

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Πτυχιακή Εργασία:

**Χρήση σύγχρονης τεχνολογίας και ανάλυση εικόνας
για την ανίχνευση βιοτικού stress σε φυτά**

Όνομα Φοιτητή: Παναγιώτης Ντόντορος

ΑΕΜ: 02289

ΑΜ: 0418029

Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Βαγγέλας

Βόλος, 2023

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας, Ιωάννη Βαγγέλα για την πολύτιμη καθοδήγησή του και την οργάνωση όλων των τομέων της πτυχιακής μου εργασίας. Ευχαριστώ τον κύριο Χρήστο Λύκα για την παραχώρηση του εργαστηρίου Ανθοκομίας όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα της εργασίας και για την διάθεση του εξοπλισμού του εργαστηρίου. Τον ευχαριστώ επίσης για την βοήθειά του στον σχεδιασμό των πειραμάτων. Ευχαριστώ τον κύριο Άρη Κυπαρίσση για τις χρήσιμες συμβουλές του πάνω στην διόρθωση του κειμένου της πτυχιακής μου εργασίας.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον Αθανάσιο Παπαδήμο για την ενασχόληση του με τα πειράματα της πτυχιακής μου εργασίας και για την απαραίτητη τεχνική υποστήριξη που παρείχε.

Ευχαριστώ όλους τους καθηγητές του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για τις γνώσεις και τις εμπειρίες που πρόσφεραν σε εμάς τους φοιτητές όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος ευχαριστώ όλους τους φίλους, τους συμφοιτητές και την οικογένειά μου για την στήριξή τους.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	4
1. Εισαγωγή	5
1.1. Τεχνικές διάγνωσης και ανίχνευσης παθογένεσης σε φυτά	5
1.2. Μέθοδοι υπέρυθρης θερμογραφίας και οι χρήσεις τους στην επιστήμη	9
1.3. Θερμικές κάμερες-εξοπλισμός για υπέρυθρη θερμογραφία.....	14
1.4. Αλληλεπίδραση φυτοπαθογόνου μύκητα και φυτού ξενιστή	16
2. Υλικά και μέθοδοι	21
2.1. Εξοπλισμός για θερμομέτρηση με κάμερα τύπου Infrared	21
2.2. Ανάπτυξη και εφαρμογή του απαραίτητου λογισμικού για τις κάμερες του τύπου RGB και Infrared	22
2.3. Τριγωνομετρικές συναρτήσεις για τις κάμερες του τύπου RGB και Infrared.....	24
2.4. Δημιουργία μιας σταθερής βάσης στην οποία θα μπορεί να προσαρμοστεί το σύστημα λήψης των εικόνων από τις κάμερες RGB και Infrared.....	26
2.5. Ρύθμιση και βαθμονόμηση της κάμερας τύπου RGB και Infrared για μια ορθή εστίαση	29
2.6. Θερμομέτρηση φυτικών οργάνων με τις κάμερες RGB και Infrared	31
2.7. Τεχνητή μόλυνση φυτών τριανταφυλλιάς με ωίδιο	34
2.8. Καταγραφή της ανάπτυξης του ωιδίου της τριανταφυλλιάς με το σύστημα των καμερών τύπου RGB και Infrared.....	35
2.9. Επανάληψη της πειραματικής διαδικασίας	37
3. Αποτελέσματα.....	40
3.1. Μετρήσεις με το σύστημα των καμερών RGB-Infrared σε φυτά φακής προσβεβλημένα από περονόσπορο	40
3.2. Συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας κατά επώαση και ανάπτυξη του μολύσματος 47	
3.3. Αποτελέσματα θερμογράφησης φυτών τριανταφυλλιάς μολυσμένα με ωίδιο	48
4. Συζήτηση	51
Συμπεράσματα	57
Βιβλιογραφία	57

Περίληψη

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία, μελετήθηκε και εξετάστηκε πειραματικά η χρήση τεχνικών υπέρυθρης θερμογραφίας (Infrared Thermography-IRT) ως σύγχρονη μέθοδος διάγνωσης βιοτικής καταπόνησης από παθογόνους μικροοργανισμούς σε φυτικούς ιστούς. Γνωρίζοντας την διακύμανση της θερμοκρασίας κατά μήκος των φυτικών οργάνων, είναι δυνατή η ανίχνευση μεταβολών της φυσιολογικής λειτουργίας των φυτών όπως για παράδειγμα αλλαγές στον ρυθμό διαπνοής των φύλλων, που ίσως να υποδεικνύουν προσβολή από κάποια ασθένεια. Στόχος, λοιπόν, είναι η έμμεση ανίχνευση της παρουσίας παθογόνων μικροοργανισμών στα φυτά μέσω της επιρροής που ασκούν στη φυσιολογία των φυτών, με τη χρήση θερμικής κάμερας. Η θερμική κάμερα που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα είναι η MLX90640, μια αρκετά οικονομική επιλογή, που είναι ικανή να διακρίνει διαφορές θερμοκρασίας στους φυτικούς ιστούς. Επομένως, κατασκευάστηκε ένα σύστημα θερμογραφίας που συνδυάζει θερμική εικόνα με εικόνα φυσικών χρωμάτων RGB για τον ακριβή εντοπισμό των σημείων με έντονες διαφορές θερμοκρασίας, λόγω χάρη βρέθηκε ότι τμήμα φυτού φακής με έντονη εκδήλωση συμπτωμάτων περονόσπορου έχει περίπου 2°C χαμηλότερη θερμοκρασία από τα τμήματα χωρίς συμπτώματα σύμφωνα με τις συγκεκριμένες μετρήσεις. Απαραίτητη ήταν η ανάπτυξη λογισμικού σε γλώσσα προγραμματισμού ώστε να υπάρχει δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης της λειτουργίας του συστήματος θερμογράφησης αλλά και των θερμικών εικόνων που δίνει το σύστημα. Αφού δοκιμάστηκε το σύστημα θερμογραφίας σε φυτά που εκδήλωναν ήδη συμπτώματα ασθένειας, ξεκίνησαν πειράματα θερμογραφίας φυτών τριανταφυλλιάς τα οποία μολύνθηκαν τεχνητά με ωίδιο της τριανταφυλλιάς. Η καθημερινή παρακολούθηση της ανάπτυξης του ωιδίου με το σύστημα θερμογραφίας έδειξε πως την ημέρα δεκαπέντε και δεκαοκτώ, η θερμοκρασία στο σημείο ανάπτυξης του μύκητα ήταν κατά περίπου 0,9°C χαμηλότερη από ότι στα γύρω σημεία του φύλλου που δεν αναπτυσσόταν η ασθένεια. Αυτή η μείωση της θερμοκρασίας στους συγκεκριμένους ιστούς του φύλλου πιθανολογείται ότι την προκαλεί τοπική αύξηση της διαπνοής, που οφείλεται στην προσβολή του μύκητα.

Λέξεις κλειδιά: Υπέρυθρη θερμογραφία, διάγνωση , ανίχνευση βιοτικής καταπόνησης, αλληλεπίδραση φυτοπαθογόνου και ξενιστή

1. Εισαγωγή

1.1. Τεχνικές διάγνωσης και ανίχνευσης παθογένεσης σε φυτά

Οι φυτοπαθογόνοι μικροοργανισμοί, δηλαδή οι μύκητες κατά κύριο λόγο αλλά και τα βακτήρια και οι ιοί, προκαλούν ασθένειες στα φυτά και είναι από τα σημαντικότερα αίτια για τις απώλειες της φυτικής παραγωγής (Sharma et al. 2021). Ένα θεμελιώδες κομμάτι της Φυτοπαθολογίας είναι η διάγνωση μιας ασθένειας, δηλαδή η αναγνώριση ενός παθογόνου αιτίου από τα συμπτώματά που εμφανίζει το φυτό ξενιστής όπως ορατές ή και μη ορατές μεταβολές στη μορφή και λειτουργία του (Τζάμος 2017). Όταν έχουν εμφανιστεί έντονα τα συμπτώματα μιας ασθένειας που εκδηλώνεται σε μια φυτική καλλιέργεια η αντιμετώπισή της είναι δύσκολη και πολλές φορές μπορεί να είναι και αδύνατη καθώς ο παθογόνος μικροοργανισμός έχει αποικήσει τους φυτικούς ιστούς και έχει προκαλέσει βλάβες στα φυτικά κύτταρα (Stoll et al. 2008). Κατά συνέπεια, μια έγκαιρη διάγνωση της ασθένειας, προτού δηλαδή η ανάπτυξη του παθογόνου μικροοργανισμού αποφέρει αλλοιώσεις στα όργανα των φυτών και στο παραγόμενο από τη καλλιέργεια προϊόν, είναι μείζονος σημασίας για την διασφάλιση της υγείας των φυτών αλλά και του οικονομικού συμφέροντος του παραγωγού (Mahlein 2016).

Φυσικά πρέπει να σημειωθεί πως ασθένειες, δηλαδή διαφοροποιήσεις στην μορφολογία και τη φυσιολογία του φυτού προκαλούν και άλλοι βιοτικοί παράγοντες όπως έντομα, νηματώδεις και ακάρεα. Αυτοί οι οργανισμοί έχουν αναπτύξει τροφικές σχέσεις με τα φυτά, καταναλώνοντας τμήματα του ριζώματος, αλλά και του υπέργειου τμήματος των φυτών. Οι οργανισμοί που αναφέρθηκαν είναι αντικείμενα μελέτης των επιστημών της γεωργικής εντομολογίας, της νηματωδολογίας και της ακαρεολογίας αντιστοίχως. (Τζάμος 2017).

Επιπροσθέτως, ένα φυτό μπορεί να εμφανίσει συμπτώματα ασθένειας, που δεν οφείλεται στον παρασιτισμό, δηλαδή στη διαβίωση ενός οργανισμού στο εσωτερικό των φυτών και τη θρέψη του από αυτό, αλλά σε αβιοτικούς παράγοντες, λόγω χάρη σε κλιματολογικούς παράγοντες (Τζάμος 2017). Μειώσεις της φυτικής παραγωγής είναι συνέπειες των συνθηκών όπως πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ή συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Σε τέτοιες συνθήκες το φυτό καταπονείται (abiotic stress), δηλαδή οι φυσιολογικές διεργασίες του αρχίζουν να μην λειτουργούν σωστά και ανάλογα με την ένταση της καταπόνησης, διακινδυνεύεται η παραγωγή, η βιομάζα,

ο ρυθμός αφομοίωσης CO₂ και θρεπτικών, ακόμα και η επιβίωση του φυτού (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012). Εκτός από την υδατική καταπόνηση και την καταπόνηση λόγω ακραίων θερμοκρασιών, ένα φυτό μπορεί να καταπονηθεί μηχανικά από καιρικά φαινόμενα όπως ισχυροί άνεμοι και χαλάζι που τραυματίζουν τα φυτικά όργανα (Τζάμος 201). Άλλα αίτια μη παρασιτικών ασθενειών είναι η έλλειψη ή η υπερβολική συγκέντρωση στοιχείων και ιχνοστοιχείων στο έδαφος. Η τροφοπενία των βασικών στοιχείων όπως φώσφορο και κάλιο θα έχει πολύ σημαντικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη του φυτού, αλλά ακόμα και η πολύ μικρή συγκέντρωση ιχνοστοιχείων θα επηρεάσει αρνητικά κάποιες λειτουργίες του φυτού. Η έλλειψη ασβεστίου συνήθως προκαλεί νεκρώσεις οφθαλμών, και ξήρανση κορυφής φύλων, έλλειψη σιδήρου προκαλεί έντονη χλώρωση φύλλων καθώς συντελεί στη σύνθεση της χλωροφύλλης και έλλειψη ψευδαργύρου θα εμφανίσει μικροφυλλία (Τζάμος 2017). Το στάδιο του φυτού παίζει σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση συμπτωμάτων από μη παρασιτικές ασθένειες. Για παράδειγμα, όταν δεν μπορεί ένα δέντρο μηλιάς να παρέχει αρκετό ασβέστιο κατά το στάδιο ωρίμανσης των καρπών, εκδηλώνεται η ασθένεια της πικρής κηλίδωσης, όπου οι καρποί εμφανίζουν κηλίδες με έντονο καστανό μέχρι και μαύρο χρώμα και η επιδερμίδα συρρικνώνεται ή νεκρώνεται, με αποτέλεσμα μεγάλης υποβάθμισης της ποιότητας των φρούτων και μείωση της παραγωγής (Παναγόπουλος 2007). Από την άλλη, η υπερβολική συγκέντρωση ουσιών όπως αζωτούχα λιπάσματα, αλάτων νατρίου και διάφορα φυτοπροστατευτικά γεωργικά φάρμακα προκαλούν τοξικότητα στα φυτά με συμπτώματα όπως χλωρώσεις φύλλων, εγκαύματα στους φυτικούς ιστούς, παραμορφώσεις βλαστών, ακόμα και νεκρώσεις φύλλων και ολόκληρων φυτών (Τζάμος 2017). Ρύποι που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα όπως το διοξείδιο του θείου και το όζον αλλά και βαρέα μέταλλα όπως ο χαλκός και το νικέλιο που υπάρχουν στο έδαφος προκαλούν πολύ βλαβερές παρενέργειες στο μεταβολισμό των φυτών δυσχεραίνοντας την ανάπτυξη και επιβίωση των φυτών (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012 και Τζάμος 2017). Τέτοιες ουσίες είναι αίτια της βιομηχανίας και άλλων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και αποτελούν παράγοντα αβιοτικής καταπόνησης (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012). Επομένως, πρώτα από όλα για την διάγνωση μιας ασθένειας που οφείλεται σε παθογόνους μικροοργανισμούς, το άτομο που κάνει τη διάγνωση πρέπει να γνωρίζει ή να αναγνωρίσει πως δεν οφείλεται σε κάποιον άλλον βιοτικό παράγοντα ή σε αβιοτικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες καθώς μπορεί να υπάρχουν κοινά συμπτώματα όπως κηλίδες και χλωρώσεις.

