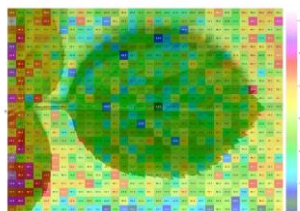


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
Σχολή Γεωπονικών Επιστημών
Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού
Περιβάλλοντος
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΚΑΙ
ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΘΟΚΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΤΟΠΙΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**«Επίδραση της ποιότητας του φωτός στην ανίχνευση
θερμοκρασιακών διαφορών σε φύλλα ανθοκομικών φυτών με
τη χρήση IR αισθητήρων»**



Βόλος, 2024

Μουσαϊλίδου Μαρία

**«Επίδραση της ποιότητας του φωτός στην ανίχνευση
θερμοκρασιακών διαφορών σε φύλλα ανθοκομικών φυτών με
τη χρήση IR αισθητήρων»**

Μουσαϊλίδου Μαρία

Τριμελής Επιτροπή

Λύκας Χρήστος (Επιβλέπων): Αναπληρωτής Καθηγητής (Ανθοκομία), Τμήμα
Φυτικής Παραγωγής Και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Π.Θ

Βαγγέλας Ιωάννη: Επίκουρος Καθηγητής (Φυτοπαθολογία),
Τμήμα Φυτικής Παραγωγής Και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Π.Θ

Λεβίζου Ευθυμία: Αναπληρώτρια Καθηγήτρια (Φυσιολογία Φυτών),
Τμήμα Φυτικής Παραγωγής Και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Π.Θ

Copyright © Μουσαιλίδου Μαρία, 2024

.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διατριβής, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης.

Η έγκριση της Μεταπτυχιακής Διατριβής Ειδίκευσης από το Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δε δηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα.

Περίληψη

Η καταγραφή της θερμοκρασίας (θερμογραφία), χρησιμοποιώντας τεχνικές βασιζόμενες στην υπέρυθρη απεικόνιση, είναι κομβικής σημασίας στον εντοπισμό καταπονημένων φυτών από βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες. Αυτό καθώς τα δεδομένα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν για την πρόληψη και την καταπολέμηση βλαβερών παραγόντων, υπεύθυνων για τη μείωση της αγροτικής παραγωγής. Έρευνες έχουν δείξει ότι, οι θερμοκρασιακές αλλαγές φυτικών οργάνων σχετίζονται με προσβολές από φυτοπαθογόνους οργανισμούς αλλά και των συνθηκών του (μικρο-)περιβάλλοντος, όπως η υγρασία και ο φωτισμός. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιείται ένα πρότυπο σύστημα θερμοκρασιακής καταγραφής, το οποίο βασίζεται κυρίως σε IR αισθητήρες σε επιφάνειες φύλλων τριαντάφυλλου. Μετρήθηκαν φύλλα τριανταφυλλιάς σε τεχνητό και φυσικό φωτισμό και στο σκοτάδι. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι: (α) το ολοκληρωμένο σύστημα απεικόνισης υπέρυθρων και RGB που αναπτύχθηκε σε αυτή την εργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιτυχή καταγραφή θερμοκρασίας και (β) υπό τις συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες, η ύπαρξη τεχνητού και φυσικού φωτισμού σε σχέση με το απόλυτο σκοτάδι δεν επηρεάζουν την φυλλική επιφανειακή θερμοκρασία.

Λέξεις κλειδιά: Θερμογραφία, σύστημα απεικόνισης, τριανταφυλλιά

Abstract

Temperature recording (thermography), which employs infrared imaging techniques, is critical for identifying plants that are stressed by biotic and abiotic factors. It can be used to prevent and cope with harmful factors that reduce agricultural production. According to studies, temperature changes in plant organs are linked to phytopathogenic organism attacks as well as (micro)environmental conditions such as humidity and lighting. In this study, a standard temperature recording system is used, which is primarily based on infrared sensors on rose leaf surfaces. Rose leaves were measured under both artificial and natural light, as well as in complete darkness. The results show that: (a) the integrated infrared and RGB imaging system developed in this study can be used to successfully record temperature; and (b) under the specific experimental conditions, the presence of artificial and natural light relative to absolute darkness has no effect on leaf surface temperature.

Keywords: Thermography, recording system, rose plant

Εγώ, η Μουσαιλίδου Μαρία, είμαι ο συγγραφέας αυτής της Μ.Δ.Ε. Αυτή η Μ.Δ.Ε. αντικατοπτρίζει την έρευνα που έγινε από εμένα και δεν έχει υποβληθεί (εξ ολοκλήρου ή μέρος της) σαν προπτυχιακή διατριβή ή Μ.Δ.Ε. ή ως μέρος Διδακτορικής Διατριβής σε αυτό ή άλλο Προπτυχιακό ή Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Ιδρυμάτων Τριτοβάθμιας Εκπαίδευσης του εσωτερικού ή εξωτερικού. Όποια συνεργασία καθώς και το μέγεθος αυτής δηλώνονται επακριβώς στο αντίστοιχο πεδίο αυτής της διατριβής. Επίσης έχω διαβάσει όλες τις βιβλιογραφικές αναφορές που παρατίθενται στο τέλος.

Ως επιβλέπων της έρευνας που περιγράφεται σε αυτή τη διατριβή, δηλώνω ότι όλοι οι όροι του Εσωτερικού Κανονισμού του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος έχουν τηρηθεί από τον/την κο/κα (ονοματεπώνυμο μεταπτυχιακού φοιτητή).

Υπογραφή καθηγητή

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Λύκα, για την επίβλεψη και τον συντονισμό της παρούσας πτυχιακή εργασία, καθώς επίσης και τον επιστημονικό συνεργάτη Παπαδήμο Αθανάσιο για την συμβολή του στην πειραματική διαδικασία. Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στα μέλη της τριμελούς επιτροπής και ιδιαίτερα τον κ. Βαγγέλα Ιωάννη, για τις συμβουλές στους και την συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή.

Τέλος , το μεγαλύτερο ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ το οφείλω στον συνοδοιπόρο της ζωής μου και φυσικά αναφέρομαι στον σύζυγο μου Τεκέδη Ιωάννη, που στέκεται αγέρωχος βράχος δίπλα τόσο στα δύσκολα όσο και στα εύκολα.

Σας ευχαριστώ από καρδιάς.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	III
Abstract	IV
Ευχαριστίες.....	VII
1. Εισαγωγή	1
1.1 Φωτισμός και φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών	5
1.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά των πηγών φωτισμού	9
1.3 Λειτουργία υπέρυθρων (IR) αισθητήρων	13
1.4 Η επίδραση της πηγής ακτινοβολίας στη μέτρηση με υπέρυθρων (IR) αισθητήρων ..	14
1.5 Η επίδραση της πηγής ακτινοβολίας στην αύξηση θερμοκρασίας του φύλλου	16
1.6 Άλλοι Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία των φύλλων	18
1.7 Βοτανικά χαρακτηριστικά του φυτού της τριανταφυλλιάς	19
1.8 Αρχές μεταφοράς θερμότητας σε φύλλα φυτών.....	21
1.9 Συγκριτική ανάλυση διαφορετικών τεχνολογιών αισθητήρων υπέρυθρων	24
1.10 Θεωρητικά μοντέλα δυναμικής θερμότητας σε φύλλα φυτών	27
2. Υλικά και Μέθοδοι	34
2.1 Σύστημα θερμομέτρησης με κάμερα τύπου Infrared	34
2.2 Λογισμικό της κάμερας τύπου RGB και Infrared	35
2.3 Τριγωνομετρικές συναρτήσεις για τη συνδυαστική λειτουργία των 2 τύπου κάμερας (RGB και Infrared).....	36
2.4 Σχεδιασμός της σταθερής βάσης προσαρμογής του συστήματος φωτογράφισης.....	38
2.5 Ρύθμιση και βαθμονόμηση καμερών τύπου RGB και Infrared	39
2.6 Θερμομέτρηση φύλλων με τις κάμερες RGB και Infrared	40
3. Αποτελέσματα - Συζήτηση.....	43
3.1 Πειραματικά αποτελέσματα των θερμομετρήσεων στο Εργαστήριο	43
3.2 Πειραματικά αποτελέσματα των θερμομετρήσεων με Τεχνητό Φωτισμό	46
3.3 Πειραματικά αποτελέσματα των θερμομετρήσεων στο Θερμοκήπιο	51
3.4 Σύγκριση μετρήσεων σε εργαστηρίου και θερμοκηπίου	54
4. Συμπεράσματα	56
5. Βιβλιογραφία.....	58

1. Εισαγωγή

Ο τεχνητός φωτισμός παίζει καθοριστικό ρόλο στη σύγχρονη γεωργία, επιτρέποντας ελεγχόμενα περιβάλλοντα όπου τα φυτά μπορούν να καλλιεργούνται όλο το χρόνο, ανεξάρτητα από τη διαθεσιμότητα φυσικού ηλιακού φωτός. Από την έναρξή του, η χρήση του τεχνητού φωτισμού έχει εξελιχθεί σημαντικά. Αρχικά, χρησιμοποιούνταν απλοί λαμπτήρες πυρακτώσεως, οι οποίοι, ενώ παρείχαν φως, ήταν αναποτελεσματικοί και παρήγαγαν πολλή θερμότητα. Η ανάπτυξη των λαμπτήρων φθορισμού στα μέσα του 20ου αιώνα σημείωσε σημαντική βελτίωση, προσφέροντας καλύτερη ποιότητα φωτός και ενεργειακή απόδοση. Πιο πρόσφατα, οι εξελίξεις στην τεχνολογία LED έφεραν επανάσταση στον τομέα, παρέχοντας προσαρμόσιμα φάσματα φωτός και ανώτερη ενεργειακή απόδοση.

Στη γεωργία χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι τεχνητού φωτισμού, ο καθένας με τις μοναδικές του ιδιότητες και την καταλληλότητά του για διάφορες εφαρμογές. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, η παλαιότερη μορφή τεχνητού φωτισμού που χρησιμοποιείται στην γεωργία, είναι φθηνοί αλλά αναποτελεσματικοί, μετατρέποντας ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας σε θερμότητα και όχι σε φως. Αυτή η θερμότητα μπορεί να επηρεάσει τη θερμοκρασία των φυτών, αυξάνοντας συχνά τη θερμοκρασία των φύλλων σημαντικά. Οι λαμπτήρες φθορισμού είναι πιο ενεργειακά αποδοτικοί από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως και παράγουν λιγότερη θερμότητα, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται συνήθως για την καλλιέργεια δενδρυλλίων και φυτών εσωτερικού χώρου. Οι λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής έντασης (HID), συμπεριλαμβανομένων των λαμπτήρων αλογονιδίου μετάλλου (MH) και νατρίου υψηλής πίεσης (HPS), είναι πολύ ισχυροί και χρησιμοποιούνται σε εμπορικές εργασίες θερμοκηπίου. Παράγουν σημαντικές ποσότητες φωτός και θερμότητας, επηρεάζοντας τη θερμοκρασία και την ανάπτυξη των φυτών. Ο πιο πρόσφατος και πιο αποτελεσματικός τύπος τεχνητού φωτισμού είναι η δίοδος εκπομπής φωτός (LED – Light-Emitting Diode), που μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να εκπέμπει συγκεκριμένα μήκη κύματος φωτός, βελτιστοποιώντας την ανάπτυξη των φυτών και ελαχιστοποιώντας την παραγωγή θερμότητας. Τα LED έχουν γίνει η προτιμώμενη επιλογή για πολλές εφαρμογές γεοτεχνολογίας λόγω της ενεργειακής απόδοσης και της ευελιξίας τους (Wubs et al., 2014).

Το φως είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την ανάπτυξη των φυτών, οδηγώντας τη φωτοσύνθεση, τη διαδικασία με την οποία τα φυτά μετατρέπουν την φωτεινή ενέργεια σε χημική ενέργεια. Η ποιότητα (μήκος κύματος), η ένταση και η διάρκεια του φωτός επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών. Ο τεχνητός φωτισμός πρέπει να μιμείται όσο το δυνατόν περισσότερο το φυσικό φως του ήλιου για να είναι αποτελεσματικός στην γεωργία. Η κατανόηση των αρχών του φωτός και της ανάπτυξης των φυτών είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων τεχνητού φωτισμού για την προώθηση της υγιούς ανάπτυξης των φυτών. Τα φυτά έχουν εξελιχθεί για να ανταποκρίνονται στους φυσικούς κύκλους φωτός του περιβάλλοντός τους, ένα φαινόμενο γνωστό ως φωτοπεριοδισμός, το οποίο αναφέρεται στην επίδραση της διάρκειας της ημέρας και της νύχτας στην ανάπτυξη των φυτών. Για παράδειγμα, ορισμένα φυτά χρειάζονται μεγάλες μέρες για να ανθίσουν, ενώ άλλα απαιτούν πιο σύντομες περιόδους. Τα συστήματα τεχνητού φωτισμού πρέπει να σχεδιάζονται για να αναπαράγουν αυτούς τους κύκλους φυσικού φωτός για να εξασφαλίσουν τη σωστή ανάπτυξη των φυτών (Wubs et al., 2014).

Το φάσμα του φωτός, ή το εύρος των εκπεμπόμενων μηκών κύματος, είναι ακόμη ένας κρίσιμος παράγοντας στην ανάπτυξη των φυτών. Τα διαφορετικά μήκη κύματος φωτός έχουν διάφορες επιπτώσεις στη φυσιολογία των φυτών. Για παράδειγμα, το μπλε φως προάγει τη βλαστική ανάπτυξη, ενώ το κόκκινο φως είναι πιο αποτελεσματικό για την ανθοφορία και την καρποφορία. Τα LED είναι ιδιαίτερα πλεονεκτικά επειδή μπορούν να κατασκευαστούν για να παρέχουν συγκεκριμένα φάσματα φωτός προσαρμοσμένα στις ανάγκες διαφορετικών φυτών. Ο τεχνητός φωτισμός επηρεάζει διάφορες πτυχές της φυσιολογίας των φυτών πέρα από τη φωτοσύνθεση. Μπορεί να επηρεάσει τη θερμοκρασία των φύλλων, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει τους ρυθμούς διαπνοής και τις συνολικές σχέσεις νερού των φυτών. Η θερμότητα που παράγεται από τα τεχνητά φώτα μπορεί να αυξήσει τις θερμοκρασίες των φύλλων, προκαλώντας δυνητικά θερμική καταπόνηση εάν δεν γίνει σωστή διαχείριση. Η κατανόηση αυτών των φυσιολογικών αποκρίσεων είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων φωτισμού για την εξασφάλιση υγιούς ανάπτυξης των φυτών (Rihn et al., 2014).

Η επιλογή του τεχνητού φωτισμού έχει επίσης οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί σημαντική ανησυχία, καθώς τα συστήματα φωτισμού μπορεί να είναι δαπανηρά όσον αφορά τη λειτουργία τους. Τα

LED, με την ανώτερη ενεργειακή τους απόδοση, προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση κόστους με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας έχει περιβαλλοντικά οφέλη, συμβάλλοντας σε πιο βιώσιμες πρακτικές ανθοκομίας. Ο τομέας του τεχνητού φωτισμού εξελίσσεται συνεχώς. Η συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη επικεντρώνεται στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας των συστημάτων φωτισμού. Καινοτομίες όπως ο έξυπνος φωτισμός, ο οποίος χρησιμοποιεί αισθητήρες και αυτοματισμούς για τη βελτιστοποίηση της παροχής φωτός και η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ανοίγουν το δρόμο για πιο βιώσιμες και παραγωγικές πρακτικές (Wubs et al., 2014).

Ο τεχνητός φωτισμός έχει μεταμορφώσει σε σημαντικό βαθμό τη βιομηχανία, επιτρέποντας την καλλιέργεια φυτών σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα. Με την κατανόηση του ιστορικού πλαισίου, των τύπων φωτισμού, των αρχών του φωτός και της ανάπτυξης των φυτών, του φωτοπεριοδισμού, της ποιότητας φωτός, των φυσιολογικών επιπτώσεων και των οικονομικών και περιβαλλοντικών εκτιμήσεων, μπορεί κανείς να εκτιμήσει την πολυπλοκότητα και τα οφέλη του τεχνητού φωτισμού. Αυτή η γνώση θέτει το έδαφος για τη διερεύνηση πιο συγκεκριμένων επιδράσεων, όπως η επίδραση του τεχνητού φωτισμού στη θερμοκρασία των φύλλων τριανταφυλλιάς, η οποία θα διερευνηθεί περαιτέρω σε επόμενα κεφάλαια.

Η διερεύνηση της επίδρασης του τεχνητού φωτισμού στη θερμοκρασία των φύλλων τριανταφυλλιάς απαιτεί μια βαθύτερη κατανόηση των βασικών αρχών της μεταφοράς θερμότητας και της φυσιολογίας των φυτών. Η μεταφορά θερμότητας στα φύλλα των φυτών γίνεται κυρίως μέσω αγωγιμότητας, μεταφοράς και ακτινοβολίας. Ο τεχνητός φωτισμός συμβάλλει σε αυτή τη διαδικασία εκπέμποντας τόσο φως όσο και θερμότητα, τα οποία μπορούν να απορροφηθούν από τα φύλλα του φυτού. Ο βαθμός στον οποίο ένα φύλλο απορροφά ή αντανακλά το φως και τη θερμότητα εξαρτάται από τις φυσικές και χημικές του ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της υφής της επιφάνειας των φύλλων, του χρώματος και της περιεκτικότητας σε νερό (Rihn et al., 2014).

Στην ανθοκομία, η διαχείριση της θερμοκρασίας των φύλλων είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της βέλτιστης υγείας και παραγωγικότητας των φυτών. Η υπερβολική θερμότητα από τον τεχνητό φωτισμό μπορεί να οδηγήσει σε θερμική καταπόνηση, επηρεάζοντας τη φωτοσύνθεση, την αναπνοή και την πρόσληψη νερού. Για τα τριαντάφυλλα, η διατήρηση της ιδανικής θερμοκρασίας των φύλλων είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επηρεάζει την ανάπτυξη των λουλουδιών, το χρώμα και

τη συνολική ευρωστία των φυτών. Χρησιμοποιούνται διάφορες στρατηγικές για τον μετριασμό των επιπτώσεων της θερμότητας του τεχνητού φωτισμού, όπως η χρήση ανεμιστήρων για βελτιωμένη κυκλοφορία του αέρα, η χρήση τεχνικών σκίασης και η επιλογή συστημάτων φωτισμού με χαμηλότερη απόδοση θερμότητας (Rihn et al., 2014).

Οι αισθητήρες υπέρυθρων (IR) είναι καθοριστικοί για την ακριβή και μη επεμβατική παρακολούθηση της θερμοκρασίας των φύλλων. Αυτοί οι αισθητήρες μετρούν την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα φύλλα των φυτών, παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για τη θερμοκρασία της επιφάνειας των φύλλων. Αυτές οι πληροφορίες είναι κρίσιμες για την προσαρμογή των περιβαλλοντικών ελέγχων και τη βελτιστοποίηση των συνθηκών φωτισμού για την πρόληψη της θερμικής καταπόνησης. Διατίθενται διάφοροι τύποι αισθητήρων υπέρυθρων, που κυμαίνονται από απλές συσκευές χειρός έως εξελιγμένα αυτοματοποιημένα συστήματα ενσωματωμένα με τεχνολογίες κλιματισμού. Κάθε τύπος προσφέρει διαφορετικούς βαθμούς ακρίβειας, ευαισθησίας και λειτουργικότητας, καθιστώντας απαραίτητη την επιλογή του σωστού αισθητήρα για συγκεκριμένες εφαρμογές ανθοκομίας και καλλιέργειας.

Η εφαρμογή των αισθητήρων υπέρυθρων στην ανθοκομία έχει επεκταθεί σημαντικά, λόγω της ανάγκης για ακριβή και αξιόπιστα δεδομένα για τις αλληλεπιδράσεις φυτού-περιβάλλοντος. Αυτοί οι αισθητήρες έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μελέτες για την αξιολόγηση του αντίκτυπου διαφορετικών συστημάτων φωτισμού στη θερμοκρασία, την ανάπτυξη και την ανάπτυξη των φυτών. Για παράδειγμα, έρευνες που συγκρίνουν τα αποτελέσματα του φωτισμού LED και HID στη θερμοκρασία των φύλλων τριανταφυλλιάς έχουν δείξει τα πλεονεκτήματα των LED στη μείωση του θερμικού φορτίου και στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Τέτοιες μελέτες υπογραμμίζουν τη σημασία της επιλογής των κατάλληλων τεχνολογιών φωτισμού και παρακολούθησης για τη βελτίωση της απόδοσης των εγκαταστάσεων και της αποδοτικότητας χρήσης των πόρων (Rihn et al., 2014).

Οι πρόοδοι στην τεχνολογία αισθητήρων και στην ανάλυση δεδομένων ενισχύουν περαιτέρω την ικανότητα να κατανοούνται και να ελέγχονται οι επιπτώσεις του τεχνητού φωτισμού στη θερμοκρασία των φυτών. Οι σύγχρονοι αισθητήρες υπέρυθρων μπορούν να ενσωματωθούν με ασύρματα δίκτυα και πλατφόρμες που βασίζονται σε cloud, επιτρέποντας συνεχή παρακολούθηση και ανάλυση δεδομένων. Αυτή η

ενοποίηση διευκολύνει τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο και τις αυτοματοποιημένες προσαρμογές στα συστήματα φωτισμού και ελέγχου του κλίματος, διασφαλίζοντας βέλτιστες συνθήκες καλλιέργειας. Επιπλέον, η χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για την ανάλυση δεδομένων αισθητήρων μπορεί να παρέχει πληροφορίες για πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις φυτού-περιβάλλοντος, οδηγώντας σε πιο εκλεπτυσμένες και αποτελεσματικές πρακτικές καλλιέργειας.

Τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη από τη βελτιστοποίηση του τεχνητού φωτισμού και του ελέγχου της θερμοκρασίας στην ανθοκομία είναι σημαντικά. Τα ενεργειακά αποδοτικά συστήματα φωτισμού, όπως τα LED, όχι μόνο μειώνουν το λειτουργικό κόστος αλλά και ελαχιστοποιούν το αποτύπωμα άνθρακα των λειτουργιών του θερμοκηπίου. Η αποτελεσματική διαχείριση της θερμοκρασίας συμβάλλει σε υψηλότερες αποδόσεις και ποιότητα των καλλιεργειών, κάτι που μεταφράζεται σε καλύτερη αγοραία αξία και κερδοφορία. Επιπλέον, οι βιώσιμες πρακτικές υποστηρίζουν ευρύτερους περιβαλλοντικούς στόχους, όπως η διατήρηση των φυσικών πόρων και η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Rihn et al., 2014).

Οι μελλοντικές τάσεις στον τεχνητό φωτισμό και τη διαχείριση της θερμοκρασίας στην ανθοκομική είναι πιθανό να επικεντρωθούν στην περαιτέρω βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, της ακρίβειας και της βιωσιμότητας. Καινοτομίες όπως τα ρυθμιζόμενα LED, τα οποία μπορούν να προσαρμόσουν τα φάσματα φωτός ανάλογα με τις ανάγκες των φυτών και τα προηγμένα δίκτυα αισθητήρων για ολοκληρωμένη περιβαλλοντική παρακολούθηση, αναμένεται να οδηγήσουν την επόμενη γενιά τεχνολογιών ανθοκομίας. Αυτές οι εξελίξεις θα επιτρέψουν στους καλλιεργητές να δημιουργήσουν εξαιρετικά ελεγχόμενα περιβάλλοντα που μεγιστοποιούν την υγεία και την παραγωγικότητα των φυτών, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τη χρήση των πόρων και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Rihn et al., 2014).

1.1 Φωτισμός και φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών

Το φως παίζει καθοριστικό ρόλο στη φυσιολογία των φυτών παρέχοντας την ενέργεια που απαιτείται για τη φωτοσύνθεση, τη διαδικασία μέσω της οποίας τα φυτά μετατρέπουν το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό σε οργανικά μόρια και οξυγόνο. Τα χαρακτηριστικά του φωτός που διέπουν την αλληλεπίδρασή του με τα φυτά περιλαμβάνουν:

- Το φως ταξιδεύει σε κυματική μορφή.
- Η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών κορυφών ενός κύματος ονομάζεται μήκος κύματος, το οποίο ποικίλλει για διαφορετικά χρώματα.
- Μεταξύ των ορατών μηκών κύματος, το κόκκινο φως έχει το μεγαλύτερο μήκος κύματος. Εκτός του ορατού εύρους, τα μεγαλύτερα μήκη κύματος περιλαμβάνουν υπέρυθη ακτινοβολία, μικροκύματα και ραδιοκύματα.
- Τα μικρότερα ορατά μήκη κύματος περιλαμβάνουν το μπλε και το ιώδες φως, με ακόμη μικρότερα μήκη κύματος πέρα από το ορατό φάσμα, όπως το υπεριώδες φως, οι ακτίνες X και οι ακτίνες γάμμα.
- Το φως παρουσιάζει επίσης ιδιότητες σωματιδίων, με τα σωματίδια που είναι γνωστά ως φωτόνια.

Τα φωτόνια παρέχουν την ενέργεια που απαιτείται για τη φωτοσύνθεση, διευκολύνοντας την ενσωμάτωση του ατμοσφαιρικού CO₂ σε οργανικά μόρια, ιδιαίτερα σε απλά σάκχαρα όπως η γλυκόζη και η φρουκτόζη (C₆H₁₂O₆). Η συνοπτική χημική αντίδραση για τη φωτοσύνθεση είναι:

Νερό + διοξείδιο του άνθρακα → οξυγόνο , νερό , και απλά σάκχαρα

Συγκεκριμένα, 12 γραμμομόρια (moles) νερού και 6 γραμμομόρια διοξειδίου του άνθρακα, εν παρουσία χλωροφύλλης, βοηθητικών χρωστικών και φωτός, παράγουν 6 γραμμομόρια αερίου οξυγόνου, επιστρέφουν 6 γραμμομόρια νερού στο κύτταρο και δημιουργούν ένα γραμμομόριο απλής ζάχαρης όπως π.χ. γλυκόζης ή φρουκτόζης.

Η φωτοσύνθεση περιλαμβάνει δύο θεμελιώδεις αντιδράσεις: την Αντίδραση Φωτός (LR) και την Ανεξάρτητη Αντίδραση Φωτός (LIR). Στην Αντίδραση του Φωτός, η χλωροφύλλη —μια πράσινη χρωστική ουσία— είναι ο βασικός παράγοντας στη σύλληψη του φωτός για τη φωτοσύνθεση. Τα φυτά περιέχουν δύο κρίσιμες χρωστικές χλωροφύλλης, τη χλωροφύλλη α και τη χλωροφύλλη β, οι οποίες βρίσκονται σε χλωροπλάστες εντός των κυττάρων, ιδιαίτερα συγκεντρωμένες στο στρώμα της μεσοφύλλης (Yavari et al., 2021).

Το φως επηρεάζει επίσης άλλες πτυχές της φυσιολογίας των φυτών, επηρεάζοντας τον ρυθμό και την κατεύθυνση ανάπτυξης, καθώς και το χρόνο και την ποιότητα της ανθοφορίας και της καρποφορίας. Τα φυτά μπορούν να αισθανθούν την ένταση, τη διάρκεια και την ποιότητα του φωτός (μήκος κύματος) και να προσαρμόσουν ανάλογα

την ανάπτυξή τους. Για παράδειγμα, τα φυτά αναπτύσσονται προς τις πηγές φωτός (φωτοτροπισμός) και ορισμένα είδη ανθίζουν μόνο όταν το φως της ημέρας υπερβαίνει ή πέφτει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο (φωτοπεριοδισμός) (Yavari et al., 2021; Zioutopoulou et al., 2022).

Επιπλέον, το φως επηρεάζει τη σύνθεση και την αποικοδόμηση χρωστικών ουσιών όπως η χλωροφύλλη, τα καροτενοειδή και οι ανθοκυανίνες στα φυτικά κύτταρα. Αυτές οι χρωστικές ουσίες καθορίζουν το χρώμα και την εμφάνιση των φυτικών ιστών και συμμετέχουν στην απορρόφηση του φωτός για φωτοσύνθεση και προστασία. Για παράδειγμα, τα φυτά που εκτίθενται σε υψηλή ένταση φωτός τείνουν να παράγουν περισσότερες ανθοκυανίνες, οι οποίες δίνουν μια κοκκινωπή ή μοβ απόχρωση για προστασία από το υπερβολικό φως και την υπεριώδη ακτινοβολία (Zioutopoulou et al., 2022).

Εκτός από τις προαναφερθείσες φυσιολογικές λειτουργίες, το φως επηρεάζει μια ποικιλία άλλων διεργασιών κρίσιμων για την ανάπτυξη και την προσαρμοστικότητα των φυτών. Αυτά περιλαμβάνουν τη φωτομορφογένεση, τον φωτοπεριοδισμό και τον φωτοτροπισμό, καθένα από τα οποία είναι απαραίτητο για τη βέλτιστη ανάπτυξη και αναπαραγωγή σε ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες:

- *Φωτομορφογένεση*: Αναφέρεται στην ανάπτυξη και ανάπτυξη των φυτών ως απόκριση σε φωτεινές ενδείξεις. Αυτή η διαδικασία ρυθμίζεται από φωτοϋποδοχείς, όπως φυτόχρωμα, κρυπτοχρώματα και φωτοτροπίνες, τα οποία ανιχνεύουν διαφορετικά μήκη κύματος φωτός και πυροδοτούν συγκεκριμένες αναπτυξιακές αποκρίσεις. Τα φυτόχρωμα απορροφούν κυρίως το κόκκινο και το πολύ κόκκινο φως, ρυθμίζοντας διαδικασίες όπως η βλάστηση των σπόρων, η επιμήκυνση του στελέχους και ο χρόνος ανθοφορίας. Τα κρυπτοχρώματα και οι φωτοτροπίνες είναι ευαίσθητα στο μπλε φως και εμπλέκονται στη ρύθμιση του ανοίγματος των στομάτων, της κίνησης των χλωροπλαστών και του φωτοτροπισμού (Yin, Lin & Zuo, 2021).
- *Φωτοπεριοδισμός*: Φωτοπεριοδισμός είναι η φυσιολογική αντίδραση των οργανισμών στη διάρκεια της ημέρας ή της νύχτας. Στα φυτά, αυτό το φαινόμενο επηρεάζει το χρόνο της ανθοφορίας και είναι κρίσιμο για το συγχρονισμό με τις εποχιακές αλλαγές. Τα φυτά κατηγοριοποιούνται ως

μικρής ημέρας, μεγάλης ημέρας ή ουδέτερης ημέρας με βάση την ανθοφορία τους στη φωτοπερίοδο. Τα φυτά μικρής ημέρας ανθίζουν όταν η διάρκεια της ημέρας είναι μικρότερη από ένα κρίσιμο όριο, ενώ τα φυτά μεγάλης ημέρας ανθίζουν όταν η διάρκεια της ημέρας υπερβαίνει μια ορισμένη διάρκεια. Τα ουδέτερα για την ημέρα φυτά δεν εξαρτώνται από τη φωτοπερίοδο για την ανθοφορία και μπορούν να ανθίσουν ανεξάρτητα από τη διάρκεια του φωτός της ημέρας (Yin, Lin & Zuo, 2021).

- *Φωτοτροπισμός*: Ο φωτοτροπισμός είναι η αναπτυξιακή απόκριση των φυτών προς ή μακριά από το φως. Ο θετικός φωτοτροπισμός, όπου η ανάπτυξη κατευθύνεται προς την πηγή φωτός, παρατηρείται συνήθως στους μίσχους και τα φύλλα, βελτιστοποιώντας τη σύλληψη φωτός για φωτοσύνθεση. Ο αρνητικός φωτοτροπισμός, όπου η ανάπτυξη κατευθύνεται μακριά από το φως, εμφανίζεται συχνά στις ρίζες, προάγοντας τη διεύθυνση στο έδαφος και την απόκτηση θρεπτικών στοιχείων. Αυτή η κατευθυντήρια ανάπτυξη μεσολαβεί από την ανακατανομή της αυξίνης της φυτικής ορμόνης, η οποία συσσωρεύεται στη σκιασμένη πλευρά του φυτού, προάγοντας την επιμήκυνση των κυττάρων και την κάμψη προς την πηγή φωτός.

Το φως ρυθμίζει επίσης τη σύνθεση και την αποικοδόμηση των χρωστικών ουσιών, οι οποίες είναι σημαντικές για την προστασία των φυτών από τη φωτοφθορά και για την απορρόφηση της φωτεινής ενέργειας. Οι χλωροφύλλες, τα καροτενοειδή και οι ανθοκυανίνες είναι οι κύριες χρωστικές που επηρεάζονται από την ένταση και την ποιότητα του φωτός. Οι χλωροφύλλες είναι απαραίτητες για τη φωτοσύνθεση, συλλαμβάνοντας την φωτεινή ενέργεια και μετατρέποντάς την σε χημική ενέργεια. Τα καροτενοειδή προστατεύουν τη χλωροφύλλη από τη φωτοοξείδωση και συμβάλλουν στην ελαφριά συγκομιδή. Οι ανθοκυανίνες, οι οποίες συσσωρεύονται ως απόκριση σε υψηλή ένταση φωτός, προστατεύουν τα φυτά απορροφώντας την περίσσεια φωτός και καθαρίζοντας τα ενεργά είδη οξυγόνου (ROS), αποτρέποντας έτσι την κυτταρική βλάβη (Yin, Lin & Zuo, 2021).

Ο κirkάδιος ρυθμός, ένα εσωτερικό βιολογικό ρολόι, είναι μια άλλη πτυχή που επηρεάζεται από το φως. Αυτός ο ενδογενής μηχανισμός χρονισμού επιτρέπει στα φυτά να προβλέπουν τις καθημερινές περιβαλλοντικές αλλαγές και να προσαρμόζουν ανάλογα τις φυσιολογικές τους διεργασίες. Οι φωτεινές ενδείξεις βοηθούν στο

συγχρονισμό του κερκάδιου ρολογιού με το εξωτερικό περιβάλλον, ρυθμίζοντας διαδικασίες όπως η φωτοσύνθεση, η παραγωγή ορμονών και η γονιδιακή έκφραση. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του κερκάδιου ρολογιού και των φωτεινών σημάτων διασφαλίζει ότι οι δραστηριότητες των φυτών χρονομετρούνται βέλτιστα για επιβίωση και παραγωγικότητα.

Τα φυτά έχουν αναπτύξει διάφορους μηχανισμούς για να προστατεύονται από τις βλαβερές συνέπειες της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV). Η ακτινοβολία UV-B, ειδικότερα, μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο DNA, αποικοδόμηση πρωτεϊνών και οξειδωτικό στρες. Τα φυτά ανταποκρίνονται στην έκθεση στην UV-B συσσωρεύοντας ενώσεις που απορροφούν την υπεριώδη ακτινοβολία, όπως φλαβονοειδή και ανθοκυανίνες, οι οποίες λειτουργούν ως αντηλιακά για να μειώσουν τη διείσδυση της υπεριώδους ακτινοβολίας στους ιστούς. Επιπλέον, η ενεργοποίηση των μηχανισμών επιδιόρθωσης του DNA και των αντιοξειδωτικών συστημάτων βοηθά στον μετριασμό της βλάβης που προκαλείται από την υπεριώδη ακτινοβολία και στη διατήρηση της κυτταρικής ακεραιότητας (Yin, Lin & Zuo, 2021).

1.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά των πηγών φωτισμού

Τα φυτά, ως αυτότροφα, χρησιμοποιούν την ενέργεια από το φως για να παράγουν οργανικά μόρια, τα οποία είναι απαραίτητα για την κατασκευή των κυττάρων τους και την αποθήκευση ενέργειας. Αυτές οι οργανικές ενώσεις συντίθενται μέσω της φωτοσύνθεσης, μιας διαδικασίας που μετατρέπει το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό σε οργανικά μόρια και οξυγόνο, χρησιμοποιώντας το φως ως πηγή ενέργειας. Τα παραγόμενα οργανικά προϊόντα αποθηκεύονται σε οργανίδια και μεταβολίζονται από το φυτό για ανάπτυξη, συντήρηση και παραγωγή των απαραίτητων οργανικών μορίων (Nabigol, 2012).

Η φωτοσύνθεση είναι ο πρωταρχικός μηχανισμός με τον οποίο τα φυτά συλλαμβάνουν και μετατρέπουν την φωτεινή ενέργεια σε χημική ενέργεια. Εμφανίζεται σε δύο στάδια: τις Αντιδράσεις Φωτός (LR) και τις Ανεξάρτητες Αντιδράσεις Φωτός (LIR), γνωστές και ως Κύκλος του Κάλβιν.

- *Αντιδράσεις φωτός (LR)*: Συμβαίνουν στις θυλακοειδείς μεμβράνες των χλωροπλάστων, όπου η χλωροφύλλη απορροφά την φωτεινή ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε χημική ενέργεια με τη μορφή ATP και NADPH.

Η χλωροφύλλη *a* και η χλωροφύλλη *b* είναι οι δύο κύριοι τύποι χλωροφύλλης που εμπλέκονται, ο καθένας απορροφά φως σε διαφορετικά μήκη κύματος για να μεγιστοποιήσει την ενέργεια που δεσμεύεται (Yavari et al., 2021).

- *Ανεξάρτητες από το φως Αντιδράσεις (LIR)*: Λαμβάνουν χώρα στο στρώμα των χλωροπλαστών, όπου το ATP και το NADPH που παράγονται στις Αντιδράσεις Φωτός χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή του διοξειδίου του άνθρακα σε γλυκόζη μέσω μιας σειράς ενζυματικών σταδίων. Αυτό το στάδιο δεν απαιτεί απευθείας φως, αλλά βασίζεται στα προϊόντα των Φωτεινών Αντιδράσεων.

Το φως είναι ένας κρίσιμος περιβαλλοντικός παράγοντας που ρυθμίζει τη φυσιολογία των φυτών, τη φωτοσύνθεση και τις αποκρίσεις σε διάφορα περιβαλλοντικά ερεθίσματα. Το μήκος κύματος του φωτός που είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη των φυτών περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα, συμπεριλαμβανομένων των ορατών, υπεριώδων και υπέρυθρων μηκών κύματος (Jung and Arar, 2023).

- *Ορατό φως*: Περιλαμβάνοντας το φάσμα από το κόκκινο έως το ιώδες, το ορατό φως χρησιμοποιείται κυρίως στη φωτοσύνθεση. Το κόκκινο και το μπλε μήκος κύματος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά, με το κόκκινο φως να απορροφάται από τη χλωροφύλλη *a* και το μπλε φως από τη χλωροφύλλη *b*.
- *Υπεριώδες φως*: Η υπεριώδης ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο DNA και τις πρωτεΐνες των φυτών, αλλά διεγείρει επίσης την παραγωγή προστατευτικών ενώσεων όπως τα φλαβονοειδή και οι ανθοκυανίνες, που δρουν ως αντηλιακά και αντιοξειδωτικά.
- *Υπέρυθρο φως*: Η υπέρυθη ακτινοβολία εμπλέκεται λιγότερο στη φωτοσύνθεση, αλλά παίζει ρόλο στη ρύθμιση της θερμοκρασίας των φυτών και επηρεάζει τις φωτοπεριοδικές αποκρίσεις.

Το φως αλληλοεπιδρά με τα φυτικά υλικά με διάφορους τρόπους, κυρίως μέσω της απορρόφησης, της ανάκλασης και της μετάδοσης.

- *Απορρόφηση*: Όταν τα κύματα φωτός συναντούν φυτικές χρωστικές ουσίες, όπως η χλωροφύλλη, η ενέργεια απορροφάται και χρησιμοποιείται για τη διέγερση των ηλεκτρονίων, ξεκινώντας τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Η απορροφούμενη ενέργεια στη συνέχεια μετατρέπεται σε χημική ενέργεια.

- *Αντανάκλαση*: Οι ανακλαστικές ιδιότητες των φύλλων των φυτών επηρεάζουν το χρώμα και την εμφάνισή τους. Για παράδειγμα, το πράσινο χρώμα των φύλλων οφείλεται στην ανάκλαση των πράσινων μηκών κύματος από τη χλωροφύλλη, ενώ άλλα μήκη κύματος απορροφώνται.
- *Μετάδοση*: Ένα μέρος του φωτός περνά μέσα από τους φυτικούς ιστούς, επιτρέποντας στα κατώτερα στρώματα των κυττάρων να συμμετέχουν επίσης στη φωτοσύνθεση. Ο βαθμός μετάδοσης εξαρτάται από τη δομή και το πάχος του φύλλου (Nabigol, 2012) .

Τα φυτά ρυθμίζουν την ανάπτυξη και την ανάπτυξή τους μέσω της φωτομορφογένεσης και του φωτοπεριοδισμού, διεργασίες που ανταποκρίνονται στα φωτεινά σήματα.

- *Φωτομορφογένεση*: Αναφέρεται στις αναπτυξιακές αλλαγές στα φυτά που προκαλούνται από το φως. Φωτοϋποδοχείς όπως τα φυτοχρώματα, τα κρυπτοχρώματα και οι φωτοτροπίνες ανιχνεύουν διαφορετικά μήκη κύματος φωτός, πυροδοτώντας συγκεκριμένες αποκρίσεις ανάπτυξης. Για παράδειγμα, το μπλε φως προάγει το άνοιγμα του στομάτου και την κίνηση του χλωροπλάστη, ενώ το κόκκινο φως επηρεάζει τη βλάστηση και την ανθοφορία των σπόρων(Nabigol, 2012).
- *Φωτοπεριοδισμός*: Αφορά την αντίδραση των φυτών στη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, επηρεάζοντας την ανθοφορία και άλλες αναπτυξιακές διαδικασίες. Τα φυτά μικρής ημέρας ανθίζουν όταν η νύχτα είναι μεγαλύτερη από ένα κρίσιμο μήκος, ενώ τα φυτά μεγάλης ημέρας ανθίζουν όταν η νύχτα είναι μικρότερη. Τα ουδέτερα για την ημέρα φυτά δεν εξαρτώνται από τη διάρκεια της φωτοπεριόδου για την ανθοφορία (Thomas & Vince-Prue, 1997).

Τα φυτά έχουν αναπτύξει διάφορες προσαρμογές για να αντιμετωπίσουν τις διακυμάνσεις στην ένταση και την ποιότητα του φωτός.

- *Προσαρμογή χλωροφύλλης*: Σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, τα φυτά αυξάνουν την περιεκτικότητά τους σε χλωροφύλλη και επεκτείνουν την περιοχή των φύλλων τους για να συλλάβουν περισσότερο φως και να ενισχύσουν τη φωτοσύνθεση.

