al., 2024).

Τα οπτικά φάσματα των δειγμάτων (PE και PE-ATO4) απεικονίζονται στο σχήμα 9. Το PE είναι σχεδόν πλήρως διαφανές τόσο στις περιοχές PAR όσο και στις περιοχές NIR από 380 έως 2000 nm. Στα δείγματα PE δεν παρατηρείται καθόλου απορρόφηση στις περιοχές PAR και NIR. Παρόλα αυτά, η απορρόφηση στο δείγμα PE-ATO4 αρχίζει να αυξάνεται από το τέλος της περιοχής PAR (860 nm). Οι τιμές διαπερατότητας PAR των διαφορετικών επικαλύψεων αναφέρονται στον πίνακα 2. Από τον πίνακα 2 και το σχήμα 6 παρατηρείται ότι η διαφάνεια του PE δεν άλλαξε πολύ στην περιοχή PAR. Η συνολική διαπερατότητα PAR του μονοστρωματικού PE και του PE-ATO4 είναι 0,890 και 0,746, αντίστοιχα. Παρατηρείται λοιπόν ότι παρόλο που η απορρόφηση του PE αυξάνεται στην περιοχή NIR με την επίστρωση ΑΤΟ, η διαφάνεια στην περιοχή PAR έχει μειωθεί συνολικά κατά 0,144. Το κύριο χαρακτηριστικό των πλασμονικών νανοδομημάτων που εφαρμόζονται σε δείγματα PE με επίστρωση ΑΤΟ είναι ότι το φως NIR απορροφάται από τα νανοδομημάτια ΑΤΟ και φιλτράρεται μέσω του δείγματος PE-ATO4, ενώ το φως PAR, το οποίο απαιτείται για τη φωτοσύνθεση, διαδίδεται. (Elmi et al., 2024).



Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Σχήμα 9. Τα φάσματα UV–Vis–NIR του PE και του PE-ATO4. (πηγή: Elmi et al., 2024).

Κάλυμμα	Διαπερατότητα PAR
Μονοστρωματικό PE	0,890
Διπλό στρώμα PE	0,802
PE-ATO4	0,746

Πίνακας 2. Τιμές διαπερατότητας PAR διαφορετικών καλυμμάτων θερμοκηπίου. (πηγή: Elmi et al., 2024).

Οι δύο πιο σημαντικές θερμικές παράμετροι των καλυμμάτων του θερμοκηπίου είναι συντελεστής U του κέντρου του καλύμματος και ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους (SHGC). Στον πίνακα 3 αναφέρονται οι τιμές των παραμέτρων για τις διάφορες επικαλύψεις. Όπως παρατηρείται το διπλό στρώμα PE έχει χαμηλότερο συντελεστή U από το μονοστρωματικό PE. Επίσης παρατηρείται ότι ο συντελεστής U του PE-ATO4 είναι ακόμη μικρότερος από το διπλό στρώμα PE. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μικρότερη εκπομπή του επικαλυμμένου PE από το απλό PE. (Elmi et al., 2024).

Κάλυμμα	Συντελεστής U ($\text{W/m}^2 \text{ K}$)	SHGC
Μονοστρωματικό PE	6.065	0,892
Διπλό στρώμα PE	2.816	0,806
PE-ATO4 (Καλοκαίρι)	2.336	0,579
PE-ATO4 (Χειμώνας)	2.336	0,727

Πίνακας 3. Θερμικές ιδιότητες των καλυμμάτων του θερμοκηπίου. (πηγή: Elmi et al., 2024).

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Όσον αφορά το συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (SHGC), ο οποίος εκφράζεται ως η διαφορά μεταξύ των ροών θερμότητας που εισέρχονται στο θερμοκήπιο με και χωρίς προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία παρατηρείται ότι είναι μεγαλύτερη στο μονοστρωματικό PE από το διπλό στρώμα PE και το PE-ATO4 (καλοκαίρι, χειμώνας). Επίσης παρατηρείται ότι το SHGC είναι μεγαλύτερο στο PE-ATO4 (χειμώνας) από ότι στο PE-ATO4 (καλοκαίρι). Αυτή η διαφορά βοηθά στη διαχείριση της ενέργειας μέσα στο θερμοκήπιο, καθώς απαιτείται λιγότερη θέρμανση τον χειμώνα καθώς εισέρχεται μεγαλύτερη ηλιακή θερμότητα στο θερμοκήπιο και λιγότερη ψύξη το καλοκαίρι καθώς εισέρχεται λιγότερη ηλιακή θερμότητα. (Elmi et al., 2024).

3.4.3. Επίδραση των πλασμονικών νανοσωματιδίων στη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR) και στην ανάπτυξη των φυτών

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο κάλυμμα (PE) που προστέθηκε επικάλυψη ATO4 παρατηρήθηκε μια μικρή πτώση στη φωτοσυνθετική ροή φωτονίων, η οποία όμως αντισταθμίστηκε από τεχνητό φωτισμό έτσι ώστε να μην επηρεάσει την ανάπτυξη των φυτών. Όπως είναι γνωστό η φωτοσυνθετική πυκνότητα ροής φωτονίων (PPFD) είναι μια κρίσιμη μέτρηση, η οποία αντιπροσωπεύει την ποσότητα των φωτοσυνθετικά ενεργών φωτονίων που φτάνουν σε μια συγκεκριμένη περιοχή μέσα σε ένα δεδομένο χρονικό πλαίσιο. Η μέτρηση αυτή παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την ένταση του φωτός που είναι διαθέσιμο για φωτοσύνθεση. Η φωτοσύνθεση είναι η διαδικασία με την οποία τα φυτά μετατρέπουν την φωτεινή ενέργεια σε χημική ενέργεια η οποία τα βοηθάει να αναπτυχθούν. (Elmi et al., 2024).

Όσον αφορά τις βασικές χρωστικές (χλωροφύλλη α και β και καροτενοειδή) τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τιμές τους ήταν 75% υψηλότερες στις μεμβράνες πολυαιθυλενίου που ήταν επικαλυμμένες με νανοσωματίδια ATO4 σε σχέση με τις μη επικαλυμμένες μεμβράνες. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι επικαλυμμένες μεμβράνες με ATO4 να ενισχύουν την ικανότητα της μεμβράνης να φιλτράρει επιλεκτικά την ηλιακή θερμότητα, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει μια σημαντική μετάδοση της PAR. (Elmi et al., 2024).

Η θερμότητα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου παρατηρήθηκε ότι διατηρείται περισσότερο κάτω από κάλυμμα PE με επικάλυψη ATO4 σε σχέση με κάλυμμα Πολυαιθυλενίου μονής και διπλής στρώσης. (Elmi et al., 2024).

Τέλος όσον αφορά τον φωτισμό παρατηρήθηκε ότι ήταν μικρότερος κάτω από κάλυμμα PE με επικάλυψη ATO4 σε σχέση με κάλυμμα πολυαιθυλενίου μονής και διπλής στρώσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η μετάδοση PAR του καλύμματος PE-ATO4 είναι μικρότερη από αυτή του PE διπλής στρώσης. Επίσης το PE διπλής στρώσης έχει λιγότερη μετάδοση PAR από το PE μονής στρώσης. Για τον λόγο αυτό σε θερμοκήπιο με κάλυμμα PE-ATO4 χρειάζεται περισσότερος τεχνητός φωτισμός για να λάβει χώρα σε ικανοποιητικό βαθμό η διαδικασία της φωτοσύνθεσης. (Elmi et al., 2024).

3.4.4. Σύνοψη - Σχολιασμός

Τα φωτοθερμικά πλασμονικά νανοσωματίδια αποτελούν ένα πολύ καλό υλικό κάλυψης για θερμοκήπια που εγκαθίστανται σε περιοχές με θερμά, δροσερά, ψυχρά και πολύ ψυχρά κλίματα. Αντιθέτως δεν ενδείκνυται η χρήση τους σε πολύ θερμά κλίματα λόγω της αυξημένης κατανάλωσης ενέργειας φωτισμού και ψύξης. Εν κατά κλείδι τα φωτοθερμικά πλασμονικά νανοσωματίδια έχουν την ικανότητα να χρησιμοποιούνται ως υλικό επικάλυψης για τον χειρισμό των οπτικών και θερμικών ιδιοτήτων των επικαλύψεων των θερμοκηπίων. Επίσης παρουσιάζουν την ικανότητα να ελέγχουν τη μεταφορά θερμότητας μέσω του θερμοκηπίου και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα θερμοκήπια χωρίς να επηρεάζεται η ανάπτυξη των φυτών.

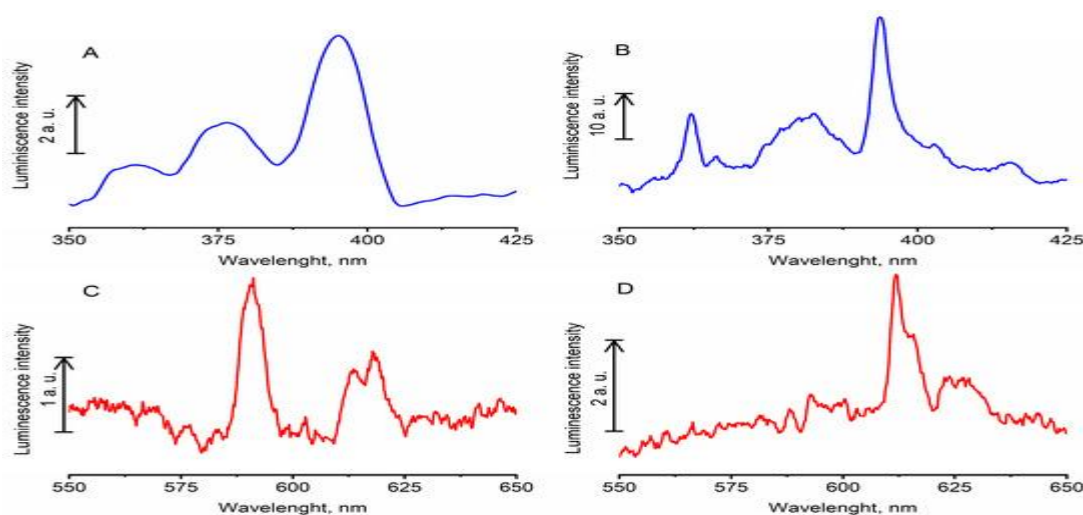
3.5. Υλικά κάλυψης θερμοκηπίου με βάση το ευρώπιο

Οι Paskhin et al. (2023), διεξήγαγαν πείραμα, στο οποίο διερεύνησαν την επίδραση της μετατροπής φωτός χρησιμοποιώντας καλύμματα φωτομετατροπής με βάση το ευρώπιο. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποίησαν δύο τύπους νανοσωματιδίων ευρωπαϊού, το οξείδιο του ευρωπαϊού (Eu_2O_3) και τους νανοκρύσταλλους $\text{Eu}^{3+}:\text{LaF}_3$. Κάτω από τα καλύμματα αυτά καλλιεργήθηκαν φυτά τομάτας και αγγούρια και παρατηρήθηκε πως επηρεάζεται η ανάπτυξή τους και η αντοχή τους στις συνθήκες καταπόνησης.

3.5.1. Οπτικές ιδιότητες

Οι οπτικές ιδιότητες του οξειδίου του ευρωπαϊού (Eu_2O_3) και των νανοκρυστάλλων $\text{Eu}^{3+}:\text{LaF}_3$ φαίνονται στο σχήμα 10. Πιο συγκεκριμένα οι δύο αυτοί τύποι νανοσωματιδίων παρουσιάζουν την πιο αποτελεσματική φωταύγεια στα 395 nm. Παρόλα αυτά τα φάσματα

φωταύγειας αυτών των νανοσωματιδίων ήταν διαφορετικά. Το PCC-Eu₂O₃ παρουσίασε δύο έντονα μέγιστα στα 612 nm και 625 nm (Σχήμα 10 D). Το PCC-Eu³⁺:LaF₃ παρουσίασε τρία μέγιστα στα 591 nm, 615 nm και 622 nm (Σχήμα 10 C). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η μέγιστη φωταύγεια του PCC-Eu₂O₃ παρουσιάστηκε στα 615 nm, ενώ αυτή του PCC-Eu³⁺:LaF₃ παρουσιάστηκε στα 591 nm. Έτσι λοιπόν τα υλικά αυτά κάλυψης παρουσίασαν διαφορετικά οπτικά χαρακτηριστικά, γεγονός που είχε σαν αποτέλεσμα να έχουν διαφορετική επίδραση στα φυτά.



Σχήμα 10. Διαφορικά φάσματα («φάσμα μεμβράνης φωτομετατροπής» μείον «φάσμα κοινής μεμβράνης») διέγερσης (A, B) και φωταύγειας (C, D) των PCC-Eu³⁺:LaF₃ (A, C) και PCC-Eu₂O₃ (B, D). Τα φάσματα διέγερσης φωταύγειας ανιχνεύθηκαν σε μήκη κύματος 591 nm (A) και 612 nm (B). Τα φάσματα φωταύγειας ελήφθησαν κατά τη διέγερση σε μήκος κύματος 395 nm (C, D). (Paskhin et al., 2023).