Οι παραδοσιακοί ή αλλιώς συμβατικοί μέθοδοι διάγνωσης εστιάζουν στην αναγνώριση των παθογόνων αιτιών μιας ασθένειας στηριζόμενοι στα φανερά συμπτώματα που προκαλεί η ασθένεια καθώς και σε εργαστηριακές τεχνικές. Πιο συγκεκριμένα, οι παραδοσιακοί μέθοδοι διάγνωσης βασίζονται στις μορφολογικές, τις μικροβιολογικές και τις βιοχημικές διαφορές που εμφανίζουν τα ασθενή φυτά σε σχέση με τα υγιή, δηλαδή αυτά που δεν έχουν μολυνθεί από κάποιο φυτοπαθογόνο μικροοργανισμό. Διάγνωση μπορεί να γίνει από τα ορατά συμπτώματα με την προϋπόθεση ότι το άτομο που θα κάνει τη διάγνωση θα διαθέτει μεγάλη εμπειρία και καλή γνώση των συμπτωμάτων, των καρποφοριών και του κύκλου ζωής των ασθενειών της κάθε περιοχής. Μια λιγότερο υποκειμενική και με μεγαλύτερη ακρίβεια μέθοδος από την αναγνώριση ορατών συμπτωμάτων, είναι η δειγματοληψία φυτών ή τμημάτων με συμπτώματα, η απομόνωση του μύκητα με καλλιέργεια στο εργαστήριο και η μικροσκοπική παρατήρηση του αιτίου για αναγνώριση των μορφολογικών του χαρακτηριστικών, λόγω χάρη τις υφές που αποτελούν το μυκήλιο, και τις καρποφορίες όπως κονιδιοφόρους με κονίδια. Αυτή η μέθοδος διάγνωσης απαιτεί επίσης εμπειρία και ικανότητα του ατόμου που κάνει τη διάγνωση αλλά και γνώση πάνω στη διάκριση και ταξινόμηση των μυκήτων, υπάρχουν δυο σημαντικά προβλήματα που θα αναφερθούν παρακάτω. Το πρώτο πρόβλημα της εργαστηριακής διάγνωσης σύμφωνα με τους Ray et al (2017) είναι πως απαιτείται πολύς χρόνος για να ολοκληρωθούν σωστά όλα τα στάδια αυτής της διαδικασίας από την ορθή δειγματοληψία στον αγρό, την ανάπτυξη του μύκητα σε τρυβλία στις κατάλληλες συνθήκες και μέχρι να γίνει η διάγνωση με τα μέσα μικροσκοπικής παρατήρησης. Αυτός ο χρόνος που απαιτείται για την εργαστηριακή διάγνωση θεωρείται κρίσιμος ως προς της επιτυχημένη αντιμετώπιση της ασθένειας και της προστασίας της φυτικής παραγωγής. Το δεύτερο βασικό πρόβλημα της εργαστηριακής διάγνωσης είναι πως κάποιοι μικροοργανισμοί όπως οι σκωριομύκητες (Τάξη Uredinales) που προκαλούν τις σκωριάσεις και οι περονόσποροι (Οικογένεια Peronosporaceae) είναι υποχρεωτικά παράσιτα και επιβιώνουν μόνο όταν παρασιτούν σε ζωντανούς φυτικούς ιστούς, οπότε δεν δύναται να καλλιεργηθούν στο εργαστήριο (Τζάμος 2017). Ακόμα μια συμβατική μέθοδος, είναι η ανάλυση των ισοενζύμων, δηλαδή ενζύμων με διαφορές στην ακολουθία των αμινοξέων που καταλύουν όμως την ίδια αντίδραση όπως διάφορες πηκτινάσες. Η μέθοδος ανάλυσης ισοενζύμων χρησιμοποιείται κυρίως για τον διαχωρισμό ειδών που είναι μορφολογικά πολύ κοντά μεταξύ τους. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει σχετικά υψηλό κόστος σε σύγκριση με τις υπόλοιπες συμβατικές μεθόδους διάγνωσης που αναφέρθηκαν

παραπάνω, αλλά προσφέρει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια στην αναγνώριση του παθογόνου αιτίου μιας ασθένειας (Ray et al. 2017). Συνοψίζοντας, οι τεχνικές της αναγνώρισης συμπτωμάτων, της εργαστηριακής διάγνωσης παθογόνων αιτίων και της ανάλυσης ισοενζύμων που αναπτύχθηκαν σε αυτήν την παράγραφο είναι τεχνικές που χρησιμοποιούνται πολλά χρόνια από τις γεωπονικές και βιολογικές επιστήμες και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του τομέα της φυτοπαθολογίας λόγω της απλότητάς τους και του χαμηλού τους κόστους (Ray et al. 2017). (Ray et al. 2017 και Τζάμος 2017).

Τις τελευταίες δεκαετίες αναπτύχθηκαν σύγχρονοι μέθοδοι διάγνωσης που αποσκοπούν στο να δώσουν λύσεις στις δυσκολίες και στους φραγμούς των παραδοσιακών μεθόδων διάγνωσης, είτε με οικονομικότερα και απλούστερα μέσα είτε με πολύ υψηλότερη ακρίβεια (Ray et al. 2017). Οι νέοι αυτοί μέθοδοι διάγνωσης αναπτύχθηκαν χάρις στην ραγδαία πρόοδο της επιστήμης και τεχνολογίας της μοριακής βιολογίας και κατηγοριοποιούνται σε δυο κατηγορίες, στις άμεσες και στις έμμεσες. Οι άμεσες τεχνικές διάγνωσης βασίζονται στην ανοσολογία, δηλαδή στη διάγνωση μιας ασθένειας μέσω των αντισωμάτων που παράγονται εξαιτίας της προσβολής του παθογόνου καθώς και στην ταυτοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών από το DNA τους μέσω της αλυσιδωτής αντίδρασης της πολυμεράσης (PCR) και των διαφορετικών εκδοχών της όπως την αντίστροφη PCR. Έμμεσες μέθοδοι διάγνωσης, βασίζονται στην διάκριση και διερμηνεύση των αλλαγών που προκαλούν οι παθογόνοι μικροοργανισμοί στα φυτά όπως επιπτώσεις των καταπονήσεων, αλλαγές στο μεταβολισμό και αναγνώριση των φυτικών μεταβολιτών. Η μέθοδος διάγνωσης που μελετήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση του πειράματος αυτής της εργασίας ανήκει στις έμμεσες μεθόδους διάγνωσης, τις τεχνικές ανάλυσης εικόνας (Imaging). Επομένως, νέοι μέθοδοι διάγνωσης ασθενειών σε φυτικούς οργανισμούς πρέπει να συνεχίζουν να αναπτύσσονται χωρίς αυτοί να βασίζονται μόνο στην συμπτωματολογία των φυτών, αλλά να συνδυάζουν πολύπλοκες μεθόδους για τη επίτευξη ενός βέβαιου και χρήσιμου πορίσματος (Sharma et al. 2021). (Ray et al. 2017 και Τζάμος 2017).

Στις επιστήμες γενικότερα, χρησιμοποιούνται ειδικά όργανα ή αισθητήρες όπου λαμβάνουν δεδομένα για κάποιο αντικείμενο από το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, δηλαδή την ακτινοβολία που εκπέμπει και αντανakλά ένα αντικείμενο. Τέτοια όργανα είναι και οι κάμερες όπως οι πολυφασματικές ή του τύπου RGB. Στις κάμερες αυτές, η

φασματική διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα, αναφέρεται στο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που είναι ευαίσθητος αυτός ο αισθητήρας (Jensen 2015). Αυτά τα τμήματα του φάσματος ονομάζονται κανάλια και καθορίζονται από τα μήκη κύματος που καλύπτουν. Για παράδειγμα μια κάμερα RGB είναι ευαίσθητη στο ορατό τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, δηλαδή τα κανάλια της ανιχνεύουν ενέργεια/ακτινοβολία με μήκη κύματος από 400 nm μέχρι 700 nm. Όταν ένας αισθητήρας έχει πολλά κανάλια με σχετικά μεγάλο εύρος σε διάφορα σημεία του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ονομάζεται πολυφασματικός, ενώ όταν έχει εκατοντάδες κανάλια με ιδιαίτερο στενό εύρος ονομάζεται υπερφασματικός (Jensen 2015). Μια υπερφασματική κάμερα έχει ποικίλες χρήσεις στις γεωπονικές και βιολογικές επιστήμες καθώς λαμβάνει πληροφορίες για την κατάσταση των φυτών ως προς τις καταπονήσεις που δέχονται, την ανάπτυξη ασθενειών, για τη δομή τους και για βιοχημικές λειτουργίες, δηλαδή πληροφορίες απαραίτητες για τη γεωργία ακριβείας και την φαινοτυπική αξιολόγηση φυτών (Behmann 2018). Οι Lacotte et al. (2022) με τα πειράματά τους όπου μόλυναν φυτά αμπέλου με περονόσπορο, έδειξαν πως η ανίχνευση του παθογόνου μύκητα στα φύλλα των φυτών ήταν εφικτή με τη χρήση υπερφασματικού αισθητήρα προτού να εμφανιστούν τα συμπτώματα της ασθένειας, όπως κατάφεραν να κάνουν και οι Vaggelas et. al. (2012) με τη χρήση θερμικής κάμερας (θερμογραφία) για ανίχνευση της ανάπτυξης ασθενειών σε διάφορα καλλωπιστικά φυτά. Πολυφασματικοί αισθητήρες (Assmann 2018) βρίσκουν εφαρμογή στις γεωπονικές αλλά και οικολογικές επιστήμες καθώς παρέχουν χωρικές πληροφορίες για τον υπολογισμό των δεικτών βλάστησης, όπως ο NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), που με την σειρά τους δίνουν εκτιμήσεις για την παραγωγή και τον τύπο της βλάστησης. Όπως επισημαίνουν οι Bleasdale et al. (2022), όμως, η αγορά πολυφασματικών και υπερφασματικών καμερών είναι ακριβή και η χρήση τους αρκετά περίπλοκη για να διαδοθούν περισσότερο αυτές οι τεχνικές.

1.2. Μέθοδοι υπέρυθρης θερμογραφίας και οι χρήσεις τους στην επιστήμη

Η εσωτερική θερμότητα που έχει ένα σώμα μετατρέπεται, εν μέρη, σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Έτσι, η θερμοκρασία ενός σώματος μπορεί να μετρηθεί από αισθητήρες οι οποίοι είναι ευαίσθητοι στο θερμικό υπέρυθρο (Far-Infrared) τμήμα του φάσματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα σώμα, συγκεκριμένα

στα μήκη κύματος 3-14μm (Jensen 2015). Γενικά, η θερμοκρασία ενός σώματος είναι ένα πολύ σημαντικό φυσικό μέγεθος καθώς μπορεί να δώσει χρήσιμα συμπεράσματα για την κατάσταση ενός σώματος, λόγω χάρη για την υγεία ενός οργανισμού, την καταπόνηση που δέχεται ένα φυτό ή το αν υπάρχει θερμική απώλεια σε κάποιο κτίριο (Sharma et al. 2021).

Οι εφαρμογές των θερμικών αισθητήρων είναι πάρα πολλές και χρησιμοποιούνται από τις ιατρικές, τις οικολογικές, τις βιολογικές, τις φυσικές επιστήμες αλλά βρίσκουν χρήση και στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Ειδικότερα, οι θερμικές κάμερες είναι πολύ σημαντικές για τις δυνάμεις της πυροσβεστικής καθώς μπορούν να εντοπίσουν ανθρώπους σε κτίρια που φλέγονται ή να παρακολουθούν δασικές εκτάσεις για ξέσπασμα πυρκαγιάς (Apriani et al. 2022). Η αστυνομία τις χρησιμοποιεί για τον εντοπισμό αγνοούμενων ή εγκληματιών στο σκοτάδι. Μια θερμική εικόνα ενός σπιτιού μπορεί να δείξει τα σημεία όπου υπάρχει απώλεια θερμότητας λόγω κακών μονωτικών υλικών. Πολλές μεγάλες περιβαλλοντικές μελέτες έχουν μελετήσει τη μόλυνση ενός υδάτινου βιότοπου με την ανίχνευση θερμικών αποβλήτων. Στη δασοπονία, λαμβάνονται χάρη την θερμική ακτινοβολία πληροφορίες για τη κόμη των δένδρων ενός δάσους, την ηλικία τους, τη φυσιολογία τους και τη βιομάζα που υπάρχει στο δάσος. Σαν δείκτης καταπόνησης των φυτών, τα δεδομένα στο θερμικό υπέρυθρο δείχνουν τη κατανάλωση νερού από τα φυτά, τη καταπόνηση λιβαδιών και κάνουν μια εκτίμηση για την αναμενόμενη παραγωγή μιας καλλιέργειας. Η ιατρική χρησιμοποιεί θερμικούς αισθητήρες για έλεγχο των ανθρώπων για προβλήματα υγείας όπως για παράδειγμα την ύπαρξη κάποιου καρκινικού όγκου, για θυροειδή, για το φαινόμενο Reynaud, για την θερμομέτρηση ασθενών με πυρετό ή για ορθοπεδικούς σκοπούς (Sruthi and Sasikala, 2015). Επιπροσθέτως, σύστημα με καταγραφή υπέρυθρης ακτινοβολίας από κάμερα χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση και εκγύμναση των άνω άκρων ασθενών που πλήχτηκαν από κάποιο εγκεφαλικό επεισόδιο με σκοπό την αποκατάσταση της φυσιολογικής τους λειτουργίας (Chen 2017). Γενικά, οι τεχνικές που υπολογίζουν και μελετάνε θερμικές εικόνες ενός οργανισμού για να διαπιστώσουν την κατάσταση της υγείας του ονομάζονται τεχνικές υπέρυθρης θερμογραφίας (Infrared Thermography – IRT). (Jensen 2015).

Τεχνικές υπέρυθρης θερμογραφίας χρησιμοποιούνται και για τη μελέτη φυτών και ουσιαστικά η μέτρηση της θερμοκρασίας ενός φυτού ή κάποιου φυτικού οργάνου, όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία των φύλλων, μπορεί να αποφέρει πληροφορίες

για την υδατική κατάσταση του φυτού, το μικροκλίμα στους ιστούς του και τις αλλαγές στην διαπνοή του (Mahlein 2016). Από πειράματα σε αμπέλι, οι Jones et al. 2002 κατάφεραν να πάρουν πληροφορίες για την υδατική κατάσταση των φύλλων των φυτών με την υπέρυθρη θερμογραφία, υπήρξε δηλαδή συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας και της υδατικής κατάστασης στα φύλλα. Ακόμα, η Mahlein (2016) επισημαίνει πως στο βιβλίο του Jones (1992) αναφέρεται ότι η θερμοκρασία των φύλλων σχετίζεται, ιδιαίτερα στενά μάλιστα, με τη διαπνοή των φύλλων και η σχέση τους είναι αντίστροφη (Oerke et al 2006), με άλλα λόγια, όσο αυξάνεται ο ρυθμός διαπνοής και εξατμίζεται νερό από τα στόματα των φύλλων, τόσο μειώνεται η θερμοκρασία του φύλλου. Όταν αναπτύσσεται ένας παθογόνος μικροοργανισμός στα φύλλα ενός φυτού επηρεάζονται οι μεταβολικές διεργασίες του φύλλου και συνεπώς αλλάζει και ο ρυθμός διαπνοής του φύλλου (Oerke et al 2006). Κατά συνέπεια, εφόσον ο ρυθμός διαπνοής σχετίζεται με την υδατική κατάσταση αλλά και την θερμοκρασία του φύλλου και ο ρυθμός διαπνοής αλλάζει όταν υπάρχει μόλυνση του φύλλου από παθογόνα, μια αλλαγή στη θερμοκρασία που ανιχνεύεται με τεχνικές υπέρυθρης θερμογραφίας μπορεί να υποδεικνύει την ανάπτυξη κάποιου παθογόνου.

Η υπέρυθρη θερμογραφία βρίσκει σημαντικές εφαρμογές για τις γεωπονικές και τις συναφή επιστήμες με τις πληροφορίες που μπορεί να πάρει για τα φυτά. Η μέτρηση της διαπνοής και της υδατικής κατάστασης των φυτών είναι ένας πολύ καλός δείκτης για τον προγραμματισμό της άρδευσης όπως επίσης και του εντοπισμού φυτών που δέχονται υδατική καταπόνηση λόγω ξηρασίας ή έλλειψης νερού (Sharma et al. 2021). Μπορεί επίσης να δείξει, πότε τα φυτά είναι κατάλληλα για συγκομιδή με έλεγχο του σταδίου ωριμότητας (Sharma et al. 2021). Σύμφωνα με τους Sharma et al. (2021), ακόμα ένας τομέας με ενδιαφέρουσες εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας, αναφερόμενοι στους Al-doski et al. (2016), είναι ο ποιοτικός έλεγχος σπόρων στις αποθήκες για ζημιές από εχθρούς, όπως για παράδειγμα το έντομο *Callosobruchus maculatus* που γεννάει στην επιφάνεια φασολιών και η προνύμφη του προκαλεί μεγάλες απώλειες στα αποθηκευμένα προϊόντα, καθώς και ανίχνευση προσβολής εντόμων σε φυτά, αναφερόμενοι στους Ahmed et al. (2018), λόγου χάρη ανίχνευση του κόκκινου σκαθαριού (*Rhynchophorus ferrugineus*) σε δέντρα φοίνικα.