- *Αντιοξειδωτικά Ένζυμα*: Τα φυτά ενεργοποιούν τα αντιοξειδωτικά ένζυμα για να μετριάσουν το οξειδωτικό στρες που προκαλείται από το υπερβολικό φως, προστατεύοντας τα κυτταρικά συστατικά από βλάβες.
- *Αλλαγές γονιδιακής έκφρασης*: Οι διακυμάνσεις του φωτός μπορούν να προκαλέσουν αλλαγές στη γονιδιακή έκφραση, επιτρέποντας στα φυτά να προσαρμόσουν τις φυσιολογικές τους διαδικασίες και να βελτιστοποιήσουν την ανάπτυξη κάτω από διαφορετικές συνθήκες φωτός.

Στη γεωργία, ο τεχνητός φωτισμός χρησιμοποιείται για την υποστήριξη της ανάπτυξης των φυτών, ειδικά σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα όπως τα θερμοκήπια. Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι ηλεκτρικών λαμπτήρων, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται με βάση τις αρχές εκπομπής φωτός τους:

- *Λαμπτήρες πυρακτώσεως*: Λειτουργούν με την αρχή της θερμικής ακτινοβολίας, εκπέμποντας φως ως αποτέλεσμα της θέρμανσης ενός νήματος μέχρι να λάμψει. Αν και παράγουν ένα ευρύ φάσμα φωτός, δεν είναι ενεργειακά αποδοτικοί (Nabigol, 2012).
- *Λαμπτήρες εκκένωσης*: Περιλαμβάνουν λαμπτήρες φθορισμού και λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης, οι οποίοι εκπέμπουν φως μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Είναι πιο ενεργειακά αποδοτικά και παρέχουν συγκεκριμένα μήκη κύματος ευεργετικά για την ανάπτυξη των φυτών.
- *Λαμπτήρες ηλεκτροφωταύγειας*: Περιλαμβάνουν φώτα LED, τα οποία εκπέμπουν φως μέσω ηλεκτροφωταύγειας. Τα LED είναι εξαιρετικά ενεργειακά αποδοτικά, μπορούν να ρυθμιστούν σε συγκεκριμένα μήκη κύματος και χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στις σύγχρονες γεωργικές πρακτικές.

Η φασματοσκοπία ανάκλασης είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για την παρακολούθηση της υγείας των φυτών και την ανίχνευση του στρες. Αναλύοντας τα φάσματα ανάκλασης των φυτών, οι ερευνητές είναι σε θέση να αξιολογήσουν τη φυσιολογική κατάσταση, να ανιχνεύσουν ανεπάρκειες θρεπτικών συστατικών και να εντοπίσουν παράγοντες στρες όπως η ξηρασία ή οι ασθένειες. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την παρακολούθηση μεγάλης κλίμακας και την έγκαιρη παρέμβαση, βελτιώνοντας τη διαχείριση και την παραγωγικότητα των καλλιεργειών (Volterrani et al., 2017).

1.3 Λειτουργία υπέρυθρων (IR) αισθητήρων

Οι αισθητήρες υπέρυθρων παίζουν κρίσιμο ρόλο στην ανίχνευση, την απεικόνιση και τη μέτρηση των μοτίβων θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπονται από αντικείμενα, συμπεριλαμβανομένων των φυτών. Αυτοί οι αισθητήρες ανιχνεύουν την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από αντικείμενα με θερμοκρασίες πάνω από το απόλυτο μηδέν (Norton, 1991). Ένας αισθητήρας υπέρυθρων αποτελείται από έναν πομπό υπέρυθρων και έναν υπέρυθρο δέκτη. Ο πομπός, συχνά ένα IR LED ή λείζερ, εκπέμπει υπέρυθρο φως, το οποίο στη συνέχεια αλληλοεπιδρά με αντικείμενα. Ο δέκτης, συνήθως μια φωτοδίοδος ή ένα φωτοτρανζίστορ, είναι ευαίσθητος στο ίδιο μήκος κύματος υπέρυθρου φωτός με τον πομπό. Όταν το εκπεμπόμενο υπέρυθρο φως χτυπά ένα αντικείμενο, μέρος του φωτός ανακλάται πίσω στον δέκτη, ο οποίος στη συνέχεια μετατρέπει αυτό το ανακλώμενο φως σε ηλεκτρικό σήμα που μπορεί να μετρηθεί και να υποβληθεί σε επεξεργασία.

Οι αισθητήρες υπέρυθρων ταξινομούνται σε δύο τύπους: ενεργούς και παθητικούς. Οι ενεργοί αισθητήρες ενσωματώνουν πομπό και δέκτη υπέρυθρων, ανιχνεύοντας την υπέρυθρη ακτινοβολία που ανακλάται από αντικείμενα. Αντίθετα, οι παθητικοί αισθητήρες αποτελούνται μόνο από δέκτες υπέρυθρων που ανιχνεύουν την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα ίδια τα αντικείμενα.

Στο πλαίσιο της γεωργικής έρευνας, ιδιαίτερα για τη μέτρηση της επίδρασης του τεχνητού φωτισμού στη θερμοκρασία των φύλλων τριανταφυλλιάς, οι αισθητήρες υπέρυθρων προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να μετρήσουν με ακρίβεια τη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα φύλλα της τριανταφυλλιάς, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για τη θερμοκρασία τους. Αυτό είναι κρίσιμο για την κατανόηση του πώς οι διαφορετικές συνθήκες τεχνητού φωτισμού επηρεάζουν τη φυσιολογία των φυτών και τη ρύθμιση της θερμοκρασίας.

Ο τεχνητός φωτισμός χρησιμοποιείται συνήθως στην ανθοκομία για τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξης και της ανθοφορίας των φυτών. Ωστόσο, η επίδραση διαφορετικών συνθηκών φωτισμού στη θερμοκρασία των φύλλων μπορεί να επηρεάσει διάφορες φυσιολογικές διεργασίες. Για παράδειγμα, η αυξημένη θερμοκρασία των φύλλων υπό ορισμένες συνθήκες φωτισμού μπορεί να επηρεάσει τον ρυθμό της φωτοσύνθεσης, τη διαπνοή και τη συνολική υγεία των φυτών. Χρησιμοποιώντας

τέτοιους αισθητήρες, μπορούν να παρακολουθηθούν οι αλλαγές θερμοκρασίας με ακρίβεια και σε πραγματικό χρόνο.

Οι αισθητήρες διευκολύνουν επίσης τη λεπτομερή ανάλυση του τρόπου με τον οποίο ο τεχνητός φωτισμός επηρεάζει τη θερμοκρασία των φύλλων τριανταφυλλιάς, επιτρέποντας στη βελτιστοποίηση των συνθηκών φωτισμού για καλύτερα αποτελέσματα ανάπτυξης και ανθοφορίας. Αυτοί οι αισθητήρες ανιχνεύουν τις ελάχιστες διακυμάνσεις στη θερμοκρασία των φύλλων, οι οποίες μπορεί να υποδεικνύουν στρες ή μη βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξης. Με τη συνεχή παρακολούθηση αυτών των θερμοκρασιών, μπορούν να γίνουν προσαρμογές στη ρύθμιση φωτισμού για να διασφαλιστούν οι βέλτιστες συνθήκες για την καλλιέργεια τριανταφυλλιάς.

Επιπλέον, οι αισθητήρες υπέρυθρων είναι πολύτιμοι για τη μελέτη της χωρικής κατανομής της θερμοκρασίας των φύλλων κάτω από τεχνητό φωτισμό. Έτσι παρέχεται βοήθεια στον εντοπισμό περιοχών μέσα σε ένα θερμοκήπιο ή περιοχή ανάπτυξης όπου εμφανίζονται διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, επιτρέποντας πιο στοχευόμενες και αποτελεσματικές προσαρμογές του φωτισμού και άλλων περιβαλλοντικών ελέγχων.

1.4 Η επίδραση της πηγής ακτινοβολίας στη μέτρηση με υπέρυθρων (IR) αισθητήρων

Οι αισθητήρες υπέρυθρων είναι κρίσιμοι για τη μέτρηση της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από αντικείμενα και το μήκος κύματος αυτής της ακτινοβολίας εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία του αντικειμένου. Σύμφωνα με τον νόμο μετατόπισης του Wien, το μέγιστο μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογο με τη θερμοκρασία του σώματος που εκπέμπει. Κατά συνέπεια, τα θερμότερα αντικείμενα εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία σε μικρότερα μήκη κύματος, ενώ τα ψυχρότερα αντικείμενα την εκπέμπουν σε μεγαλύτερα μήκη κύματος.

Το φάσμα υπέρυθρης ακτινοβολίας κυμαίνεται από 0,75 μm έως 1000 μm , με διάφορα εύρη που χρησιμοποιούνται για διαφορετικές εφαρμογές. Αυτές οι υποκατηγορίες περιλαμβάνουν:

- *Εγγύς υπέρυθρο (NIR):* 0,75 - 1,4 μm
- *Υπέρυθρο μικρού μήκους κύματος (SWIR):* 1,4 - 3 μm

- *Υπέρυθρο μέσου μήκους κύματος (MWIR): 3 - 8 μm*
- *Υπέρυθρο Μεγάλο Μήκος Κύματος (LWIR): 8 - 15 μm*

Γενικά, τα μικρότερα μήκη κύματος συνδέονται με υψηλότερες θερμοκρασίες, ενώ τα μεγαλύτερα μήκη κύματος αντιστοιχούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Η επιλογή του μήκους κύματος για την ανίχνευση υπέρυθρων εξαρτάται επίσης από παράγοντες όπως η εκπομπή, η ανακλαστικότητα και η μετάδοση του αντικειμένου ή της πηγής ακτινοβολίας, μαζί με τις συνθήκες περιβάλλοντος και τις πιθανές πηγές παρεμβολής. Ως εκ τούτου, ο τύπος και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από αντικείμενα μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση των υπέρυθρων αισθητήρων (Norton, 1991, Aydin and Ozer, 2023).

Οι αισθητήρες μπορούν να επηρεαστούν από διάφορες πηγές ακτινοβολίας ικανές να εκπέμπουν υπέρυθρο φως, τον ίδιο τύπο ακτινοβολίας που ανιχνεύουν αυτοί οι αισθητήρες. Τέτοιες πηγές μπορεί να προκαλέσουν ψευδείς ενδείξεις ή να μειώσουν την ευαισθησία του αισθητήρα. Για παράδειγμα, ο τεχνητός φωτισμός που χρησιμοποιείται στην ανθοκομία μπορεί να εκπέμψει υπέρυθρη ακτινοβολία που παρεμβαίνει στις μετρήσεις της θερμοκρασίας των φύλλων από αισθητήρες. Αυτή η παρεμβολή μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβείς μετρήσεις, επηρεάζοντας την εκτίμηση της θερμικής κατάστασης και της συνολικής υγείας της εγκατάστασης.

Το ορατό φως, αν και είναι διαφορετικός τύπος ακτινοβολίας από το υπέρυθρο φως, μπορεί επίσης να επηρεάσει τις μετρήσεις του υπέρυθρου αισθητήρα. Το ορατό φως μπορεί να απορροφηθεί ή να ανακλαστεί από αντικείμενα που ο αισθητήρας προσπαθεί να ανιχνεύσει, αλλάζοντας την ποσότητα της υπέρυθρης ακτινοβολίας που φτάνει στον αισθητήρα. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να προκαλέσει σφάλματα στις μετρήσεις θερμοκρασίας ή να μειώσει την ακρίβεια του αισθητήρα (Khattak et al., 2011).

Για τον μετριασμό των επιπτώσεων της ανεπιθύμητης ακτινοβολίας στους αισθητήρες υπέρυθρων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες στρατηγικές:

- *Φίλτρα ή ασπίδες:* Η εφαρμογή φίλτρων ή ασπίδων μπορεί να μειώσει την ποσότητα του εξωτερικού φωτός, συμπεριλαμβανομένων τόσο του ορατού όσο και του υπέρυθρου, που φτάνει στον αισθητήρα. Αυτό βοηθά στην απομόνωση των συγκεκριμένων υπέρυθρων μηκών κύματος που εκπέμπονται από το αντικείμενο στόχο, βελτιώνοντας έτσι την ακρίβεια μέτρησης.

- *Ειδικοί αισθητήρες μήκους κύματος:* Η χρήση αισθητήρων που είναι ευαίσθητοι σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος υπέρυθρου φωτός διαφορετικό από το μήκος κύματος της πηγής παρεμβολής ακτινοβολίας μπορεί να βοηθήσει στη διάκριση μεταξύ του σήματος στόχου και του θορύβου περιβάλλοντος.
- *Αισθητήρες υψηλής αναλογίας σήματος προς θόρυβο:* Οι αισθητήρες με υψηλή αναλογία σήματος προς θόρυβο είναι πιο ικανοί στη διάκριση μεταξύ των επιθυμητών σημάτων υπέρυθρων από το αντικείμενο στόχου και οποιασδήποτε ακτινοβολίας φόντου ή παρεμβολής.
- *Αισθητήρες υψηλού δυναμικού εύρους:* Οι αισθητήρες με υψηλό δυναμικό εύρος μπορούν να μετρήσουν με ακρίβεια ένα ευρύ φάσμα εντάσεων ακτινοβολίας, κάτι που είναι ευεργετικό σε περιβάλλοντα με ποικίλες συνθήκες φωτισμού. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να προσαρμοστούν τόσο σε υψηλά όσο και σε χαμηλά επίπεδα υπέρυθρης ακτινοβολίας, διασφαλίζοντας αξιόπιστες μετρήσεις σε διαφορετικά σενάρια (Khattak et al., 2011).

Στο πλαίσιο της μέτρησης της επίδρασης του τεχνητού φωτισμού στη θερμοκρασία των φύλλων τριανταφυλλιάς, αυτές οι στρατηγικές μετριάσμου είναι πρωταρχικής σημασίας. Χρησιμοποιώντας αισθητήρες υπέρυθρων με κατάλληλα φίλτρα, ειδική ευαισθησία μήκους κύματος, υψηλούς λόγους σήματος προς θόρυβο και υψηλές δυναμικές περιοχές, λαμβάνονται ακριβείς μετρήσεις θερμοκρασίας. Όλο αυτό διασφαλίζει ότι ο αντίκτυπος του τεχνητού φωτισμού στη θερμοκρασία των φύλλων αξιολογείται με ακρίβεια, οδηγώντας σε καλύτερες γνώσεις για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών φωτισμού για βελτιωμένη ανάπτυξη και υγεία των φυτών (Khattak et al., 2011).

1.5 Η επίδραση της πηγής ακτινοβολίας στην αύξηση θερμοκρασίας του φύλλου

Η επίδραση του φωτός στη θερμοκρασία των φύλλων είναι πολύπλοκη και ποικίλλει ανάλογα με την ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Καθώς αυξάνεται η ένταση του φωτός, η θερμοκρασία των φύλλων αυξάνεται επειδή τα φύλλα απορροφούν το φως, μετατρέποντάς το σε θερμότητα. Αυτή η αλλαγή στη θερμοκρασία της επιφάνειας των φύλλων επηρεάζει σημαντικά τη φωτοσυνθετική λειτουργία. Για παράδειγμα, έρευνα

σε τέσσερα είδη τροπικών δέντρων αποκάλυψε ότι διαφορετικά χρονικά διαστήματα ανταλλαγής αερίων CO₂ και φθορισμού χλωροφύλλης των φύλλων ανταποκρίθηκαν διακριτά στο φως κάτω από διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας. Η μελέτη έδειξε ότι η επαγωγή του ρυθμού αφομοίωσης (A), ο ρυθμός μεταφοράς ηλεκτρονίων του φωτοσυστήματος II (ETR II) και η διαδικασία ενεργοποίησης του Rubisco γενικά επιταχύνθηκαν όταν οι θερμοκρασίες άλλαξαν από 30 σε 40°C (T_{dyn}) σε σύγκριση με σταθερές θερμοκρασίες 30°C (T₃₀) ή 40°C (T₄₀) (Kang et al., 2020).

Η επίδραση της πηγής ακτινοβολίας στη θερμοκρασία των φύλλων ποικίλλει επίσης ανάλογα με το χρώμα των φύλλων. Τα πιο σκούρα φύλλα τείνουν να απορροφούν περισσότερο φως και θερμότητα, ενώ τα πιο ανοιχτόχρωμα φύλλα αντανακλούν περισσότερο φως και θερμότητα, οδηγώντας σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Επιπλέον, η επιφάνεια και το μέγεθος του φύλλου παίζουν κρίσιμους ρόλους. Η θερμοκρασία της επιφάνειας των φύλλων (LST) είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που καθορίζει τη συνολική θερμοκρασία του φυτού, η οποία διαφέρει από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτή η διακύμανση θερμοκρασίας επηρεάζει τη διαστολή των φύλλων, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη μεγιστοποίηση της πρόσληψης φωτός. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, η εσωτερική πίεση μέσα στο φυτό προκαλεί την επέκταση και την ανάπτυξη των κυτταρικών τοιχωμάτων, επηρεάζοντας έτσι τη συνολική ανάπτυξη του φυτού.

Ο τεχνητός φωτισμός, που χρησιμοποιείται συνήθως σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα όπως τα θερμοκήπια, μπορεί επίσης να επηρεάσει τη θερμοκρασία των φύλλων. Διαφορετικοί τύποι τεχνητών πηγών φωτός, όπως φώτα LED, φθορισμού και πυρακτώσεως, εκπέμπουν ποικίλα μήκη κύματος και εντάσεις φωτός, επηρεάζοντας έτσι τη θερμική δυναμική των επιφανειών των φύλλων. Για παράδειγμα, τα φώτα LED, τα οποία μπορούν να ρυθμιστούν με ακρίβεια για να εκπέμπουν συγκεκριμένα μήκη κύματος, ενδέχεται να οδηγήσουν σε διαφορετικά προφίλ θερμοκρασίας φύλλου σε σύγκριση με τα φώτα φθορισμού ευρέος φάσματος.

Επιπλέον, η διάρκεια και η ποιότητα της έκθεσης σε τεχνητό φως παίζουν ρόλο στη ρύθμιση της θερμοκρασίας των φύλλων. Η παρατεταμένη έκθεση σε φως υψηλής έντασης μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση, η οποία μπορεί να βλάψει τη φωτοσυνθετική απόδοση και να αυξήσει τον κίνδυνο θερμικής καταπόνησης. Αντίθετα, η βελτιστοποίηση του φάσματος φωτός για να ταιριάζει με τις φωτοσυνθετικές ανάγκες

του φυτού μπορεί να ενισχύσει την ανάπτυξη διατηρώντας παράλληλα ασφαλείς θερμοκρασίες φύλλων.

Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο διαφορετικές πηγές ακτινοβολίας επηρεάζουν τη θερμοκρασία των φύλλων είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη στρατηγικών για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών ανάπτυξης των φυτών. Με την προσεκτική επιλογή και τον έλεγχο του τεχνητού φωτισμού, είναι δυνατός ο χειρισμός της θερμοκρασίας των φύλλων για να ευνοηθεί η βέλτιστη φωτοσυνθετική δραστηριότητα και η συνολική υγεία των φυτών. Αυτή η γνώση είναι ιδιαίτερα πολύτιμη για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της βιωσιμότητας των γεωργικών πρακτικών σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα.

1.6 Άλλοι Παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία των φύλλων

Η θερμοκρασία των φυτικών ιστών καθορίζεται τόσο από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (De Boeck *et al.*, 2016) όσο και από τα θερμικά χαρακτηριστικά των φυτών που καθορίζουν την αποθήκευση θερμότητας (π.χ. Michaletz *et al.*, 2015). Ως εκ τούτου, οι θερμοκρασίες των φύλλων μπορεί να ποικίλλουν ευρέως μεταξύ των περιβαλλόντων, αλλά και μεταξύ των φυτών που αναπτύσσονται υπό τις ίδιες συνθήκες και ακόμη και του ίδιου φυτού (Leuzinger & Körner, 2007). Οι θερμοκρασίες των φύλλων επηρεάζουν άμεσα τους μεταβολικούς ρυθμούς και συνδέονται με τον κύκλο του νερού, επηρεάζοντας έτσι την ανάπτυξη και τις ροές CO₂ και H₂O (Michaletz, 2018).

Οι θερμοκρασίες των φύλλων μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά από τις θερμοκρασίες του αέρα. Αλλαγές στο μικροκλίμα (π.χ. θερμοκρασία αέρα, υγρασία, άνεμος, έδαφος υγρασία, ακτινοβολία) μαζί με τα θερμικά χαρακτηριστικά των φυτών θα καθορίσουν εάν η διακύμανση της θερμοκρασίας των φύλλων θα αλλάξει. (Marchand *et al.*, 2005).

Η υγρασία και η θερμοκρασία παίζουν σημαντικό ρόλο κατά τη θερμογράφηση καθώς επηρεάζουν την θερμοκρασία των φύλλων των φυτών (Oerke, 2006).