3.5.2. Επίδραση του ευρωπίου στην ανάπτυξη των φυτών

Τα φυτά αγγουριού που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυψη οξειδίου του ευρωπίου (Eu₂O₃) δεν παρουσίασαν καμία αλλαγή. Αντίθετα αυτά τα φυτά αγγουριού που αναπτύχθηκαν κάτω από τους νανοκρύσταλλους Eu³⁺:LaF₃ παρουσίασαν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη και φυλλική επιφάνεια κατά 20% και 30%, αντίστοιχα από τα φυτά μάρτυρες. Τα φυτά τομάτας που καλλιεργήθηκαν κάτω από το οξείδιο του ευρωπίου (Eu₂O₃) ήταν ψηλότερα κατά 25% και είχαν μεγαλύτερη συνολική επιφάνεια φύλλου κατά 40% από τα φυτά μάρτυρες. Επίσης, παρουσίασαν

μειωμένη περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη. Όλοι οι υπόλοιποι παράμετροι που μελετήθηκαν (η αναλογία υγρού βάρους προς ξηρό βάρος των φύλλων, ο αριθμός των φύλλων, το μήκος των μεσογονάτιων διαστημάτων) ήταν ίδιες όπως στα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες. Τα φυτά τομάτας που αναπτύχθηκαν κάτω από τους νανοκρυστάλλους $\text{Eu}^{3+}:\text{LaF}_3$ δεν διέφεραν από τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες σε όλες τις παραμέτρους που μελετήθηκαν. (Paskhin et al., 2023).

3.5.3. Επίδραση του ευρωπαϊού στην ανταλλαγή αερίων στα φύλλα

Η ένταση της διαπνοής σε όλες τις ομάδες φυτών αγγουριού στο σκοτάδι ήταν σχεδόν η ίδια. Η παρουσία φωτός όμως ενεργοποιεί τη διαπνοή στα φύλλα όλων των φυτών αγγουριού, παρόλα αυτά όμως με διαφορετικό τρόπο σε διαφορετικές ομάδες. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε, ότι ενώ η διαπνοή στα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από το κάλυμμα του οξειδίου του ευρωπαϊού (Eu_2O_3) και των φυτών που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες ήταν η ίδια, αντίθετα η διαπνοή στα φύλλα των φυτών που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυψη με νανοκρυστάλλους $\text{Eu}^{3+}:\text{LaF}_3$, ήταν μικρότερη κατά 2%. Όσον αφορά το CO_2 , η αφομοίωσή του από τα φύλλα των φυτών ενεργοποιήθηκε με την παρουσία του φωτός. Η απορρόφηση του CO_2 από τα φύλλα των φυτών στο σκοτάδι δεν ήταν σταθερή, αλλά η απελευθέρωσή του παρατηρήθηκε ως αποτέλεσμα ανεξάρτητων από το φως διεργασιών που συμβαίνουν στους ιστούς των φυτών. Μετά την ενεργοποίηση του φωτισμού η αφομοίωση του CO_2 περιλάμβανε τρεις φάσεις: α) Η γρήγορη φάση, η οποία εκφράζεται στα πρώτα λεπτά ως ταχεία αύξηση της έντασης της απορρόφησης του CO_2 . β) Η αργή φάση, η οποία εκφράζεται στα επόμενα επτά λεπτά φωτισμού ως σταδιακή αύξηση του ρυθμού αφομοίωσης του CO_2 . γ) Η στατική φάση, όταν επιτευχθεί η μέγιστη ένταση της αφομοίωσης του CO_2 . Παρά το γεγονός ότι η ένταση της αφομοίωσης του CO_2 στα φύλλα όλων των φυτών στη στατική φάση ήταν σχεδόν η ίδια, η ανάπτυξη της γρήγορης φάσης στα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα με νανοκρυστάλλους $\text{Eu}^{3+}:\text{LaF}_3$ ήταν πιο αργή, παρόλα αυτά δεν επηρέασε τον ρυθμό ανάπτυξης των φυτών. (Paskhin et al., 2023).

Όσον αφορά τα φυτά τομάτας, η διαπνοή στα φύλλα ενεργοποιήθηκε παρουσία φωτός. Αν και δεν υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στους μέγιστους ρυθμούς διαπνοής μεταξύ των ομάδων των φυτών, τα φυτά τομάτας που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα νανοκρυστάλλων

Eu³⁺:LaF₃ παρουσίασαν βραδύτερη ενεργοποίηση της διαπνοής σε σχέση με άλλες ομάδες φυτών. Στην στατική φάση η ένταση της αφομοίωσης του CO₂ στα φύλλα των φυτών τομάτας που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα οξειδίου του ευρωπαϊού (Eu₂O₃) ήταν η ίδια με τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες. Τα φύλλα των φυτών τομάτας που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα νανοκρυστάλλων Eu³⁺:LaF₃, είχαν ρυθμό αφομοίωσης CO₂ 25% χαμηλότερο. (Paskhin et al., 2023).

3.5.4. Ανθεκτικότητα των φυτών σε αβιοτικούς παράγοντες

Τα φυτά εκτέθηκαν σε υψηλές (+40 °C για 40 λεπτά) και χαμηλές (+4 °C για 22 ώρες) θερμοκρασίες. Παρατηρήθηκε ότι τόσο οι υψηλές όσο και οι χαμηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν την ανταλλαγή αερίων στα φύλλα τομάτας όλων των ομάδων που μελετήθηκαν. Η ανάπτυξη των φυτών σε χαμηλές θερμοκρασίες δεν είχε σχεδόν καμία επίδραση στην ένταση της διαπνοής στο σκοτάδι. Παρόλα αυτά, η διαπνοή με την παρουσία φωτός ήταν σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με τα φυτά που δεν υπέστησαν ακραίες θερμοκρασίες. Η ένταση της διαπνοής στο φως, στα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες μειώθηκε κατά 50%, στα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα οξειδίου του ευρωπαϊού (Eu₂O₃) μειώθηκε κατά 65% και στα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα νανοκρυστάλλων (Eu³⁺:LaF₃) μειώθηκε κατά 30%. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και κατά τη μέτρηση του CO₂ που αφομοιώθηκε από τα φυτά που υποβλήθηκαν σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η αφομοίωση του CO₂ σε όλες τις ομάδες φυτών στο σκοτάδι δεν άλλαξε. Αντιθέτως η αφομοίωση του CO₂ στο φως παρεμποδίστηκε σε μεγάλο βαθμό. Πιο συγκεκριμένα στα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα οξειδίου του ευρωπαϊού (Eu₂O₃) η αφομοίωση του CO₂ μειώθηκε 85%, στα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα νανοκρυστάλλων (Eu³⁺:LaF₃) μειώθηκε κατά 55% και στα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες μειώθηκε κατά 90%. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι τα φυτά πριν υποβληθούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, η αφομοίωση του CO₂ στα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα νανοκρυστάλλων (Eu³⁺:LaF₃) ήταν σημαντικά χαμηλότερη από ότι σε φυτά άλλων ομάδων, ενώ μετά την υποβολή των φυτών σε χαμηλές θερμοκρασίες η αφομοίωση του CO₂ ήταν υψηλότερη από τις άλλες ομάδες φυτών. Κατά την ψυχρή επεξεργασία, παρατηρήθηκε το αντίθετο μοτίβο. Επίσης η ανάπτυξη των φυτών στους +4 °C είχε σαν αποτέλεσμα την αλλαγή στη συνολική αγωγιμότητα για το νερό και το CO₂. Τέλος παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του φωτός

στα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες και στα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα οξειδίου του ευρωπίου (Eu_2O_3) κατά 90-95%, ενώ η μείωση που παρατηρήθηκε στα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα νανοκρυστάλλων ($\text{Eu}^{3+}:\text{LaF}_3$) ήταν μικρότερη περίπου 65 με 70%. (Paskhin et al., 2023).

3.5.5. Σύνοψη - Σχολιασμός

Όπως είναι γνωστό μία από τις κύριες ιδιότητες των ενώσεων ευρωπίου, η οποία τις επιτρέπει να χρησιμοποιούνται στη δημιουργία υλικών κάλυψης για θερμοκήπια, είναι η ικανότητα να εκπέμπουν φως στο φωτοσυνθετικά ενεργό εύρος και να απορροφούν την υπεριώδη ακτινοβολία.

Η χρήση του οξειδίου του ευρωπίου (Eu_2O_3) ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίου έχει σαν αποτέλεσμα να επιδρά στην ταχύτερη αύξηση των φυτών. Πιο συγκεκριμένα τα φυτά παρουσιάζονται μεγαλύτερα κατά 30 με 40%, επίσης, παρουσιάζουν υψηλότερες αποδόσεις. Αντιθέτως, τα φυτά που καλλιεργούνται υπό κάλυψη με νανοκρυστάλλους $\text{Eu}^{3+}:\text{LaF}_3$ παρουσιάζουν μικρότερο ρυθμό συσσώρευσης βιομάζας. Παρόλα αυτά όμως τα φυτά που αναπτύσσονται κάτω από κάλυμμα νανοκρυστάλλων $\text{Eu}^{3+}:\text{LaF}_3$ παρουσιάζονται πιο ανθεκτικά σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες σε σχέση με τα φυτά που αναπτύσσονται κάτω από κάλυμμα οξειδίου του ευρωπίου (Eu_2O_3).

Παρόλο που η χρήση των υλικών αυτών ως υλικών κάλυψης θερμοκηπίων εμφανίζει επιστημονικό ενδιαφέρον στην πράξη η εφαρμογή τους παραμένει δύσκολη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το ευρώπιο είναι ένα πολύ σπάνιο στοιχείο (σπάνια γαία) με αποτέλεσμα να είναι πολύ ακριβό. Ως εκ τούτου δεν μπορεί να αποτελέσει μια οικονομική βιώσιμη λύση για μεγάλες επιφάνειες όπως είναι τα θερμοκήπια. Επίσης δεν υπάρχει διαθέσιμη τεχνολογία ευρείας εφαρμογής για επικάλυψη των θερμοκηπίων με αυτά τα υλικά. Τέλος οι επιστημονικές έρευνες που έχουν διεξαχθεί μέχρι σήμερα είναι στα σπάργανα, επομένως χρειάζεται περεταίρω έρευνα.

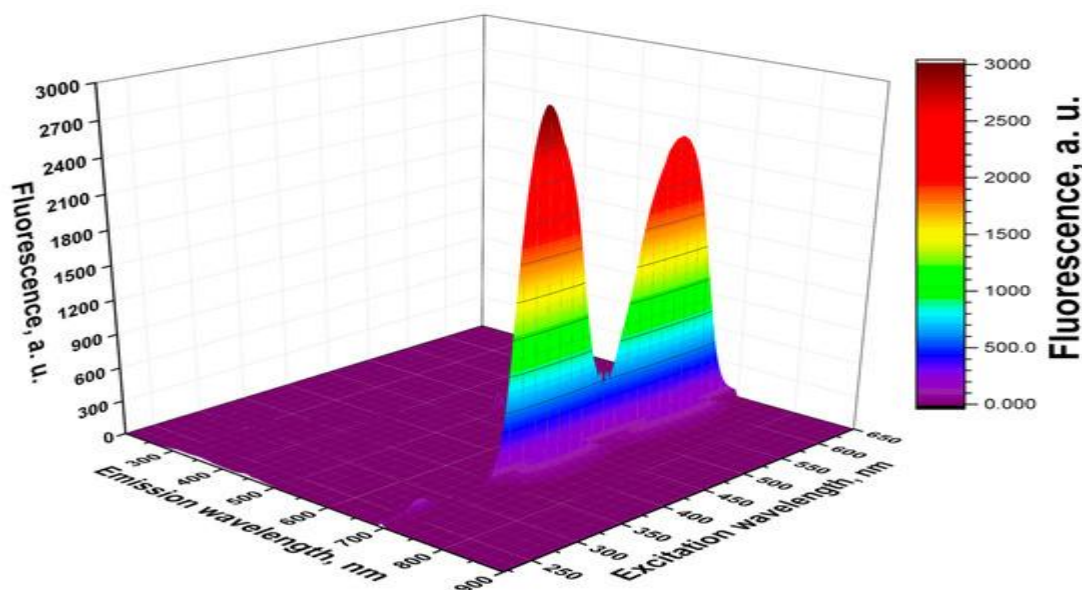
3.6. Υλικά κάλυψης θερμοκηπίου με βάση το Ρουμπίνι

Οι Paskhin et al. (2024), μελέτησαν την επίδραση των καλυμμάτων φωτομετατροπής που βασίζονται σε σωματίδια ρουμπινιού [οξείδιο του αργιλίου με πρόσμειξη χρωμίου ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$)]

(PCC-R), στην ανάπτυξη φυτών μαρουλιού (*Lactuca sativa*). Χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια από ρουμπίνι (από 100 nm έως 2 μm), τα οποία ελήφθησαν ύστερα από κατακερματισμό με λέιζερ. Η περιεκτικότητα σε ιόντα χρωμίου σε σχέση με ιόντα αλουμινίου στα νανοσωματίδια ήταν $3,3 \times 10^{-3}$. Χρησιμοποιήθηκαν τρία καλύμματα με διαφορετικές πυκνότητες εφαρμοζόμενων σωματιδίων ρουμπινιού $2 \times 10^7 \text{ m}^{-2}$ (PCC-R7), $2 \times 10^8 \text{ m}^{-2}$ (PCC-R8), $2 \times 10^9 \text{ m}^{-2}$ (PCC-R9).

3.6.1. Οπτικές ιδιότητες

Οι οπτικές ιδιότητες των καλυμμάτων ρουμπινιού φαίνονται στο σχήμα 11. Τα καλύμματα πάνω στα οποία ενσωματώνονται νανοσωματίδια ρουμπινιού έχουν φωταύγεια που κυμαίνεται από 650 nm έως 750 nm, με κορυφή στα 695 nm. Το PCC-R8 παρουσιάζει δύο περιοχές διέγερσης φωταύγειας: από 350 nm έως 450 nm με μέγιστο στα 405 nm και από 500 nm έως 600 nm με μέγιστο στα 550 nm.



Σχήμα 11. Διαφορά φάσματος φωταύγειας 3D («φάσμα PCC-R8» μείον «φάσμα κοινής κάλυψης») σωματιδίων ρουμπινιού. (πηγή: (Paskhin et al., 2024).