Στον κλάδο της εντομολογίας, οι υπέρυθρες κάμερες βρίσκουν και εκεί εφαρμογές. Οι Gorb και Gorb (2019) μελέτησαν με υπέρυθρες κάμερες την συμπεριφορά εντόμων και επιβεβαίωσαν παλαιότερα συμπεράσματα που δεν είχαν αποδειχθεί πειραματικά.

Πιο συγκεκριμένα, θερμομέτρησαν λιβελούλες, θηλυκές και αρσενικές μαζί, κατά την γέννα των αβγών τους και τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντικά αυξημένη θερμοκρασία στην περιοχή του θώρακα των αρσενικών εντόμων σε σχέση με τα θηλυκά λόγω της μεγαλύτερης χρήσης των μυών τους για το πέταγμα. Αποδείχθηκε δηλαδή, πως οι αρσενικές λιβελούλες συνεισφέρουν περισσότερο στην αιώρηση του ζεύγους πάνω από το νερό όπου γεννάν τα αβγά τους, καθώς στηρίζουν το θηλυκό το οποίο κρατάνε. Σε άλλο πείραμα, μελετήθηκε η διακύμανση της θερμοκρασίας στο σώμα δυο διαφορετικών ειδών νυχτοπεταλούδας όταν αυτές καθόταν, όταν προετοιμαζόταν να πετάξουν, όταν πέταγαν και όταν ηρεμούσαν μετά τη πτήση (Kim, 2022). Οι μετρήσεις έγιναν με υπέρυθρη κάμερα σε εξωτερικό χώρο. Εκτός από τις διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ της κοιλιάς του θώρακα και του κεφαλιού των εντόμων, οι ερευνητές ανακάλυψαν πως τη μεγαλύτερη τιμή θερμοκρασίας δεν την είχε ο θώρακας του εντόμου όπως πίστευαν οι επιστήμονες, καθώς έτσι συνηθίζεται να συμβαίνει λόγω της μυϊκής ενεργοποίησης του θώρακα κατά τη πτήση, αλλά οι οφθαλμοί του εντόμου. Τέτοια πειράματα, όπως αυτό των Gorb και Gorb (2019) ,δείχνουν την σημασία των τεχνικών θερμογραφίας καθώς όχι μόνο δίνουν ακριβή πληροφορίες και νέες γνώσεις σε θέματα που θεωρούνταν γνωστά και δεδομένα, αλλά κάνουν εφικτή τη μελέτη οργανισμών στο φυσικό τους περιβάλλον και κατά τη διάρκεια φυσιολογικών συμπεριφορών χωρίς να παρενοχλούνται από τους ερευνητές ή τα όργανα μέτρησης. Συνοψίζοντας, οι τεχνικές θερμογραφίας είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για τις βιολογικές επιστήμες, καθώς δίνουν αποτελέσματα μεγάλης αξίας αφού καταγράφονται σε πραγματικές και φυσικές καταστάσεις και όχι σε περιβάλλον εργαστηρίου. (Gorb and Gorb 2019, Kim 2022).

Σύμφωνα με τον Glenn (2012), από εργασία του Nabity et al. (2009), οι τεχνικές θερμογραφίας σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους, βοήθησαν στην αποσαφήνιση των αποτελεσμάτων που έχουν στα φυτά οι επιθέσεις από φυλλοφάγα έντομα. Τα φυτοφάγα έντομα που τρώνε κομμάτια του φύλλου, προκαλούν αντιδράσεις από τα γειτονικά τμήματα του φυτού και μια από αυτές είναι η μείωση της φωτοσύνθεσης σε αυτά. Θερμικές εικόνες έδωσαν πληροφορίες για την αγωγιμότητα των στομάτων, για την ενεργειακή και υδατική κατάσταση και για την διαπνοή στο φύλλο. Η σύνδεση τέτοιων αλλαγών στην φυσιολογία και λειτουργία του φύλλου με την προσβολή από ζωντανούς οργανισμούς συνεισφέρει στην καλύτερη πρόβλεψη της αντίδρασης που θα

έχει το φυτό σε άλλες προσβολές αλλά και στον καλύτερο υπολογισμό των αναμενόμενων απωλειών παραγωγής. (Nabity 2009).

Συσχέτιση της θερμοκρασίας ενός φυτικού ιστού και της ανάπτυξης παθογόνων μικροοργανισμών σε αυτό έχει παρατηρηθεί από πολλά πειράματα οπότε η χρήση τεχνικών θερμογραφίας για εντοπισμό ανάπτυξης παθογόνων φαίνεται εφικτή (Lipinska et al 2022). Φυσικά είναι πολύ σημαντικό η θερμογραφία να υποδεικνύει την ύπαρξη του παθογόνου μικροοργανισμού στα αρχικά στάδια ανάπτυξής του ώστε να αντιμετωπισθεί αποτελεσματικά όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Σε περιπτώσεις όπως σε πειράματα σε αμπέλια με περονόσπορο (Stoll et al 2008) αλλά και σε φυτά αγγουριάς μολυσμένα με Περονόσπορο (Oerke et al 2006), η ανίχνευση της ανάπτυξης του παθογόνου έγινε πολύ νωρίς, πριν ακόμα να εμφανίσει τα ορατά συμπτώματα της ασθένειας. Επιπροσθέτως, πειράματα θερμογραφίας καρπών μηλιάς μολυσμένα με διάφορες ασθένειες των μηλοειδών (των μυκήτων *Penicillium expansum*, *Botrytis cinerea* και *Rhizopus stolonifer* αλλά και μεικτές μολύνσεις), έδειξε συσχέτιση της ανάπτυξης των παθογόνων μικροοργανισμών με άνοδο της θερμοκρασίας στους ιστούς που αναπτυσσόταν και κάθε είδος μύκητα προκαλούσε διαφορετικές αλλαγές στη θερμοκρασία, υποδεικνύοντας πως η θερμογραφία καρπών ίσως είναι ικανή να ανιχνεύσει όχι μόνο την μόλυνση αλλά και να διακρίνει το είδος του φυτοπαθογόνου μικροοργανισμού (Lipinska et al. 2022).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των τεχνικών θερμογραφίας είναι πως επηρεάζουν ελάχιστα έως καθόλου τους φυτικούς ιστούς, σε αντίθεση με πιο διαδεδομένες τεχνικές διάγνωσης όπως δειγματοληψία φυτών ή τμημάτων από αυτά και έλεγχος στο εργαστήριο για παθογόνα αίτια (Lipinska et al 2022 and Stoll et al 2008). Οι τεχνικές θερμογραφίας, όπως και άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούν αισθητήρες πολυφασματικούς, υπερφασματικούς και RGB, έχουν αποδεδειγμένη αποτελεσματικότητα και έχουν πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά όπως ικανότητα αυτοματοποίησης των συστημάτων τους, αντικειμενικότητα λόγω της μικρής συμμετοχής ανθρώπων κατά τη μέτρηση και επαναληψιμότητα ώστε να λαμβάνουν δεδομένα συνεχώς ή καθημερινά με την ίδια ακρίβεια (Mahlein 2016). Αυτά τα χαρακτηριστικά, καθιστούν την υπέρυθρη θερμογραφία ιδανικό μέσο για την μελέτη της κίνησης, της ανάπτυξης και των συμπεριφορών που έχουν τα αντικείμενα μελέτης, καθώς γίνεται καταγραφή της εξέλιξης αυτών των καταστάσεων (Glenn 2012). Εκτός από το ότι δεν επεμβαίνουν σχεδόν καθόλου στο αντικείμενο μελέτης, οπότε δεν το

καταστρέφουν και δεν χάνεται καθόλου φυτικό κεφάλαιο, γίνεται μεγάλη εξοικονόμηση χρόνου για τη διάγνωση μιας ασθένειας (Mahlein 2016 and Lipinska et al 2022).

Οι διάφοροι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράγματα που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους τοποθετούνται σε διάφορες πλατφόρμες, ανάλογα με το οπτικό πεδίο που χρειάζεται να καλύπτεται από το κάθε πείραμα. Πλατφόρμες όπως αεροπλάνα και μη επανδρωμένα σκάφη (UAV ή drone) καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή εδάφους και δίνουν δεδομένα για πολλά φυτά, ενώ επίγειες πλατφόρμες όπως γεωργικοί ελκυστήρες και ρομπότ χρησιμοποιούνται για μικρής κλίμακας πειράγματα που μελετάνε λίγα φυτά (Mahlein 2016). Για τη μελέτη ενός μόνο φυτού, μια απλή βάση που συγκρατεί τους αισθητήρες είναι αρκετή. Σε κάθε περίπτωση βέβαια, πρέπει να χρησιμοποιείται αισθητήρας με κατάλληλη χωρική ανάλυση ανάλογα το πεδίο μελέτης αλλά και με την απαιτούμενη ακρίβεια στην διάκριση διαφορετικών θερμοκρασιών στο σώμα ή αντικείμενο που μελετάται (Glenn 2012). (Jensen 2015).

1.3.Θερμικές κάμερες-εξοπλισμός για υπέρυθρη θερμογραφία.

Πλέον με την άνοδο της τεχνολογίας τα συστήματα θερμομετρήσεις έχουν γίνει πιο προσιτά από ποτέ και υπάρχουν πολύ φτηνές επιλογές για θερμικές κάμερες και απλούς μικροεπεξεργαστές στην αγορά χωρίς να υστερούν στην ακρίβεια των μετρήσεων (Glenn 2012). Οι θερμικές κάμερες περιέχουν μια διάταξη από αισθητήρες ευαίσθητους στην υπέρυθρη ακτινοβολία και κάθε αισθητήρας δίνει μια θερμική τιμή με αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας ψηφιακής εικόνας όπου κάθε εικονοστοιχείο (pixel) της αντιστοιχεί στα δεδομένα κάθε αισθητήρα (Glenn 2012). Για παράδειγμα, η θερμική κάμερα AMG8833 της εταιρίας Panasonic περιέχει μια διάταξη με 8x8 αισθητήρες, οπότε δίνει μια ψηφιακή εικόνα με 64 εικονοστοιχεία και παρέχει μετρήσεις στο εύρος θερμοκρασιών από 0°C μέχρι 80°C (www.industrial.panasonic.com Βασικές και πολύ φτηνές θερμικές κάμερες όπως η AMG8833 έχουν αποδείξει την χρησιμότητα των τεχνικών θερμογραφίας σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης ζωής. Με τις κατάλληλες προδιαγραφές και γνώσεις χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της ποιότητας των масκών προστασίας προσώπου σε δημόσιους χώρους, ιδιαίτερα σημαντικό για την περίοδο της πανδημίας του SARS-CoV-2 (Sulino et al. 2021), καθώς και για την ανίχνευση ατόμων με βακτηριόσεις και

διαβήτη (Priya et al. 2021). Για ακόμα μια φορά, με βάση τη κατάσταση που επικράτησε κατά την πανδημία του SARS-CoV-2, δημιουργήθηκαν συστήματα θερμομέτρησης πολυσύχναστων χώρων για εύρεση ανθρώπων με αυξημένη θερμοκρασία, που δηλαδή δηλώνει ασθένεια. Με συνδυασμό της θερμικής κάμερας AMG8833 και RGB κάμερες εκπαιδεύτηκαν μοντέλα που ειδοποιούν όταν κάποιος άνθρωπος με πυρετό δεν φοράει σωστά ή και καθόλου μάσκα προστασίας προσώπου (Hassan 2022)

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία βασίστηκε πάνω στο πείραμα των Vagelas et al. (2021), αλλά αντί για την θερμική κάμερα AMG8833 Grind-Eye (www.gr.rsdelivers.com) με τους 8x8 αισθητήρες, χρησιμοποιήθηκε μια ελάχιστα πιο ακριβή θερμική κάμερα, η MLX90640 Standard (55°) από τον κατασκευαστή Pimoroni με 32x24 αισθητήρες που παρέχει μετρήσεις στο εύρος θερμοκρασιών -40°C - 300°C και παρέχει ακρίβεια ± 1 °C (www.opencircuit.shop). Μια τέτοια θερμική κάμερα παρέχει εικόνες με αρκετά μεγαλύτερη ανάλυση και επιβεβαιωμένη απόδοση χωρίς να αυξάνεται ιδιαίτερα το κόστος αγοράς, σε σχέση με την AMG8833, και χάρις σε αυτόν τον λόγο έχει χρησιμοποιηθεί από ερευνητές σε όλο το κόσμο τα τελευταία χρόνια (Chidurala & Li 2022). Κάποιες εφαρμογές είναι, για παράδειγμα, η χρήση της για θερμομέτρηση ανθρώπων, εντοπισμό ασθενών με πυρετό και έλεγχος των προσώπων για το αν η μάσκα προστασίας φοριέται με ορθό τρόπο (Wang et al. 2022) και η χρήση της για δημιουργία ιατρικού συστήματος θερμογραφίας-θερμομέτρησης ανθρώπων με κόστος πολλές φορές μικρότερο από αυτά που χρησιμοποιούνται στην ιατρική (Sruthi and Sasikala 2015). Για παρόμοια πειράματα με αυτά που μόλις αναφέρθηκαν, έχει χρησιμοποιηθεί και η θερμική κάμερα AMG8833 που εξετάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, αλλά η σημαντικά μεγαλύτερη ανάλυση που έχει η MLX90640 αυξάνει την ευκρίνεια των θερμών πηγών και μπορεί να καλύψει πολύ μεγαλύτερο πεδίο όρασης. Επομένως, μια ακόμα χρήσιμη εφαρμογή που βασίζεται στο μεγάλο οπτικό πεδίο και την ακρίβεια της MLX90640, είναι η παρακολούθηση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού για αύξηση της θερμοκρασίας, όπου η μεγάλη ανάλυση μπορεί να δείξει ακριβώς πια συσκευή υπερθερμάνθηκε και μπορεί να ειδοποιήσει τους υπεύθυνους (He et al. 2020). Από μόνη της, χωρίς να συνδυάζεται με κάποια κάμερα τύπου RGB, η MLX90640 προτείνεται ως κάμερα ασφαλείας σε έξυπνα σπίτια καθώς είναι ικανή να ανιχνευθεί άνθρωπος και τις δραστηριότητες που κάνουν, χωρίς όμως να βιντεοσκοπεί τους κατοίκους του σπιτιού, αφού η κάμερα θα δίνει μόνο θερμικές

εικόνες (Spasov et al. 2019). Με άλλα λόγια, μπορεί να ανιχνεύσει την παραβίαση του σπιτιού από κλέφτες ή ακόμα και να εντοπίσει αν έμεινε κάποιο μάτι της κουζίνας ανοικτό χωρίς όμως να παραβιάζει προσωπικά δεδομένα όπως πρόσωπα, ιδιωτικές πληροφορίες ή συζητήσεις (Spasov et al. 2019). Μπορεί φυσικά, να συνδυαστεί η θερμική κάμερα με μια απλή κάμερα τύπου RGB ώστε να υπάρχει και εικόνα με φυσικά χρώματα μαζί με τη θερμική απεικόνιση, όπως έκαναν οι Qi & Siang (2019) με το χαμηλού κόστους σύστημα που έφτιαξαν. Αντίστοιχο σχεδιασμό έχει και το σύστημα που κατασκευάστηκε για την συγκεκριμένη εργασία που περιέχει την θερμική κάμερα MLX90640 και μια χαμηλού κόστους RGB κάμερα, Την Tyro Full HD Webcam (64°) από τον κατασκευαστή Trust. Η MLX90640 έχει συγκριθεί με υψηλότερου κόστους εξοπλισμού θερμομέτρησης όπως θερμίστορ, που είναι τύποι αντιστάσεων που επηρεάζονται από τη θερμοκρασία, ή θερμοηλεκτρικά θερμόμετρα, και αποδείχθηκε πιο αποτελεσματική στον υπολογισμό της θερμοκρασίας σωμάτων από αυτά τα όργανα (Wu et al. 2019). Φυσικά υπάρχουν και περιορισμοί στην χρήση της ή τεχνικά προβλήματα όπως ύπαρξη ακανόνιστων διακυμάνσεων στις τιμές θερμοκρασίας, ειδικά στον περιβάλλοντα χώρο (background) της θερμικής εικόνας, αλλά ακόμα και αυτά μπορούν να λυθούν ή να συνυπολογιστούν στο αποτέλεσμα, αρκεί οι χειριστές να τα γνωρίζουν από πριν (Gu et al. 2020). Συνοψίζοντας, η MLX90640 είναι ευρέως διαδεδομένη λόγω του χαμηλού κόστους για τις δυνατότητες που προσφέρει και ίσως να μπορεί να αντικαταστήσει κάποια συστήματα ανίχνευσης με υψηλότερο κόστος.