1.7 Βοτανικά χαρακτηριστικά του φυτού της τριανταφυλλιάς

- Είναι καλλωπιστικό και φυλλοβόλο φυτό. Η τριανταφυλλιά είναι μέλος του γένους *Rosa*, το οποίο ανήκει στην οικογένεια *Rosaceae*. Υπάρχουν περίπου 100 είδη τριαντάφυλλων, κυρίως ιθαγενών στην Ασία, και πολλές ποικιλίες και υβρίδια που ποικίλλουν σε σχήμα, μέγεθος, χρώμα και άρωμα. Μερικά από τα κοινά χαρακτηριστικά του φυτού είναι:
- Έχουν μίσχους με αγκάθια για να αποτρέψουν τα φυτοφάγα ζώα.
- Έχουν φύλλα που είναι εναλλάξ διατεταγμένα και σύνθετα, δηλαδή έχουν πολλά φύλλα προσαρτημένα σε έναν κεντρικό άξονα. Τα φυλλαράκια είναι συνήθως οβάλ και οδοντωτά κατά μήκος των άκρων.
- Έχουν λουλούδια που είναι συνήθως συμμετρικά και στρογγυλά, με πολλαπλά σέτ πετάλων που επικαλύπτονται. Τα πέταλα είναι απαλά, λεία και βελούδινα και μπορεί να έχουν χρώμα από λευκό έως κόκκινο, κίτρινο, ροζ και μοβ. Ορισμένα τριαντάφυλλα έχουν πέταλα δίχρωμα ή τρίχρωμα ή έχουν σχέδια όπως στίγματα και ρίγες.
- Έχουν καρπούς που ονομάζονται γοφοί, οι οποίοι είναι σαρκώδεις, που περιέχουν σπόρους. Οι γοφοί είναι συνήθως κόκκινοι ή πορτοκαλί και έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε βιταμίνη C (Westley, 2023).

Η τριανταφυλλιά πολλαπλασιάζεται με πέντε τρόπους. Πολλαπλασιάζεται με παράρριζα, με σπέρματα, με καταβολάδες, με μοσχεύματα και με μπόλιασμα.

Τα άνθη φύονται στη κορυφή ανθοφόρων κλάδων που προέρχονται από την τελευταία βλάστηση. Η στεφάνη μπορεί να έχει από 5 ως πάνω από 40 πέταλα. Οι αυτοφυείς ποικιλίες της Ευρώπης και οι παλιές καλλιεργούμενες ποικιλίες είναι μονόφορες (ανθίζουν μια φορά το χρόνο), οι ασιατικές είναι πολύφορες, ενώ τα πολύανθα υβρίδια και τριανταφυλλιές της κατηγορίας φλοριμπούντα έχουν συνεχή ανθοφορία από την άνοιξη ως το φθινόπωρο (Westley, 2023).

Τα τριαντάφυλλα εκτιμώνται για την ομορφιά, το άρωμα και τον συμβολισμό τους. Συχνά χρησιμοποιούνται ως καλλωπιστικά φυτά, κομμένα λουλούδια ή δώρα για διάφορες περιστάσεις.

Στην Ελλάδα απαντούν αυτοφυή 18 περίπου είδη, τα οποία είναι κοινώς γνωστά ως αγριοτριανταφυλλιές. Τα σημαντικότερα είναι:

- Η πουρναροτριανταφυλλιά ή τριανταφυλλιά της Βεγγάλης, αειθαλής θάμνος με κληματώδεις βλαστούς ύψους 2 περίπου μέτρων και με λευκά άνθη. Αναρριχάται συνήθως πάνω στα πουρνάρια, στις κουμαριές και σε άλλους θάμνους όπου ζει. Διασταυρούμενη με το είδος *R. chinensis* δίνει διπλανθείς ποικιλίες (*Rosa sempervirens*).
- Η δασοτριανταφυλλιά φυλλοβόλος, συνήθως, θάμνος, με κληματώδεις αναρριχώμενους βλαστούς, ύψους 2 περίπου μέτρων, με λευκά άοσμα άνθη. Κοινό σε όλη την Ηπειρωτική Ελλάδα και την Ευρώπη, ζει σε ορεινά δάση *R. arvensis* ή *R. silvestris*).
- Η σκυλοτριανταφυλλιά ή τριανταφυλλιά των φρακτών ή κυνορροδή (*R. canina*), μεγάλος θάμνος με χοντρούς βλαστούς ύψους 3 μέτρων, με άνθη ρόδινα ή, σπανίως, λευκά. Απαντά στα δάση και στους θαμνότοπους σε όλη την Ελλάδα και την Ευρώπη.
- Η πυκνοτριανταφυλλιά (*R. ferruginea*), πυκνός, πολύκλαδος θάμνος, ύψους 1-2 μέτρων με ρόδινα άνθη. Απαντά στα βουνά της Κεντρικής και Βόρειας Ελλάδας.
- Η βουνοτριανταφυλλιά (*R. montana*), μεγάλος θάμνος, ύψους 3 μέτρων, με ρόδινα άνθη. Απαντά στη οροσειρά της Πίνδου.
- Η θαμνοτριανταφυλλιά (*R. micrantha*), θάμνος ύψους 1-2 μέτρων, με φύλλα αραιά, μακριά κλαδιά και άνθη λευκά ή ρόδινα. Απαντά στη Ηπειρωτική Ελλάδα και στα Επτάνησα.
- Η χνουδοτριανταφυλλιά (*R. tomentella*), θάμνος ύψους 2 μέτρων, με λευκά συνήθως άνθη, που απαντά στους θαμνότοπους μέσου υψόμετρου της Κεντρικής Ελλάδας και της Πελοποννήσου.
- Η κοκκινοτριανταφυλλιά (*R. nitidula*), θάμνος ύψους 2 μέτρων, με ρόδινα άνθη, που απαντά στην Πίνδο.
- Η βατοτριανταφυλλια (*R. agrestis*), θάμνος ύψους ως 2 μέτρα, με λευκά άνθη, που απαντά σε θαμνότοπους στην Βόρεια Ελλάδα. Τα υπόλοιπα είδη έχουν ύψος μικρότερο του ενός μέτρου.

Η τριανταφυλλιά προτιμά τα αμμοαργιλώδη προς αργιλώδη εδάφη (κοκκινοχώματα), ουδέτερα ή ελαφρώς αλκαλικά. Με την χρησιμοποίηση των

κατάλληλων υποκειμένων μπορεί να καλλιεργηθεί σε όλα τα εδάφη εκτός από τα πολύ όξινα και πολύ υγρά. Εξαντλεί το έδαφος και απαιτεί λιπάνσεις με κοπριά και λιπάσματα, καθώς και τακτικά ποτίσματα. Όταν βρίσκεται σε περίοδο ανάπαυσης, αντέχει σε χαμηλές θερμοκρασίες (μερικούς βαθμούς κάτω των 0°C). Για να βλαστήσει ωστόσο απαιτεί θερμοκρασία τουλάχιστον 5°- 6°C και για να σχηματίσει μπουμπούκια τουλάχιστον 12°-14°C. Απαιτεί ακόμη πολύ φως και ήλιο, και καλό αερισμό. Μεγάλη σημασία έχει το κλάδεμα, γιατί αν το φυτό μένει ακλάδευτο, θα δώσει μια μπερδεμένη, χωρίς σχήμα μάζα από σκληρό ξύλο με μικρά άνθη σε ασθενικούς πολύκλαδους βλαστούς (Westley, 2023).

1.8 Αρχές μεταφοράς θερμότητας σε φύλλα φυτών

Η κατανόηση των αρχών της μεταφοράς θερμότητας στα φύλλα των φυτών είναι θεμελιώδης για τη διαχείριση της υγείας και τη βελτιστοποίηση των συνθηκών ανάπτυξης αυτών των φυτών στην ανθοκομία. Η μεταφορά θερμότητας στα φύλλα, πιο συγκεκριμένα της τριανταφυλλιάς, γίνεται μέσω τριών πρωταρχικών μηχανισμών: αγωγιμότητας, μεταφοράς και ακτινοβολίας. Κάθε μηχανισμός παίζει ξεχωριστό ρόλο στη θερμική ρύθμιση των φύλλων, επηρεάζοντας τη θερμοκρασία τους και τις συνολικές φυσιολογικές διεργασίες (Inamoto et al., 2016).

Η αγωγιμότητα είναι η μεταφορά θερμότητας μέσω της άμεσης επαφής μεταξύ των μορίων. Στο πλαίσιο των φύλλων της τριανταφυλλιάς, η αγωγιμότητα συμβαίνει όταν η θερμότητα μετακινείται από τα θερμότερα μέρη του φύλλου στα ψυχρότερα μέρη. Η εσωτερική δομή ενός φύλλου, συμπεριλαμβανομένων των κυττάρων και των ιστών του, διευκολύνει αυτή τη διαδικασία. Παράγοντες όπως το πάχος των φύλλων, η περιεκτικότητα σε νερό και η κυτταρική σύνθεση επηρεάζουν τον ρυθμό της αγωγίμης μεταφοράς θερμότητας. Για παράδειγμα, τα φύλλα της τριανταφυλλιάς με υψηλότερη περιεκτικότητα σε νερό έχουν συνήθως καλύτερη θερμική αγωγιμότητα, επιτρέποντας στη θερμότητα να κατανέμεται πιο ομοιόμορφα στην επιφάνεια του φύλλου.

Η συναγωγή περιλαμβάνει τη μεταφορά θερμότητας μέσω της κίνησης ρευστών, όπως ο αέρας ή το νερό. Η μεταφορά πραγματοποιείται κυρίως μέσω του οριακού στρώματος αέρα που περιβάλλει την επιφάνεια του φύλλου. Αυτό το στρώμα λειτουργεί ως μονωτικό φράγμα, επηρεάζοντας τον ρυθμό με τον οποίο ανταλλάσσεται θερμότητα μεταξύ του φύλλου και του περιβάλλοντος του. Όταν ο περιβάλλοντα αέρας

κινείται, όπως μέσω φυσικού ανέμου ή τεχνητού αερισμού, διαταράσσει το οριακό στρώμα, ενισχύοντας τη μεταφορά θερμότητας και ψύχοντας το φύλλο. Η απόδοση της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή εξαρτάται από παράγοντες όπως η ταχύτητα του αέρα, ο προσανατολισμός των φύλλων και η περιβαλλοντική υγρασία (Inamoto et al., 2016).

Ακτινοβολία είναι η εκπομπή ή η απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της θερμότητας, από αντικείμενα. Τα φύλλα απορροφούν την ενέργεια ακτινοβολίας από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένου του ηλιακού φωτός και του τεχνητού φωτισμού. Εκπέμπουν επίσης υπέρυθη ακτινοβολία, η οποία βοηθά στη διάχυση της υπερβολικής θερμότητας. Η ισορροπία μεταξύ της απορροφούμενης και της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας καθορίζει τη θερμοκρασία του φύλλου. Οι ιδιότητες της επιφάνειας του φύλλου, όπως το χρώμα και η υφή, επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία. Τα πιο σκούρα φύλλα της τριανταφυλλιάς, για παράδειγμα, απορροφούν περισσότερη ενέργεια ακτινοβολίας, οδηγώντας δυνητικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ενώ τα πιο ανοιχτόχρωμα φύλλα αντανακλούν περισσότερη ενέργεια, βοηθώντας να διατηρηθούν πιο δροσερά.

Στην ανθοκομία, ο τεχνητός φωτισμός προσθέτει μια σημαντική πηγή ενέργειας ακτινοβολίας, επηρεάζοντας τη θερμοκρασία των φύλλων της τριανταφυλλιάς. Διαφορετικοί τύποι λαμπτήρων, όπως LED, λαμπτήρες HID και λαμπτήρες φθορισμού, εκπέμπουν διαφορετικά επίπεδα θερμότητας. Η διαχείριση της έντασης και της διάρκειας του τεχνητού φωτισμού είναι σημαντική για την πρόληψη της υπερβολικής θέρμανσης και τη διασφάλιση της βέλτιστης θερμοκρασίας των φύλλων. Η κατανόηση των αρχών της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία επιτρέπει στους καλλιεργητές να επιλέξουν κατάλληλα συστήματα φωτισμού και να εφαρμόσουν στρατηγικές για τον μετριασμό του θερμικού στρες (Inamoto et al., 2016).

Η ρύθμιση της θερμοκρασίας των φύλλων της τριανταφυλλιάς είναι εξίσου σημαντική για τη διατήρηση των βέλτιστων φυσιολογικών διεργασιών. Η θερμοκρασία επηρεάζει τη φωτοσύνθεση, την αναπνοή και τους ρυθμούς διαπνοής στα τριαντάφυλλα. Η φωτοσύνθεση, η διαδικασία με την οποία τα τριαντάφυλλα μετατρέπουν την φωτεινή ενέργεια σε χημική ενέργεια, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στη θερμοκρασία. Η βέλτιστη θερμοκρασία των φύλλων εξασφαλίζει μέγιστη φωτοσυνθετική απόδοση. Εάν η θερμοκρασία των φύλλων της τριανταφυλλιάς αυξηθεί πολύ, η φωτοσύνθεση μπορεί να ανασταλεί, οδηγώντας σε μειωμένη ανάπτυξη και

παραγωγή λουλουδιών. Αντίθετα, εάν η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή, οι ρυθμοί φωτοσύνθεσης μπορεί να είναι ανεπαρκείς για να υποστηρίξουν την υγιή ανάπτυξη και ανθοφορία.

Η αναπνοή, η διαδικασία με την οποία τα τριαντάφυλλα μετατρέπουν την αποθηκευμένη ενέργεια σε χρησιμοποιήσιμη ενέργεια, επηρεάζεται επίσης από τη θερμοκρασία των φύλλων. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να επιταχύνουν τους ρυθμούς αναπνοής, οδηγώντας δυνητικά σε ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Αυτή η ανισορροπία μπορεί να μειώσει τη διαθέσιμη ενέργεια για ανάπτυξη και ανάπτυξη λουλουδιών. Η διατήρηση ενός βέλτιστου εύρους θερμοκρασίας διασφαλίζει ότι οι ρυθμοί αναπνοής ευθυγραμμίζονται με τις ενεργειακές ανάγκες της μονάδας (Inamoto et al., 2016).

Η διαπνοή, η διαδικασία της κίνησης του νερού μέσα από τα τριαντάφυλλα και η εξάτμισή του από τα φύλλα, επηρεάζεται και από τη θερμοκρασία. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες των φύλλων αυξάνουν τους ρυθμούς διαπνοής, οδηγώντας σε μεγαλύτερη απώλεια νερού. Ενώ η διαπνοή βοηθά στην ψύξη του φύλλου μέσω της ψύξης με εξάτμιση, η υπερβολική απώλεια νερού μπορεί να οδηγήσει σε αφυδάτωση και στρες. Η διαχείριση της θερμοκρασίας των φύλλων είναι επομένως απαραίτητη για την εξισορρόπηση της απόδοσης χρήσης νερού και των αναγκών ψύξης.

Για τη βελτιστοποίηση της θερμοκρασίας των φύλλων της τριανταφυλλιάς, χρησιμοποιούνται διάφορες στρατηγικές σε ανθοκομικές/γεωργικές πρακτικές. Περιλαμβάνουν την επιλογή κατάλληλων συστημάτων φωτισμού, τη βελτίωση της κυκλοφορίας του αέρα και τη χρήση τεχνικών σκίασης. Για παράδειγμα, τα φώτα LED προτιμώνται για τη χαμηλότερη απόδοση θερμότητας σε σύγκριση με τους λαμπτήρες HID, μειώνοντας τον κίνδυνο υπερθέρμανσης. Η βελτίωση της κυκλοφορίας του αέρα μέσω των ανεμιστήρων ή του φυσικού αερισμού συμβάλλει στην ενίσχυση της συναγωγής ψύξης, διατηρώντας τη βέλτιστη θερμοκρασία των φύλλων. Οι τεχνικές σκίασης, όπως η χρήση υφασμάτων σκίασης ή ρυθμιζόμενων οθονών, μπορούν να βοηθήσουν στη διαχείριση της ποσότητας της ακτινοβολούμενης ενέργειας που φτάνει στα φύλλα (Inamoto et al., 2016).

Οι προηγμένες τεχνολογίες παρακολούθησης, όπως οι αισθητήρες υπέρυθρων, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαχείριση της θερμοκρασίας των φύλλων τριανταφυλλιάς. Αυτοί οι αισθητήρες παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για τη

θερμοκρασία της επιφάνειας των φύλλων, επιτρέποντας τον ακριβή έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών. Η ενσωμάτωση δεδομένων αισθητήρων με αυτοματοποιημένα συστήματα κλιματισμού επιτρέπει δυναμικές προσαρμογές στο φωτισμό, τον εξαερισμό και τη σκίαση, διασφαλίζοντας βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξης (Inamoto et al., 2016).

1.9 Συγκριτική ανάλυση διαφορετικών τεχνολογιών αισθητήρων υπέρυθρων

Η ανάλυση των διαφορετικών τεχνολογιών αισθητήρων υπέρυθρων είναι σημαντική για την επιλογή του καταλληλότερου εξοπλισμού για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας των φύλλων τριανταφυλλιάς σε γεωργικές εφαρμογές. Οι αισθητήρες υπέρυθρων (IR) είναι συσκευές χωρίς επαφή που μετρούν τη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από αντικείμενα, όπως φύλλα τριαντάφυλλου, για να προσδιορίσουν τη θερμοκρασία τους. Η απόδοση, η ακρίβεια και η καταλληλότητα των διαφόρων τεχνολογιών μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την αποτελεσματικότητά τους σε ανθοκομικά περιβάλλοντα (Dehbi et al., 2017).

- *Θερμοστοιχεία:* Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται συνήθως στη μέτρηση της θερμοκρασίας. Τα θερμοστοιχεία αποτελούνται από δύο διαφορετικά μέταλλα ενωμένα στο ένα άκρο που παράγουν μια τάση ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας. Οι θερμοστοιχίες αποτελούνται από πολλαπλά θερμοστοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα για να αυξήσουν την ευαισθησία και την τάση εξόδου. Οι θερμοστοιχίες παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια και είναι καλύτερα προσαρμοσμένες για ακριβείς μετρήσεις της θερμοκρασίας των φύλλων. Ωστόσο, και οι δύο τύποι έχουν περιορισμούς όσον αφορά την ευαισθησία σε μικρές αλλαγές θερμοκρασίας και μπορούν να επηρεαστούν από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.
- *Πυροηλεκτρικοί αισθητήρες:* Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούν πυροηλεκτρικά υλικά που παράγουν ηλεκτρικό φορτίο ως απόκριση στις αλλαγές της θερμοκρασίας. Είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι και μπορούν να ανιχνεύσουν μικρές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, καθιστώντας τους κατάλληλους για την παρακολούθηση δυναμικών αλλαγών θερμοκρασίας στα φύλλα τριανταφυλλιάς. Ωστόσο, είναι συνήθως πιο ακριβοί και

πολύπλοκοι για την ενσωμάτωσή τους σε συστήματα γεωτεχνολογίας σε σύγκριση με άλλους τύπους αισθητήρων (Dehbi et al., 2017).

- *Βολόμετρα*: Τα βολόμετρα μετρούν την ισχύ της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσω της θέρμανσης ενός υλικού με ηλεκτρική αντίσταση που εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα και ικανά να ανιχνεύουν πολύ μικρές αλλαγές θερμοκρασίας, καθιστώντας τα ιδανικά για ακριβή παρακολούθηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, είναι συνήθως πιο περίπλοκα και ακριβά και η απόδοσή τους μπορεί να επηρεαστεί από αλλαγές στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, απαιτώντας μηχανισμούς αντιστάθμισης.
- *Κάμερες θερμικής απεικόνισης*: Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούν συστοιχίες αισθητήρων υπέρυθρων για τη δημιουργία λεπτομερών θερμικών εικόνων, παρέχοντας ολοκληρωμένους χάρτες θερμοκρασίας των φύλλων και του περιβάλλοντος. Οι κάμερες θερμικής απεικόνισης προσφέρουν υψηλή χωρική ανάλυση και δυνατότητα παρακολούθησης μεγάλων περιοχών ταυτόχρονα, καθιστώντας τις εξαιρετικά αποτελεσματικές για λεπτομερείς αναλύσεις και εφαρμογές έρευνας. Ωστόσο, απαιτούν εξελιγμένο λογισμικό και υλικό για την ανάλυση δεδομένων (Dehbi et al., 2017).
- *Αισθητήρες υπέρυθρων οπτικών ινών*: Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούν οπτικές ίνες για τη μετάδοση υπέρυθρης ακτινοβολίας από το σημείο μέτρησης σε έναν απομακρυσμένο ανιχνευτή. Οι αισθητήρες αυτοί είναι εξαιρετικά ευέλικτοι και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δύσκολα περιβάλλοντα όπου η άμεση πρόσβαση στα φύλλα είναι περιορισμένη. Παρέχουν υψηλή ακρίβεια και μπορούν να ενσωματωθούν σε αυτοματοποιημένα συστήματα παρακολούθησης. Το κύριο μειονέκτημα είναι το κόστος τους και η πολυπλοκότητα εγκατάστασης και συντήρησης.
- *Αισθητήρες υπέρυθρων μη διασποράς (NDIR)*: Οι αισθητήρες NDIR χρησιμοποιούν μια πηγή υπέρυθρων, οπτικά φίλτρα και ανιχνευτές για τη μέτρηση συγκεκριμένων μηκών κύματος υπέρυθρης ακτινοβολίας που απορροφάται από αέρια. Ενώ χρησιμοποιούνται κυρίως για ανίχνευση αερίων, μπορούν να προσαρμοστούν για τη μέτρηση της θερμοκρασίας

αναλύοντας τα χαρακτηριστικά απορρόφησης IR της επιφάνειας του φύλλου. Προσφέρουν υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία, αλλά είναι πιο περίπλοκα και ακριβά σε σύγκριση με απλούστερους αισθητήρες (Dehbi et al., 2017).