3.6.2. Επίδραση των καλυμμάτων ρουμπινιού στην ανάπτυξη των φυτών

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι τα φυτά μαρουλιού που αναπτύχθηκαν κάτω από το καλύμματα PCC-R8, είχαν καλύτερη απόδοση στην ανάπτυξή τους. Πιο συγκεκριμένα τα

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

φυτά μαρουλιού που αναπτύχθηκαν κάτω από το κάλυμμα αυτό, παρουσίασαν μεγαλύτερο αριθμό φύλλων σε σύγκριση με τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες κατά 10% και μεγαλύτερη συνολική επιφάνεια φύλλων σε σχέση με τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες κατά 40%. Όσον αφορά τα φυτά μαρουλιού που καλλιεργήθηκαν κάτω από το κάλυμμα PCC-R9 είχαν ελαφρώς μικρότερο αριθμό φύλλων σε σύγκριση με τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες και η συνολική επιφάνεια των φύλλων τους ήταν σχεδόν ίδια με τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες. Τα φυτά που καλλιεργήθηκαν κάτω από το κάλυμμα PCC-R7 δεν είχαν κανέναν επηρεασμό όσο αναφορά τον αριθμό των φύλλων όσο και την συνολική επιφάνεια των φύλλων. Τα φυτά μαρουλιού που αναπτύχθηκαν κάτω και από τα τρία καλύμματα αύξησαν την περιεκτικότητά τους σε χλωροφύλλη στα φύλλα κατά 25 με 35% σε σχέση με τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες. (Paskhin et al., 2024).

Στην συνέχεια της έρευνας μετρήθηκαν κάποιες επιπλέον παράμετροι όπως είναι η ένταση της αφομοίωσης του CO₂, η ένταση της διαπνοής και οι παράμετροι απόδοσης του νερού. Η ένταση της αφομοίωσης του CO₂ και της διαπνοής στο σκοτάδι δεν διέφερε σε φυτά μαρουλιού διαφορετικών ομάδων εκτός από τα φυτά μαρουλιού που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα PCC-R8 και ανερχόταν σε 0,31 έως 0,36 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ και 0,30 έως 0,36 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ αντίστοιχα. Η ένταση της αφομοίωσης του CO₂ στα φυτά μαρουλιού που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα PCC-R8 ήταν στατιστικά σημαντικά υψηλότερη από ό,τι στα φυτά μάρτυρες (0,31 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ έναντι 0,39 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), το γεγονός αυτό μπορεί να σημαίνει ότι σε αυτά τα φυτά η αναπνοή είναι πιο έντονη. Όσον αφορά την ένταση της διαπνοής στα φυτά μαρουλιού που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα PCC-R8 ήταν 0,09 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, η οποία ήταν σημαντικά χαμηλότερη από ό,τι στα άλλα φυτά. Στην συνέχεια η παρουσία φωτός είχε σαν αποτέλεσμα να ενεργοποιηθεί η διαδικασία της αφομοίωσης του CO₂ και της διαπνοής. Η ένταση της αφομοίωσης του CO₂ κάτω από φως σε όλες τις ομάδες φυτών δεν είχε στατιστικά σημαντικές διαφορές. Ο ρυθμός διαπνοής στα φύλλα των φυτών μαρουλιού που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα PCC-R8 ενεργοποιήθηκε λιγότερο αποτελεσματικά από ό,τι σε άλλες ομάδες φυτών.

Παρόλο που οι διαφορές στην αφομοίωση και τη διαπνοή του διοξειδίου του άνθρακα από τα φύλλα δεν ήταν τόσο σημαντικές, ωστόσο οι διαφορές στην αποτελεσματικότητα της χρήσης

του νερού των φυτών ήταν σημαντικές. Παρατηρήθηκε ότι κατά την αναπνοή των φυτών στο σκοτάδι η απόδοση χρήσης νερού (WUE), ήταν σημαντικά υψηλότερη στα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από το κάλυμμα PCC-R8, ενώ στα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα PCC-R7 και PCC-R9 η απόδοση χρήσης νερού (WUE) παρέμεινε περίπου στο επίπεδο με αυτό που παρατηρήθηκε στα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες. Με την παρουσία φωτός όχι μόνο ενεργοποιούνται οι διαδικασίες αφομοίωσης και διαπνοής στα φύλλα των φυτών μαρουλιού αλλά αλλάζει και η αποδοτικότητα χρήσης νερού από τα φυτά. Στα πρώτα λεπτά, σε όλες τις ομάδες φυτών, η αποδοτικότητα χρήσης νερού, υπολογιζόμενη τόσο στην αναλογία αφομοίωσης/διαπνοής CO₂ όσο και στην αναλογία αφομοίωσης CO₂ /στοματική αγωγιμότητα έδειξε απότομη αύξηση. Μετά την επίτευξη των μέγιστων τιμών, η WUE σταδιακά μειώθηκε. Παρατηρήθηκε ότι στα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα PCC-R8, οι μέγιστες τιμές WUE ήταν έως και τρεις φορές υψηλότερες από αυτές που είχαν τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες και τα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από τα καλύμματα PCC-R7 και PCC-R9. Μετά από 20 λεπτά παρουσίας φωτισμού, οι τιμές WUE στα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από κάλυμμα PCC-R8 έφτασαν τις τιμές εκείνες που μετρήθηκαν σε άλλες ομάδες φυτών. (Pashkin et al., 2024).

3.6.3. Σύνοψη - Σχολιασμός

Το ρουμπίνι παρουσιάζει πολύ καλή διαπερατότητα στο φως, ειδικά στο ορατό φάσμα αλλά απορροφά συγκεκριμένα μήκη κύματος, ειδικά στην πράσινη περιοχή λόγω του χρωμίου. και αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες. Παρόλα αυτά όμως έχει υψηλό κόστος με αποτέλεσμα η εφαρμογή του σε θερμοκήπια που έχουν μεγάλη επιφάνεια το κάνει οικονομικά ασύμφορο. Επίσης η κατασκευή του είναι δύσκολη με αποτέλεσμα να έχει περιορισμένη διαθεσιμότητα. Επιπλέον το ρουμπίνι είναι πολύ σκληρό και βαρύ υλικό με αποτέλεσμα να γίνεται δύσκολη η χρήση του ως υλικό επικάλυψης θερμοκηπίων διότι όπως είναι γνωστό τα υλικά επικάλυψης θερμοκηπίων πρέπει να είναι ελαφριά και εύκαμπτα. Τέλος το ρουμπίνι λόγω των ιόντων χρωμίου έχει ερυθρή απόχρωση, το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αλλοιώνει το φάσμα του φωτός που φτάνει στα φυτά και πιθανότατα να επηρεάζει αρνητικά τη φωτοσύνθεση. Η φωτοσύνθεση βασίζεται κυρίως στο μπλε και κόκκινο φως, και το ρουμπίνι δεν είναι βέλτιστο σε αυτό.

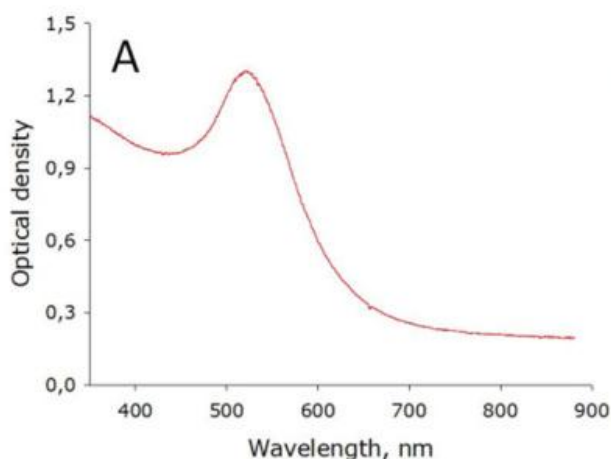
Έτσι λοιπόν τα νανοσωματίδια ρουμπινιού θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε καλύμματα θερμοκηπίων, ενισχύοντας την μετατροπή του φωτός. Παρόλα αυτά όμως η χρήση τους στην πράξη δεν έχει ευρεία εφαρμογή. Η χρήση τους αρκείται μόνο σε πειραματικό στάδιο και μάλιστα απαιτείται και περεταίρω έρευνα για να εξαχθούν καλύτερα συμπεράσματα.

3.7. Υλικά κάλυψης θερμοκηπίων με βάση μεμβράνες φθοροπολυμερούς φωτομετατροπής με επικάλυψη νανοσωματιδίων χρυσού

Μια άλλη νέα τεχνολογία κάλυψης των θερμοκηπίων αποτελούν οι μεμβράνες που έχουν ως βάση τα φθοροπολυμερή, τα οποία επικαλύπτονται με νανοσωματίδια χρυσού. Οι μεμβράνες που έχουν ως βάση τα φθοροπολυμερή έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν την υπεριώδη ακτινοβολία και το ιώδες φως σε μπλε και κόκκινο φως. Τα νανοσωματίδια χρυσού δεν έχουν την ικανότητα να συμβάλλουν στη φωτομετατροπή, αλλά έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν εν μέρει την ενέργεια στην πράσινη περιοχή του φάσματος σε θερμότητα, η οποία είναι πολύ σημαντική σε θερμοκήπια που είναι κατασκευασμένα σε περιοχές που επικρατούν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Επίσης, η επικάλυψη των φθοροπολυμερών με νανοσωματίδια χρυσού αυξάνουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής των μεμβρανών. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι σε πειράματα που προσομοιώνουν θερμοκήπια σε περιοχές με χαμηλές θερμοκρασίες, η φθοροφόρος μεμβράνη που δεν ήταν επικαλυμμένη με νανοσωματίδια χρυσού ήταν επιρρεπής σε αποδόμηση. Όσον αφορά την ένταση της φωταύγειας δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές κατά την πρώτη ημέρα. Παρόλα αυτά όμως, μετά από δύο ημέρες, παρατηρήθηκε μια σχεδόν γραμμική μείωση της έντασης του φωτός (με ρυθμό 7-8% ανά ημέρα). Με το πέρας δύο εβδομάδων, η ένταση της φωταύγειας ήταν μόνο στο 15% της αρχικής έντασης. Από εκείνο το σημείο και μετά ο ρυθμός αποδόμησης της μεμβράνης μειωνόταν 1 με 2% ανά ημέρα. Παρατηρήθηκε ότι η εξάντληση της μεμβράνης γινόταν κυρίως κατά τη μετάβαση από τη νύχτα σε μέρα. Όταν στην μεμβράνη ενσωματώθηκαν νανοσωματίδια χρυσού ο μέσος ρυθμός αποδόμησης δεν ξεπέρασε το 1% ανά ημέρα. (Gudkov et al., 2020).

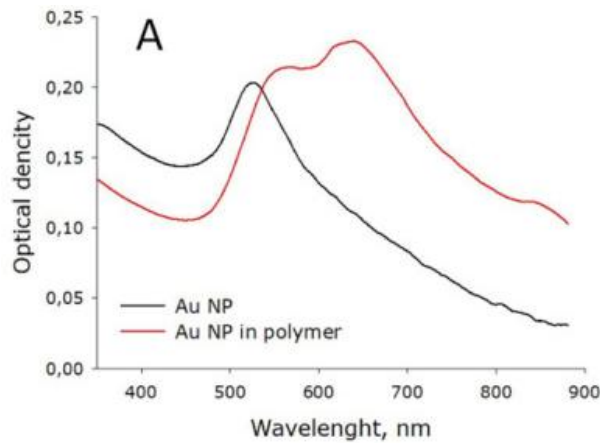
3.7.1. Οπτικές και θερμικές ιδιότητες φθοροπολυμερών με επικάλυψη νανοσωματιδίων χρυσού

Όπως φαίνεται από το σχήμα 12 το φάσμα απορρόφησης των νανοσωματιδίων χρυσού έχει μέγιστο στα 530 nm



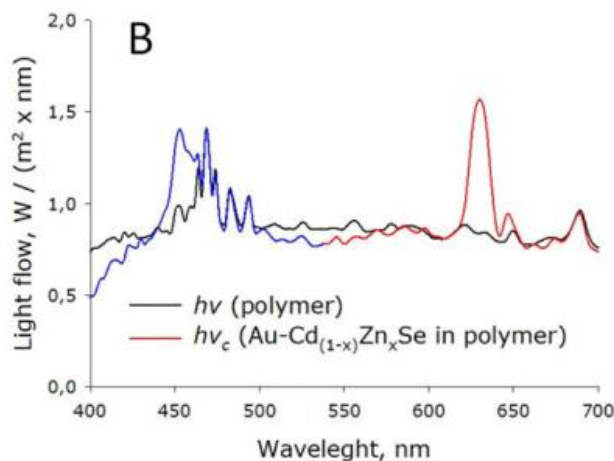
Σχήμα 12. Φάσμα απορρόφησης νανοσωματιδίων χρυσού. (πηγή: Gudkov et al., 2020).

Για την ενσωμάτωση των νανοσωματιδίων χρυσού σε μια πολυμερή μεμβράνη θα πρέπει να μεταφερθούν σε ακετόνη. Στο σχήμα 13 φαίνεται το φάσμα απορρόφησης των νανοσωματιδίων χρυσού σε ακετόνη και σε φθοροπολυμερές. Παρατηρείται ότι τα φάσματα των νανοσωματιδίων σε μια φθοροπολυμερική μεμβράνη είναι τελείως διαφορετικά από τα φάσματά τους σε ένα υγρό. Πιο συγκεκριμένα το φάσμα απορρόφησης των νανοσωματιδίων χρυσού σε ακετόνη παρουσιάζει μέγιστο στην περιοχή των 530 nm. Το φάσμα απορρόφησης των ίδιων νανοσωματιδίων χρυσού στο νανοσύνθετο που περιέχει φθόριο παρουσιάζει μέγιστο στην περιοχή των 650 nm. (Gudkov et al., 2020).