1.4.Αλληλεπίδραση φυτοπαθογόνου μύκητα και φυτού ξενιστή

Για τον ακριβή εντοπισμό αλλά και την επίλυση των προβλημάτων που προκαλούν οι παθογόνοι μικροοργανισμοί κρίνονται απαραίτητες όχι μόνο οι γνώσεις πάνω στον κύκλο ζωής και τον τρόπο ανάπτυξης των παθογόνων μικροοργανισμών, αλλά και η φυσιολογία και μορφολογία του ίδιου του φυτού που είναι ο ξενιστής της ασθένειας (Sharma et al. 2021). Σύμφωνα με τον Τζάμο, κάθε παθογόνο αίτιο φαίνεται να έχει ξεχωριστή σχέση με το φυτό ξενιστή του και εμφανίζει ιδιαιτερότητες στον τρόπο που επικοινωνεί, στις αντιδράσεις και αλληλεπιδράσεις τους, στον τρόπο που διεισδύει στα φυτικά κύτταρα και στη τροφική εξάρτηση που αποκτά για την επιβίωσή του (Τζάμος 2017).

Το πρώτο στάδιο που αλληλοεπιδράν το φυτό με τον ξενιστή, είναι το στάδιο της επαφής. Σε αυτό το στάδιο, το μόλυσμα, δηλαδή ένα τμήμα του παθογόνου το οποίο είναι ικανό να προκαλέσει ασθένεια όπως κάποιο σπόριο ή μυκήλιο, μετακινείται από τη θέση που δημιουργήθηκε στο σημείο μόλυνσης πάνω στο φυτό. Όταν έρθουν σε επαφή οι δυο οργανισμοί, αρχίζει η επικοινωνία μεταξύ τους. Το μόλυσμα που προσκολλάτε στο φυτό αναγνωρίζεται από αυτό μέσω βιοχημικών αντιδράσεων (Τζάμος 2017).

Αφού οι δυο οργανισμοί είναι σε στενή επαφή και έχουν ανταλλάξει χημικά μηνύματα μεταξύ τους, το μόλυσμα θα προσπαθήσει να διεισδύσει στο εσωτερικό των φυτικών ιστών μέσω των στομάτων των φύλλων, των φακιδίων από τα υδατόδια ή από πληγή που έχει δεχτεί το φυτό από τρίτο παράγοντα. Επιπλέον, υπάρχει και η περίπτωση της απευθείας διάτρησης των κυτταρικών στρώσεων του φυτού. Πιο συγκεκριμένα, οι μύκητες διαθέτουν εξειδικευμένες μυκηλιακές κατασκευές για να επιτύχουν την άμεση είσοδο στο φυτό και αρχίζουν να δημιουργούνται από τροποποιημένες μυκηλιακές απολήξεις όταν το μόλυσμα προσκολληθεί γερά στην εφυμενίδα. Η εφυμενίδα αποτελείται από στρώματα υδρογονανθράκων αλλά κυρίως κηρών που βρίσκονται εξωτερικά των επιδερμικών κυττάρων και ουσιαστικά είναι η πρώτη άμυνα που έχουν τα φυτά σε βιοτικές και αβιοτικές καταπονήσεις, καθώς εμποδίζει την διαφυγή του νερού από τα φύλλα αλλά και δυσκολεύει την είσοδο φυτοπαθογόνων μικροοργανισμών (Taiz et al. 2017). Η βλαστική υφή που προέρχεται από το μόλυσμα θα αναγνωρίσει ποια σημεία του φυτικού ιστού είναι τα καταλληλότερα για να γίνει η διέλευση του μύκητα στο φυτό. Μόλις εντοπιστεί ένα τέτοιο σημείο, η υφή θα διογκωθεί και θα προσκολληθεί εκεί, παρέχοντας σταθερότητα για να συνεχιστεί η ανάπτυξη του μύκητα στο φυτό. Έτσι, έχει δημιουργηθεί μια μυκηλιακή κατασκευή που ονομάζεται πλάκα συγκράτησης (Τζάμος 2017).

Στη συνέχεια η πλάκα συγκράτησης θα σχηματίσει την υφή διείσδυσης που αλλιώς ονομάζεται και ράμφος. Τα τοιχώματα της υφής είναι λεπτά και το σχήμα της είναι κωνικό για να συντελεί μηχανικά στην διάτρηση. Επιπλέον, ασκείται σχετικά υψηλή ωσμωτική πίεση προς το φυτό που συντελεί και αυτό μηχανικά. Η σημασία της υφής διείσδυσης είναι μεγάλη, καθώς δεν συνεισφέρει μόνο μηχανικά στην είσοδο στο φυτό αλλά από αυτή παράγοντα και ειδικά ένζυμα που είναι ικανά να ξεπεράσουν το πρώτο στάδιο της άμυνας των φυτών διασπώντας την εφυμενίδα και τα κυτταρικά τοιχώματα της επιδερμίδας. Έτσι να πετυχαίνετε η διείσδυση στο φυτικό ιστό. Τα ένζυμα αυτά

αποδιοργανώνουν την πηκτίνη και την κυτταρίνη των φυτικών κυττάρων. Ακόμα, τα ένζυμα μπορεί να είναι τοξίνες που νεκρώνουν τα φυτικά κύτταρα ή ορμόνες που προάγουν την αύξηση του φυτού. Βέβαια αυτή η δράση των ενζύμων διαφέρει από παθογόνο σε παθογόνο και δεν έχουν όλα τα παθογόνα την ικανότητα διείσδυσης σε κάθε είδος φυτού. (Τζάμος 2017).

Εφόσον έχει εισχωρήσει η μυκηλιακή υφή στο φυτό, αρχίζει η μόλυνση με μορφή παρασιτισμού, δηλαδή ο μύκητας ζει στο εσωτερικό του φυτού και χρησιμοποιεί τα θρεπτικά συστατικά του για να επιβιώσει και να αναπτυχθεί χωρίς ο μύκητας να προσφέρει κάτι στο φυτό. Οι εγκατεστημένες ανάμεσα στους φυτικούς ιστούς υφές πολλαπλασιάζονται και αναπτύσσονται με γρήγορους ρυθμούς χάρις τα θρεπτικά στοιχεία που δέχονται από το φυτό. Η απορρόφηση αυτή των θρεπτικών επιτυγχάνεται με εξειδικευμένες μυκηλιακές κατασκευές, τους μυζητήρες, που αναπτύσσονται στις άκρες των υφών και έρχονται σε επαφή με τα φυτικά κύτταρα. Οι μυζητήρες αυξάνουν την περατότητα της κυτταρικής μεμβράνης ώστε τα θρεπτικά που περιέχονται στο φυτικό κύτταρο να μπορούν να περάσουν στις μυκηλιακές υφές και να τραφεί μύκητας, χωρίς όμως να θανατωθεί το κύτταρο. (Τζάμος 2017).

Το επόμενο στάδιο είναι της επώασης και ουσιαστικά είναι η διάρκεια που χρειάζεται η μόλυνση του μύκητα να εκδηλώσει τα συμπτώματα της ασθένειας που θα προκαλέσει στο φυτό ξενιστή του. Για ασθένειες προσαρμοσμένες στους ξενιστές τους συνήθως χρειάζονται κάποιες μέρες μέχρι να εμφανιστούν τα συμπτώματα, όμως υπάρχουν περιπτώσεις που η επώαση χρειάζεται μήνες ή ακόμα και έτη. Φυσικά, αυτό το στάδιο επηρεάζεται και από τις συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, τις οποίες κάθε είδος μύκητα έχει τις δικιές του ευνοϊκές για τη μόλυνση και επώαση συνθήκες. (Τζάμος 2017).

Τα τελευταία στάδια του βιολογικού κύκλου που μπορεί να έχει ένα φυτοπαθογόνο αίτιο είναι της εμφάνισης των συμπτωμάτων και της διάδοσής του σε νέο ξενιστή. Τα συμπτώματα είναι ο βασικότερος τρόπος να αναγνωριστεί η ασθένεια από τους ανθρώπους καθώς είναι οι αποκλίσεις από την φυσιολογική εικόνα των φυτών. Χαρακτηριστικά συμπτώματα ασθενειών που οφείλονται σε μυκητιάσεις είναι οι χλωρώσεις των φύλλων οι μεταχρωματισμού διάφορων ιστών και οι διάφορες κηλιδώσεις και σήψεις των ιστών. Μαζί με τα συμπτώματα εμφανίζονται και τα σημεία τα οποία αποτελούν μυκηλιακές κατασκευές διαχείμανσης ή αναπαραγωγικά όργανα

του μύκητα. Συνηθισμένα σημεία είναι οι εξανθήσεις, οι σωροί και τα μανιτάρια. Από τις μυκηλιακές υφές και πάντα στις απαιτούμενες συνθήκες, σχηματίζονται το αγενές ή εγγενές πολλαπλασιαστικό υλικό όπως κονίδια και ασκοσπόρια αντιστοίχως που θα διαδώσει το μύκητα σε άλλα φυτά. (Τζάμος 2017).

Η μόλυνση από παθογόνα αίτια και η βλάβη του φυτικού ιστού είναι ένας παράγοντας βιοτικής καταπόνησης (biotic stress) και επηρεάζει σημαντικά τις φυσιολογικές και βιοχημικές λειτουργίες του φυτού ξενιστή (Τζάμος 2017). Οι μεταβολές που θα υποστεί το φυτό εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες καθώς όπως έχει προαναφερθεί, η σχέση ενός παρασιτικού παθογόνου μικροοργανισμού με το φυτό ξενιστή του είναι ιδιαίτερη σε κάθε περίπτωση. Κάποιοι από τους παράγοντες που κρίνουν την σοβαρότητα των επιπτώσεων της μόλυνσης είναι το είδος του παθογόνου που καθορίζει τα βιοχημικά και μηχανικά εργαλεία που έχει στη διάθεσή του για να πετύχει η μόλυνση, το είδος του φυτού με τους αμυντικούς μηχανισμούς του, σε ποιο όργανο θα πραγματοποιηθεί η μόλυνση, το αν τη χρονική στιγμή της μόλυνσης οι περιβαλλοντικές συνθήκες θα είναι ευνοϊκές για την ανάπτυξη του παθογόνου και το αναπτυξιακό στάδιο το οποίο θα βρίσκεται το φυτό (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012).

Μια βασική λειτουργία του φυτού που επηρεάζεται από την επιρροή του παθογόνου είναι η αναπνοή, δηλαδή ο μεταβολισμός οξυγόνου και σακχαρόζης για την απελευθέρωση ενέργειας και την έκλυση διοξειδίου του άνθρακα (Taiz et al. 2017). Στο σημείο που έγινε η μόλυνση, η αναπνοή αυξάνεται σημαντικά. Αν το φυτό είναι ανθεκτικό στην ασθένεια, η άμυνα που ενεργοποιείται αφού γίνει η μόλυνση ευθύνεται για την αύξηση της αναπνοής αλλά στη συνέχεια θα μειωθεί πάλι. Αν όμως το φυτό δεν εμφανίσει ανθεκτικότητα, η αναπνοή θα αργήσει περισσότερο να πέσει σε φυσιολογικά επίπεδα. (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012). Ουσιαστικά, η άμυνα το φυτού απαιτεί αυξημένη παροχή ενέργειας από το φυτό (παρέχεται με την αναπνοή) και το παθογόνο αναγκάζει την αύξηση της αναπνοής για την ταχύτερη παραγωγή ενέργειας και χημικών ουσιών μέσω του μεταβολισμού καθώς είναι εξαρτημένο από το φυτό για την τροφή του ώστε για να αναπτυχθεί και αυτό γρήγορα (Τζάμος 2017).

Πολύ σημαντικές είναι οι επιδράσεις των μολύνσεων στη φωτοσύνθεση, είτε καταστρέφοντας άμεσα το φύλλωμα είτε παρεμποδίζοντάς την έμμεσα. Βλάβες σε τμήματα των φύλλων ή ακόμα και φυλλόπτωση μειώνει τη συνολική φωτοσύνθεση του φυτού. Ελάττωση της φωτοσύνθεσης γίνεται και με το κλείσιμο των στομάτων που

προκαλούν ασθένειες που φράζουν τις ηθμαγγειώδεις δεσμίδες. Οι μύκητες παράγουν τοξίνες που εμποδίζουν τη δράση των φωτοσυνθετικών ενζύμων αλλά και των χλωροπλαστών και μπορούν ακόμα και να τους καταστρέψουν. Τέλος, το φυτό μπροστά στον κίνδυνο της ασθένειας θα μειώσει από μόνο του την έκφραση γονιδίων που συντελούν στην φωτοσύνθεση και γενικότερα στην ανάπτυξη του φυτού και θα στραφεί στην έκφραση γονιδίων για την άμυνά του. (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012 και Τζάμος 2017).

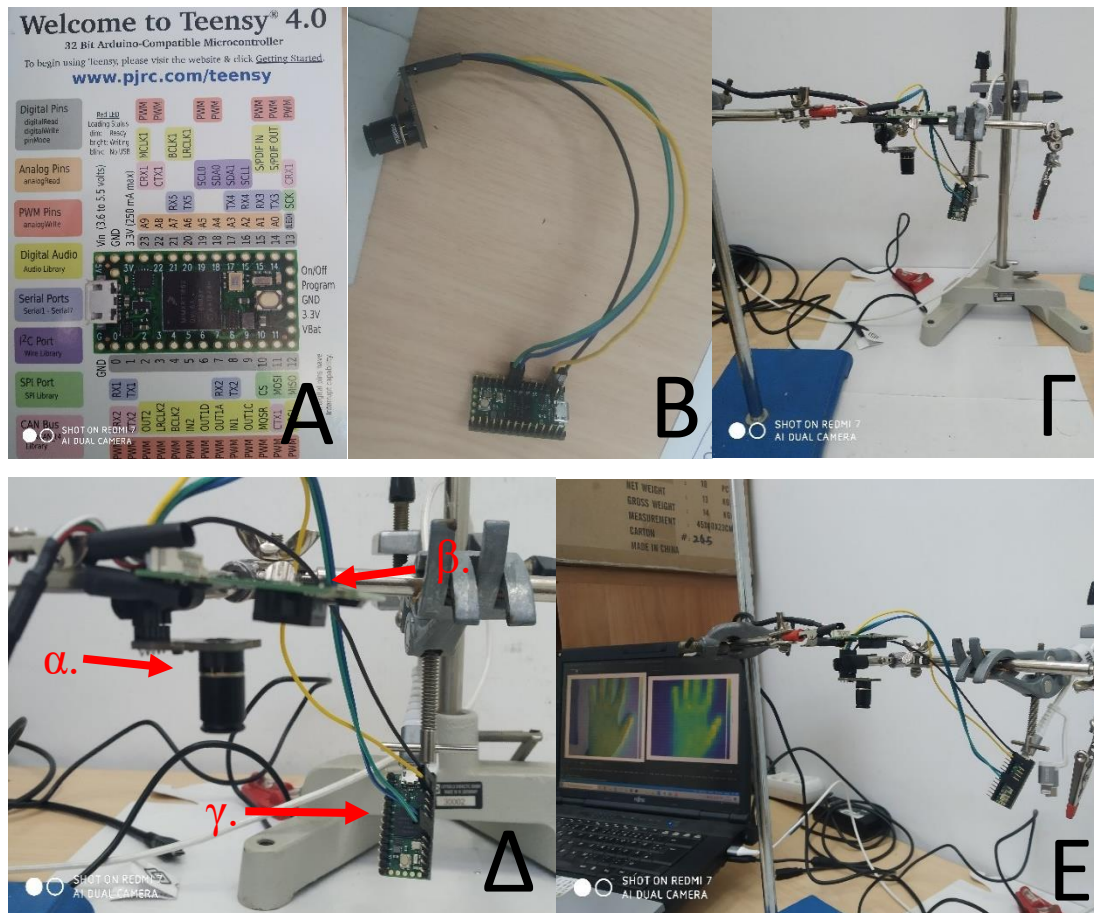
Αναφέρθηκε προηγουμένως πως η προσβολή από μύκητες που συμβαίνει στα φύλλα προκαλεί αύξηση της διαπνοής, δηλαδή της εξάτμισης νερού από την επιφάνεια των φύλλων που αποσκοπεί στην μείωση της θερμοκρασίας των φύλλων (Taiz et al. 2017). Η διαπνοή πραγματοποιείται με διάχυση του νερού μέσω των στομάτων καθώς το 95% του νερό δεν διαπερνά την εφυμενίδα των φύλλων (Taiz et al. 2017). Οι μύκητες όμως μπορούν να διασπάσουν την εφυμενίδα, την επιδερμίδα του φύλλου και να παρεμποδίσουν το κλείσιμο των στομάτων με τις τοξίνες τους (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012). Έτσι, το φύλλο χάνει την ικανότητα να συγκρατεί το νερό στο εσωτερικό των ιστών του, το νερό διαρρέει ελεύθερα, τα φυτικά κύτταρα χάνουν τη σπαργή τους και το φύλλο μπορεί να φτάσει στη μάρανση (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012). Επομένως, η θερμοκρασία του φύλλου ρυθμίζεται από την διαπνοή, η οποία επηρεάζεται από την παρουσία παθογόνων και τις επιπτώσεις της στα στόματα των φύλλων.