Σε μια συγκριτική ανάλυση, αρκετοί παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον προσδιορισμό της καταλληλότερης τεχνολογίας αισθητήρα για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας των φύλλων (Dehbi et al., 2017):

- *Ακρίβεια και ευαισθησία:* Η ακρίβεια και η ευαισθησία του αισθητήρα είναι πρωταρχικής σημασίας για τη διασφάλιση ακριβών μετρήσεων θερμοκρασίας. Προτιμώνται αισθητήρες με μεγαλύτερη ακρίβεια και ευαισθησία για λεπτομερείς φυσιολογικές μελέτες και βέλτιστη διαχείριση θερμοκρασίας.
- *Χρόνος απόκρισης:* Η ταχύτητα με την οποία ο αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει και να αναφέρει αλλαγές θερμοκρασίας είναι ζωτικής σημασίας, ειδικά σε δυναμικά περιβάλλοντα όπου μπορεί να συμβούν γρήγορες διακυμάνσεις θερμοκρασίας. Οι γρήγοροι χρόνοι απόκρισης επιτρέπουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και τις έγκαιρες προσαρμογές των περιβαλλοντικών ελέγχων.
- *Περιβαλλοντική ευρωστία:* Οι αισθητήρες πρέπει να είναι σε θέση να αντέχουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες που υπάρχουν σε ανθοκομικά περιβάλλοντα, όπως η υγρασία, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και η πιθανή έκθεση σε νερό και χημικές ουσίες. Οι στιβαροί αισθητήρες μειώνουν την ανάγκη για συχνή συντήρηση και αντικατάσταση.
- *Κόστος και Ευκολία Ενσωμάτωσης:* Το κόστος του αισθητήρα και η ευκολία ενσωμάτωσής του σε υπάρχοντα συστήματα είναι σημαντικά πρακτικά ζητήματα. Ενώ οι πιο προηγμένοι αισθητήρες προσφέρουν μεγαλύτερες δυνατότητες, ενδέχεται επίσης να απαιτούν σημαντικές επενδύσεις και τεχνική τεχνογνωσία για την εφαρμογή και τη συντήρηση.
- *Χωρική Ανάλυση:* Για εφαρμογές που απαιτούν λεπτομερή χαρτογράφηση θερμοκρασίας, όπως κάμερες θερμικής απεικόνισης, η υψηλή χωρική ανάλυση είναι κρίσιμη. Αυτό επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας σε όλη την επιφάνεια του φύλλου και μπορεί να ενημερώσει στοχευμένες παρεμβάσεις (Dehbi et al., 2017).

- *Δυνατότητες ανάλυσης δεδομένων:* Η ικανότητα ανάλυσης και ερμηνείας δεδομένων αισθητήρων είναι απαραίτητη για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Οι αισθητήρες που ενσωματώνονται με προηγμένες πλατφόρμες ανάλυσης δεδομένων και παρέχουν φιλικές προς το χρήστη διεπαφές ενισχύουν τη συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος παρακολούθησης θερμοκρασίας.
- *Ενεργειακή απόδοση:* Οι ενεργειακά αποδοτικοί αισθητήρες μειώνουν το λειτουργικό κόστος και είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για μεγάλης κλίμακας εργασίες ανθοκομίας. Οι αισθητήρες που καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια συμβάλλουν σε πιο βιώσιμες πρακτικές.
- *Μακροζωία και αξιοπιστία:* Η μακροπρόθεσμη αξιοπιστία και ανθεκτικότητα του αισθητήρα επηρεάζει τη συνολική του σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας. Αισθητήρες υψηλής ποιότητας που προσφέρουν σταθερή απόδοση με την πάροδο του χρόνου παρέχουν καλύτερη αξία και μειώνουν την ανάγκη για συχνές αντικαταστάσεις (Dehbi et al., 2017).

Η επιλογή της πιο κατάλληλης τεχνολογίας για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας των φύλλων περιλαμβάνει ακρίβεια εξισορρόπησης, ευαισθησία, χρόνο απόκρισης, περιβαλλοντική ευρωστία, κόστος και ευκολία ενσωμάτωσης. Με την προσεκτική εξέταση αυτών των παραγόντων, οι καλλιεργητές και οι ερευνητές είναι σε θέση βελτιστοποιήσουν τα συστήματα παρακολούθησης της θερμοκρασίας τους, διασφαλίζοντας υγιή ανάπτυξη και μεγιστοποιώντας την παραγωγικότητα των φυτών τριανταφυλλιάς. Οι προηγμένες τεχνολογίες, όπως οι κάμερες θερμικής απεικόνισης και οι αισθητήρες οπτικών ινών, προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα για λεπτομερή και ακριβή παρακολούθηση της θερμοκρασίας, συμβάλλοντας σε βελτιωμένες πρακτικές και αποτελέσματα γεωργίας (Dehbi et al., 2017).

1.10 Θεωρητικά μοντέλα δυναμικής θερμότητας σε φύλλα φυτών

Τα μοντέλα αυτά είναι απαραίτητα για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η θερμότητα μεταφέρεται και κατανέμεται μέσα στο φύλλο και πώς εξωτερικοί παράγοντες όπως ο τεχνητός φωτισμός επηρεάζουν αυτή τη διαδικασία. Αυτά τα μοντέλα ενσωματώνουν αρχές από τη φυσική, τη βιολογία και την περιβαλλοντική επιστήμη για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς των φύλλων των φυτών

υπό διάφορες συνθήκες. Για τα φύλλα, αυτά τα μοντέλα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την πρόβλεψη του τρόπου με τον οποίο οι διαφορετικές ρυθμίσεις φωτισμού επηρεάζουν τη θερμοκρασία των φύλλων και τη συνολική υγεία των φυτών (Gruda & Tanny, 2014).

- *Μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου*: Μία από τις θεμελιώδεις προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση της δυναμικής θερμότητας στα φύλλα των φυτών είναι το μοντέλο του ενεργειακού ισοζυγίου. Αυτό το μοντέλο λαμβάνει υπόψη όλες τις εισροές και εξόδους ενέργειας σε ένα φύλλο για να προσδιορίσει τη θερμοκρασία του. Τα κύρια συστατικά της εξίσωσης ενεργειακού ισοζυγίου περιλαμβάνουν:
- *Ακτινοβολία*: Η ενέργεια που απορροφάται από το ηλιακό φως ή τον τεχνητό φωτισμό και η ενέργεια που εκπέμπεται από το φύλλο ως υπέρυθρη ακτινοβολία. Η ανταλλαγή ακτινοβολίας επηρεάζεται από τις επιφανειακές ιδιότητες του φύλλου, όπως το χρώμα, την υφή και την εκπομπή.
- *Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή*: Είναι μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του φύλλου και του περιβάλλοντος αέρα. Αυτή η διαδικασία εξαρτάται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία του αέρα, η ταχύτητα του ανέμου και τα χαρακτηριστικά του οριακού στρώματος.
- *Αγωγή μεταφορά θερμότητας*: Αφορά την εσωτερική μεταφορά θερμότητας μέσα στο φύλλο από το ένα μέρος στο άλλο. Αυτό επηρεάζεται από τη δομή του φύλλου, την περιεκτικότητα σε νερό και τις θερμικές ιδιότητες.
- *Λανθάνουσα ανταλλαγή θερμότητας*: Αφορά τη θερμότητα που χάνεται λόγω της διαπνοής, όπου το νερό εξατμίζεται από την επιφάνεια του φύλλου. Οι ρυθμοί διαπνοής επηρεάζονται από τη στοματική αγωγιμότητα, την υγρασία και το δυναμικό νερού των φύλλων.

Εξισορροπώντας αυτά τα ενεργειακά συστατικά, το μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου μπορεί να προβλέψει τη θερμοκρασία σταθερής κατάστασης ενός φύλλου τριαντάφυλλου κάτω από συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες (Gruda & Tanny, 2014).

- *Μοντέλο μεταβατικής μεταφοράς θερμότητας*: Ενώ το μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου παρέχει μια λύση σταθερής κατάστασης, το μοντέλο παροδικής μεταφοράς θερμότητας υπολογίζει τις εξαρτώμενες από το χρόνο αλλαγές στη

θερμοκρασία των φύλλων. Αυτό το μοντέλο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα φύλλα της τριανταφυλλιάς ανταποκρίνονται σε γρήγορες αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η κυμαινόμενη ένταση φωτός ή θερμοκρασία. Το μεταβατικό μοντέλο χρησιμοποιεί διαφορικές εξισώσεις για να περιγράψει τον ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας των φύλλων με την πάροδο του χρόνου, ενσωματώνοντας τις ίδιες ενεργειακές συνιστώσες με το μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου αλλά προσθέτοντας μια χρονική διάσταση (Yaghi, 2019).

- *Μοντέλο πολυστρωματικών φύλλων:* Αυτό το μοντέλο χωρίζει το φύλλο σε πολλαπλά στρώματα, το καθένα με ξεχωριστές θερμικές ιδιότητες. Παρέχει μια πιο λεπτομερή αναπαράσταση της μεταφοράς θερμότητας μέσα στο φύλλο, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές μεταξύ της επιδερμίδας, της μεσόφυλλης και των αγγειακών ιστών. Το μοντέλο πολλαπλών στρωμάτων μπορεί να καταγράψει διακυμάνσεις της θερμοκρασίας σε διαφορετικά στρώματα φύλλων και είναι χρήσιμο για τη μελέτη της εσωτερικής κατανομής θερμότητας και των επιπτώσεών της σε φυσιολογικές διαδικασίες όπως η φωτοσύνθεση και η αναπνοή.
- *Μοντέλο στοματικής αγωγιμότητας:* Η στοματική αγωγιμότητα παίζει κρίσιμο ρόλο στη ρύθμιση της θερμοκρασίας των φύλλων ελέγχοντας τους ρυθμούς διαπνοής. Το μοντέλο στοματικής αγωγιμότητας ενσωματώνει φυσιολογικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες για να προβλέψει το άνοιγμα και το κλείσιμο των στομάτων. Παράγοντες όπως η ένταση φωτός, η συγκέντρωση CO₂, η υγρασία και η κατάσταση του νερού των φύλλων επηρεάζουν τη συμπεριφορά του στομάτου. Συνδέοντας τη στοματική αγωγιμότητα με τη δυναμική της θερμότητας, αυτό το μοντέλο βοηθά να κατανοήσουμε πώς τα φύλλα τριαντάφυλλου διαχειρίζονται το θερμικό στρες και διατηρούν τη θερμική ισορροπία.
- *Μοντέλο Θερμικής Απεικόνισης:* Η Θερμική Απεικόνιση παρέχει μια πρακτική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση της δυναμικής θερμότητας καταγράφοντας τις χωρικές κατανομές θερμοκρασίας στην επιφάνεια του φύλλου. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιεί δεδομένα από θερμικές κάμερες για να επικυρώσει θεωρητικές προβλέψεις και να βελτιώσει τα μοντέλα. Η θερμική απεικόνιση βοηθά στον εντοπισμό των hotspot, των περιοχών με ανομοιόμορφη θέρμανση

και των επιπτώσεων διαφορετικών διαμορφώσεων φωτισμού στη θερμοκρασία των φύλλων. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για μελέτες μεγάλης κλίμακας όπου απαιτείται λεπτομερής χαρτογράφηση θερμοκρασίας (Yaghi, 2019).

- *Μοντέλο συνδεδεμένης μεταφοράς θερμότητας και μάζας:* Αυτό το ολοκληρωμένο μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας και μάζας εντός του φύλλου. Ενσωματώνει τη θερμική αγωγή, τη μεταφορά, την ακτινοβολία και τη διαπνοή, καθώς και την κίνηση του νερού και των θρεπτικών ουσιών. Αυτή η συνδυασμένη προσέγγιση είναι απαραίτητη για την κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της θερμικής δυναμικής και των φυσιολογικών διεργασιών, παρέχοντας μια ολιστική άποψη για το πώς τα φύλλα της τριανταφυλλιάς ανταποκρίνονται στις περιβαλλοντικές αλλαγές (Yaghi, 2019).
- *Μοντέλα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD):* Τα μοντέλα CFD προσομοιώνουν τη ροή αέρα γύρω από το φύλλο και τον αντίκτυπό της στη μεταφορά θερμότητας. Αυτά τα μοντέλα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για τη μελέτη των επιπτώσεων του αερισμού και των μοτίβων ροής αέρα σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα, όπως τα θερμοκήπια. Τα μοντέλα CFD μπορούν να προβλέψουν πώς οι διαφορετικές στρατηγικές αερισμού επηρεάζουν τη θερμοκρασία των φύλλων και βοηθούν στο σχεδιασμό συστημάτων για τη βελτιστοποίηση της ψύξης με συναγωγή.

Τα θεωρητικά αυτά μοντέλα έχουν αρκετές πρακτικές εφαρμογές. Βοηθούν στο σχεδιασμό βέλτιστων συστημάτων φωτισμού που ελαχιστοποιούν το θερμικό στρες, βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση και ενισχύουν την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των φυτών. Αυτά τα μοντέλα βοηθούν επίσης στην ανάπτυξη στρατηγικών ελέγχου του κλίματος στα θερμοκήπια, διασφαλίζοντας ότι η θερμοκρασία και η υγρασία διατηρούνται εντός των βέλτιστων ορίων για την καλλιέργεια φυτών.

Επιπλέον, αυτά τα μοντέλα συμβάλλουν στην κατανόηση της απόκρισης των φυτών στην κλιματική αλλαγή. Προσομοιώνοντας πώς αντιδρούν τα φύλλα της τριανταφυλλιάς σε διαφορετικές θερμοκρασίες και συνθήκες φωτός, οι ερευνητές μπορούν να προβλέψουν πώς αυτά τα φυτά θα μπορούσαν να προσαρμοστούν στις μελλοντικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτή η γνώση είναι ζωτικής σημασίας για την

αναπαραγωγή ποικιλιών τριαντάφυλλων ανθεκτικών στη θερμότητα και την ανάπτυξη βιώσιμων κηπευτικών πρακτικών (Yaghi, 2019).

- *Στρατηγικές Περιβαλλοντικού Ελέγχου:* Χρησιμοποιώντας θεωρητικά μοντέλα δυναμικής θερμότητας, οι καλλιεργητές έχουν την ευχέρεια να αναπτύξουν και να εφαρμόσουν αποτελεσματικές στρατηγικές περιβαλλοντικού ελέγχου. Για παράδειγμα, η κατανόηση των λεπτομερών διαδικασιών μεταφοράς θερμότητας επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των συνθηκών του θερμοκηπίου, όπως ο φωτισμός, ο εξαερισμός και ο έλεγχος της υγρασίας. Με την προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων, οι καλλιεργητές προβλέπουν τον αντίκτυπο διαφόρων περιβαλλοντικών παραμέτρων στη θερμοκρασία των φύλλων τριανταφυλλιάς και να προσαρμόσουν τις πρακτικές τους ανάλογα για να διατηρήσουν τις βέλτιστες συνθήκες καλλιέργειας.
- *Βελτιστοποίηση του τεχνητού φωτισμού:* Ο τεχνητός φωτισμός είναι ένας κρίσιμος παράγοντας στη γεωργία ελεγχόμενου περιβάλλοντος, ειδικά για την καλλιέργεια φυτών όπως η τριανταφυλλιά. Τα θεωρητικά μοντέλα βοηθούν στον προσδιορισμό των καταλληλότερων τύπων, εντάσεων και διαρκειών φωτισμού για την ελαχιστοποίηση της θερμικής καταπόνησης μεγιστοποιώντας παράλληλα τη φωτοσυνθετική απόδοση. Για παράδειγμα, τα μοντέλα μπορούν να συγκρίνουν την απόδοση θερμότητας διαφορετικών τεχνολογιών φωτισμού όπως LED, HID και φώτα φθορισμού, καθοδηγώντας την επιλογή συστημάτων φωτισμού που παρέχουν επαρκή φωτισμό με ελάχιστο θερμικό φορτίο.
- *Μετριασμός του θερμικού στρες:* Το θερμικό στρες μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την υγεία και την παραγωγικότητα των τριαντάφυλλων. Χρησιμοποιώντας θεωρητικά μοντέλα, οι ερευνητές και οι καλλιεργητές εντοπίζουν τις συνθήκες που οδηγούν σε θερμικό στρες και να αναπτύξουν στρατηγικές για τον μετριασμό των επιπτώσεών του. Αυτές οι στρατηγικές μπορεί να περιλαμβάνουν την προσαρμογή της τοποθέτησης και του προσανατολισμού των φώτων, τη βελτίωση της κυκλοφορίας του αέρα με ανεμιστήρες ή φυσικό αερισμό και τη χρήση τεχνικών σκίασης για τη μείωση του άμεσου θερμικού φορτίου ακτινοβολίας στα φύλλα.

- *Γεωργία Ακριβείας:* Η ενοποίηση θεωρητικών μοντέλων με τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας επιτρέπει την πιο στοχευμένη και αποτελεσματική χρήση των πόρων. Οι αισθητήρες και τα εργαλεία ανάλυσης δεδομένων μπορούν να παρακολουθούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις θερμοκρασίες των φύλλων σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας εισόδους στα μοντέλα για συνεχή βελτιστοποίηση. Αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει ότι πόροι όπως το φως, το νερό και τα θρεπτικά συστατικά χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά, προωθώντας τη βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική καλλιέργεια τριανταφυλλιάς.
- *Επιλογή για ανοχή στη θερμότητα:* Τα θεωρητικά μοντέλα διαδραματίζουν επίσης κρίσιμο ρόλο σε προγράμματα αναπαραγωγής που στοχεύουν στην ανάπτυξη ανθεκτικών στη θερμότητα ποικιλιών τριανταφυλλιάς. Με την προσομοίωση της απόκρισης διαφορετικών γονότυπων σε διαφορετικές θερμικές συνθήκες, οι παραγωγοί μπορούν να αναγνωρίσουν χαρακτηριστικά που σχετίζονται με βελτιωμένη ανοχή στη θερμότητα. Αυτές οι πληροφορίες καθοδηγούν την επιλογή των μητρικών φυτών και την αξιολόγηση των απογόνων, επιταχύνοντας την ανάπτυξη εύρωστων ποικιλιών τριαντάφυλλων ικανών να ευδοκιμήσουν σε διαφορετικά κλίματα.
- *Εκπαίδευση και Έρευνα:* Τα θεωρητικά μοντέλα δυναμικής θερμότητας είναι πολύτιμα εκπαιδευτικά εργαλεία για μαθητές και ερευνητές στη φυτοεπιστήμη και την γεωργία. Παρέχουν ένα πλαίσιο για την κατανόηση πολύπλοκων φυσιολογικών διεργασιών και τις αλληλεπιδράσεις τους με το περιβάλλον. Με την ενσωμάτωση αυτών των μοντέλων σε προγράμματα σπουδών και ερευνητικά έργα, τα εκπαιδευτικά ιδρύματα είναι σε θέση να προωθήσουν μια βαθύτερη κατανόηση των αλληλεπιδράσεων φυτού-περιβάλλοντος και να προωθήσουν το πεδίο της επιστήμης της ανθοκομίας.
- *Προηγμένες τεχνικές μοντελοποίησης:* Καθώς η υπολογιστική ισχύς και οι τεχνικές μοντελοποίησης συνεχίζουν να προχωρούν, μπορούν να αναπτυχθούν πιο εξελιγμένα μοντέλα. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να ενσωματώσουν πρόσθετες μεταβλητές όπως γενετικούς παράγοντες, ηλικία φυτών και αναπτυξιακό στάδιο, παρέχοντας ακόμη πιο ακριβείς και ολοκληρωμένες γνώσεις. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης και η τεχνητή

νοημοσύνη μπορούν να βελτιώσουν περαιτέρω τις προγνωστικές δυνατότητες αυτών των μοντέλων, επιτρέποντας πιο ακριβείς και δυναμικές προσομοιώσεις.

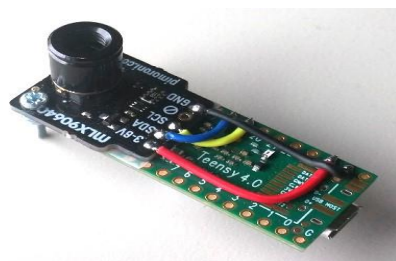
- *Ενοποίηση με το IoT και την Έξυπνη Γεωργία:* Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και οι τεχνολογίες έξυπνης γεωργίας μεταμορφώνουν την ανθοκομία παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου. Τα θεωρητικά μοντέλα μπορούν να ενσωματωθούν με δίκτυα IoT, όπου οι αισθητήρες συλλέγουν συνεχώς δεδομένα για τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις θερμοκρασίες των φύλλων. Αυτά τα δεδομένα τροφοδοτούνται στα μοντέλα, τα οποία στη συνέχεια παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες και σήματα ελέγχου στα αυτοματοποιημένα συστήματα. Για παράδειγμα, εάν το μοντέλο προβλέπει ένα επικείμενο συμβάν θερμικής καταπόνησης, μπορεί να ενεργοποιήσει προσαρμογές στα συστήματα φωτισμού, εξαερισμού ή άρδευσης για να μετριαστεί η επίδραση.