Σχήμα 13. Φάσματα απορρόφησης νανοσωματιδίων χρυσού (Au NP) σε ακετόνη και νανοσωματιδίων χρυσού ενσωματωμένων στο νανοςύνθετο που περιέχει φθόριο. (πηγή: Gudkov et al., 2020).

Στο σχήμα 14 φαίνεται το φάσμα φωταύγειας μιας μεμβράνης φθοροπολυμερούς που περιέχει νανοσωματίδια φθοροφόρων και χρυσού. Τα πολυμερή που περιέχουν φθοροφόρα και νανοσωματίδια χρυσού παρατηρείται ότι έχουν δύο μέγιστα φωταύγειας: στα 450 και 630 nm. Η ένταση του διερχόμενου φωτός στην πράσινη περιοχή του φάσματος μειώθηκε κάπως, προφανώς, λόγω της παρουσίας νανοσωματιδίων χρυσού στο πολυμερές. (Gudkov et al., 2020).



Σχήμα 14. Φάσμα φωταύγειας του πολυμερούς φωτομετατροπής που περιέχει κβαντικές κουκκίδες και νανοσωματίδια χρυσού. (πηγή: Gudkov et al., 2020).

Λόγω του γεγονότος ότι τα νανοσωματίδια χρυσού απορροφούν το φως στην πράσινη περιοχή του φάσματος, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το σύνθετο φθοροπολυμερές να θερμαίνεται. Επίσης, τα νανοσωματίδια χρυσού παρουσιάζουν και την ικανότητα να αυξάνουν τη σταθερότητα των κβαντικών κουκίδων. (Gudkov et al., 2020).

3.7.2. Επίδραση μεμβρανών φθοροπολυμερούς φωτομετατροπής με επικάλυψη νανοσωματιδίων χρυσού στην απόδοση των καλλιεργειών

Οι Gudkov et al. (2020), διεξήγαγαν πειράματα καλλιεργειών πιπεριάς, μελιτζάνας, αγγουριού και τομάτας κάτω από μεμβράνες φθοροπολυμερούς και κάτω από κοινές μεμβράνες (μάρτυρας) και μετρήθηκαν το μήκος των βλαστών και των ριζών και ο αριθμός και η επιφάνεια των φύλλων. Στα πειράματα αυτά παρατηρήθηκε ότι οι μεμβράνες φωτομετατροπής επιταχύνουν την ανάπτυξη και των τεσσάρων καλλιεργούμενων φυτών. Ο υψηλότερος ρυθμός ανάπτυξης παρατηρήθηκε στα φυτά τομάτας, ενώ ο χαμηλότερος στα φυτά αγγουριάς. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η επιφάνεια των φύλλων των φυτών τομάτας που αναπτύχθηκαν κάτω από μεμβράνες φωτομετατροπής ήταν σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή των φυτών τομάτας που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες και μάλιστα παρατηρήθηκε ότι με το πέρας της 5ης εβδομάδας, η διαφορά έφτασε κατά μέσο όρο στο 50%. (Gudkov et al., 2020).

Όσον αφορά την αφομοίωση του CO₂ από τα φυτά και των τεσσάρων καλλιεργειών παρατηρήθηκε ότι αυτά που καλλιεργήθηκαν κάτω από μεμβράνη φθοροπολυμερούς φωτομετατροπής, είχαν αυξημένη αφομοίωση κατά 30-40% σε σύγκριση με τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες. Ταυτόχρονα, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές στους ρυθμούς διαπνοής. Τέλος η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη στα φύλλα των φυτών και των τεσσάρων καλλιεργειών που καλλιεργήθηκαν κάτω από τη μεμβράνη φωτομετατροπής αυξήθηκε κατά 55% σε σύγκριση με τα φυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες. (Gudkov et al., 2020).

3.7.3. Σύνοψη - Σχολιασμός

Οι μεμβράνες φθοροπολυμερούς μετατροπής με επικάλυψη νανοσωματιδίων χρυσού θα μπορούσε να είναι μια καλή επιλογή για θερμοκήπια που εγκαθίστανται σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη (περιοχές που έχουν πολύ κρύο) λόγω του γεγονότος ότι τα νανοσωματίδια χρυσού έχουν

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

την ικανότητα να μετατρέπουν εν μέρει την ενέργεια στην πράσινη περιοχή του φάσματος σε θερμότητα. Επίσης οι μεμβράνες αυτές παρουσιάζουν αντοχή στους φυσικούς παράγοντες και υψηλή σταθερότητα. Ακόμη η εφαρμογή αυτών των μεμβρανών στα θερμοκήπια θα μπορούσε να βοηθήσει στην αύξηση της απόδοσης των καλλιεργειών λόγω της ενίσχυσης των φωτοσυνθετικών διεργασιών.

Παρόλο που οι μεμβράνες αυτές είναι μια ελκυστική επιλογή για τα θερμοκήπια, η χρήση τους προς τον παρόν δεν είναι ευρεία και περιορίζεται σε πειραματικά θερμοκήπια. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο υψηλό κόστος που έχουν και στην ανάγκη που υπάρχει για περαιτέρω έρευνα για να εξαχθούν καλύτερα συμπεράσματα.

3.8. Υλικά κάλυψης Θερμοκηπίου με βάση το έξυπνο γυαλί (SG)

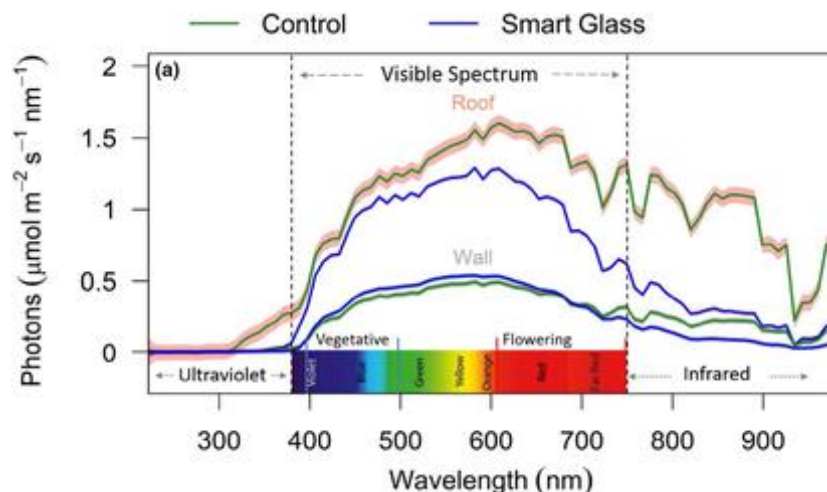
Μια νέα τεχνολογία υλικών κάλυψης που χρησιμοποιείται στα θερμοκήπια υψηλής τεχνολογίας είναι αυτή του «έξυπνου γυαλιού» (SG). Το υλικό αυτό κάλυψης έχει την ικανότητα να αλλάζει την ποιότητα και την ένταση του φωτός με αποτέλεσμα να βελτιώνει την ενέργεια ψύξης στο εσωτερικό των θερμοκηπίων. (Lin et al., 2022)

Σε έρευνα που διεξήγαγαν οι Lin et al. (2022), χρησιμοποίησαν το «έξυπνο γυαλί» (SG) εξοπλισμένο με μεμβράνη ULR-80, το οποίο επιτρέπει τη μετάδοση του 85% του φωτοσυνθετικά ενεργού φωτός και ταυτόχρονα μπλοκάρει την ακτινοβολία που παράγει θερμότητα. Στο πείραμα αυτό καλλιεργήσαν μελιτζάνες σε θερμοκήπιο υψηλής τεχνολογίας, το οποίο το χώρισαν σε δύο τμήματα, στο ένα τμήμα το θερμοκήπιο είχε για υλικό κάλυψης το SG εξοπλισμένο με μεμβράνη ULR-80 και το άλλο τμήμα του θερμοκηπίου χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας και είχε για υλικό κάλυψης το τυπικό διάχυτο γυαλί. Πραγματοποίησαν δύο διαδοχικές δοκιμές 6 μηνών τόσο σε ψυχρές όσο και σε θερμές συνθήκες και αποτύπωσαν τα συμπεράσματά τους σχετικά με το κλίμα του θερμοκηπίου και με την απόδοση των καλλιεργειών μελιτζάνας.

3.8.1.Οπτικές ιδιότητες

Οι οπτικές ιδιότητες του έξυπνου γυαλιού παρουσιάζονται στο σχήμα 15. Πιο συγκεκριμένα το «έξυπνο γυαλί» (SG) εξοπλισμένο με μεμβράνη ULR-80 μπλοκάρει το μεγαλύτερο μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας (221-279 nm) περίπου το 85%. Επίσης,

μπλοκάρει μια σημαντική ποσότητα κόκκινου φωτός (600-699 nm) περίπου 26% και απώτερου κόκκινου φωτός (710-850 nm) περίπου 58%. Επιπλέον, προκαλεί και μια συνολική μείωση της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας (280 σε 799 nm) κατά 19%. Έτσι λοιπόν το «έξυπνο γυαλί» (SG) αλλάζει τόσο την ποιότητα όσο και την ποσότητα του φάσματος φωτός. (Chavan et al., 2020).



Σχήμα 15. Γραφική παράσταση φωτονίων. Το φως που διέρχεται από την οροφή και τον τοίχο του θερμοκηπίου. (πηγή: Chavan et al., 2020).

3.8.2. Επίδραση του υλικού κάλυψης έξυπνου γυαλιού (SG) στο κλίμα του θερμοκηπίου.

Οι Lin et al. (2022), παρατήρησαν ότι δεν υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές τόσο στην θερμοκρασία όσο και στην υγρασία ανάμεσα στα δύο τμήματα του θερμοκηπίου. Όσον αφορά το διοξείδιο του άνθρακα η παροχή ήταν ίδια και στα δύο θερμοκήπια, αλλά παρατηρήθηκε ότι η αναπνοή τη νύχτα ήταν σημαντικά χαμηλότερη στο τμήμα SG του θερμοκηπίου τόσο στην ψυχρή όσο και στην θερμή περίοδο και είχε σαν αποτέλεσμα να μειωθεί το CO₂ τη νύχτα τόσο κατά την ψυχρή περίοδο όσο και κατά την θερμή περίοδο (- 13,3%) σε σχέση με το τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας και στις δύο περιόδους.

Επίσης, στο τμήμα του θερμοκηπίου SG μειώθηκε η κατανάλωση ενέργειας ψύξης τόσο στην ψυχρή όσο και στην θερμή περίοδο κατά 4,4,% σε σχέση με το τμήμα του θερμοκηπίου που

χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας. Ακόμη το τμήμα του θερμοκηπίου SG δεν επηρέασε σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης ή αερισμού. (Lin et al., 2022).

Όσον αφορά τον καθαρό ρυθμό φωτοσύνθεσης παρατηρήθηκε ότι μειώθηκε στο τμήμα θερμοκηπίου SG τόσο κατά την ψυχρή όσο και κατά την θερμή περίοδο. (-15,2% κατά μέσο όρο). Ο ρυθμός διαπνοής (Tr) μειώθηκε σημαντικά στο τμήμα του θερμοκηπίου SG κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου (-15,7%) και αυτό επήλθε από την μειωμένη φωτοσυνθετική δραστηριότητα που επικρατούσε λόγω της χαμηλής έντασης φωτός της περιόδου αυτής. Το έλλειμα πίεσης ατμών φύλλου-αέρα ($VPDL$) ήταν υψηλότερο στο τμήμα θερμοκηπίου SG τόσο κατά την ψυχρή περίοδο (+9,45%) όσο και για την θερμή περίοδο (+5,79%) σε σχέση με το τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας και στις δύο περιόδους. Η στοματική αγωγιμότητα μειώθηκε στο τμήμα θερμοκηπίου SG κατά την ψυχρή περίοδο (-24,7%) υπό κορεσμένο φως, αλλά δεν ήταν σημαντικά διαφορετική κατά την θερμή περίοδο σε σχέση με το τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας. Ενώ η στοματική αγωγιμότητα υπό φυσικό φως ανάπτυξης μειώθηκε στο τμήμα του θερμοκηπίου SG κατά την θερμή περίοδο (-18,4%) σε σχέση με το τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας. (Lin et al., 2022).

3.8.3. Επίδραση του υλικού κάλυψης έξυπνου γυαλιού (SG) στην απόδοση της καλλιέργειας.

Ο αριθμός των γονιμοποιημένων καρπών μειώθηκε στο τμήμα του θερμοκηπίου SG σε σύγκριση με το τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας. Πιο συγκεκριμένα στην ψυχρή περίοδο η μείωση ήταν -17%, ενώ την θερμή περίοδο η μείωση ήταν -24%. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι το μέσο βάρος και ο μέσος αριθμός καρπών μελιτζάνας ήταν μικρότερος στο τμήμα του θερμοκηπίου SG σε σύγκριση με το τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας και στις δύο περιόδους των μετρήσεων. Γενικότερα η απόδοση της καλλιέργειας μελιτζάνας στο τμήμα θερμοκηπίου SG ήταν μικρότερη κατά 25% στην ψυχρή περίοδο και κατά 21% στην θερμή περίοδο σε σύγκριση με το τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η απόδοση στην καλλιέργεια μελιτζάνας στο τμήμα του θερμοκηπίου SG την θερμή περίοδο ήταν μεγαλύτερη κατά 31% σε σχέση με την απόδοση στο

τμήμα του θερμοκηπίου SG κατά την ψυχρή περίοδο. Τέλος παρατηρήθηκε ότι η απόδοση στην καλλιέργεια μελιτζάνας στο τμήμα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας κατά την θερμή περίοδο ήταν μεγαλύτερη κατά 24% σε σχέση με την απόδοση του τμήματος του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας κατά την ψυχρή περίοδο. (Lin et al., 2022).