Μεταξύ άλλων, ένας μύκητας που χρησιμοποιήθηκε για τη θερμογράφηση είναι ο ασκομύκητας *Sphaerotheca pannosa* var. *rosae* ή *Podosphaera pannosa* που προκαλεί το ωίδιο της τριανταφυλλιάς, μια από τις σημαντικότερες ασθένειες για αυτά τα φυτά με μεγάλες επιπτώσεις στην παραγωγή. Ο μύκητας διαχειμάζει ως μυκήλιο ή ως κλειστοθήκιο στους οφθαλμούς των τριανταφυλλιών σε φυτά σε εξωτερικούς χώρους, αλλά σε θερμοκήπια διαχειμάζει ως μυκήλιο ή κονίδια στα φύλλα και τους βλαστούς. Η μόλυνση νέων φυτών πραγματοποιείται με τη μεταφορά κονιδίων ή ασκοσπορίων μέσω του ανέμου. Τα σπόρια θα βλαστήσουν στην επιφάνεια των φυτών και θα δώσουν επιφανειακό λευκό μυκήλιο σαν αλευρώδης εξάνθηση. Επιπλέον, θα αναπτυχθεί και μυκήλιο στο εσωτερικό των ιστών της τριανταφυλλιάς, με τον τρόπο που αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, ώστε να τραφεί ο μύκητας με τους μυζητήρες του. Στο επιφανειακό μυκήλιο θα δημιουργηθούν κονιδιοφόροι με κονίδια ώστε να μολυνθούν νέα φυτά. (Τζάμος 2017).

2. Υλικά και μέθοδοι

2.1.Εξοπλισμός για θερμομέτρηση με κάμερα τύπου Infrared

Η προετοιμασία και ο σχεδιασμός του πειράματος έλαβε μέρος στο εργαστήριο Ανθοκομίας και στο εργαστήριο Φυτοπαθολογίας που ανήκουν στο Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα υλικά, τα όργανα μέτρησης και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν ανήκουν στα εργαστήρια Ανθοκομίας και Φυτοπαθολογίας. Για την εκπόνηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η θερμική κάμερα MLX90640 Standard με οπτική γωνία λήψης 55° από τον κατασκευαστή Pimoroni. Η συγκεκριμένη κάμερα περιέχει 32x24 αισθητήρες οι οποίοι ανιχνεύουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στα μήκη κύματος του μακρού υπέρυθρου (Far Infrared) ή αλλιώς θερμικού υπέρυθρου που εκπέμπεται από ένα σώμα. Έτσι, με την μέτρηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας γίνεται υπολογισμός της θερμοκρασίας μιας επιφάνειας σε βαθμούς Κελσίου (°C) με ακρίβεια ± 1 °C και εύρος αναγνώρισης θερμοκρασιών από -40°C μέχρι 300 °C (www.grobotronics.com). Για την κατεργασία και προβολή των δεδομένων της θερμικής κάμερας, δηλαδή των θερμοκρασιών μιας επιφάνειας, είναι αναγκαία η σύνδεση της κάμερας με κάποιον επεξεργαστή (Εικ. 2.1 (Α), (Β)). Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο μικροεπεξεργαστής (microcontroller) Teensy 4.0 που είναι συμβατός με Arduino και επιτρέπει τον προγραμματισμό της θερμικής κάμερας ώστε να αξιοποιηθούν οι μετρήσεις της. Επιπλέον, στο σύστημα προστέθηκε και μια κάμερα RGB, η Tyro Full HD Webcam (64°) από τον κατασκευαστή Trust, ώστε μαζί με τις θερμικές τιμές να εμφανίζεται και το σώμα που θερμομετρείτε ως έχει στη φυσική του κατάσταση. Να σημειωθεί πως στο συγκεκριμένο πείραμα της παρούσας εργασίας, αφαιρέθηκε το πλαστικό κάλυμμά από την RGB κάμερα ώστε να μπορεί να γίνει ευκολότερη η συγκράτησή της στις επιθυμητές θέσεις (Εικ. 2.1 (Δ)). Συνοψίζοντας, το σύστημα θερμογραφίας που δημιουργήθηκε, αποτελείται από την RGB κάμερα Tyro Full HD Webcam (64°) και την θερμική κάμερα MLX90640 Standard (55°) που είναι συνδεδεμένη με τον μικροεπεξεργαστή Teensy 4.0 και το σύστημα αυτό συνδέθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με δυο καλώδια τύπου USB, ένα για την σύνδεση κάμερας RGB-υπολογιστή και ένα για την σύνδεση μικροεπεξεργαστή-υπολογιστή (Εικ. 2.1 (Ε)).



Εικόνα 2.1. (Α) Θύρες και ηλεκτρικοί σύνδεσμοι (ports and pins) του μικροεπεξεργαστή Teensy, (www.pjrc.com). (Β) Συνδεσμολογία της θερμικής κάμερας με τον μικροεπεξεργαστή τύπου Arduino. (Γ) Τοποθέτηση του συστήματος των καμερών τύπου Infrared και RGB και του επεξεργαστή στη βάση στήριξης. (Δ) Η Διάταξη του ολοκληρωμένου συστήματος με τις κάμερες τύπου Infrared και RGB όπου: α. η θερμική κάμερα, β. η RGB κάμερα γ. ο μικροεπεξεργαστής. (Ε) Σύνδεση του συστήματος των καμερών τύπου Infrared και RGB σε φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή. (όλες οι φωτογραφίες αποτελούν υλικό των εργαστηρίων ανθοκομίας και φυτοπαθολογίας).

2.2. Ανάπτυξη και εφαρμογή του απαραίτητου λογισμικού για τις κάμερας του τύπου RGB και Infrared

Για την συλλογή, καταγραφή και προβολή των δεδομένων από τις δύο κάμερες αναπτύχθηκε πρόγραμμα στην πλατφόρμα Visual Studio χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Python. Ο προγραμματισμός του συγκεκριμένου κώδικα πραγματοποιήθηκε από τον καθηγητή και υπεύθυνο εργαστηρίου Ανθοκομίας Χρήστο

Λύκα και από τον Αθανάσιο Παπαδήμο ενώ ο φοιτητής που συγγράφει τη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία βρισκόταν παρών κατά την διαδικασία του προγραμματισμού και απέκτησε μια βασική κατανόηση της διαδικασίας προγραμματισμού και της δομής του συγκεκριμένου κώδικα. Το πρόγραμμα αυτό, αρχικά, παίρνει τα δεδομένα της θερμικής κάμερας μέσω του μικροεπεξεργαστή και τα αποθηκεύει. Στη συνέχεια μετατρέπει αυτά τα δεδομένα από τιμές τύπου string, σε λίστα τιμών (list) και τελικά βάζει τις τιμές σε πλέγμα (dataframe) που αποτελείται από 32 στήλες και από 24 γραμμές. Περιέχει δηλαδή τις 768 τιμές θερμοκρασίας από τους αισθητήρες της θερμικής κάμερας. Τώρα, θα επαναλάβει αυτό το στάδιο, δηλαδή θα καταγράψει τιμές από τη θερμική κάμερα και θα τις κάνει πλέγμα τιμών, άλλες 6 φορές. Από αυτά τα 6 πλέγματα με θερμοκρασίες, το πρόγραμμα θα βρει το μέσο όρο από τις 6 τιμές για κάθε εικονοστοιχείο του πλέγματος και θα δημιουργήσει νέο πλέγμα μόνο με τους μέσους όρους των θερμοκρασιών (Εικ. 2.2). Αυτό γίνεται για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια τιμών μέσω των πολλαπλών μετρήσεων. Έπειτα, η RGB κάμερα βγάζει φωτογραφία την επιφάνεια που θερμομετρήθηκε με καθυστέρηση δέκα δευτερολέπτων. Επειδή η κάμερα RGB κάνει αυτόματη εστίαση και μερικές φορές αυτό είχε ως αποτέλεσμα μη εστιασμένες θολές εικόνες, ο βαθμός της εστίασης ρυθμίστηκε από τον κώδικα με βάση την απόσταση της κάμερα RGB από την επιφάνεια καταγραφής. Αφού έχουν παρθεί και οι θερμικές τιμές και η πραγματική εικόνα δημιουργείται ένας θερμικός χάρτης, δηλαδή ένα ψηφιδωτό έγχρωμων εικονοστοιχείων με θερμοκρασίες ώστε να γίνεται πιο εύκολη η διάκριση θερμών και ψυχρών περιοχών. Η απόχρωση των εικονοστοιχείων δηλώνει την θερμοκρασία τους. Τα εικονοστοιχεία που αντιπροσωπεύουν θερμή περιοχή έχουν διαβάθμιση του κίτρινου χρώματος και αυτά των πιο ψυχρών περιοχών έχουν μπλε διαβάθμιση. Στο τελευταίο στάδιο, το πρόγραμμα συνδυάζει το πλέγμα των μέσων θερμικών τιμών με την πραγματική εικόνα ώστε ο χειριστής να μπορεί να δει την θερμοκρασία από κάθε σημείο της επιφάνειας που εξετάζεται. Ακόμα, ο θερμικός χάρτης τοποθετείται πάνω στην εικόνα και στο πλέγμα τιμών ώστε να διακρίνεται η θερμότητα κάθε σημείου με βάση το χρώμα. Ο ολοκληρωμένος κώδικας μετατράπηκε σε μορφή προγράμματος .exe για να είναι δυνατή η χρήση του από οποιονδήποτε υπολογιστή. Για την ολοκλήρωση του προγράμματος αυτού χρειάζονται περίπου 2-3 λεπτά ανάλογα βέβαια και την υπολογιστική δύναμη του υπολογιστή που το τρέχει. Όλες οι τιμές θερμοκρασίας που παράγονται από την θερμική κάμερα αποθηκεύονται σε μορφή αρχείου τιμών διαχωρισμένων με κόμματα του Microsoft Excel. Άρα, σαν τελικό

αποτέλεσμα, σχηματίζεται μια εικόνα που συνδυάζει μια φωτογραφία υψηλής ανάλυσης με φυσικά χρώματα RGB, το πλέγμα με τις τιμές θερμοκρασίας και τον θερμικό χάρτη.

```
119 # //////////////////////////////////////
120 # Mean Values
121 out2 = outfl.groupby("calc").mean()
122 # print(out2)
123 # out2.info()
124
125 out2ri = out2.reset_index(drop=True)
126 # print(out2ri)
127 out2ri.to_csv("ValuesMean.csv")
128
129 # //////////////////////////////////////
130 # Standard Daviation
131 out3 = outfl.groupby("calc").std()
132 # print(out3)
133 # out3.info()
134
135 out3ri = out3.reset_index(drop=True)
136 # print(out3ri)
137 out3ri.to_csv("ValuesSD.csv")
138
139 df = out2
140 df_sd = out3
```

Εικόνα 2.2. Δείγμα του κώδικα το οποίο αναπτύχθηκε για το λογισμικό της κάμερας τύπου RGB και Infrared. Η συγκεκριμένη ρουτίνα υπολογίζει τον μέσο όρο 6 μετρήσεων.

2.3.Τριγωνομετρικές συναρτήσεις για τις κάμερες του τύπου RGB και Infrared

Η θερμική κάμερα έχει οπτική γωνία λήψης 55° και η RGB κάμερα έχει 64° , οπότε πρέπει να απέχουν μια υψομετρική διαφορά (D_h) μεταξύ τους ώστε να εστιάζουν στο ίδιο πλαίσιο. Δηλαδή, για να καταγράψουν και οι δύο κάμερες επιφάνεια με τη μεγάλη της πλευρά (η οριζόντια) χ , θα πρέπει η RGB κάμερα να έχει ένα ύψος h_{RGB} και η θερμική κάμερα να βρίσκεται D_h πιο πάνω (Εικ. 2.3). Από την Τριγωνομετρία είναι γνωστό πως 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 (Εικ. 2.3). 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 D_h 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:

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

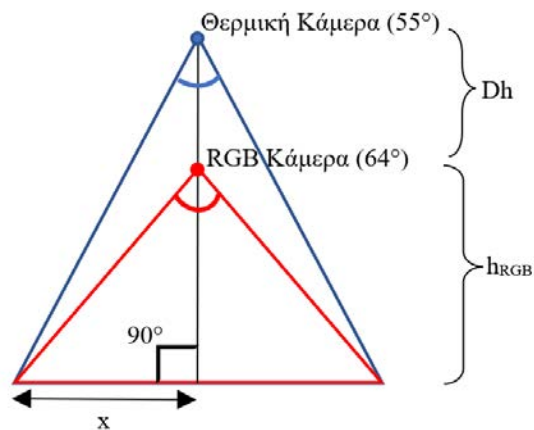
Επομένως, για να βρίσκεται η σωστή απόσταση που πρέπει να έχουν οι κάμερες, πρέπει να μετριέται το μισό της απόστασης της οριζόντιας πλευράς της επιφάνειας καταγραφής. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση της κάμερας RGB.

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

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

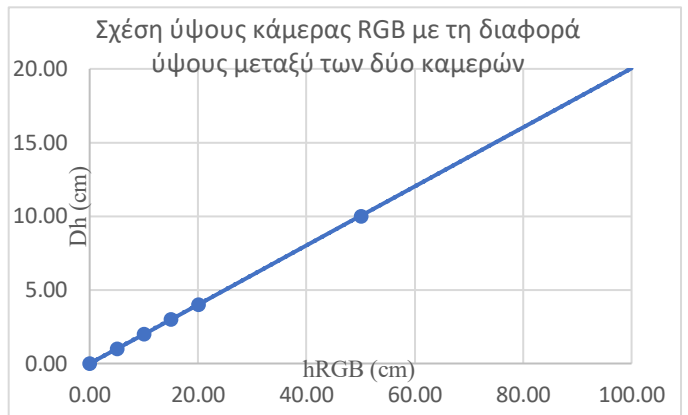
$$Dh = \{[h_{RGB} * \tan(32^\circ)]/\tan(27,5^\circ)\} - h_{RGB}$$

Οπότε σε αυτή τη περίπτωση μπορεί να βρεθεί η μεταξύ τους απόσταση μετρώντας το ύψος της κάμερας RGB κάθε φορά (Πίνακας 2.1 και Εικόνα 2.4.).