Στο σύνολό τους, τα θεωρητικά μοντέλα δυναμικής θερμότητας σε φύλλα τριαντάφυλλου παρέχουν πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τις πολύπλοκες διαδικασίες που διέπουν τη θερμοκρασία των φύλλων και την υγεία των φυτών. Με την ενσωμάτωση των αρχών του ενεργειακού ισοζυγίου, της παροδικής μεταφοράς θερμότητας, της πολυστρωματικής δομής, της στοματικής αγωγιμότητας, της θερμικής απεικόνισης, της συνδυασμένης μεταφοράς θερμότητας και μάζας και της υπολογιστικής δυναμικής των ρευστών, αυτά τα μοντέλα προσφέρουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη μελέτη και τη βελτιστοποίηση του θερμικού περιβάλλοντος των φυτών τριανταφυλλιάς.

2. Υλικά και Μέθοδοι

2.1 Σύστημα θερμομέτρησης με κάμερα τύπου Infrared

Θερμική κάμερα MLX90640 Standard (55°) (Pimoroni, Ηνωμένο Βασίλειο) χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος (Εικόνα 1). Είναι εξοπλισμένη με 32x24 αισθητήρες, που ανιχνεύουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στα μήκη κύματος του άπω υπέρυθρου (Far Infrared) / θερμικού υπέρυθρου. Με την ανίχνευση και την καταγραφή της υπέρυθρης ακτινοβολίας υπολογίζεται η επιφανειακή θερμοκρασία ενός αντικειμένου σε βαθμούς Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$) με εύρος θερμοκρασιών $-40^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$ και σφάλμα απόκλισης $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Απαραίτητη η σύνδεσή της με επεξεργαστή, ώστε να επιτευχθεί η προβολή και η κατεργασία των θερμοκρασιακών δεδομένων. Χρησιμοποιήθηκε ο μικροεπεξεργαστής (microcontroller) Teensy 4.0, καθώς είναι συμβατός με Arduino και επιτρέπει τον προγραμματισμό της θερμικής κάμερας. Στο σύστημα προστέθηκε και κάμερα RGB (Red, Green, and Blue μήκη κύματος), η Tyro Full HD Webcam (64°) (Trust, Ηνωμένο Βασίλειο), για να φωτογραφηθεί και το σώμα που υπόκειται σε θερμομέτρηση. Η κάμερα RGB και ο μικροεπεξεργαστής, συνδέθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με θύρα USB (Εικόνα 2).



Εικ.1 Κάμερα MLX 90640 συνδεδεμένη με τον μικροεπεξεργαστή teensy.

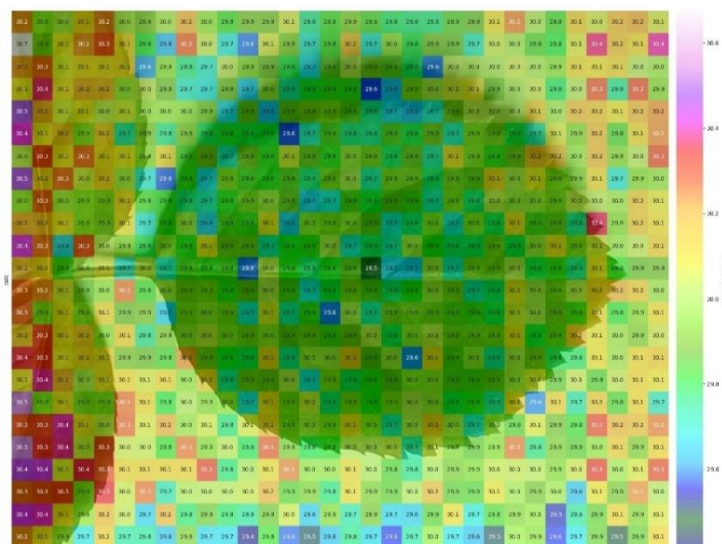


Εικόνα 2. Σύστημα καταγραφής και προβολής της θερμομέτρησης

2.2 Λογισμικό της κάμερας τύπου RGB και Infrared

Το ανοιχτού τύπου περιβάλλον ανάπτυξης Visual Studio και η προγραμματιστική γλώσσα Python χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη πρότυπου προγράμματος για την συλλογή, καταγραφή και προβολή των δεδομένων. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στην εισαγωγή και αποθήκευση των δεδομένων της θερμικής κάμερας στον μικροεπεξεργαστή. Τα μετατρέπει από τιμές σε σειρά (string), σε λίστα τιμών (list) και η τελική μορφή είναι πλέγμα (dataframe) που αποτελείται από 32 στήλες και από 24 γραμμές. Περιλαμβάνει 768 τιμές θερμοκρασίας λαμβανόμενες από θερμική κάμερα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται 6 φορές, η θερμική κάμερα θα θερμομετρήσει και το πρόγραμμα θα μετατρέψει τα δεδομένα σε πλέγμα τιμών. Δημιουργήθηκαν 6 πλέγματα και το πρόγραμμα βρίσκει το μέσο όρο από τις 6 τιμές για κάθε pixel του πλέγματος και δημιουργεί νέο πλέγμα μόνο με τους μέσους όρους των θερμοκρασιών. Σκοπός είναι να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στην μαθητική αποτύπωση των τιμών μέσω των πολλαπλών μετρήσεων. Η RGB κάμερα φωτογραφίζει τη θερμομετρούμενη επιφάνεια. Συνδυάζοντας τις τιμές θερμοκρασίας και την πραγματική εικόνα του εξεταζόμενου αντικειμένου, δημιουργείται ένας θερμικός χάρτης, ένα ψηφιδωτό έγχρωμων pixel με θερμοκρασίες ώστε να γίνεται πιο εύκολη η διάκριση θερμών και ψυχρών περιοχών. Κάθε απόχρωση των pixels δηλώνει την θερμοκρασία τους (Εικόνα 3). Η θερμή περιοχή, αντιπροσωπεύεται με pixels διαβαθμιζόμενου κίτρινου χρώματος ενώ των πιο ψυχρών περιοχών με μπλε διαβάθμιση. Κατά το τελικό στάδιο, το πρόγραμμα συνδυάζει το πλέγμα των μέσων θερμικών τιμών με την πραγματική εικόνα ώστε ο χειριστής να έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίσει την θερμοκρασία από κάθε σημείο της εξεταζόμενης επιφάνειας. Ο προκύπτουν θερμικός χάρτης τοποθετείται

πάνω στην εικόνα και στο πλέγμα τιμών για να διακρίνεται η θερμότητα κάθε σημείου με βάση το χρώμα. Το παραγόμενο αποτέλεσμα ανάγνωσης αποτελείται από μια συνδυαστική εικόνα της φωτογραφίας των χρωμάτων RGB (κόκκινο, πράσινο και μπλε), το θερμοκρασιακό πλέγμα και τον θερμικό χάρτη.



Εικόνα 3. Απεικόνιση θερμοκρασίας με pixels

2.3 Τριγωνομετρικές συναρτήσεις για τη συνδυαστική λειτουργία των 2 τύπου κάμερας (RGB και Infrared)

Για την επίτευξη της επιθυμητής εστίασης στο ίδιο πλαίσιο, οι κάμερες απείχαν μια υψομετρική διαφορά (D_h) μεταξύ τους, καθώς η θερμική κάμερα έχει οπτική γωνία λήψης 55° και η RGB κάμερα έχει 64° . Για να καταγράψουν και οι δύο κάμερες επιφάνεια με την οριζόντια αξονικά πλευρά χ , θα πρέπει η RGB κάμερα να έχει ένα ύψος h_{RGB} και η θερμική κάμερα να βρίσκεται D_h πιο πάνω (Εικόνα 4). Βάση Τριγωνομετρικής θεωρίας, η εφαπτομένη μιας γωνίας ενός ορθογώνιου τριγώνου ορίζεται ως ο λόγος της απέναντι πλευράς της με την προσκείμενη πλευρά της γωνίας αυτής. Η κάθετη ευθεία που περνάει από τα κέντρα των φακών των δυο καμερών, χωρίζει τα οπτικά πεδία των καμερών στα δυο και δημιουργεί δυο ίδια ορθογώνια τρίγωνα (Εικόνα 5). Εφαρμόζοντας τη τριγωνομετρική συνάρτηση της εφαπτομένης στο μισό των οπτικών γωνιών 64° και 55° που έχουν την ίδια απέναντι πλευρά, δηλαδή

το μισό της οριζόντιας πλευράς της επιφάνειας καταγραφής, μπορεί να βρεθεί η κάθετη απόσταση Dh που πρέπει να έχουν οι κάμερες για να καταγράψουν την ίδια επιφάνεια.

Θερμική: $\tan(55^\circ/2) = x/(h_{RGB} + Dh) \Rightarrow h_{RGB} + Dh = x/\tan(27,5^\circ) \Rightarrow$

$$Dh = x/\tan(27,5^\circ) - h_{RGB} \quad (1)$$

RGB: $\tan(64^\circ/2) = x/h_{RGB} \Rightarrow h_{RGB} = x/\tan(32^\circ) \quad (2)$

Άρα χρησιμοποιώντας την (2) στην (1) και λύνοντας προς Dh βγαίνει η εξίσωση:

$$Dh = x/\tan(27,5^\circ) - x/\tan(32^\circ)$$

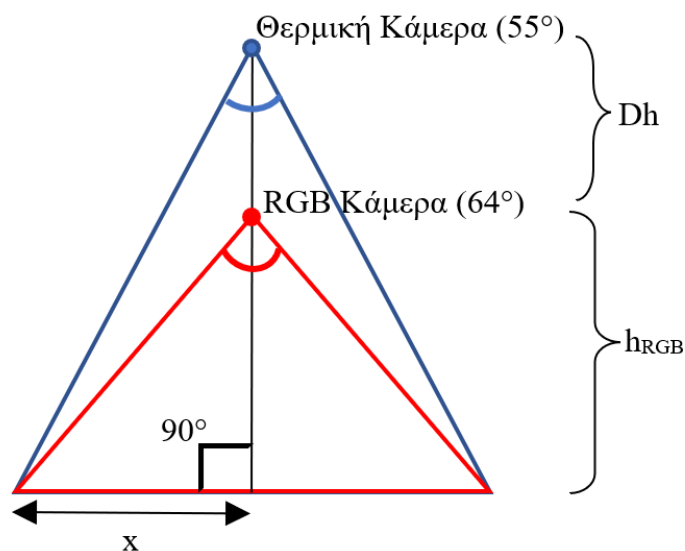
Επομένως, για να βρίσκεται η σωστή απόσταση που πρέπει να έχουν οι κάμερες, πρέπει να μετριέται το μισό της απόστασης της οριζόντιας πλευράς της επιφάνειας καταγραφής. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση της κάμερας RGB.

Όμως, από τη (2) $\Rightarrow x = h_{RGB} * (\tan 32^\circ) \quad (3)$

Χρησιμοποιώντας την (3) στην (1) βγαίνει η εξίσωση:

$$Dh = \{[h_{RGB} * \tan(32^\circ)]/\tan(27,5^\circ)\} - h_{RGB}$$

Οπότε σε αυτή τη περίπτωση μπορεί να βρεθεί η μεταξύ τους απόσταση μετρώντας το ύψος της κάμερας RGB κάθε φορά (Πίνακας)

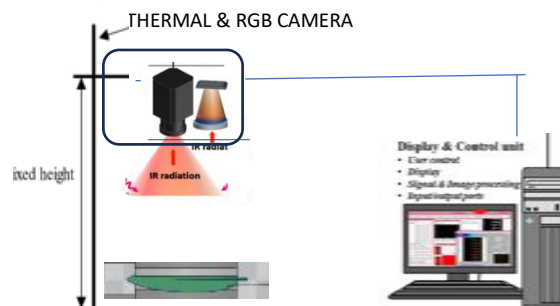


Εικόνα 5. Σχεδιάγραμμα Καμερών με διαστήματα Dh , h_{RGB} και x

HRGB (CM)	X (CM)	DH (CM)
5,00	3,12	1,00
10,00	6,25	2,00
15,00	9,37	3,01
20,00	12,50	4,01
50,00	31,24	10,02
100,00	62,49	20,04

Πίνακας 1. Τιμές Dh για διάφορα ύψη και μήκη χ

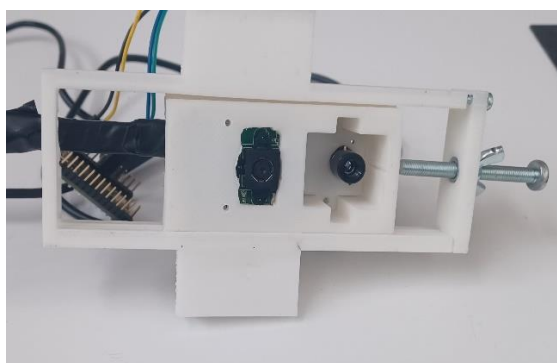
2.4 Σχεδιασμός της σταθερής βάσης προσαρμογής του συστήματος φωτογράφισης



Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος.

Οι κάμερες τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις για την εύρυθμη λειτουργία τους. Ο σχεδιασμός εκτελέστηκε χρησιμοποιώντας το Fusion 360 και ακολούθησε η τρισδιάστατη εκτύπωση. Σχεδιάστηκαν δυο εσοχές τοποθέτησης των καμερών (Εικόνα 4) και ένας επιπλέον μηχανισμός για την θερμική για την κάθετη αυξομείωση της απόστασής της από την RGB κάμερα (Dh), ώστε οι δυο κάμερες να έχουν το ίδιο οπτικό πεδίο. Η πλήρης μετακίνηση του συστήματος στη βάση επί του οριζόντιου άξονα θα

πρέπει να είναι σε μήκος τόση όσο και η απόσταση των δυο φακών των καμερών μεταξύ τους και έτσι να καταγράφουν μια επιφάνεια από το ακριβώς ίδιο σημείο. Αυτή η μετακίνηση θα πρέπει να γίνεται από τον χρήστη για κάθε μέτρηση. Έτσι αυτή η βάση επιτρέπει δυο κινήσεις: τη μετακίνηση της θερμικής κάμερας στον κάθετο άξονα και τη μετακίνηση του συστήματος με τις δυο καμερών στον οριζόντιο άξονα.

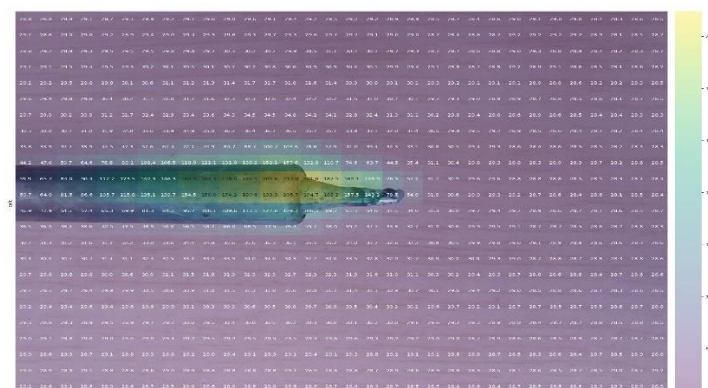


Εικόνα 4. Η βάση με τις δυο κάμερες.

2.5 Ρύθμιση και βαθμονόμηση καμερών τύπου RGB και Infrared

Η σταθερή βάση με το μηχανισμό μετακίνησης των δυο καμερών στον οριζόντιο άξονα δίνει τη δυνατότητα καταγραφής του ίδιου οπτικού πεδίου και διευκολύνει τις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Ο έλεγχος ακρίβειας των μετρήσεων διαπιστώθηκε μέσω δοκιμών με αντικείμενα αυξημένης θερμότητας. Χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρικό κολλητήρι για τον έλεγχο της ακρίβειας του συστήματος των καμερών, διότι παρέχει μια πολύ υψηλή αλλά και σημειακή τιμή θερμοκρασίας. Να σημειωθεί πως είναι γνωστό από τους χειριστές πως το σημείο του ηλεκτρικού κολλητηριού (Εικόνα 5) που έχει τη μεγαλύτερη θερμοκρασία είναι αυτό πριν την άκρη του εξαρτήματος και αυτή καθ' αυτή, γεγονός που επιβεβαιώνει το αποτέλεσμα της θερμομέτρησής του. Έτσι, με τη θερμομέτρησή του ηλεκτρικού κολλητηριού επιτεύχθηκε η βαθμονόμηση του. Με τη θερμομέτρησή του ηλεκτρικού κολλητηριού ρυθμιζόταν, πριν από τις μετρήσεις διαφορετικών σωμάτων, η υψομετρική διαφορά της κάμερας RGB με την κάμερα

Infrared (Dh), καθώς και το εύρος κίνησης του συστήματος των καμερών RGB και Infrared στον οριζόντιο άξονα.



Εικόνα 5. Έλεγχος ακρίβειας συστήματος με το κολλητήρι.

Τα αντικείμενα που θερμομετρούνται από τις κάμερες RGB και Infrared τοποθετούνται σε κεντρική θέση στο οπτικό πεδίο τους. Όσο πιο κοντά στα όρια του οπτικού πεδίου βρίσκεται το αντικείμενο, τόσο μικρότερη θα είναι η ακρίβεια της θερμικής εικόνας. Οι παραμορφώσεις αυτές αναγράφονται και από τον κατασκευαστή της κάμερας Infrared (www.melexis.com).

2.6 Θερμομέτρηση φύλλων με τις κάμερες RGB και Infrared

Η χρήση του συστήματος των καμερών στοχεύει στη θερμομέτρηση των φύλλων τριανταφυλλιάς. Πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα για την αξιολόγηση του σφάλματος μέτρησης της θερμοκρασίας φύλλων με χρήση IR αισθητήρων. Αυτό έγινε για δύο λόγους, πρώτον για το εάν υπάρχει οποιαδήποτε διακύμανση στην ακρίβεια μέτρησης της θερμοκρασίας με διαφορετικές πηγές φωτισμού και δεύτερον οποιοδήποτε σφάλμα θα είναι περισσότερο παρατηρήσιμο στα υπό εξέταση πεδία παρουσία φως και σκοτάδι. Τα πειράματα έλαβαν χώρα στις 26 και 31/7/2023 αντίστοιχα στο εργαστήριο ανθοκομίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, καθώς και στις 2/8/2023 στο θερμοκήπιο που βρίσκεται στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή Βελεστίνου, Μαγνησίας (39ο2' Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος, 22ο45' Ανατολικό Γεωγραφικό Μήκος) και σε υψόμετρο 70m από την επιφάνεια της θάλασσας.

Οι μετρήσεις στο χώρο του εργαστηρίου πραγματοποιήθηκαν πρωινές ώρες μεταξύ 10:00 με 12:00 π.μ. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος του εργαστηρίου στο οποίο διεξήχθη δεν ελέγχθηκε ενεργά, θεωρήθηκε κατά προσέγγιση ότι ήταν στους 25 °C όπως συνήθως είναι τέτοια εποχή. Τα φύλλα αφού επιλέχθηκαν, αποσπάστηκαν από το φυτό μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο Ανθοκομίας. Τα σύνθετα φυλλάρια που συλλέχθηκαν ήτο εύρωστα, απαλλαγμένα από μυκητολογικές ασθένειες, έχοντας όλα τα κύτταρα σε σπαργή.



Εικόνα 6. Μέτρηση φύλλων τριανταφυλλιάς στο εργαστήριο.

Αρχικά ελήφθησαν μετρήσεις φύλλων υπό δύο συνθήκες, με τον υπάρχον φωτισμό οροφής του εργαστηρίου όπου αποτελείται από λαμπτήρες φθορισμού και στο σκοτάδι (Εικόνα 6). Η διαδικασία περιλάμβανε απλά άνοιγμα και κλείσιμο του διακόπτη της αίθουσας του εργαστηρίου. Επιπλέον, ελήφθησαν μετρήσεις σε νέα αποσπασμένα υγιή φυλλάρια υπό δύο συνθήκες, με φωτισμό παραγόμενο από λαμπτήρα γραφείου LED (Εικόνα 7) και υπό απόλυτο σκοτάδι. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για κάθε συνθήκη δύο φορές, ως επανάληψη.



Εικόνα 7. Μέτρηση με λαμπτήρα LED.

Τέλος, η θερμομέτρηση στο χώρο του θερμοκηπίου πραγματοποιήθηκε μεταξύ 10:00 π.μ. με 12:00 π.μ. όπου η θερμοκρασία του χώρου ήταν περίπου 40 °C με σχετική υγρασία 75% (Εικόνα7). Η επιλογή των φύλλων ήταν τυχαία όσον αφορά την θέση του επάνω στο φυτό.



Εικόνα 8. Μέτρηση φύλλων τριανταφυλλιάς στο θερμοκήπιο

3. Αποτελέσματα - Συζήτηση

3.1 Πειραματικά αποτελέσματα των θερμομετρήσεων στο Εργαστήριο

Στο χώρο του εργαστηρίου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας, σε 11 φύλλα, υπό το φωτισμό του χώρου του εργαστηρίου από λαμπτήρες φθορισμού και υπό απόλυτο σκοτάδι με άνοιγμα και κλείσιμο του διακόπτη. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν σε συνεχή ροή χωρίς χρόνο εγκλιματισμού στις συνθήκες δηλαδή του φωτός και του σκοταδιού.

Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του συστήματος οι τιμές θερμοκρασίας του κάθε φύλλου οργανώθηκαν σε μια βάση δεδομένων σε μορφή excel. Έπειτα από τις 768 τιμές θερμοκρασίας που μας δίδεται από το πρότυπο πρόγραμμα επιλέχθηκαν οι τιμές εκείνες που βρίσκονται στο μέσο του φύλλου όπως περιγράφεται παρακάτω. Στη συνέχεια εξήχθησαν σε νέο υπολογιστικό φύλλο excel όπου υπολογίστηκαν τα εξής: α) αρχικά υπολογίστηκε η διαφορά των θερμοκρασιών που ελήφθησαν υπό φως και σκοτάδι για κάθε μια τιμή θερμοκρασίας πλέγματος. β) στη συνέχεια βρέθηκε ο Μ.Ο. των θερμοκρασιών τόσο της μέτρησης στο φως όσο και στο σκοτάδι καθώς και η διαφορά των Μ.Ο. γ) Έπειτα υπολογίστηκε η μέγιστη (MAX) και η ελάχιστη (MIN) διαφορά του Μ.Ο. όπου ακολούθησε ο υπολογισμός της διαφοράς MAX και MIN (D)

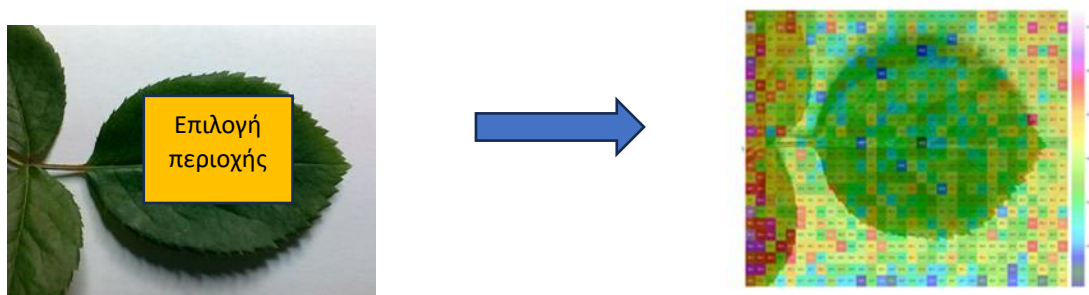
Η τυπική απόκλιση (Standard Deviation - SD) υπολογίζεται για να μετρηθεί η διασπορά των τιμών γύρω από τον μέσο όρο. Στην περίπτωση που γίνεται αναφορά, η τυπική απόκλιση των τιμών διαφοράς θερμοκρασίας εξετάζεται για να κατανοηθεί πόσο διαφέρουν οι μετρήσεις θερμοκρασίας μεταξύ τους σε σχέση με τη θερμική κάμερα αναφοράς. Ας δούμε γιατί αυτό είναι σημαντικό:

- 1. Αξιοπιστία Μετρήσεων:** Η τυπική απόκλιση δίνει μια ένδειξη για την αξιοπιστία των μετρήσεων. Μια μικρή τυπική απόκλιση σημαίνει ότι οι μετρήσεις είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, δηλαδή υπάρχει χαμηλή διασπορά, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι μετρήσεις είναι αξιόπιστες και συνεπείς.
- 2. Εντοπισμός Σφαλμάτων:** Μια υψηλή τυπική απόκλιση μπορεί να υποδηλώνει ότι υπάρχουν σφάλματα στις μετρήσεις ή ότι υπάρχουν εξωτερικοί παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό και τη διόρθωση τέτοιων σφαλμάτων.

- 3. Σύγκριση Μετρήσεων:** Όταν συγκρίνονται οι μετρήσεις θερμοκρασίας από τη θερμική κάμερα με την κάμερα αναφοράς, η τυπική απόκλιση μπορεί να βοηθήσει να κατανοηθεί εάν οι διαφορές μεταξύ των δύο συστημάτων μέτρησης είναι σταθερές ή αν παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις.
- 4. Ανάλυση Συνοχής:** Η τυπική απόκλιση βοηθά στην ανάλυση της συνοχής των δεδομένων. Εάν οι διαφορές θερμοκρασίας έχουν χαμηλή τυπική απόκλιση, αυτό υποδηλώνει ότι η διαφορά είναι σχετικά σταθερή και προβλέψιμη.

Εν κατακλείδι, η τυπική απόκλιση είναι ένα σημαντικό στατιστικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί η ποικιλομορφία των δεδομένων και να διαπιστωθεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία των μετρήσεων θερμοκρασίας σε σχέση με την κάμερα αναφοράς.

Παρατίθενται εικόνες για καλύτερη κατανόηση των όσων περιγράφηκαν παραπάνω.



Εικόνα 9. Συγχώνευση ορατής και θερμικής απεικόνισης όπου το κίτρινο πλαίσιο αποτελεί την περιοχή που επιλέχθηκε για την εξαγωγή των υπό μελέτη τιμών.

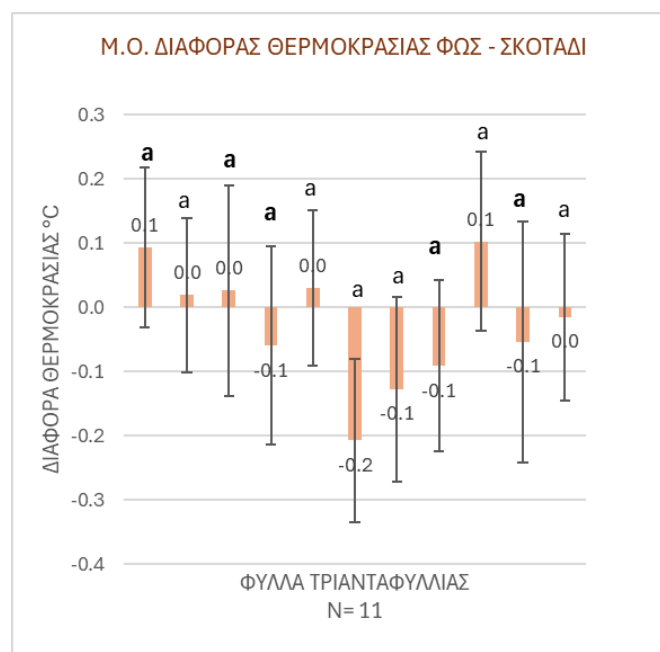
Τέλος, οι παραπάνω υπολογισμοί παρουσιάζονται στο παρακάτω Γράφημα 1 και η διαφορά των ακραίων τιμών στο Γράφημα 2. Το "Γράφημα 1" που γίνεται αναφορά φαίνεται να παρουσιάζει τον μέσο όρο (Μ.Ο.) της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ υπό φωτισμό και υπό σκοτάδι για 11 παρατηρήσεις.

Η σημασία του γραφήματος είναι να δείξει τη διαφορά στις θερμοκρασίες ανάμεσα σε δύο συνθήκες: φωτισμένο και σκοτεινό περιβάλλον. Αυτό μπορεί να έχει σημαντικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα σε εργαστήρια ή σε άλλους χώρους όπου η θερμοκρασία μπορεί να επηρεάζει τις μετρήσεις ή τις διαδικασίες.

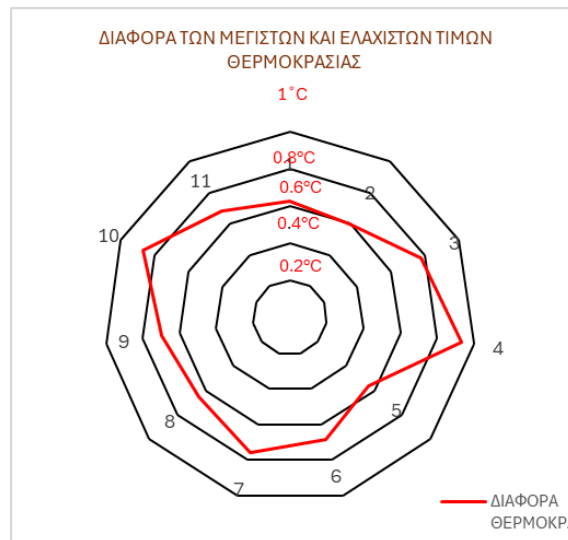
Η επιλογή του N=11 ως αριθμού παρατηρήσεων μπορεί να σημαίνει ότι έχουν γίνει αρκετές μετρήσεις για να υπολογιστεί ο μέσος όρος με αξιόπιστο τρόπο, αν και η ακρίβεια και η σημασία των αποτελεσμάτων εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή και τα δεδομένα.

Συνοψίζοντας, η σημασία του γραφήματος είναι να απεικονίσει τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ φωτισμού και σκοταδιού, παρέχοντας έτσι πληροφορίες για τον τρόπο που ο φωτισμός επηρεάζει τη θερμοκρασία στο εργαστήριο στη συγκεκριμένη μελέτη ή εφαρμογή.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων θερμοκρασίας, στα σύνθετα φυλλάρια, που πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου, υπό φωτισμό και στο σκοτάδι διαπιστώθηκε οι μέσες θερμοκρασίες κυμαίνονταν και στις δυο περιπτώσεις μεταξύ 29.8 °C και 30.2 °C καθώς και ο Μ.Ο. της διαφοράς τους είναι από 0.0 °C έως -0.2 °C. Επίσης η μέγιστη διαφορά των Μ.Ο. στα περισσότερα φύλλα είναι 0.4 °C ενώ η ελάχιστη -0.6 °C. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει στατιστικώς σημαντική διαφορά δηλώνοντας πως η μέτρηση της θερμοκρασίας ενός φύλλου δεν επηρεάζεται από τον φωτισμό με λάμπες φθορισμού όπως αυτές του εργαστηρίου καθώς οι λάμπες αυτές χρησιμοποιούν την ενέργεια τους για να παράγουν φως και όχι θερμότητα. Ακόμη και με απουσία φωτός (σκοτάδι) η θερμοκρασία παρέμενε σχεδόν ίδια.



Γράφημα 1. Μ.Ο. διαφοράς θερμοκρασίας στο εργαστήριο, υπό φωτισμό και σκοτάδι. N=11



Γράφημα 2. Διφορά μέγιστων - ελάχιστων τιμών θερμοκρασίας στο εργαστήριο, υπό φωτισμό και σκοτάδι. $N=11$

3.2 Πειραματικά αποτελέσματα των θερμομετρήσεων με Τεχνητό Φωτισμό

Στο χώρο του εργαστηρίου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας, σε 4 φύλλα με επαναλαμβανόμενη μέτρηση τους, υπό φωτισμό με λαμπτήρα γραφείου LED και υπό απόλυτο σκοτάδι. Υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι των διαφορών θερμοκρασίας με την ίδια διαδικασία όπως περιγράφηκε λεπτομερώς παραπάνω στη διαδικασία του εργαστηρίου και η διαφορά των ακραίων τιμών. Έγινε αρχικά ο υπολογισμός και σύγκριση των μέσων όρων της διαφοράς των θερμοκρασιών μεταξύ των επαναλήψεων στις μετρήσεις με τη χρήση του LED λαμπτήρα (Γράφημα 3) και η διαφορά των Μ.Ο. των μετρήσεων στο φως (Γράφημα 4). Ακολούθως έγινε η ίδια διαδικασία για τις μετρήσεις στο σκοτάδι (Γραφήματα 5,6). Στη συνέχεια έγινε υπολογισμός των Μ.Ο. μεταξύ μετρήσεων φως και σκοτάδι (Γράφημα 7) και η διαφορά των ακραίων τιμών τους (Γράφημα 8).

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε τις εξής τιμές θερμοκρασίας (σε βαθμούς Κελσίου):

Για LED φωτισμό: $T_{LED} = \{T_1, T_2, T_3, T_4\}$

Για σκοτάδι: $T_{dark} = \{T_1', T_2', T_3', T_4'\}$

Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές για κάθε περιβάλλον είναι:

- Μέγιστη θερμοκρασία για LED: $T_{\max_LED} = \max(T1, T2, T3, T4)$
- Ελάχιστη θερμοκρασία για LED: $T_{\min_LED} = \min(T1, T2, T3, T4)$
- Μέγιστη θερμοκρασία για σκοτάδι: $T_{\max_dark} = \max(T1', T2', T3', T4')$
- Ελάχιστη θερμοκρασίας για σκοτάδι: $T_{\min_dark} = \min(T1', T2', T3', T4')$

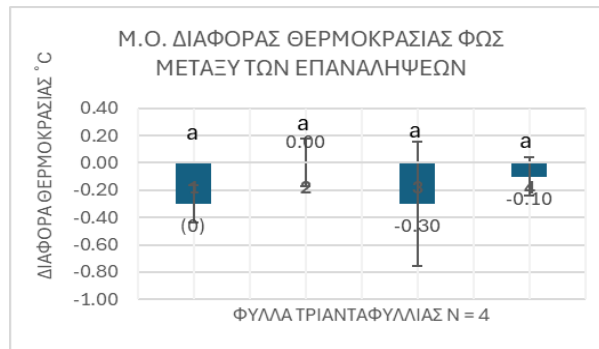
Η διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελαχίστης θερμοκρασίας για κάθε περιβάλλον είναι:

- Για LED φωτισμό: $\Delta LED = T_{\max_LED} - T_{\min_LED}$
- Για σκοτάδι: $\Delta dark = T_{\max_dark} - T_{\min_dark}$

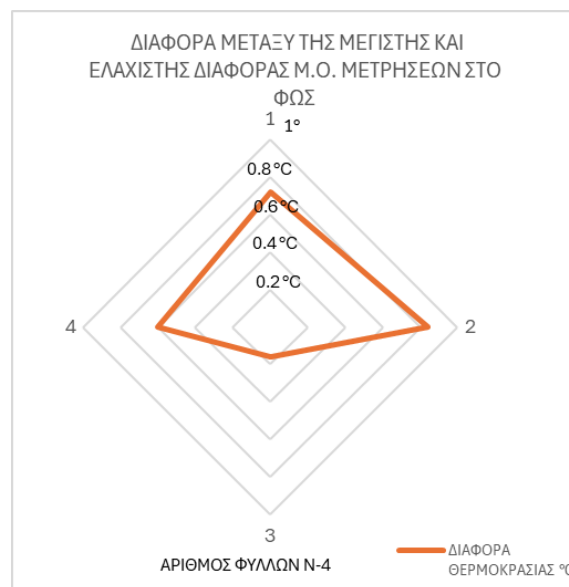
Παρατηρείται μεταξύ των μετρήσεων υπό του λαμπτήρα LED , ότι η διαφορά των τιμών των Μ.Ο. ήταν από -0.3°C έως 0.0°C (Γράφημα 2) και η διαφορά της μέγιστης και ελάχιστης διαφοράς των επαναληπτικών μετρήσεων (Γράφημα 3) ήταν από -0.6°C έως 1.10°C .

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων θερμοκρασίας στα σύνθετα φυλλάρια, που πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου, υπό φωτισμό LED λαμπτήρα και στο σκοτάδι, διαπιστώνεται ότι η διαφορά των μέσων όρων θερμοκρασίας έναντι της τυπικής απόκλισης για τέσσερις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις στα φύλλα 2, 3 και 4 κυμαίνονται από 0.3°C έως 0.8°C . Η θερμοκρασία των φύλλων στο φως και στο σκοτάδι σε απόλυτες τιμές ήταν μεταξύ 29.3°C και 30.3°C , και η μέγιστη διαφορά τους ήταν στους 2.2°C και η ελάχιστη στους 0.64°C . Γενικά οι διαφορές που μετρήθηκαν ήταν σε όλες τις περιπτώσεις εντός του εύρους ακρίβειας του συστήματος θερμομέτρησης ($\pm 1^{\circ}\text{C}$), μόνο στο φύλλο 3 στην αρχική μέτρηση παρατηρήθηκε αυτή η μεγαλύτερη διαφορά των 2.2°C , το οποίο μπορεί να οφείλεται σε πιθανή αστοχία του χειριστή. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και στην επανάληψη της συνθήκης (Γραφήματα 9,10) Αποδεικνύεται δε, ότι η πηγή φωτισμού (λαμπτήρας LED) παρότι αποτελεί εξωτερικό παράγοντα δεν ευθύνεται για μεταβλητότητα στις παραπάνω μετρήσεις. Συγκεκριμένα οι λαμπτήρες LED που χρησιμοποιούνται στα γραφεία όπως και ο λαμπτήρας που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα παρέχουν μόνο φωτισμό, δηλαδή έχουν κατασκευαστεί ως τεχνητή πηγή φωτός για να φωτίζουν σκοτεινούς χώρους. Αποτελούνται από στενά φασματικά μήκη κύματος σε αντίθεση με τα φώτα ανάπτυξης που είναι ειδικά σχεδιασμένα για να παράγουν σωστή ποσότητα φωτός με αποτέλεσμα να επηρεάζουν τις μεταβολικές λειτουργίες των φυτών. Αν και τα φυτά μπορούν να ανιχνεύσουν ανεπαίσθητες αλλαγές στο φως και να ξεκινήσουν αλλαγές στις φυσιολογικές και μορφολογικές δομές που είναι απαραίτητες για την

επιβίωση τους (Hogewoning et al.,2010. Xu et al.,2015) η μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του φύλλου με το σύστημα καμερών δεν επηρεάζεται από τον LED λαμπτήρα.



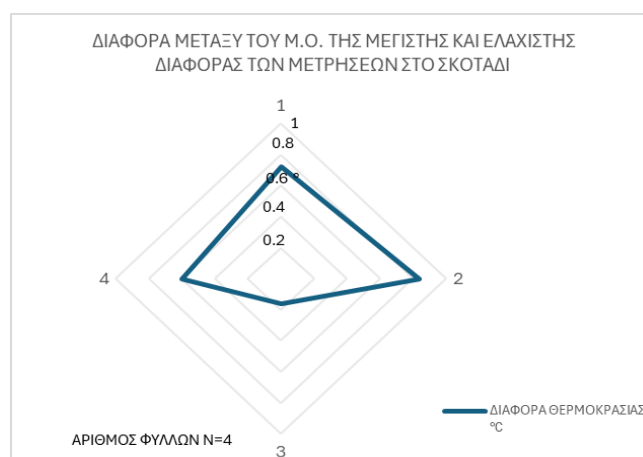
Γράφημα 3 Μ.Ο. Διαφοράς μεταξύ των μετρήσεων υπό τεχνητό φωτισμό (LED).



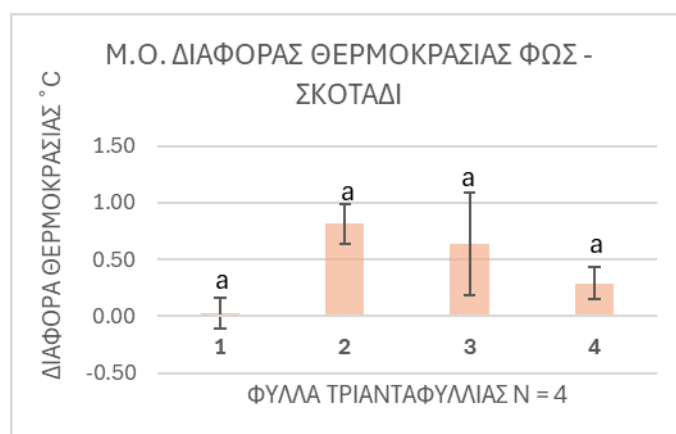
Γράφημα 4. Διαφορά μέγιστης – ελάχιστης των διαφορών των Μ.Ο. μεταξύ των μετρήσεων στο φως. N=4



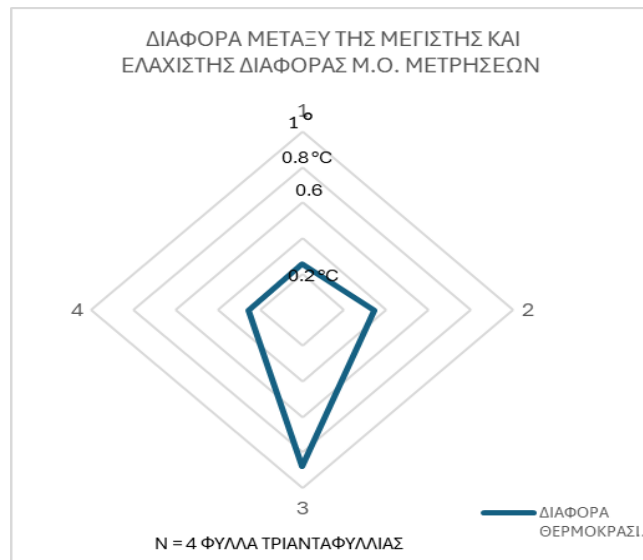
Γράφημα 5 Μ.Ο. Διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των μετρήσεων στο σκοτάδι. N=4



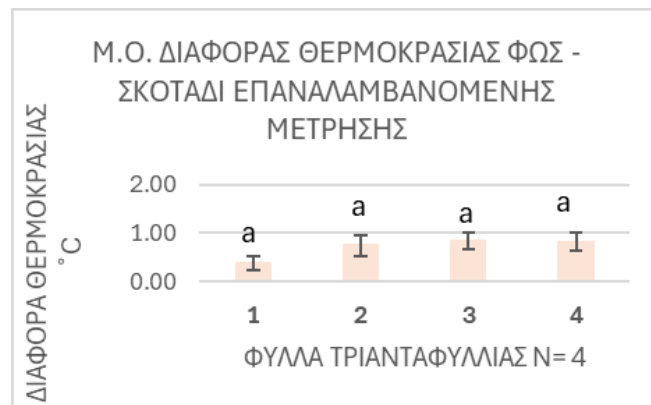
Γράφημα 6 Μέγιστες και ελάχιστες τιμές για κάθε περιβάλλον



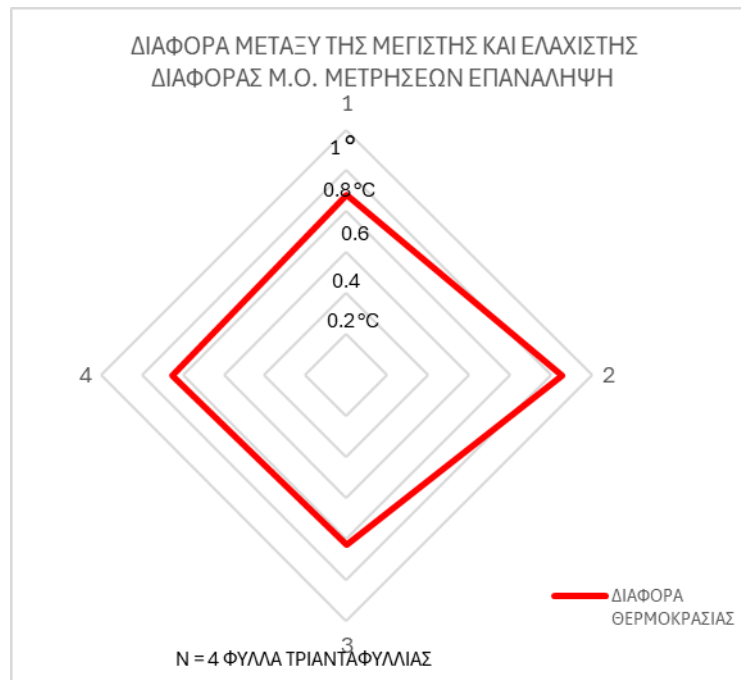
Γράφημα 7 Μ.Ο. διαφοράς θερμοκρασίας στο εργαστήριο υπό LED φωτισμό και σκοτάδι. N=4



Γράφημα 8 Διαφορά μέγιστων – ελάχιστων τιμών θερμοκρασίας υπό LED φωτισμό και σκοτάδι. N=4



Γράφημα 9. Μ.Ο. διαφοράς θερμοκρασίας στο εργαστήριο υπό LED φωτισμό και σκοτάδι (επαναλαμβανόμενη μέτρηση) N=4



Γράφημα 10. Διαφορά μέγιστων – ελάχιστων τιμών θερμοκρασίας στο εργαστήριο υπό LED φως και σκοτάδι (επαναλαμβανόμενη μέτρηση). $N=4$

3.3 Πειραματικά αποτελέσματα των θερμομετρήσεων στο Θερμοκήπιο

Στο Θερμοκήπιο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας, σε 11 φύλλα, υπό φυσικό φωτισμό. Υπολογίστηκαν οι μέσο όροι των διαφορών θερμοκρασίας (Γράφημα 11) και η διαφορά των ακραίων τιμών (Γράφημα 12) μεταξύ των επαναλήψεων.