3.8.4. Σύνοψη - Σχολιασμός

Το SG μπλοκάρει την υπεριώδη ακτινοβολία αλλά και ένα σημαντικό ποσοστό της PAR, κυρίως στην περιοχή του κόκκινου φωτός του φάσματος, συμβάλλοντας στη μειωμένη κατανάλωση νερού, θρεπτικών συστατικών και ενέργειας. Οι μειώσεις στην PAR στα φυτά που καλλιεργήθηκαν με SG μείωσαν τη φωτοσύνθεση στα φύλλα αυτών των φυτών με αποτέλεσμα να παρατηρηθεί μείωση της απόδοσης χωρίς να επηρεαστεί η ποιότητα των καρπών. Απαιτείται μια περαιτέρω διερεύνηση για να ελεγχθεί κατά πόσον η ποιότητα ή και η ποσότητα του φωτός μειώνουν κυρίως την απόδοση των καρπών έτσι ώστε να αναπτυχθεί μια νέα γενιά SG για τις θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι το SG είναι πιθανό να έχει διαφορετικές επιδράσεις ανάλογα με την καλλιέργεια (π.χ., καλλιέργειες όπως τα φυλλώδη λαχανικά μπορεί να έχουν διαφορετική απόκριση επειδή τα φύλλα, και όχι οι αναπαραγωγικές δομές, συλλέγονται για απόδοση) και τη διάρκεια περιόδων κυρίως χαμηλού φωτισμού, συμπεριλαμβανομένων των χειμερινών περιόδων ανάπτυξης. Για τους λόγους αυτούς είναι απαραίτητες επιπλέον έρευνες του έξυπνου γυαλιού SG με διαφορετικούς τύπους καλλιεργειών και κυρίως σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού έτσι ώστε να εντοπιστούν τα καταλληλότερα χαρακτηριστικά του SG και έτσι να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν για την καλλιέργεια ποικίλων φυτών.

Συνολικά, η χρήση των νέων τεχνολογιών γυαλιού ως υλικά κάλυψης θερμοκηπίων έχει την ικανότητα να προσφέρει στο άμεσο μέλλον στους παραγωγούς την δυνατότητα να εξοικονομούν ενέργεια και ταυτόχρονα να παράγουν προϊόντα με λιγότερη χρήση πόρων. Τέλος η επιστημονική έρευνα πάνω στον τομέα αυτό θα πρέπει να συνεχιστεί για την εξαγωγή καλύτερων συμπερασμάτων της επίδρασης των υλικών υάλωσης στην ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των φυτών.

3.9. Υλικά κάλυψης θερμοκηπίων με βάση το γραφένιο και το φουλερένιο

Τα θερμοκήπια του μέλλοντος θα καθορίζονται από την ανάπτυξη αλλοτροπικών υλικών με βάση τον άνθρακα, όπως είναι οι νανοσωλήνες άνθρακα (Ghalandari et al., 2020), το φουλερένιο (Emmott et al., 2015) και το γραφένιο. (Saeidi et al., 2020). Οι κβαντικές κουκίδες (QD) που βασίζονται σε PB είναι ευαίσθητες σε επιφανειακή οξείδωση, χαμηλή σταθερότητα, περιβαλλοντική υποβάθμιση και απώλεια θερμότητας. Η συνεχή έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία επιδεινώνει το πρόβλημα.

Οι κβαντικές κουκίδες (QD) με βάση το γραφένιο έχουν σαν αποτέλεσμα να ενισχύουν την κβαντική απόδοση φωταύγειας (PL) κατά 65%, μειώνοντας σημαντικά τις απώλειες επαναρρόφησης. (Saeidi et al., 2020). Οι ερευνητές (Saeidi et al., 2020) έχουν συνθέσει θερμοτροπικά μόρια υδρογέλης-οξειδίου του γραφενίου με αυτόματη ρυθμιζόμενη διαφάνεια για διπλά ελεγχόμενα γυαλιά. (Chou et al., 2017). Το οξύδιο του γραφενίου έχει την ικανότητα να μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα. Κατά την διάρκεια της μετατροπής αυτής το διαφανές γυαλί μετατρέπεται σε αδιαφανές, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνει την ικανότητά του να απορροφά την ηλιακή ενέργεια. Παρόλο που τα υλικά με βάση το γραφένιο παρέχουν καλύτερα ηλεκτρικά και οπτικά χαρακτηριστικά, η περαιτέρω σύνθεση του γραφενίου εξακολουθεί να παραμένει δύσκολη. Το γεγονός αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα να είναι πολύ δύσκολο να παραχθούν υλικά με βάση το γραφένιο. (Lin et al., 2019).

Ως καλύμματα θερμοκηπίου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν υλικά που έχουν ως βάση το φουλερένιο και αυτό γιατί μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς περιορισμούς και σε σχετικά μικρό κόστος. Έτσι λοιπόν το φουλερένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα φωτοβολταϊκά υλικά που με την σειρά τους χρησιμοποιούνται ως έξυπνα καλύμματα θερμοκηπίων. Η καταλληλότητα των φουλλερενίων βασίζεται στη χημική σύζευξη και στη χαμηλή ενέργεια αναδιοργάνωσης. (Zhan and Jiang, 2008). Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι η χρήση των ηλιακών κυψελών με βάση το φουλερένιο έχει σημειώσει ελάχιστη πρόοδο.

Οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν φουλερένιο σε ηλιακές κυψέλες ήταν οι (Thompson and Frechet, 2008). Συσκευές παραγωγής ενέργειας, οι οποίες είχαν ως βάση τα φωσφολιπίδια και το φουλερένιο ερευνήθηκαν από τους (Zhan, and Jiang, 2008). Η τελευταία μελέτη απέδειξε ότι η

πιο εφικτή προσέγγιση για την ενσωμάτωση φουλερενίων σε φωτοβολταϊκές μονάδες ήταν μέσω της ανάπτυξης αμφίφιλων παραγώγων φουλερενίου C^{60} σε φωσφολιπίδια. Αυτή η προσέγγιση διευκολύνει την εκμετάλλευση της φωτοεπαγόμενης μετατροπής φορτίου, της μετατροπής φορτίου HOMO-LUMO και της μεταφοράς ενέργειας.

Τα φουλερένια αναγνωρίστηκαν ως χρήσιμο υλικό στις προαναφερθείσες μελέτες (Lin et al., 2019, Zhan, and Jiang, 2008, Thompson and Frechet, 2008), λόγω της ικανότητας που έχουν να μεταφέρουν φορτία και της συγγένειάς τους με τα ηλεκτρόνια. Σύμφωνα με την μελέτη, το πολυμερές φουλερένιο ήταν το πιο αποτελεσματικό υλικό εκείνη την εποχή. Παρά τα ελπιδοφόρα αποτελέσματα, ελάχιστη πρόοδος έχει σημειωθεί στην εμπορευματοποίηση αυτών των καινοτομιών. Αν και σε πρόσφατες έρευνες έχουν βρεθεί ενθαρρυντικά αποτελέσματα σχετικά με πρακτικές τεχνικές σύνθεσης χημικών ουσιών με βάση το φουλερένιο, παρόλα αυτά όμως δεν έχουν ακόμη τεθεί σε πρακτική εφαρμογή. (Kar et al., 2016).

4. Συμπεράσματα

Η επιλογή του υλικού κάλυψης ενός θερμοκηπίου είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις συνολικές επιδόσεις των συστημάτων παραγωγής ενός θερμοκηπίου. Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες υλικών κάλυψης θερμοκηπίων που έχουν ως στόχο την βελτίωση του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπίων με απώτερο στόχο την βελτίωση της απόδοσης των καλλιεργειών.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν σύμφωνα με την μελέτη που διεξήχθη ήταν τα εξής:

Όσον αφορά τα φωτοεπιλεκτικά καλύμματα των θερμοκηπίων, παρέχουν αυξημένη απόδοση των καλλιεργειών και ταυτόχρονα βελτιώνουν τη θρεπτική ποιότητα, τη γεύση και το χρώμα των φρούτων. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι οι φωτοεπιλεκτικές μεμβράνες δεν παρουσιάζουν τα ίδια οφέλη με τα καλύμματα που μετατοπίζουν το φως, για το λόγο αυτό σε περιόδους που δεν προσφέρουν οφέλη στην βλαστική ανάπτυξη μπορούν να αφαιρεθούν.

Οι μεμβράνες με κβαντικές κουκίδες παρουσιάζουν την ικανότητα να βελτιώνουν την φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR) και να ρυθμίζουν την θερμοκρασία στο εσωτερικό του

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

θερμοκηπίου με αποτέλεσμα να βελτιώνουν την απόδοση των καλλιεργειών. Παρόλα αυτά όμως η χρήση τους περιορίζεται λόγω του υψηλού κόστους που έχουν.

Η χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις είναι μια πάρα πολύ καλή επιλογή η οποία στην πράξη έχει εφαρμογή παρά το υψηλό κόστος. Οι κρίσιμοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν είναι η εύρεση των κατάλληλων τοποθεσιών για την κατασκευή θερμοκηπίων με φωτοβολταϊκά συστήματα, ο σχεδιασμός της καλύτερης δομής και διάταξης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών για τη μεγιστοποίηση της έκθεσης σε υψηλής ποιότητας ηλιακή ακτινοβολία για τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες και τη βέλτιστη φωτοσυνθετικά ενεργό ακτινοβολία για τις καλλιέργειες, καθώς και η επιλογή των κατάλληλων καλλιεργειών. Η ταυτόχρονη ανάπτυξη όλων αυτών των τεχνολογιών σε μαζική παραγωγή μπορεί να μειώσει σταδιακά το τρέχον υψηλό κόστος τους. Ταυτόχρονα με την τεχνολογική έρευνα, εξίσου σημαντική είναι η περαιτέρω μελέτη των αποκρίσεων των φυτών στις διαφορετικές τεχνολογίες, τόσο όσον αφορά τις φωτομορφογενείς όσο και τις φωτοσυνθετικές επιδράσεις.

Τα φωτοθερμικά πλασμονικά νανοσωματίδια παρουσιάζουν μικρότερη μετάδοση της φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας (PAR). Αλλά από την άλλη πλευρά έχουν την ικανότητα να διατηρούν την θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου καλύτερα από τα συμβατά υλικά κάλυψης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι ενδεδειγμένη η χρήση τους σε θερμοκήπια που εγκαθίστανται σε πιο ψυχρά κλίματα.

Τα νανοσωματίδια ευρωπαϊού που χρησιμοποιούνται ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίου έχουν την ικανότητα να εκπέμπουν την φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία και να απορροφούν την υπεριώδη ακτινοβολία. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα υλικά αυτά να επιδρούν θετικά στην απόδοση των καλλιεργειών. Πάρα το επιστημονικό ενδιαφέρον που υπάρχει για τα νανοσωματίδια του ευρωπαϊού, στην πράξη δεν χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω του υψηλού κόστους.

Τα νανοσωματίδια ρουμπινιού θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίου διότι το ρουμπίνι παρουσιάζει πολύ καλή διαπερατότητα στο φως, ειδικά στο ορατό φάσμα και αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες. Παρόλα αυτά όμως η χρήση τους στην πράξη δεν έχει ευρεία εφαρμογή λόγω του υψηλού κόστους και της περιορισμένης διαθεσιμότητας. Η χρήση

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

των νανοσωματιδίων ρουμπινιού αρκείται μόνο σε πειραματικό στάδιο και μάλιστα απαιτείται και περεταίρω έρευνα για να εξαχθούν καλύτερα συμπεράσματα.

Οι μεμβράνες φθοροπολυμερούς μετατροπής με επικάλυψη νανοσωματιδίων χρυσού θα μπορούσε να είναι μια ελκυστική επιλογή για θερμοκήπια που εγκαθίστανται σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη (περιοχές που έχουν πολύ κρύο) λόγω του γεγονότος ότι τα νανοσωματίδια χρυσού έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν εν μέρει την ενέργεια στην πράσινη περιοχή του φάσματος σε θερμότητα. Παρόλα αυτά όμως η χρήση τους περιορίζεται σε πειραματικά θερμοκήπια λόγω του γεγονότος ότι έχουν υψηλό κόστος σε συνδυασμό με την ανάγκη που υπάρχει για περεταίρω έρευνα.

Η χρήση του έξυπνου γυαλιού (SG) ως υλικό κάλυψης θερμοκηπίου μπορεί να αποτελέσει μια πολύ καλή επιλογή διότι έχει την ικανότητα να μπλοκάρει την υπεριώδη ακτινοβολία αλλά και ένα σημαντικό ποσοστό της PAR, κυρίως στην περιοχή του κόκκινου φωτός του φάσματος, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στη μειωμένη κατανάλωση νερού, θρεπτικών συστατικών και ενέργειας. Οι μειώσεις στην PAR στα φυτά που καλλιεργήθηκαν με SG μειώνουν τη φωτοσύνθεση στα φύλλα αυτών των φυτών με αποτέλεσμα να παρατηρείται μείωση της απόδοσης χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα των καρπών. Επίσης η χρήση του SG είναι πιθανό να έχει διαφορετικές επιδράσεις ανάλογα με την καλλιέργεια. Για τους λόγους αυτούς είναι απαραίτητες επιπλέον έρευνες του έξυπνου γυαλιού SG με διαφορετικούς τύπους καλλιεργειών και κυρίως σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού έτσι ώστε να εντοπιστούν τα καταλληλότερα χαρακτηριστικά του SG.