Εικόνα 2.3. 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



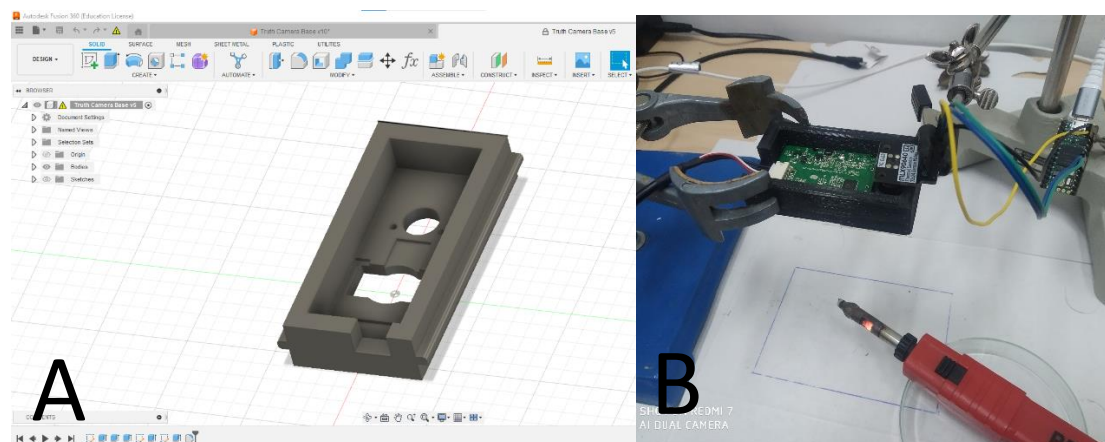
Πίνακας 2.1 (Αριστερά) Τιμές Dh για διάφορα ύψη h_{RGB} και μήκη χ που παράχθηκε για την συγκεκριμένη εργασία.

Εικόνα 2.4. (Δεξιά) Γράφημα σχέσης Dh με h_{RGB} που παράχθηκε για την συγκεκριμένη εργασία ώστε να υπολογίζεται γρήγορα η απόσταση που πρέπει να έχουν μεταξύ τους η κάμερες (Dh) για κάθε διαφορετική απόσταση επιφάνειας καταγραφής και συστήματος καμερών Dh.

2.4. Δημιουργία μιας σταθερής βάσης στην οποία θα μπορεί να προσαρμοστεί το σύστημα λήψης των εικόνων από τις κάμερες RGB και Infrared

Εφόσον για το σύστημα θερμογραφίας θα χρησιμοποιηθούν δυο κάμερες υπήρχε η ανάγκη σχεδιασμού μιας βάσης ώστε να τοποθετηθούν οι κάμερες σε αυτή και να μπορούν να γίνουν ρυθμίσεις και αντικειμενικές μετρήσεις. Όπως φαίνεται από το υποκεφάλαιο 2.1 (Εικ. 2.1 (Γ)), οι κάμερες συγκρατιόνταν από βάσεις συγκράτησης με δαγκάνες ώστε να ελεγχθεί σε πρώτο στάδιο αν ο κώδικας Python που προγραμματίστηκε για τις κάμερες RGB και Infrared λειτουργούσε σωστά. Επειδή όμως ήταν αδύνατον να μένουν σταθερές οι κάμερες κατά τις διάφορες δοκιμές που ακολούθησαν έπρεπε να σχεδιαστεί μια βάση για όλο το σύστημα των καμερών RGB και Infrared. Το σχέδιο δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα Fusion 360 της εταιρίας Autodesk και εκτυπώθηκε από τρισδιάστατο εκτυπωτή (3D-printer) από τον Αθανάσιο Παπαδήμο υπό την παρουσία του φοιτητή που εκπονεί τη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία (2.5 (Α)). Οι πραγματικές διαστάσεις των καμερών μετρήθηκαν με παχύμετρο ώστε να ληφθούν υπόψιν στο σχέδιο. Οπότε σχεδιάστηκαν δυο εσοχές για να τοποθετούνται οι κάμερες και να μένουν σταθερές όσο θα κινούνται και οι δυο ταυτόχρονα. Έτσι λοιπόν, σχεδιάστηκε και εκτυπώθηκε η πρώτη βάση για να

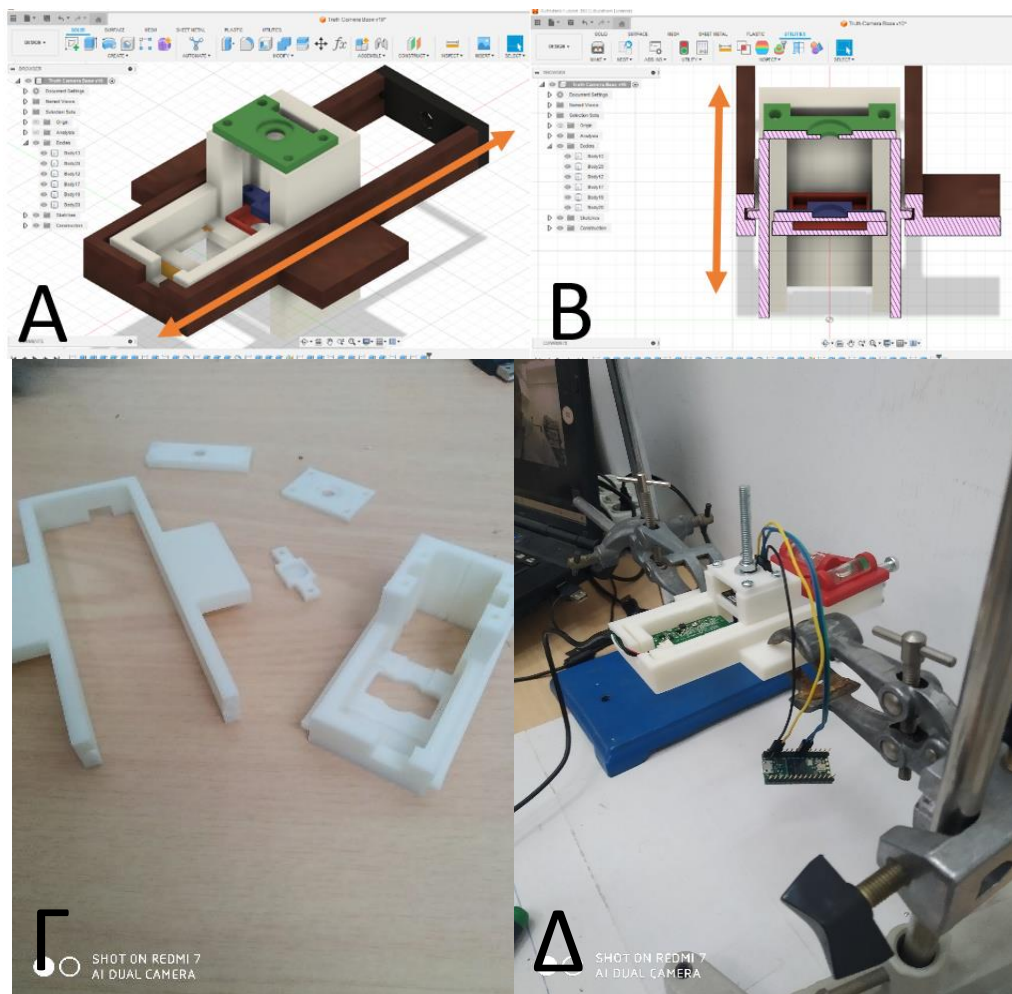
διευκολύνει τη χρήση του συστήματος και να μπορεί να δώσει σταθερές εικόνες ώστε να βαθμονομηθεί το σύστημα των καμερών RGB και Infrared (εικόνα 2.5 (B)).



Εικόνα 2.5. (Α) Η πρώτη βάση για το σύστημα με τις δυο εσοχές κατάλληλα σχεδιασμένες ώστε να εισάγονται οι κάμερες RGB και Infrared στο περιβάλλον του προγράμματος Fusion360. (Β) Η πρώτη βάση αφού εκτυπώθηκε από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Ήδη η χρήση του συστήματος θερμογραφίας έγινε πιο απλή και σταθερή. (όλες οι φωτογραφίες αποτελούν υλικό των εργαστηρίων ανθοκομίας και φυτοπαθολογίας).

Έγιναν διάφορες δοκιμές με αυτή τη βάση αλλά ήταν αναγκαίο να δημιουργηθεί νέα βάση η οποία θα έλυνε τα προβλήματα που παρατηρήθηκαν με την πρώτη έκδοση αλλά και με τα θεωρητικά προβλήματα που ήταν γνωστά από την αρχή και έχουν να κάνουν με το οπτικό πεδίο της κάθε κάμερας και αναπτύσσονται στο υποκεφάλαιο 2.3. Κάποια στοιχεία που έπρεπε να ληφθούν υπόψιν είναι εσοχές σε κατάλληλο μέγεθος για να διέρχονται τα καλώδια των καμερών RGB, Infrared και του μικροεπεξεργαστή καθώς και κάποια τμήματα στο εξωτερικό της βάσης ώστε να μπορεί να συγκρατείται από τις βάσεις συγκράτησης του εργαστηρίου. Στην πράξη δεν μπορεί η μια κάμερα να είναι ακριβώς πάνω από την άλλη όπως θα έπρεπε θεωρητικά, επομένως η βάση σχεδιάστηκε έτσι ώστε και οι δυο κάμερες να μπορούν να μετακινηθούν μαζί στον οριζόντιο άξονα (Εικ. 2.6 (Α)). Η πλήρης μετακίνηση του συστήματος στη βάση στον οριζόντιο 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. Για την κάμερα Infrared σχεδιάστηκε ακόμα μηχανισμός ώστε να μπορεί να αυξομειώνεται η κάθετη απόστασή της από την RGB κάμερα (Dh), καθώς όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 2.3, αυτή η απόσταση πρέπει να μπορεί να αλλάζει ανάλογα με το ύψος του συστήματος ώστε οι δυο κάμερες να έχουν την ίδια επιφάνεια καταγραφής ή αλλιώς

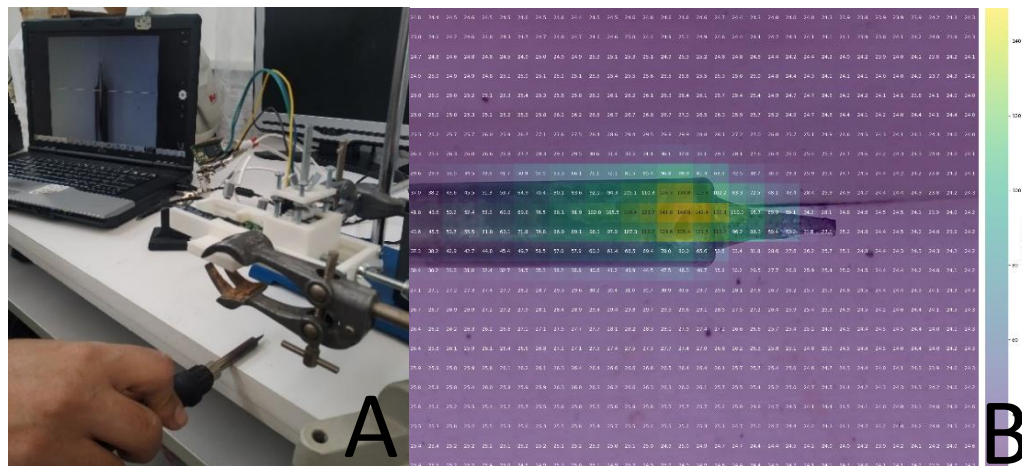
οπτικό πεδίο (Εικ. 2.6 (B)). Συνοψίζοντας, η τελική βάση επιτρέπει δυο κινήσεις: τη μετακίνηση της θερμικής κάμερας στον κάθετο άξονα και τη μετακίνηση του συστήματος με τις δυο καμερών στον οριζόντιο άξονα (Εικ. 2.6 (Δ)).



Εικόνα 2.6. (Α) Το σχέδιο της βάσης στο περιβάλλον του Fusion360. Το περίγραμμα με χρώμα καφέ επιτρέπει την μετακίνηση, παρουσιάζεται με το πορτοκαλί βέλος, και των δυο καμερών στον οριζόντιο άξονα (Β) Τομή της πρόσοψη της βάσης στο περιβάλλον του Fusion360. Διακρίνεται ο μηχανισμός που επιτρέπει τη κάμερα Infrared να μετακινείται στον κάθετο άξονα και ουσιαστικά η ρύθμιση του ύψους Dh, το οποίο παρουσιάζεται με το πορτοκαλί βέλος. (Γ) Τα διαφορετικά κομμάτια της βάσης εκτυπωμένα από τρισδιάστατο εκτυπωτή. (Δ) Συναρμολόγηση της βάσης και στήριξή της. (Όλες οι φωτογραφίες αποτελούν υλικό των εργαστηρίων ανθοκομίας και φυτοπαθολογίας).

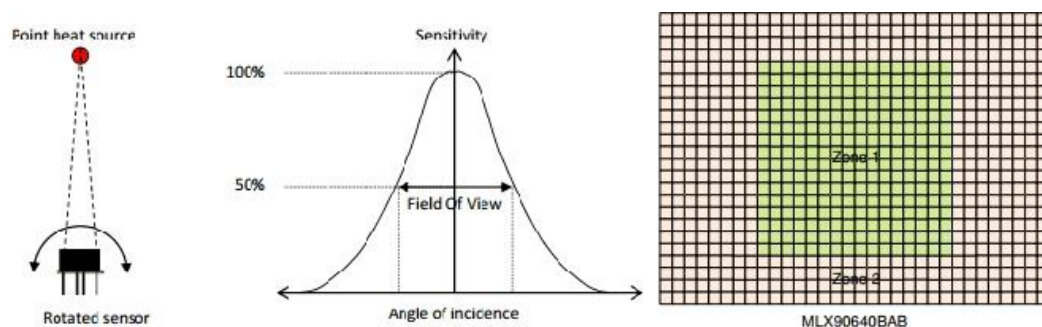
2.5. Ρύθμιση και βαθμονόμηση της κάμερας τύπου RGB και Infrared για μια ορθή εστίαση

Όταν ετοιμάστηκε η βάση που συγκρατεί τις κάμερες τύπου RGB και Infrared σταθερές, ξεκίνησαν οι καταγραφές αντικειμένων για να ελεγχθεί η λειτουργία των καμερών και η ορθότητα των μετρήσεων. Η σταθερή βάση με το μηχανισμό μετακίνησης των δυο καμερών στον οριζόντιο άξονα δίνει τη δυνατότητα καταγραφής του ίδιου οπτικού πεδίου σε κάθε μέτρηση για την ορθή φωτογράφιση και θερμομέτρηση αντικειμένων και με πολλές επαναλήψεις. Για να ελεγχθεί η ακρίβεια των μετρήσεων, δηλαδή το αν οι θερμικές τιμές που αναγράφονται στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε αντιστοιχούν στην πραγματικότητα, έγιναν δοκιμές με σώματα που έχουν πολύ υψηλή θερμότητα σε σχέση με το περιβάλλοντα χώρο. Οι περισσότερες δοκιμές έγιναν με τη θερμομέτρηση ενός ηλεκτρικού κολλητηριού (Εικ. 2.7. (Α)) Το ηλεκτρικό κολλητήριο κρίθηκε ιδανικό για τον έλεγχο της ακρίβειας του συστήματος των καμερών τύπου RGB και Infrared καθώς παρέχει μια πολύ υψηλή αλλά και σημειακή τιμή θερμοκρασίας. Να σημειωθεί πως είναι γνωστό από τους χειριστές του συστήματος θερμογραφίας πως το σημείο του ηλεκτρικού κολλητηριού που έχει τη μεγαλύτερη θερμοκρασία είναι αυτό πριν τη μύτη του και όχι η ίδια η μύτη, πράγμα που επιβεβαιώνει το αποτέλεσμα της θερμομέτρησής του (Εικ. 2.7. (Β)). Οπότε με τη θερμομέτρησή του ηλεκτρικού κολλητηριού έγινε δυνατή η βαθμονόμηση του συστήματος των καμερών RGB και Infrared καθώς η ορθότητα των αποτελεσμάτων θα έδειχνε αν χρειάζονται ρυθμίσεις στο σύστημα ή αν υπήρχε κάποιο σχεδιαστικό λάθος που έπρεπε να λυθεί ώστε να συνεχιστούν οι μετρήσεις. 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 2.7. (Α) Θερμομέτρηση και φωτογράφιση ηλεκτρικού κολλητηριού το οποίο είναι σε λειτουργία και έχει πολύ υψηλή θερμοκρασία, με το σύστημα των καμερών RGB και Infrared. (Β) Το αποτέλεσμα της καταγραφής του ηλεκτρικού κολλητηριού, δηλαδή ο θερμικός χάρτης σε συνδυασμό με την RGB φωτογραφία, όπου είναι φανερή η ορθή ευθυγράμμιση και βαθμονόμηση του συστήματος των καμερών RGB και Infrared. (όλες οι φωτογραφίες αποτελούν υλικό των εργαστηρίων ανθοκομίας και φυτοπαθολογίας).