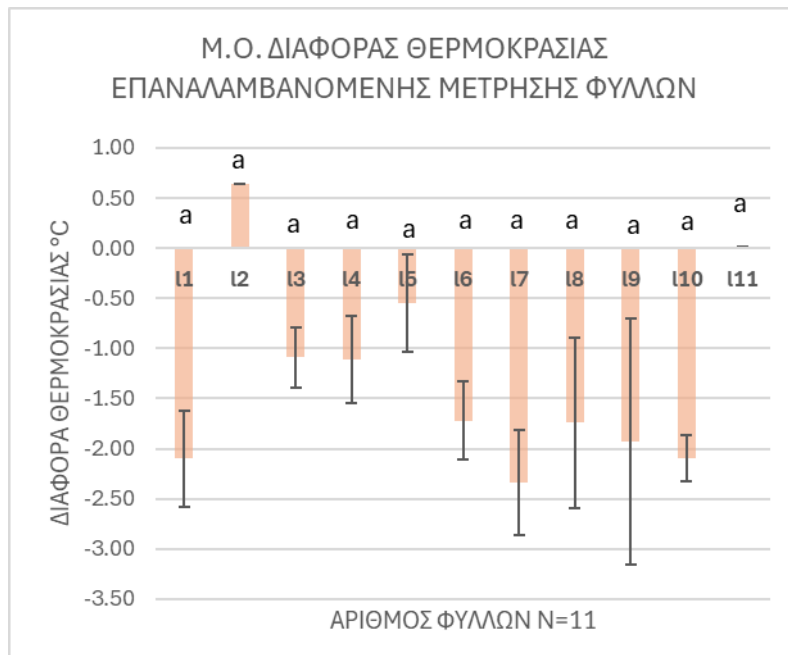
Καταγράφηκαν απόλυτες θερμοκρασίες φύλλων από 42 °C έως 46.9 °C, αρκετά υψηλότερες από αυτή του περιβάλλοντα χώρου (κατά προσέγγιση 40°C). Η διαφορά των Μ.Ο. που υπολογίστηκε (Γράφημα 12) ήταν από – 2.33 °C έως 0.64 °C και η διαφορά max και min των μέσων όρων της διαφοράς των θερμοκρασιών μεταξύ των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων ήταν από -2.05 °C έως 7.9 °C.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι η διαφορά της θερμοκρασίας φύλλου – αέρα που χρησιμοποιείται συχνά ως δείκτης στρες σε διάφορα φυτά (Fuchs, 1990. Long et al., 2006. Jones et al., 2009. Song et al., 2017. Kim et al., 2018. Zhang et al., 2019) παραπέμπει στο συμπέρασμα ότι η κατάσταση της πιθανής καταπόνησης των φυτών δεν είναι φυσιολογική. Είναι γνωστό πως οι υψηλότερες θερμοκρασίες της επιφάνειας των φύλλων καταδεικνύουν υδατικό στρες. Όταν τα

φυτά υφίστανται υδατική καταπόνηση αυξάνουν τη θερμοκρασία τους. Η αγωγιμότητα του νερού μέσω των στομάτων στα φύλλα μειώνεται όταν περιορίζεται η παροχή νερού στις ρίζες των φυτών. Η θερμοκρασία της επιφάνειας των φύλλων είναι υψηλότερη σε σχέση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, όπως ακριβώς συνέβη και στην παραπάνω μέτρηση. Έτσι εάν το υδατικό στρες των φυτών αυξηθεί, η διαπνοή μειώνεται και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η θερμοκρασία της επιφάνειας του φύλλου να υπερβαίνει την θερμοκρασία του αέρα. Αυτά τα αποτελέσματα συμφωνούν με τα αποτελέσματα των Pradhan et al. (2014) , οι οποίοι μετά από δική τους έρευνα βρήκαν επίσης υψηλότερη θερμοκρασία φύλλου από 1 °C έως 9 °C σε σχέση με τον περιβάλλοντα αέρα σε διαφορετικές μετρήσεις φυτών υπό κατάσταση υδατικής καταπόνησης.

Οι θερμικές κάμερες (infrared cameras) είναι συχνά σε θέση να μετρούν θερμοκρασίες σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων και των συνθηκών θερμοκηπίου, με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

1. **Εμβέλεια και ακρίβεια:** Εξαρτάται από το μοντέλο της κάμερας. Κάποιες κάμερες είναι πιο ακριβείς και έχουν μεγαλύτερη εμβέλεια θερμοκρασιών από άλλες.
2. **Εμπόδια:** Τζάμια ή πλαστικά καλύμματα θερμοκηπίου μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια της μέτρησης, καθώς αυτά τα υλικά μπορούν να επηρεάσουν τη διέλευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας.
3. **Συνθήκες υγρασίας:** Υψηλή υγρασία μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις, καθώς η υγρασία μπορεί να απορροφήσει ή να διασκορπίσει την υπέρυθρη ακτινοβολία.
4. **Αντανάκλαση:** Τα υλικά μέσα στο θερμοκήπιο μπορεί να έχουν αντανάκλαση που μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια της κάμερας.

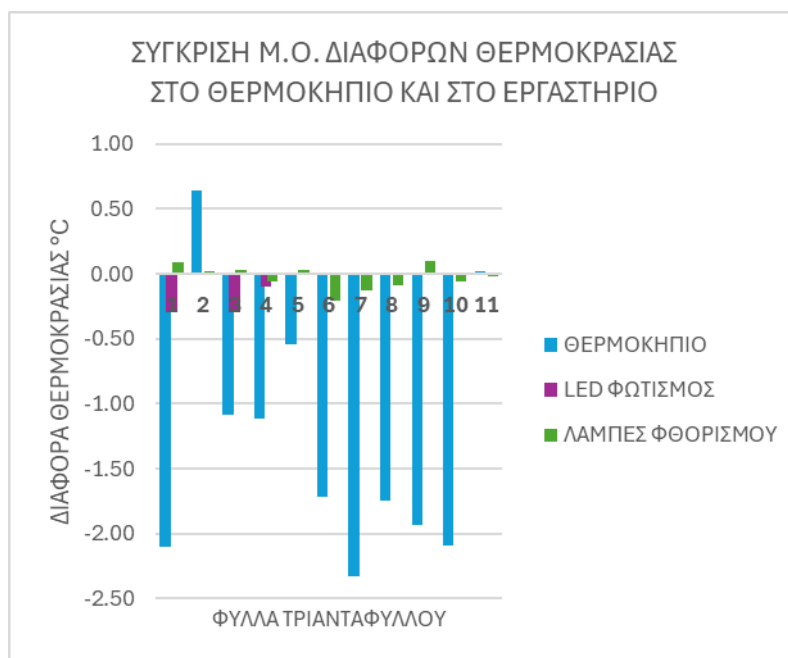


Γράφημα 11 : Μ.Ο. διαφοράς θερμοκρασίας των μετρήσεων στο θερμοκήπιο, όπου l1,l2,l3.....l11 είναι τα φύλλα τριανταφυλλιά που θερμομετρήθηκαν. Με a συμβολίζεται η μη στατιστικώς σημαντική διαφορά μεταξύ των επαναλήψεων. Οι κάθετες μπάρες συμβολίζουν την τυπική απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων.



Γράφημα 12: Διαφορά μέγιστου και ελάχιστου Μ.Ο. μεταξύ των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων , οι διαβαθμίσεις των ομόκεντρων κύκλων είναι ανά 0.2 °C.

3.4 Σύγκριση μετρήσεων σε εργαστήριο και θερμοκήπιου



Γράφημα 13: σύγκριση διαφοράς των μέσων όρων μεταξύ των μετρήσεων α) στο θερμοκήπιο β) στο εργαστήριο με λάμπες φθορισμού και γ) στο εργαστήριο με λαμπτήρα LED.

Ακολουθεί ανάλυση του γραφήματος:

Θερμοκήπιο (Μπλε Μπάρες): Αυτές οι ράβδοι δείχνουν ότι οι διαφορές θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο είναι ως επί το πλείστον αρνητικές, υποδεικνύοντας ότι η θερμοκρασία στο θερμοκήπιο είναι γενικά χαμηλότερη από τη βασική γραμμή για τα περισσότερα δείγματα. Οι τιμές κυμαίνονται από $-0,5^{\circ}\text{C}$ έως $-2,0^{\circ}\text{C}$ περίπου.

Φωτισμός LED (Πορτοκάλι Μπάρες): Αυτές οι ράβδοι εμφανίζουν μικρότερες διαφορές θερμοκρασίας, κυρίως γύρω στο μηδέν, υποδηλώνοντας ελάχιστη απόκλιση από τη βασική θερμοκρασία υπό συνθήκες φωτισμού LED. Οι διακυμάνσεις είναι ελάχιστες και κοντά στη βασική γραμμή.

Λαμπτήρες φθορισμού (πράσινες ράβδοι): Παρόμοια με τον φωτισμό LED, οι πράσινες ράβδοι εμφανίζουν ελάχιστες διαφορές θερμοκρασίας, υποδεικνύοντας ότι οι λαμπτήρες φθορισμού έχουν επίσης θερμοκρασίες κοντά στη γραμμή βάσης.

Παρατηρήσεις:

Το περιβάλλον του θερμοκηπίου παρουσιάζει μια πιο σημαντική και σταθερή μείωση της θερμοκρασίας σε σύγκριση με τις άλλες δύο συνθήκες φωτισμού. Τόσο οι συνθήκες φωτισμού LED όσο και φθορισμού παρουσιάζουν ελάχιστη επίδραση στη θερμοκρασία, με μικρές διακυμάνσεις γύρω στο μηδέν.

Συνοπτικά, το διάγραμμα υποδηλώνει ότι το περιβάλλον του θερμοκηπίου έχει πιο σημαντική επίδραση ψύξης στα φύλλα τριανταφυλλιάς σε σύγκριση με τις συνθήκες φωτισμού LED και φθορισμού, που έχουν αμελητέα επίδραση στη θερμοκρασία. Αυτές οι πληροφορίες θα μπορούσαν να είναι χρήσιμες για την κατανόηση της επίδρασης διαφορετικών περιβαλλόντων και συνθηκών φωτισμού στη θερμοκρασία των φύλλων των φυτών, που μπορεί να επηρεάσουν την υγεία και την ανάπτυξη των φυτών.

Απαραίτητη κρίνεται και η σύγκριση μεταξύ των υπό εξέταση πεδίων, δηλαδή των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο με τις λάμπες φθορισμού και τον LED λαμπτήρα και στο θερμοκήπιο (Γράφημα 13) .

Παρατηρούμε ότι μεταξύ των μετρήσεων στο εργαστήριο με τις διαφορετικές πηγές φωτός, οι διαφορές είναι απειροελάχιστες. Καμία επίδραση δεν φαίνεται να έχει τόσο στην θερμοκρασία της επιφάνειας του φύλλου όσο και στην ακρίβεια του συστήματος θερμομέτρησης.

4. Συμπεράσματα

Η μελέτη της επίδρασης της ποιότητας του φωτός στην ανίχνευση θερμοκρασιακών διαφορών σε φύλλα ανθοκομικών φυτών με τη χρήση υπέρυθρων (IR) αισθητήρων αποκαλύπτει σημαντικές πληροφορίες για την αποτελεσματικότητα και ακρίβεια της ανίχνευσης. Παρακάτω παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης:

1. **Επιρροή της Ποιότητας του Φωτός:** Η ποιότητα του φωτός, δηλαδή το φάσμα και η ένταση του φωτός, επηρεάζει άμεσα την θερμοκρασία των φύλλων και κατ' επέκταση την ακρίβεια των μετρήσεων με IR αισθητήρες. Διαφορετικές ποιότητες φωτός μπορεί να προκαλέσουν διαφορετικές θερμικές αποκρίσεις στα φυτά, επηρεάζοντας τις καταγραφές των IR αισθητήρων.
2. **Ανάλυση Φάσματος Φωτός:** Τα φυτά εκτίθενται σε διαφορετικά φάσματα φωτός (όπως υπεριώδες, ορατό και υπέρυθρο), τα οποία μπορεί να προκαλέσουν μεταβολές στην επιφανειακή θερμοκρασία των φύλλων. Η ανίχνευση αυτών των διαφορών θερμοκρασίας μέσω IR αισθητήρων μπορεί να είναι πιο ακριβής όταν χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα φάσματα φωτός που ανταποκρίνονται καλύτερα στις φυσιολογικές ιδιότητες των φυτών.
3. **Προσαρμογή Αισθητήρων:** Η κατανόηση της επίδρασης της ποιότητας του φωτός μπορεί να βοηθήσει στην προσαρμογή και βελτίωση των IR αισθητήρων για την ανίχνευση θερμοκρασιακών διαφορών. Οι αισθητήρες μπορεί να ρυθμιστούν ώστε να λαμβάνουν υπόψη τις θερμικές ανταποκρίσεις σε συγκεκριμένα φάσματα φωτός.
4. **Βελτίωση Φυτοπροστασίας:** Η ακριβής ανίχνευση θερμοκρασιακών διαφορών μπορεί να συμβάλει στην έγκαιρη διάγνωση ασθενειών και στην καλύτερη φυτοπροστασία. Οι θερμοκρασιακές διαφορές συχνά αποτελούν πρώιμους δείκτες στρες ή παθολογικών καταστάσεων στα φυτά.
5. **Προτάσεις για Μελλοντικές Μελέτες:** Προτείνεται η διενέργεια περαιτέρω μελετών για να διερευνηθεί η ακριβής σχέση μεταξύ διαφορετικών ποιοτήτων φωτός και θερμοκρασιακών αποκρίσεων σε ποικίλα είδη φυτών. Επιπλέον, η ανάπτυξη πιο ευαίσθητων και προσαρμόσιμων IR αισθητήρων θα μπορούσε να ενισχύσει την ακρίβεια και τη χρησιμότητα αυτών των μετρήσεων στην γεωπονική έρευνα και εφαρμογή.

Συνοψίζοντας, η ποιότητα του φωτός παίζει κρίσιμο ρόλο στην ανίχνευση θερμοκρασιακών διαφορών στα φύλλα των ανθοκομικών φυτών με τη χρήση IR αισθητήρων. Οι μετρήσεις μπορούν να βελτιστοποιηθούν λαμβάνοντας υπόψη το φάσμα και την ένταση του φωτός, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε πιο αξιόπιστες διαγνώσεις και καλύτερη διαχείριση των φυτών

5. Βιβλιογραφία

- Aydin, G. D. and Ozer, S. (2023) 'Infrared Detection Technologies in Smart Agriculture: A Review', *2023 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2023 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, pp. 1–8. doi: 10.1109/acemp-optim57845.2023.10287033.
- De Boeck, H. J. *et al.* (2016) 'Ideas and perspectives: Heat stress: More than hot air', *Biogeosciences*, 13(20), pp. 5821–5825. doi: 10.5194/bg-13-5821-2016.
- Dehbi, A., Youssef, B., Chappey, C., Mourad, A. H. I., Picuno, P. and Statuto, D. (2017). 'Multilayer polyethylene film for crop protection in harsh climatic conditions'. *Advances in Material Science and Engineering* 2017: 7- 14
- Caturegli, L. *et al.* (2015) 'Turfgrass spectral reflectance: simulating satellite monitoring of spectral signatures of main C3 and C4 species', *Precision Agriculture*, 16(3), pp. 297–310. doi: 10.1007/s11119-014-9376-3.
- Core, C. (1914) 'The absorption of light in space', *Nature*, 92(2312), pp. 698–699. doi: 10.1086/122314.
- Gruda, N. and Tanny, J. (2014). 'Protected Crops'. *Horticulture: Plants for people and places* 1: 327 - 405.
- Inamoto, K., Nagasuga, K., Yao, T. and Yamazaki, H. (2016). 'Effect of day and night air temperature on the dry matter accumulation of oriental hybrid lily 'Siberia' as they relate to photosynthesis and respiratory characteristics'. *Japan Agricultural Research Quarterly* 50 (2): 143 – 152.
- Jung, C. and Arar, M. (2023) 'Natural vs. Artificial Light: A Study on the Influence of Light Source on Chlorophyll Content and Photosynthetic Rates on Indoor Plants', *Buildings*, 13(6). doi: 10.3390/buildings13061482.
- Kang, H. X. *et al.* (2020) 'Concurrent Increases in Leaf Temperature With Light Accelerate Photosynthetic Induction in Tropical Tree Seedlings', *Frontiers in Plant Science*, 11(August), pp. 1–11. doi: 10.3389/fpls.2020.01216.

- Khattak A. M., Pearson, S., Nawab, S., Khan, M. A. and Marwat, K. B. (2011). 'The Effect of Light Quality and Air temperature on the Growth and Development of Geraniums'. *Pakistan Journal of Botany*: 43 (1): 679 - 688.
- Nabigol, A. (2012). 'Pre- harvest calcium sulfate application improves post- harvest quality of cut rose flowers'. *African Journal of Biotechnology*. 11 (5): 1078 - 1083.
- Norton, P. R. (1991) 'Infrared image sensors', *Optical Engineering*, 30(11), p. 1649. doi: 10.1117/12.56001.
- Properties, P., Light, O. F. and Measurement, I. T. S. (2015) 'Light', *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*, pp. 115–128. doi: 10.1016/B978-0-12-801775-3.00007-X.
- Rihn, A. L., Chengyan, Y., Hall, C. and Bebe, K. B. (2014). Consumer Preferences for Longevity Information and Guarantees on Cut Flower Arrangements. *HortScience* 49 (6): 769 - 778
- Volterrani, M. *et al.* (2017) 'Reflectance, absorbance and transmittance spectra of bermudagrass and manilagrass turfgrass canopies', *PLoS ONE*, 12(11), pp. 1–13. doi: 10.1371/journal.pone.0188080.
- Westley, R., (2023). 'ROSE PLANT GROWING: Ultimate Strategy To Cultivating A Health & Blossom Rose Flower Plant'. *Independently published*, 55 - 59.
- Wubs, A. M., Heuvelink, E. P., Marcelis, L. F. M., Gerhard, H. B. S. and Vos, J. (2014). Auxillary bud break in a cut rose crop as influenced by light intensity and red: far - red:ration at bud level. *Journal of American Society for Horticultural Science* 139 (2): 131-138.
- Yaghi, O., (2019). 'Flow and Mixing Optimization of an Existing Biogas Plant through CFD Simulation and Velocity Measurements Prepared'. *Grin Verlag Publishing*, 87 - 92.
- Yavari, N. *et al.* (2021) 'The effect of light quality on plant physiology, photosynthetic, and stress response in Arabidopsis thaliana leaves', *PLoS ONE*, 16(3 March), pp. 1–19. doi: 10.1371/journal.pone.0247380.
- Yin, R., Li, L., Zuo, K., (2021). 'Plant Photomorphogenesis: Methods and Protocols (Methods in Molecular Biology, 2297)'. *Humana; 1st ed. 2021 edition*, 149 - 150.

- Zioutopoulou, A. *et al.* (2022) ‘Low Fluence Ultraviolet-B Promotes Ultraviolet Resistance 8-Modulated Flowering in Arabidopsis’, *Frontiers in Plant Science*, 13(March). doi: 10.3389/fpls.2022.840720.