Το γραφένιο και το φουλερένιο είναι δύο καινοτόμα υλικά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Όσον αφορά το γραφένιο παρόλο που παρέχει καλύτερα ηλεκτρικά και οπτικά χαρακτηριστικά, η περαιτέρω σύνθεση του εξακολουθεί να παραμένει δύσκολη. Το γεγονός αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα να είναι πολύ δύσκολο να παραχθούν υλικά με βάση το γραφένιο. Από την άλλη πλευρά το φουλερένιο είναι ένα υλικό που μπορεί να κατασκευαστεί χωρίς περιορισμούς και σε σχετικά μικρό κόστος. Το φουλερένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα φωτοβολταϊκά υλικά που με την σειρά τους χρησιμοποιούνται ως έξυπνα καλύμματα θερμοκηπίων. Παρά τα ελπιδοφόρα αποτελέσματα, ελάχιστη πρόοδος έχει σημειωθεί

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

στην εμπορευματοποίηση αυτών των καινοτομιών με αποτέλεσμα να μην έχουν τεθεί ακόμη σε πρακτική εφαρμογή.

Σύμφωνα με τις έρευνες που έχουν διεξαχθεί μέχρι σήμερα είναι πολύ σημαντικό να υπάρξει μια πιο προσεχτική διαχείριση των νέων υλικών κάλυψης θερμοκηπίων με στόχο την όσο τον δυνατόν μικρότερη αρνητική επίπτωση στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Έτσι λοιπόν τα νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον και έχουν προοπτικές περαιτέρω εξέλιξης και ανάπτυξης, έτσι ώστε να μπορεί να υλοποιηθεί μια περαιτέρω εμβάθυνση στην κατανόηση σχετικά με τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των φυτών και του περιβάλλοντός τους και να εντοπιστούν πιο αποτελεσματικοί τρόποι ενσωμάτωσης αυτών των υλικών κάλυψης στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις.

Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

Μαυρογιαννόπουλος, Γ. (2001). Θερμοκήπια. Έκδοση Γ. Αθήνα.

Μαυρογιαννόπουλος, Γ. (2005). Θερμοκήπια. Εκδόσεις: Σταμούλη Α.Ε. Αθήνα.

Σάββας, Δ. (2020). Γενική Ανθοκομία. Εκδόσεις: Πεδίο. Αθήνα.

Stanghellini, C., Ooster, B. και Heuvelink, E., (2019). Θερμοκήπια: Τεχνολογίες για Βέλτιστη Παραγωγή. Επιστημονική επιμέλεια: Νικόλαος Κατσούλας. Εκδόσεις: Πεδίο. Αθήνα.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Abdel-Galil, H. S. (2014). Effect of covering material and shading on interior light intensity in poly-greenhouses. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 31(1), 327–340.

Ahamed, M. S., Guo, H., and Tanino, K. (2019). Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems engineering*, 178, 9-33.

Aira, J-R., Gallardo-Saavedra, S., Eugenio-Gozalbo, M., Alonso-Gómez, V., Muñoz-García, M-A., and Hernández-Callejo, L. (2021). Analysis of the viability of a photovoltaic greenhouse with semi-transparent amorphous silicon (a-Si) glas. *Agronomy*, 11 (2021), p. 1097.

Akula, R. and Ravishankar, G. A. (2011). Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. *Plant Signaling & Behavior*, 6(11), 1720–1731.

Allan, J.M., Mumin, M.A., Wood, J.A., Xu, W.Z., Wu, W., and Charpentier, P.A. (2014). Silica Aerogel–Poly (Ethylene-co-vinyl Acetate) Composite for Transparent Heat Retention Films. *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.* 52, 927–935.

Allardyce, C. S., Fankhauser, C., Zakeeruddin, S. M., Grätzel, M., and Dyson, P. J. (2017). The influence of greenhouse-integrated photovoltaics on crop production. *Solar Energy*, 155, 517–522.

Al-Mahdouri, A., M. Baneshi, M., Gonome, H., Okajima, J., and Maruyama, S. (2013). Evaluation of optical properties and thermal performances of different greenhouse covering materials. *Solar Energy*. Volume 96, Pages 21-32.

Anderson, H. C., Rogers, M. A., and Hoover, E. E. (2019). Low tunnel covering and microclimate, fruit yield, and quality in an organic strawberry production system. *HortTechnology*, 29(5), 590–598.

Arbeloa, F.L., Martínez, V.M., Arbeloa, T., and Arbeloa, I.L. (2007). Photoresponse and anisotropy of rhodamine dye intercalated in ordered clay layered films. *J Photochem Photobiol Photochem Rev.* 8:85–108.

Banal, J. L., Zhang, B., Jones, D. J., Ghiggino, K. P., and Wong, W. W. H. (2017). Emissive molecular aggregates and energy migration in luminescent solar concentrators. *Accounts of Chemical Research*, 50(1), 49–57.

Barichello, J., Vesce, L., Mariani, P., Leonardi, E., Braglia, R., Di Carlo, A., Canini, A., and Reale, A. (2021). Stable Semi-Transparent Dye-Sensitized Solar Modules and Panels for Greenhouse Application. *Energies*, 14, 6393.

Basile, B., Giaccone, M., Cirillo, C., Ritieni, A., Graziani, G., Shahak, Y., and Forlani, M. (2012). Photo-selective hail nets affect fruit size and quality in Hayward kiwifruit. *Scientia Horticulturae*, 141, 91–97.

Bellini, E. (2020). Global solar capacity may reach 1,448 GW in 2024. *PV Mag*.

Blanke, M. M. (2009). The structure of coloured hail nets affects light transmission, light spectrum, phytochrome and apple fruit colouration. *Acta Horticulturae*, 817, 177–184.

Briassoulis, D., Waayenberg, D., Gratraud, J., and von Elsner, B. (1997a). Mechanical properties of covering materials for greenhouses, part 1: General Overview. *J. Agric. Eng. Res.*, 67, pp. 81- 96.

Briassoulis, D., Waayenberg, D., Gratraud, J., and von Elsner, B. (1997b). Mechanical properties of covering materials for greenhouses, part 2: quality assessment. *J. Agric. Eng. Res.*, 67, pp. 171-217.

Castilla, N., van Kooten, O., Sase, S., Meneses, J.F., Schnitzler, W.H., and van Os, E. (2012). (Eds.) *XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on Greenhouse 2010 and Soilless Cultivation, ISHS Acta Horticulturae 927*; ISHS: Leuven, Belgium.

Chaurasia, A.R. (2020). Future Population Growth, 2015–2100. Population and Sustainable Development in India. Springer Link (2020), pp. 35-49.

Chavan, S. G., Maier, C., Alagoz, Y., Filipe, J. C., Warren, C. R., Lin, H., Jia, B., Loik, M. E., Cazzonelli, C. I., Chen, Z. H., Ghannoum, O., and Tissue, D. T. (2020). Light-limited photosynthesis under energy-saving film decreases eggplant yield. *Food and Energy Security*, 9(4), e245.

Chen, C., Kuang, Y., and Hu, L. (2019). Challenges and Opportunities for solar Evaporation. *Joule*, 3, pp. 683-718.

Chou, H.-T., Chen, Y.-C., Lee, C.-Y., Chang, H.-Y., and Tai, N.-H. (2017). Switchable Transparency of Dual-Controlled Smart Glass Prepared with Hydrogel-Containing Graphene Oxide for Energy Efficiency. *Solar Energ. Mater. Solar Cell* 166 (December 2016), 45–51.

Corrado, C., Leow, S.W., Osborn, M., Chan, E., Balaban, B., and Carter, S. A. (2013). Optimization of gain and energy conversion efficiency using front-facing photovoltaic cell luminescent solar concentrator design. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 111, pp. 74-81.

Cossu, M., Murgia, 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 (2014), pp. 89-100.

Critten, D.L., and Bailey, B.J. (2002). A review of greenhouse engineering developments during the 1990s. *Agricultural and Forest Meteorology*, 112 (2002), pp. 1-22, 10.1016/s0168-1923(02)00057-6. In press.

Cui, X., Ruan, Q., Zhuo, X., Xia, X., Hu, J., Fu, R., Li, Y., Wang, J., and Xu, H. (2023). Photothermal nanomaterials: a powerful light-to-heat converter. *Chem. Rev.*, 123, pp. 6891-6952.

De Wit, M., Galvão, V. C., and Fankhauser, C. (2016). Light-mediated hormonal regulation of plant growth and development. *Annual Review of Plant Biology*, 67(1), 513–537.

Díaz-Pérez, J. C. (2013). Bell pepper (*Capsicum annum* L.) crop as affected by shade level: Microenvironment, plant growth, leaf gas exchange, and leaf mineral nutrient concentration. *Hortscience*, 48(2), 175–182.

Diez, J., Orellana, F., Searles, P. S., and Acreche, M. M. (2023). Adequate supplemental irrigation amount during the critical period for yield in chia prevents reductions in radiation capture, radiation and water use efficiencies, and grain yield. *Irrigation Science*, 2023.

Dilara, P.A., and Briassoulis D. (1998). Standard testing methods for mechanical properties and degradation of low density polyethylene (LDPE) films used as greenhouse covering materials: a critical evaluation. *Polymer Testing*. Volume 17, Issue 8, Pages 549-585.

Dilara, P.A., and Briassoulis, D. (2000). Degradation and stabilization of low-density polyethylene films used as greenhouse covering materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76, pp. 309-321.

Dowling, E.N. (1993). *Mechanical Behaviour of Materials*. Prentice-Hall International Editions, Englewood Cliffs, NJ.

Elfadly, E., Abd El-Aal, H., Rizk, A., and Sobeih, W. (2016). Ambient UV manipulation in greenhouses: Plant responses and insect pest management in cucumber. *VIII International Symposium on Light in Horticulture*, 1134, 343–350.

Elmi, M., and Wang, J. (2023). Solar-thermal conversion in Envelope materials for energy savings. *Advanced Materials in Smart Building Skins for Sustainability*, Springer International Publishing, Cham, pp. 113-127.

Elmi, M., Zhang, E., Jahid, A., and Wang J. (2024). Operational energy savings in greenhouses by retrofitting covering plastics with photothermal antimony tin oxide nanocoating. *Journal of Cleaner Production*. Volume 483, 144242.

Emekli, N.Y., Büyüктаş, K., and Başçetinçelik, A. (2016). Changes of the Light Transmittance of the LDPE Films during the Service Life for Greenhouse Application. *J. Build. Eng.* 6, 126–132.

Emmott, C. J. M., Röhr, J. A., Campoy-Quiles, M., Kirchartz, T., Urbina, A., Ekins-Daukes, N. J., et al. (2015). Organic Photovoltaic Greenhouses: A Unique Application for Semi-transparent PV? *Energy Environ. Sci.* 8 (4), 1317–1328.

Emus-Medina, A., Contreras-Angulo, L. A., Ambriz-Perez, D. L., Vazquez-Olivo, G., and Heredia, J. B. (2023). UV light stress induces phenolic compounds in plants. In R. Lone, S. Khan, & A. M. Al-Sadi (Eds.), *Plant phenolics in abiotic stress management* (pp. 415–440). Springer.

Escrig Rondan, C. (2018). *Extrusion of Blown Film*; AIMPLAS Technological Institute of Plastics: Valencia, Spain.

Espejo, C., Arribas, A., Monzo, F., and Diez, P.P. (2012). Nanocomposite Films with Enhanced Radiometric Properties for Greenhouse Covering Applications. *J. Plast. Film Sheeting*, 28, 336–350.

Espí, E., Salmerón, A., Garcia, Y., and Catalina, F. (2002). Inference pigments as modifiers of the transmission spectrum of agricultural films. *Rev. Plásticos Mod.* 83, 50–56.

Ezzaeri, K., Fatnassi, H., Bouharroud, R., Gourdo, L., Bazgaou, A., Wifaya, A., Demrati, H., Bekkaoui, A., Aharoune, A., Poncet, C., and Bouirden L. (2018). The effect of photovoltaic panels on the microclimate and on the tomato production under photovoltaic canarian greenhouses. *Solar Energy*, 173 (2018), pp. 1126-1134.

Fatnassi, H., Poncet, Ch., Bazzano, M.M., Brun, R., and Bertin. N. (2015). A numerical simulation of the photovoltaic greenhouse microclimate. *Sol. Energy*, 120 (2015), pp. 575-584.

Friman-Peretz, M., Ozer, S., Geoola, F., Magadley, E., Yehia, I., Levi, A., Brikman, R., Gantz, S., Levy, A., Kacira, M., and Titels, M. (2020). Microclimate and crop performance in a tunnel greenhouse shaded by organic photovoltaic modules – comparison with conventional shaded and unshaded tunnels. *Biosyst Eng*, 197, pp. 12-31.

Friman-Peretz, M., Ozer, S., Levi, A., Magadley, E., Yehia, I., Geoola, F., Gantz, S., Brikman, R., Levy, A., Kacira, M., and Teitel, M. (2021). Energy partitioning and spatial variability of air temperature, VPD and radiation in a greenhouse tunnel shaded by semi-transparent organic PV modules. *Solar Energy*, 220 (2021), pp. 578-589.

Geoola, F., Kashti, T., and Peiper, U.M. (1998). A model greenhouse for testing the role of condensation, dust and dirt on the solar radiation transmissivity of greenhouse cladding materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71, pp. 339-346.

Ghalandari, M., Maleki, A., Haghighi, A., Safdari Shadloo, M., Alhuyi Nazari, M., and Tlili, I. (2020). Applications of Nanofluids Containing Carbon Nanotubes in Solar Energy Systems: A Review. *J. Mol. Liquids* 313, 113476.