Να σημειωθεί, ακόμα, πως τα αντικείμενα που θερμομετρούνται από τις κάμερες RGB και Infrared πρέπει να τοποθετούνται σε κεντρική θέση στο οπτικό πεδίο των καμερών RGB και Infrared. Όσο πιο κοντά στα όρια του οπτικού πεδίου των καμερών τοποθετείται ένα αντικείμενο, τόσο μικρότερη θα είναι η ακρίβεια της θερμικής εικόνας. Οι παραμορφώσεις αυτές αναγράφονται και από τον κατασκευαστή της κάμερας Infrared αλλά και από άλλους ερευνητές που ασχολήθηκαν με αυτή τη κάμερα (Chidurala & Li 2022) (Εικόνα 2.8.).

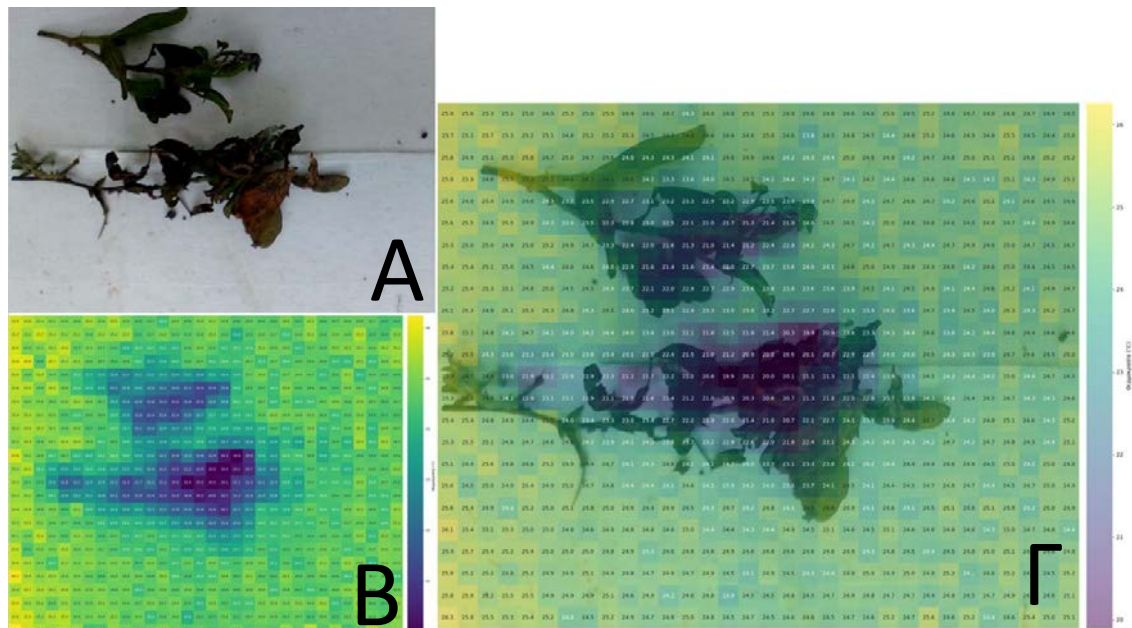


Εικόνα 2.8. (Αριστερά) Απεικόνιση του οπτικού πεδίου της κάμερας τύπου Infrared και η ευαισθησία της μέτρησης ως προς την γωνία κλίσης. (Δεξιά) Οι δυο ζώνες διαφορετικής ακρίβειας η κάθε μια. Τα εικονοστοιχεία της ζώνης 1, στο κέντρο, έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια

στην απεικόνιση των πραγματικών θερμοκρασιών των επιφανειών που εστιάζουν. (www.melexis.com).

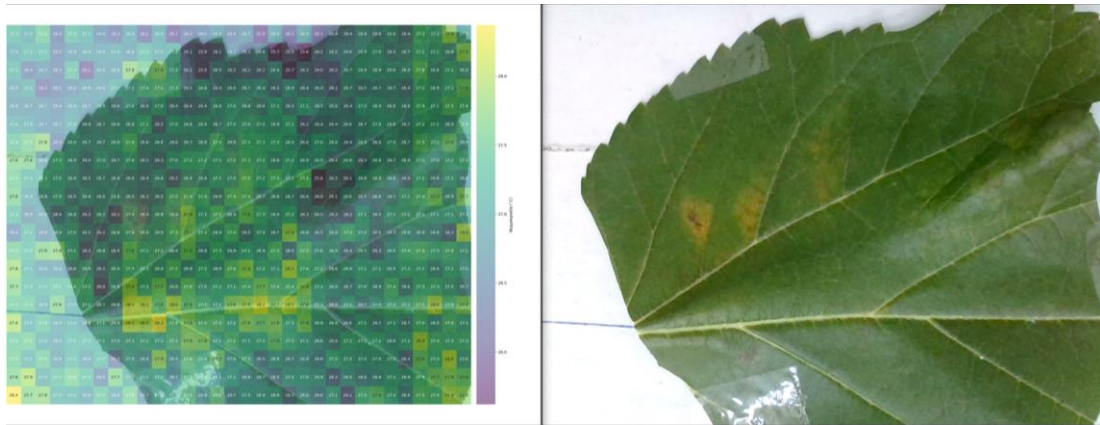
2.6.Θερμομέτρηση φυτικών οργάνων με τις κάμερες RGB και Infrared

Σε αυτό το στάδιο, το σύστημα των καμερών RGB και Infrared χρησιμοποιήθηκε για να μετρήσει τη θερμοκρασία διάφορων φυτικών οργάνων με σκοπό τον τελικό έλεγχο του συστήματος θερμομέτρησης και την ικανότητά του να ανιχνεύει διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ διαφορετικών τμημάτων των διάφορων φυτικών οργάνων που μετρήθηκαν. Πρώτα, θερμομετρήθηκαν φυτά φακής τα οποία είχαν μολυνθεί στον αγρό από Περονόσπορο πριν μεταφερθούν στο εργαστήριο για τις μετρήσεις. Με τις μετρήσεις παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των τμημάτων των φυτών φακής με εμφανή συμπτώματα της ασθένειας του Περονόσπορου, όπως χλώρωση και ξήρανση των ιστών, και των τμημάτων χωρίς εμφανή συμπτώματα, δηλαδή φυτικοί ιστοί με φυσιολογικό πράσινο χρώμα. Εφόσον οι θερμικές εικόνες και οι εικόνες RGB των φυτών της φακής έδειξαν πως στα τμήματα του φυτού που φαινόταν έντονα τα συμπτώματα υπήρχαν όντως μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας με αυτά που δεν ήταν ορατά, συμπεραίνεται πως το σύστημα των καμερών RGB και Infrared είναι σωστά εστιασμένο ώστε η εικόνα RGB και η ο θερμικός χάρτης να συμβαδίζουν χωρικά μεταξύ τους και επομένως να δείχνει η τελικά εικόνα τις πραγματικές θερμοκρασίες από τους φυτικούς ιστούς.

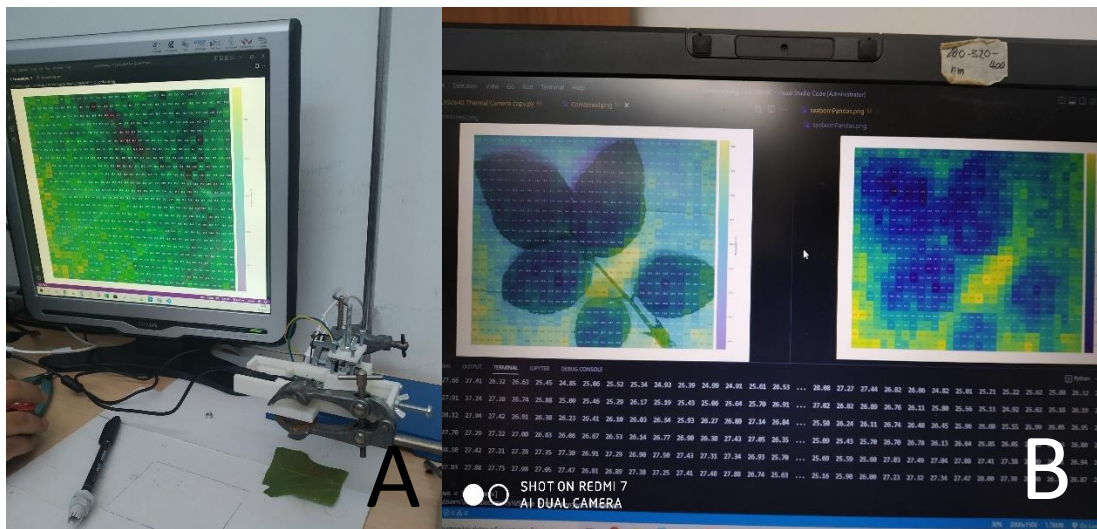


Εικόνα 2.9. Θερμομέτρηση και φωτογράφιση φυτών φακής με το σύστημα των καμερών RGB και Infrared. (Α) Φωτογραφία των φυτών της φακής από την RGB κάμερα. (Β) Ο θερμομετρικός χάρτης που δημιούργησε το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε, με τις τιμές θερμοκρασίας από την κάμερα Infrared. (Γ) Ο συνδυασμός του θερμομετρικού χάρτη με την εικόνα RGB που έκανε το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε. (Όλες οι εικόνες προέρχονται από το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε για να παρουσιάζει και να επεξεργάζεται τα δεδομένα των καμερών τύπου RGB και Infrared).

Στη συνέχεια, θερμομετρήθηκαν φύλλα από δέντρα μουριάς του προαύλιου χώρου του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας τα οποία εμφάνιζαν συμπτώματα χλώρωσης. Έγιναν πολλές επαναλήψεις των μετρήσεων σε πολλά φύλλα μουριάς. Γενικά, το σύστημα μπορούσε να ανιχνεύσει διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των διάφορων περιοχών των φύλλων, όπως έγινε και με τα φυτά φακής με Περονόσπορο στην προηγούμενη παράγραφο. Παρατηρήθηκαν τρεις περιοχές με διαφορετικές διακυμάνσεις θερμοκρασίας. Ειδικότερα, οι υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας, ήταν αυτές από τις περιοχές των νεύρων των φύλλων, ακολουθούμενες από τις θερμοκρασίες των τμημάτων των φύλλων που δεν εμφάνιζαν χλώρωση και οι χαμηλότερες θερμοκρασίες ήταν αυτές των τμημάτων με συμπτώματα χλώρωσης.



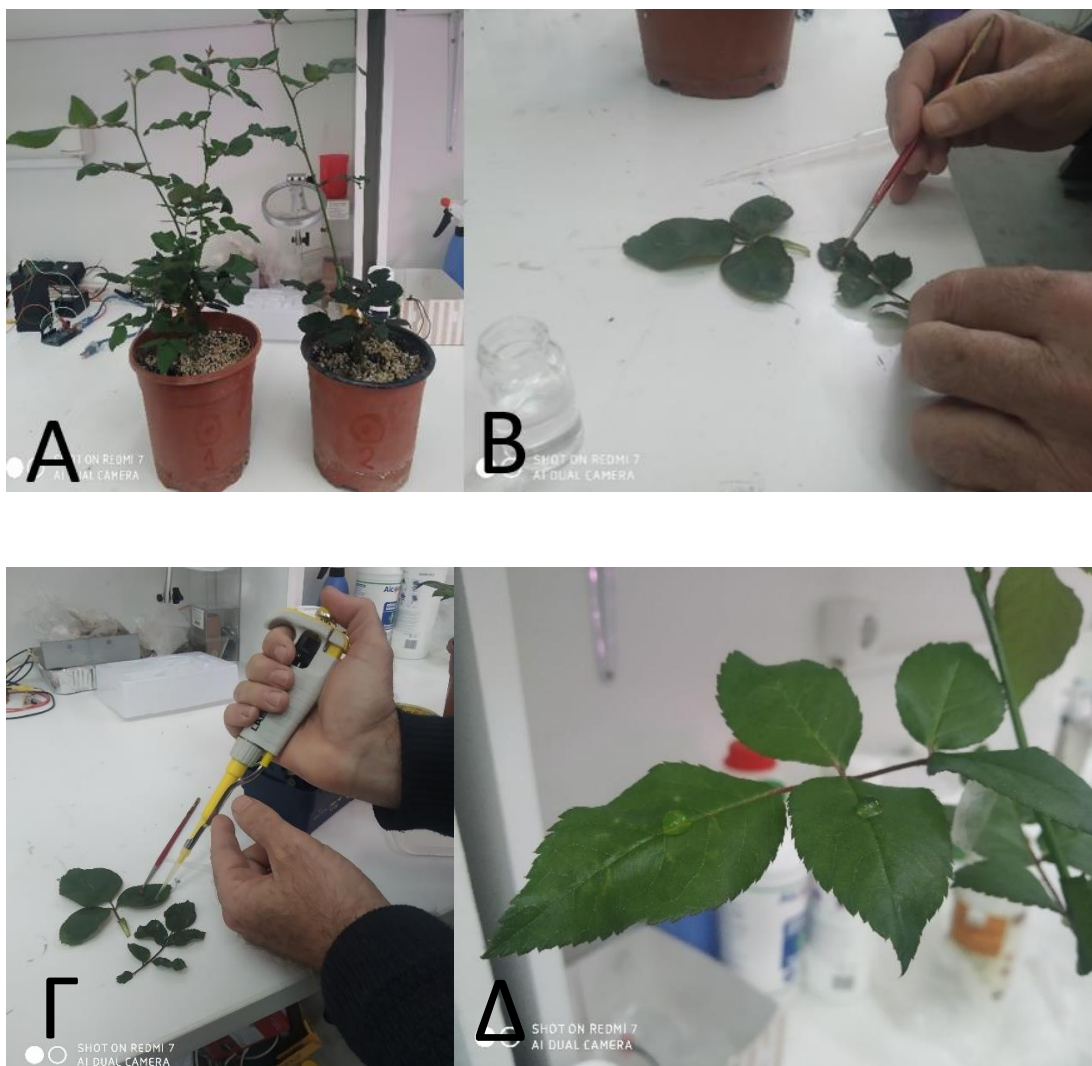
Εικόνα 2.10. Ο θερμικός χάρτης και η φωτογραφία από τις κάμερες RGB και Infrared ενός φύλλου μουριάς. (όλες οι φωτογραφίες αποτελούν υλικό των εργαστηρίων ανθοκομίας και φυτοπαθολογίας).