Ghoulem, M., El Moueddeb, K., Nehdi, E., Boukhanouf, R., and Calautit, J. K. (2019). Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status. *Biosystems Engineering*, 183, 121-150.

Gibson, R.O. (1964). The Discovery of Polythene, The Royal Institute of Chemistry, Lecture Series 1964, Number 1 1 30.

Gioti, M., Laskarakis, A., and Logothetidis, S. (2004). IR–FUV ellipsometry studies on the optical, electronic and vibrational properties of polymeric membranes. *Thin Solid Films*, 455–456, pp. 283-287.

González Argandar, C. (2010). Agronomic Evaluation of Greenhouse Films Formulated with Zinc Oxide Nanoparticles. Ph.D. Thesis, Center for Research in Applied Chemistry, Saltillo, Mexico.

Gorjian, S., Calise, F., Kant, K., Ahamed, M.S., Copertaro, B., Najafi, G., Zhang, X., Aghaei, M., and Shamshiri, R.R. (2021). A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses. *J Clean Prod*, p. 124807.

Gorjian, S., Bousi, E., Özdemir, O.E., Trommsdorff, M., Kumar, N.M., Anand, A., Kant, K., and Chopra S.S. (2022). Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume, 112126.

Graf, R.T., Koenig, J.K., and Ishida. H. (1985). Optical constant determination of thin polymer films in the infrared. *Appl. Spectrosc.*, 39 (3), pp. 405-408.

Griffini, G. (2019). Host matrix materials for luminescent solar concentrators: Recent achievements and forthcoming challenges. *Frontiers in Materials*, 6, 29.

Gruenwald, G. (1992). *Plastics: How Structure Determines Properties*. Hanser Publishers, Munich.

Gudkov, S.V., Simakin, A.V., Bunkin, N.F., Shafeev, G.A., Astashev, M.E., Glinushkin, A.P., Grinberg, M.A., and Vodeneev, V.A. (2020). Development and application of photoconversion fluoropolymer films for greenhouses located at high or polar latitudes, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, Volume 213, 112056, ISSN 1011-1344.

Gugumus, F. (1979). Developments in the U.V.-Stabilization of polymers. In: *Developments in Polymer Stabilization-1* (Scott G ed), p 1. Applied Science Publishers, London.

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 (2018), pp. 377-388.

Hebert, D., Boonekamp, J., Parrish, C. H., Ramasamy, K., Makarov, N. S., Castañeda, C., Schuddebeurs, L., McDaniel, H., and Bergren, M. R. (2022). Luminescent quantum dot films improve light use efficiency and crop quality in greenhouse horticulture. *Frontiers in Chemistry*, 10, 988227.

Henninger, F. (1992). In Handbook of Polymer Degradation (Hamid, S. H., Amin, M. B., Maadhah, A. G. eds), pp 411}431. Marcel Dekker, New York.

Hirai, D., Okamoto, K., and Yamada. N. (2015). Fabrication of highly transparent concentrator photovoltaic module for efficient dual land use in middle DNI region. 2015 IEEE 42nd photovolt. Spec. Conf., IEEE, pp. 1-4.

Hogewoning, S. W., Wientjes, E., Douwstra, P., Trouwborst, G., Van Ieperen, W., Croce, R., and Harbinson, J. (2012). Photosynthetic quantum yield dynamics: From photosystems to leaves. *The Plant Cell*, 24(5), 1921–1935.

Horiguchi, I., Sugaya, H., and Tani. H. (1982). The measurement of longwave radiation properties upon plastic films used in greenhouses. *Jpn. J. Agric. Meteorol.*, 38 (1), pp. 9-14.

Hoxey, R. P., and Robertson A. P. (1993). Design developments in plastic greenhouses. *Plasticulture*. 97 (1), 3 – 16.

Ilić, Z. S., Milenković, L., Šunić, L., Barać, S., Mastilović, J., Kevrešan, Ž., and Fallik, E. (2017). Effect of shading by coloured nets on yield and fruit quality of sweet pepper. *Zemdirbyste-Agriculture*, 104(1), 53–62.

Indhu, A.R., Keerthana, L., and Dharmalingam, G. (2023). Plasmonic nanotechnology for photothermal applications – an evaluation. *Beilstein J. Nanotechnol*, 14, pp. 380-419.

Jagger, A. (2008). Polyethylene discovered by accident 75 years ago 11 July 2021.

Jones, M.P., Archodoulaki, V.-M., and Köck, B.-M. (2022). The Power of Good Decisions: Promoting Eco-Informed Design Attitudes in Plastic Selection and Use. *Resour. Conserv. Recycl.* 182, 106324.

Josuttis, M., Dietrich, H., Treutter, D., Will, F., Linnemannstöns, L., and Krüger, E. (2010). Solar UVB response of bioactives in strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch. L.): A comparison of protected and open-field cultivation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(24), 12692–12702.

Kang, J., Kim, D., Yoon, H.I., and Son, J.E. (2023). Growth, morphology, and photosynthetic activity of Chinese cabbage and lettuce grown under polyethylene and spectrum conversion films. *Hortic Environ Biotechnol.* 64:593–603.

Kang, S., Parrish, C. H., II, Hebert, D., and Zhen, S. (2024). Luminescent Quantum Dot Films Increase the Radiation Capture and Yield of Lettuce and Sweet Basil Compared to a Traditional/Neutral-density Greenhouse Glazing. *HortScience*, 59 (7), 988-996.

Kar, S., Sizochenko, N., Ahmed, L., Batista, V. S., and Leszczynski, J. (2016). Quantitative Structure-Property Relationship Model Leading to Virtual Screening of Fullerene Derivatives: Exploring Structural Attributes Critical for Photoconversion Efficiency of Polymer Solar Cell Acceptors. *Nano Energy* 26, 677–691.

Katsoulas, N., Bari, A., and Papaioannou, C. (2020). Plant responses to UV blocking greenhouse covering materials: A review. *Agronomy*, 10(7), 1021.

Kim, J-J., Kang, M., Kwak, O.K., Yoon, Y-Z., Min, K.S., and Chu, M-J. (2014). Fabrication and characterization of dye-sensitized solar cells for greenhouse application. *Int J Photoenergy*, 2014, pp. 1-7,

Klemchuk, P. P. (1985). Introduction to hindered amine stabilizers. In: *Polymer Stabilization and Degradation* (Klemchuk P. P.), pp 1–10. ACS, DC.

Kocięcka, J., Liberacki, D., and Stróżecki, M. (2023). The Role of Antitranspirants in Mitigating Drought Stress in Plants of the Grass Family (Poaceae)—A Review. *Sustainability* 2023, 15, 9165.

Korte, E., and Roseler, A. (2003). Infrared ellipsometric determination of the optical constants of polytetrafluoroethylene. *J. Molec. Struct.*, 661–662, pp. 579-585.

Kozai, T., Niu, G., and Takagaki, M. (2015). Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production, *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*.

Krishna, P., Pandey, G., Thomas, R., and Parks, S. (2023). Improving blueberry fruit nutritional quality through physiological and genetic interventions: A review of current research and future directions. *Antioxidants*, 12(4), 810.

Krizek, D. T., and Chalker-Scott, L. (2005). Ultraviolet radiation and terrestrial ecosystems. *Photochemistry and Photobiology*, 81(5), 1021.

Kumar, M., Hailot, D., and Gibout, S. (2022). Survey and evaluation of solar technologies for agricultural greenhouse application. *Solar Energy*, 232, 18–34.

Kurata, K. (1991). Scale-Model Experiments of Applying a Fresnel Prism to Greenhouse Covering. *Sol. Energy*, 46, 53–57.

Langhans, Robert., and Tibbitts T.W. (1997). Radiation. Plant growth chamber handbook, Iowa State University, Ames. In press.

Li, Y., Zhang, X., Zhang, Y., Dong, R., and Luscombe, C. K. (2019). Review on the role of polymers in luminescent solar concentrators. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 57(3), 201–215.

Li, P., Koziel, J.A., Zimmerman, J.J., Zhang, J., Cheng, T.-Y., Yim-Im, W., Jenks, W.S., Lee, M., Chen, B., and Hoff, S.J. (2021). Mitigation of Airborne PRRSV Transmission with UV Light Treatment: Proof-of-Concept. *Agriculture*, 11, 259.

Lin, L., Peng, H., and Liu, Z. (2019). Synthesis Challenges for Graphene Industry. *Nat. Mater.* 18 (6), 520–524.

Lin, T., Goldsworthy, M., Chavan, S., Liang, W., Maier, C., Ghannoum, O., Cazzonelli, C.I., Tissue, D.T., Lan, Y.C., Sethuvenkatraman, S., Lin, H., Jia, B., and Chen, Z.H. (2022). A novel cover material improves cooling energy and fertigation efficiency for glasshouse eggplant production, *Energy*, Volume 251, 123871, ISSN 0360-5442.

Liu, W., Liu, L., Guan, C., Zhang, F., Li, M., Lv, H., Yao, P., and Ingenhoff, J. (2018). A novel agricultural photovoltaic system based on solar spectrum separation. *Sol Energy*, 162 (2018), pp. 84-94.

Loik, M.E., Carter, S.A., Alers, G., Wade, C.E., Shugar, D., Corrado, C., Jokerst, D., and Kitayama, C. (2017). Wavelength-selective solar photovoltaic systems: powering greenhouses for plant growth at the food-energy-water nexus. *Earth's Future*, 5, pp. 1044-1053.

López-Marín, J., González, A., Pérez-Alfocea, F., Egea-Gilabert, C., and Fernández, J. A. (2013). Grafting is an efficient alternative to shading screens to alleviate thermal stress in greenhouse-grown sweet pepper. *Scientia Horticulturae*, 149, 39–46.

Makarov, N. S., Ramasamy, K., Jackson, A., Velarde, A., Castaneda, C., Archuleta, N., Hebert, D., Bergren, M. R., and McDaniel, H. (2019). Fiber-coupled luminescent concentrators for medical diagnostics, agriculture, and telecommunications. *ACS Nano*, 13(8), 9112–9121.

Manja, K., and Aoun, M. (2019). The use of nets for tree fruit crops and their impact on the production: A review. *Scientia Horticulturae*, 246, 110–122.

Maraveas, C., Kotzabasaki, M. I., Bayer, I. S., and Bartzanas, T. (2023). Sustainable Greenhouse Covering Materials with Nano- and Micro-Particle Additives for Enhanced Radiometric and Thermal Properties and Performance. *AgriEngineering*, 5(3), 1347-1377.

Martínez Ramírez, J.N. (2008). Use of Different Plastic Covers in Greenhouse to Improve the Effects of Radiation, Temperature and Relative Humidity. Ph.D. Thesis, Center for Research in Applied Chemistry, Saltillo, Mexico.

Max, J.F., Schurr, U., Tantau, H.J., Mutwiwa, U.N., Hofmann, T., and Ulbrich, A. (2012). Greenhouse Cover Technology, *Horticultural Reviews*. John Wiley & Sons, Inc, 10.1002/9781118351871.

Middleton, S., and McWaters, A. (2002). Hail netting of apple orchards—Australian experience. *Compact Fruit Tree*, 35 (2), 51–55.

Mika, A., Buler, Z., Wójcik, K., and Konopacka, D. (2019). Influence of the Plastic Cover on the Protection of Sweet Cherry Fruit Against Cracking, on the Microclimate under Cover and Fruit Quality. *Journal of Horticultural Research*, 27(2), 31–38.

Mills, N. J. (1993). *Plastics: Microstructure and Engineering Applications*, 2nd edn. Edward Arnold.

Miskin, C.K., Li, Y., Perna, A., Ellis, R.G., Grubbs, E.K., Bermel, P., and Agrawal, R. (2019). Sustainable co-production of food and solar power to relax land-use constraints. *Nat Sustain*, 2, pp. 972-980.

Mormile, P., Rippa, M., Graziani, G., and Ritieni, A. (2019). Use of greenhouse-covering films with tailored UV-B transmission dose for growing ‘medicines’ through plants: Rocket salad case. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(15), 6931–6936.

Mourtzikou, A., Sygkridou, D., Georgakopoulos, T., Katsagounos, G., and Stathatos, E. (2020). Semi-transparent dye-sensitized solar panels for energy autonomous greenhouses. *Int. J. Struct. Constr. Eng.*, 14, p. 10011098.

Narjesi, V., Fatahi Moghadam, J., and Ghasemi-Soloklui, A. A. (2023). Effects of photo-selective shade net color and shading percentage on reducing sunburn and increasing the quantity and quality of pomegranate fruit [Special issue]. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 10, 25–38.

Nijssens, J., Deltour, J., Nisen, A., and Coutisse, S. (1984). Radiometric and Thermal Properties of Plastic Materials. In *Proceedings of the II International Symposium on Plastics in Mediterranean Countries*, ISHS Acta Horticulturae 154, Hammamet, Tunisia, 20–25. pp. 33–42.

Nijsskens, J., Albrecht, E., and Grataud, J. (1990). Comparative studies on the aging of polyethylene film in the laboratory and in practical use. *Plasticulture*, 87, pp. 11-20, 23-33

Ordaz Baldera, J.F. (2007). *Study on Plastic Films for Greenhouses*. Ph.D. Thesis, Center for Research in Applied Chemistry, Saltillo, Mexico.

Pandey, G., Parkw, S., and Thomas, R.G. (2023). Polymer and photo-selective covers on plant and fruit development: A review. *Agronomy Journal*, 115, 3074–3091.

Papadakis, G. (1989). Experimental Analysis and Dynamic Simulation of the Greenhouse Microclimate. Ph.D. Thesis, Agricultural University of Athens, Athens, Greece, p. 166.

Papadakis, G., Frangoudakis, A., and Kyritsis, S. (1994). Experimental Investigation and Modelling of Heat and Mass Transfer between a Tomato Crop and the Greenhouse Environment. *J. Agric. Eng. Res.* 57, 217–227.

Papadakis, G., Briassoulis, D., Scarascia Mugnozza, G., Vox, G., Feuilleley, P., and Stoffers, J.A. (2000). Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. *J. Agric. Eng. Res.*, 77 (1), pp. 7-38.

Papakonstantinou, I., Portnoi, M., and Debije, M. G. (2021). The hidden potential of luminescent solar concentrators. *Advanced Energy Materials*, 11(3), 2002883.

Parrish, C.H., Hebert, D., Jackson, A., Ramasamy, K., McDaniel, H., Giacomelli, G.A., and Bergren, M.R. (2021). Optimizing spectral quality with quantum dots to enhance crop yield in controlled environments. *Commun Biol.* 4:124.

Pashkin, M. O., Yanykin, D. V., Popov, A. V., Pobedonostsev, R. V., Kazantseva, D. V., Dorokhov, A. S., Izmailov, A. Y., Vyatchinov, A. A., Orlovskaya, E. O., Shaidulin, A. T., Orlovskii, Y. V., Vodeneev, V. A., and Gudkov, S. V. (2023). Two Types of Europium-Based Photoconversion Covers for Greenhouse Farming with Different Effects on Plants. *Horticulturae*, 9 (7), 846.

Pashkin, M. O., Aiyyzhy, K. O., Pobedonostsev, R. V., Kazantseva, D. V., Rakov, I. I., Barmina, E. V., Yanykin, D. V., and Gudkov, S. V. (2024). Ruby Nanoparticles for Greenhouse Farming: Synthesis, Features and Application. *Journal of Composites Science*, 8 (1), 7.

Patel, R.M. *et al.* (1994). Investigation of processing-structure-properties relationships in polyethylene blown films. *Polym. Eng. Sci.*, 34, pp. 1506-1514.

Pearce, J. M. (2021). Parametric open source cold-frame agrivoltaic systems. *Inventions*, 6(4), 71.

Pinheiro, R. R., Pinheiro, M. V. M., Thiesen, L. A., Diel, M. I., dos Santos, J., Caron, B. O., and Schmidt, D. (2020). The use of photosensitive nets affects the leaf characteristics of lettuce cultivars. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 26(4), 777–786.

Portnoi, M., Macdonald, T. J., Sol, C., Robbins, T. S., Li, T., Schläfer, J., Guldin, S., Parkin, I. P., and Papakonstantinou, I. (2020). All-silicone-based Distributed Bragg Reflectors for efficient flexible luminescent solar concentrators. *Nano Energy*, 70, 104507.

Powell, P.C. (1977). The selection and use of thermoplastics. *Engineering Design Guides*, 19, pp. 1-25.

Proksch, G. (2017). *Creating Urban Agricultural Systems*. Routledge.

Qaderi, M. M., Martel, A. B., and Strugnelli, C. A. (2023). Environmental factors regulate plant secondary metabolites. *Plants*, 12(3), 447.

Ouzounis, T., Heuvelink, E., Ji, Y., Schouten, H. J., Visser, R. G. F., and Marcelis, L. F. M. (2016). Blue and red LED lighting effects on plant biomass, stomatal conductance, and metabolite content in nine tomato genotypes. *Acta Horticulturae*, 1134, 251–258.

Ravishankar, E., Booth, R.E., Saravitz, C., Sederoff, H., Ade, H.W., and O'Connor, B.T.(2020). Achieving Net Zero Energy Greenhouses by Integrating Semitransparent Organic Solar Cells. *Joule*, 4, 490–506.

Rubin, M. (1982). Infrared properties of polyethylene terephthalate films. *Sol. Energy Mater.*, 6, pp. 375-380.

Ruiz, P., Sanders, B., Vulic, I., and Zenner, J. (2004). Ultraviolet stabilization of greenhouse films, experience of an additive supplier. In *Proceedings of the V Ibero-American Congress for the Development and Application of Plastics in Agriculture (CIDAPA 2004)*, Bogotá, Colombia, 8–10, pp. 55–62.

Sabir, N., and Singh, B. (2013). Protected cultivation of vegetables in global arena: A review *Indian J. Agr. Sci.* 83 123 135.

Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση στο κλίμα και στην παραγωγή»

Saeidi, S., Rezaei, B., Irannejad, N., and Ensafi, A. A. (2020). Efficiency Improvement of Luminescent Solar Concentrators Using Upconversion Nitrogen-Doped Graphene Quantum Dots. *J. Power Sourc.* 476 (January), 228647.

Scarascia-Mungozza G., Vox G., and Stefani, L. (2000). Effect of the pesticides on the degradation of Eva plastic films for greenhouse covering. *Plasticulture 2000: Proceedings of 15th International. Agricultural. Plastics Congress, Pennsylvania.*

Schettini, E., De Salvador, F. R., Scarascia Mugnozza, G., and Vox, G. (2011). Evaluation of coloured nets in peach protected cultivation. *Acta Horticulturae*, 893, 235–242.

Shachar, R., Stelman, R., Effrat, B., Ashkenazi, Y., and Lelli, N. (1997). Experiments with HALS stabilized LDPE agrifilms in rose greenhouses. *CIPA Proceeding*, p. 673–83.

Shahak, Y., Gussakovsky, E. E., Gal, E., and Ganelevin, R. (2004). ColorNets: Crop protection and light-quality manipulation in one technology. In D. J. Cantliffe & N. L. Shaw (Eds.), *VII international symposium on protected cultivation in mild winter climates: Production, pest management and global competition* (Vol. 659, pp. 143–151). International Society for Horticultural Science.

Shahak, Y., Gal, E., Offir, Y., and Ben-Yakir, D. (2008). Photosensitive shade netting integrated with greenhouse technologies for improved performance of vegetable and ornamental crops. In C. Kubota & M. Kacira (Eds.), *International workshop on greenhouse environmental control and crop production in semi-arid regions* (Vol. 797, pp. 75–80). International Society for Horticultural Science.

Shahak, Y. (2012). Photosensitive netting: An overview of the concept, research and development and practical implementation in agriculture. *Acta Horticulturae*, 1015, 155–162.

Shen, L., Lou, R., Park, Y., Guo, Y., Stallknecht, E.J., Xiao, Y., Rieder, D., Yang, R., Runkle, E.S., and Yin, X. (2021). Increasing greenhouse production by spectral-shifting and unidirectional light-extracting photonics. *Nat Food*. 2:434–441.

Shen, L., and Yin, X. (2022). Solar spectral management for natural photosynthesis: From photonics designs to potential applications. *Nano Convergence*, 9(1), 36.

Shi, H., Xia, R., Zhang, G., Yip, H-L., and Cao.Y. (2019). Spectral engineering of semitransparent polymer solar cells for greenhouse applications. *Adv Energy Mater*, 9 , p. 1803438.

Silva, A.M., Miguel, A., and Rosa, R. (1991). Thermal Radiation inside a Single Span Greenhouse with a Thermal Screen. *J. Agric. Eng. Res.* 49, 285–298.

Sultana, P. R., and Benedicto, L. (2017). Effects of light-diffusing plastic film on lettuce production and quality attributes. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 15(1), 23.

Tafoya, F. A., Juárez, M. G. Y., Orona, C. A. L., López, R. M., Alcaraz, T. D. J. V., and Valdés, T. D. (2018). Sunlight transmitted by colored shade nets on photosynthesis and yield of cucumber. *Ciência Rural*, 48(9), 2018.

Tani, A., Shina, S., Nakashima, K., and Hayashi. M. (2014). Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels. *J. Agric Meteorol*, 70, pp. 139-149.

Teitel, M., Grimberg, R., Ozer, S., Vitoshkin, H., Yehia, I., Magadley, E., Levi, A., Ziffer, E., Gantz, S., and Levy, A. (2023). Effects of organic photovoltaic modules installed inside greenhouses on microclimate and plants. *Biosystems Engineering*. Volume 232, August 2023, Pages 81-96.

Tezuka, T., Hotta, T., and Watanabe, I. (1993). Growth promotion of tomato and radish plants by solar UV radiation reaching the Earth's surface. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 19(1), 61–66.

Thompson, B. C., and Fréchet, J. M. J. (2008). Polymer-Fullerene Composite Solar Cells. *Angew. Chem. Int. Ed.* 47 (1), 58–77.

Thompson, E.P., Bombelli, E.L., Shubham, S., Watson, H., Everard, A., D'Ardes, V., Schievano, A., Bocchi, S., Zand, N., C. Howe, C.J., and Bombelli.P. (2020). Tinted semi-transparent solar panels allow concurrent production of crops and electricity on the same cropland. *Adv Energy Mater*, 10, p. 2001189.

Tong, X., Zhang, X., Fensholt, R., Dau Jensen, P. R., Li, S., Larsen, M.N., Reiner, F., Tian, F., and Brandt, M. (2024). Global area boom for greenhouse cultivation revealed by satellite mapping. *Nat Food* 5, 513–523.

Tsormpatsidis, E., Henbest, R. G. C., Davis, F. J., Battey, N. H., Hadley, P., and Wagstaffe, A. (2008). UV irradiance as a major influence on growth, development and secondary products of commercial importance in Lollo Rosso lettuce ‘Revolution’ grown under polyethylene films. *Environmental and Experimental Botany*, 63(1–3), 232–239.

Ureña-Sánchez, R., Callejón-Ferre, A.J., Pérez-Alonso, J., and Carreño-Ortega, A. (2012). Greenhouse tomato production with electricity generation by roof-mounted flexible solar panels. *Sci. Agricola*, 69 (4) (2012), pp. 233-239.

Van Dijk, M., Morley, T., Rau, M.L. and Saghai, Y. (2021). A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010 2050. *Nature Food*, 2, p.p. 494–501. doi: doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9.

Victoria, G.N., Kempkes, F.L.K., VanWeel, P., Stanghellini, C., Dueck, T.A. and Bruins, M. (2012). Effect of a diffuse glass greenhouse cover on rose production and quality *Acta Hort.* 952 241 248 <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.952.29>.

Vishu, S. (1984). *Handbook of Plastics Testing Technology*. Wiley, New York.

Waaijenbergh, D. (1985). Research on plastic greenhouse cladding materials. In *Greenhouse Construction and Covering Materials*, Vol. 170, ed. J. Meyer. *Acta Horticulturae*, pp. 103–111.

Waller, R., Kacira, M., Magadley, E., Teitel, M., and Yehia, I. (2021). Semi-transparent organic photovoltaics applied as greenhouse shade for spring and summer tomato production in arid climate. *Agronomy*, 11 (2021), p. 1152.

Weber, W.H., and Lambe, J. (1976). Luminescent greenhouse collector for solar radiation. *Applied Optics*, 15 (10), 2299–2300.

Wiesenfarth, M., Philipps, S.P., Bett, A.W., Horowitz, K., and Kurtz, S. (2017). Current status of concentrator photovoltaic (CPV) technology.

Willockx, B., Uytterhaegen, B., Ronsijn, B., Herteleer, B., and Cappelle, J. (2020). A standardized classification and performance indicators of agrivoltaic systems. *EU PVSEC*, vol. 2020, pp. 1-4

Wong, C. E., Teo, Z. W. N., Shen, L., and Yu, H. (2020). Seeing the lights for leafy greens in indoor vertical farming. *Trends in Food Science & Technology*, 106, 48–63.

Wylin, F. (2009). Antifogging additives. *Plast. Addit. Handb.* (sixth ed.), Hanser Publications, p. 609.

Yao, X., Liu, X., Xu, Z., and Jiao, X. (2017). Effects of light intensity on leaf microstructure and growth of rape seedlings cultivated under a combination of red and blue LEDs. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(1), 97–105.

Yoon, Y.-E., Kuppusamy, S., Cho, K. M., Kim, P. J., Kwack, Y.-B., Lee, and Y. B. (2017). Influence of cold stress on contents of soluble sugars, vitamin C and free amino acids including gamma-aminobutyric acid (GABA) in spinach (*Spinacia oleracea*). *Food Chemistry*, 215, 185–192.

Zhan, W., and Jiang, K. (2008). A Modular Photocurrent Generation System Based on Phospholipid-Assembled Fullerenes. *Langmuir* 24 (23), 13258–13261.

Zhang, Y.P., and Ge, X. (1995). A new method for determination of the optical constants and thermal radiation properties of semi-transparent films. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 37 (3–4), pp. 379-387.

Zhang, X., Wei, J., Xu, Z., Wang, Y., and Wu, L. (2019). Effects of NaCl on growth and photosynthesis of semi-dwarf blueberry bushes. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 34(5), 534–543.

Zhao, P., Zhang, X., Gong, Y., Wang, D., Xu, D., Wang, N., Sun, Y., Gao, L., Liu, S.-S., and Deng, X. W. (2021). Red-light is an environmental effector for mutualism between begomovirus and its vector whitefly. *PLoS Pathogens*, 17(1), e1008770.

Ιστοσελίδες

Ιστότοπος 1: Press Release.(2019). Cuesta Roble releases 2019 global greenhouse statistics.

<https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/cms/asset/e76733cb-e7ff-4934-83b7-9eb1583144dd/agj221442-fig-0005-m.jpg>.

<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1364032122000545-gr8.jpg>.

<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1364032122000545-gr15.jpg>

<https://ekadem.gr>

<https://geotechnology.gr>

<https://lleaf.com>

<https://www.ot.gr>

<https://pipe.technoluxpro.com>

<https://reddit.com>

<https://www.ypaithros.gr>

*Χριστόπουλος Νικόλαος: «Νέα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων. Επίδραση
στο κλίμα και στην παραγωγή»*

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα: Χριστόπουλος Νικόλαος

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.