Εικόνα 2.11. (Α) Ο θερμικός χάρτης ενός φύλλου μουριάς. (Β) Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε επεξεργάζεται τις τιμές θερμοκρασίας από την κάμερα Infrared και τις συνδυάζει με την εικόνα από την κάμερα RGB. (Γ) Θερμομέτρηση φύλλου μουριάς. (Δ) Θερμομέτρηση φυτών φακής. (όλες οι φωτογραφίες αποτελούν υλικό των εργαστηρίων ανθοκομίας και φυτοπαθολογίας).

2.7. Τεχνητή μόλυνση φυτών τριανταφυλλιάς με ωίδιο

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν φυτά τριανταφυλλιάς όπου μολύνθηκαν με κονίδια του μύκητα *Sphaerotheca pannosa* που προκαλούν την ασθένεια ωίδιο της τριανταφυλλιάς υπό την καθοδήγηση του επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής εργασίας Ιωάννη Βαγγέλα. Από φυτά τριανταφυλλιάς που ήταν ήδη μολυσμένα με ωίδιο, απομονώθηκαν τα κονίδια, δηλαδή οι αγενείς καρποφορίες, που παράγει ο μύκητας στις αλευρώδεις εξανθήσεις του που βρίσκονται στα φύλλα του ξενιστή (Εικ. 2.12 (Β)). Στα φύλλα του μολυσμένου φυτού που έφεραν εξανθήσεις, τοποθετήθηκε σταγόνα απιονισμένου νερού ώστε να εισέλθουν τα κονίδια στο νερό. Στη συνέχεια, το απιονισμένο νερό που φέρει τα κονίδια του ωιδίου συλλέχθηκε με πιπέτα των 50μL και τοποθετήθηκε προσεκτικά στην πάνω επιφάνεια των φύλλων υγιών φυτών τριανταφυλλιάς (Εικ. 2.12 (Γ)). Τα κονίδια που μεταφέρθηκαν στο υγιές φύλλο θα δώσουν μυκηλιακές υφές οι οποίες θα διεισδύσουν στο φυτικό κύτταρο με απευθείας διάτρηση των κυτταρικών τοιχωμάτων. Το μόλυσμα, δηλαδή το απιονισμένο νερό που περιέχει τα κονίδια εξετάστηκε κάτω από μικροσκόπιο για να επιβεβαιωθεί η ύπαρξη κονιδίων σε αυτό. Για το συγκεκριμένο πείραμα μολύνθηκαν δυο φύλλα από δυο διαφορετικά φυτοδοχεία τριανταφυλλιάς και άλλα δυο φύλλα ορίστηκαν ως μάρτυρες και σημαδεύτηκαν. Οι μυκηλιακές υφές που θα καταφέρουν να εισέλθουν στους μεσοκυττάριους χώρους των κυττάρων του φύλλου θα συνεχίζουν να αναπτύσσονται και να δίνουν νέο μυκήλιο όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 1.4. Εν κατακλείδι, η μεθοδολογία του πειράματος είναι η ανίχνευση αυτής της ανάπτυξης του μύκητα στα φύλλα της τριανταφυλλιάς με τις διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των σημείων που έγινε η μόλυνση και των περιοχών που δεν χρησιμοποιήθηκε μόλυσμα.



Εικόνα 2.12. (Α) Τα δυο φυτά τριανταφυλλιάς που μολύνθηκαν με οίδιο. (Β) Χρήση νερού και λεπτού πινέλου για να εισέλθουν τα κονίδια που βρίσκονται στις εξανθήσεις των μολυσμένων με οίδιο φύλλων τριανταφυλλιάς στο νερό. (Γ) Συλλογή κονιδίων με πιπέτα τα οποία βρίσκονται σε νερό στην επιφάνεια μολυσμένων με οίδιο φύλλων τριανταφυλλιάς. (Δ) Οι σταγόνες νερού που περιέχουν κονίδια τοποθετήθηκαν με πιπέτα πάνω σε υγιή φύλλα τριανταφυλλιάς για να μολυνθούν με οίδιο. (όλες οι φωτογραφίες αποτελούν υλικό των εργαστηρίων ανθοκομίας και φυτοπαθολογίας).

2.8. Καταγραφή της ανάπτυξης του οιδίου της τριανταφυλλιάς με το σύστημα των καμερών τύπου RGB και Infrared

Αφού έγινε η τεχνητή μόλυνση με οίδιο, τα φυτά τριανταφυλλιάς θερμομετρούνταν μια φορά τη μέρα κατά την ίδια περίπου ώρα. Και τα τέσσερα φύλλα, δηλαδή τα δυο

μολυσμένα και τα δυο μάρτυρες τοποθετούνταν κάτω από το σύστημα με τις κάμερες Infrared και RGB. Για την διευκόλυνση αυτής της διαδικασίας κατασκευάστηκε μηχανισμός για να αυξομειώνεται το ύψος του φυτοδοχείου ώστε να περνάνε τα φύλλα από κάτω χωρίς να τραυματίζονται και για να μετριούνται από το ίδιο ύψος από την κάμερα προσδίδοντας μεγαλύτερη αντικειμενικότητα στις μετρήσεις (Εικ. 2.13). Κάθε μέρα, πριν γίνουν οι μετρήσεις, καταγράφονταν η στιγμιαία θερμοκρασία του αέρα στο δωμάτιο που βρισκόταν τα φυτά τριανταφυλλιάς καθώς και η στιγμιαία σχετική υγρασία, ενώ οι μετρήσεις γινόταν περίπου στις 12.00 το μεσημέρι. Η υγρασία και η θερμοκρασία παίζουν σημαντικό ρόλο κατά τη θερμογράφηση καθώς επηρεάζουν την θερμοκρασία των φύλλων των φυτών, οπότε κρίθηκε απαραίτητο να καταγραφούν (Oerke et al. 2006). Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 16 Ιανουαρίου 2023 και διήρκησαν δέκα μέρες.



Εικόνα 2.13. Ο μηχανισμός αυξομείωσης ύψους για τα φυτοδοχεία ώστε να εισέρχονται με ασφάλεια και αντικειμενικότητα κάτω από το σύστημα καμερών Infrared και RGB. (όλες οι φωτογραφίες αποτελούν υλικό των εργαστηρίων ανθοκομίας και φυτοπαθολογίας).

Τα φυτά τριανταφυλλιάς που χρησιμοποιούνταν για τις μετρήσεις φυλάσσονταν σε δωμάτιο με λαμπτήρες ώστε να έχουν φωτοπερίοδο 16 ώρες τη μέρα και ποτιζόταν μια φορά τη βδομάδα μέχρι απορροής.

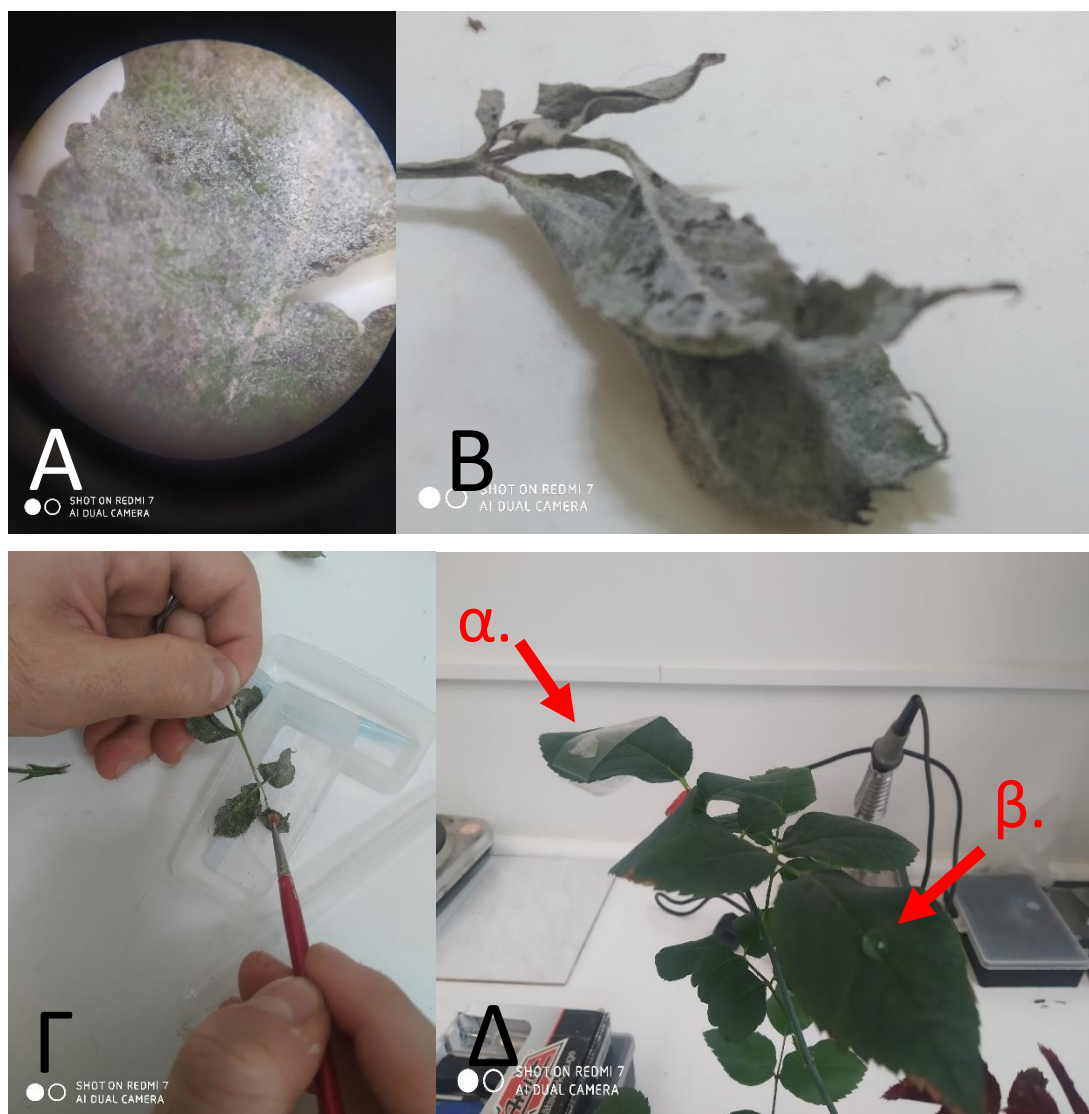


Εικόνα 2.14. Τα φυτά τριανταφυλλιάς τοποθετημένα κάτω από λάμπες σε δωμάτιο με ελεγχόμενη φωτοπερίοδο και συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας που καταγράφονται. (Όλες οι φωτογραφίες αποτελούν υλικό των εργαστηρίων ανθοκομίας και φυτοπαθολογίας).

2.9.Επανάληψη της πειραματικής διαδικασίας

Μετά τις δέκα συνεχόμενες μέρες όπου τα δυο φυτά τριανταφυλλιάς γινόταν θερμογράφηση από το σύστημα καμερών RGB και Infrared, αποφασίστηκε να σταματήσουν οι μετρήσεις καθώς η μόλυνση των φυτών με ωίδιο δεν ήταν επιτυχής με αποτέλεσμα να μην αναπτυχθούν μυκηλιακές υφές στα φύλλα των τριανταφυλλιών πιθανότατα εξαιτίας των συνθηκών φωτισμού στο δωμάτιο που τοποθετούνταν τα φυτά τριανταφυλλιάς, αλλά αυτό θα αναλυθεί περεταίρω στο κεφάλαιο 4 (Συζήτηση). Παρόλα ταύτα, οι μετρήσεις με το συστήματος θερμογραφίας δεν έδωσαν χρήσιμα αποτελέσματα, αλλά προσέφεραν εμπειρία πάνω στον τρόπο χειρισμού του συστήματος θερμογραφίας και τρόπους να πραγματοποιηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το συγκεκριμένο πείραμα. Βάσει τούτου, διεξάγει δεύτερο πείραμά πάνω σε φυτά τριανταφυλλιάς και η τεχνητή μόλυνσή τους με ωίδιο πραγματοποιήθηκε στις 4 Μαΐου 2023. Η τεχνητή μόλυνση πραγματοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο που αναφέρθηκε στο

υποκεφάλαιο 2.7. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε και μια ακόμα μέθοδος μόλυνσης όπου φύλλα με προσβολή και έντονα συμπτώματα ωιδίου κόπηκαν σε μικρά κομμάτια και κολλήθηκαν με αυτοκόλλητη ταινία πάνω στα φύλλα της τριανταφυλλιάς ώστε να έρθουν σε στενή επαφή τα κονίδια με τα υγιή φύλλα. Συνολικά μολύνθηκαν εννέα φύλλα από τα οποία τα έξι μολύνθηκαν με σταγόνα νερού με κονίδια και τα τρία με κομμάτι φύλλου με εξανθήσεις. Τα φυτά τριανταφυλλιάς τοποθετήθηκαν στον ίδιο χώρο με τις λάμπες με φωτοπερίοδο 16 ώρες. Από τη μέρα της μόλυνσης και για συνολικά δεκατρείς ημέρες λαμβανόταν θερμικές και RGB εικόνες από το σύστημα θερμογραφίας και γινόταν καταγραφή της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα στο εργαστήριο που γινόταν οι μετρήσεις.



Εικόνα 2.15. Τεχνητή μόλυνση φυτών τριανταφυλλιάς με ωίδιο. (Α) Οι εξανθήσεις που περιέχουν τα κονίδια στο κάτω από στερεοσκόπιο. (Β) Φύλλο τριανταφυλλιάς έντονα προσβεβλημένο από ωίδιο από το οποίο πάρθηκαν τα κονίδια. (Γ) Ξέπλυμα των κονιδίων από

τις εξανθήσεις του μολυσμένου φύλλου σε απιονισμένο νερό με λεπτό πινέλο. (Δ) Μεταφορά του μολύσματος: α. κονίδια σε σταγόνα νερού και β. κομμάτι έντονα μολυσμένου φύλλου στο υγιές φυτό τριανταφυλλιάς για να μολυνθεί τεχνητά. (Όλες οι φωτογραφίες αποτελούν υλικό των εργαστηρίων ανθοκομίας και φυτοπαθολογίας).

Και αυτή τη φορά η μόλυνση του ιστού δεν ήταν επιτυχής, δηλαδή δεν παρατηρήθηκαν συμπτώματα στα φύλλα των τριανταφυλλιών, οπότε οι μετρήσεις σταμάτησαν την δέκατη τρίτη μέρα, στις 16 Μαΐου 2023. Συνεπώς, ξεκίνησε τρίτο πείραμα θερμογράφησης φυτών μολυσμένων με ωίδιο το οποίο άρχισε στις 24 Μαΐου 2023 και ολοκληρώθηκε στις 13 Ιουνίου 2023, με διάρκεια δηλαδή 21 ημέρες. Συγκεκριμένα μολύνθηκαν πέντε φύλλα από καθένα από τα δύο φυτά τριανταφυλλιάς με τις δυο μεθόδους τεχνητής μόλυνσης που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αυτή τη φορά τα φυτά δεν παρέμειναν στο δωμάτιο με τις λάμπες αλλά τοποθετήθηκαν σε εξωτερικό χώρο της σχολής Γεωπονικών επιστημών (Εικ. 2.16 (B)).

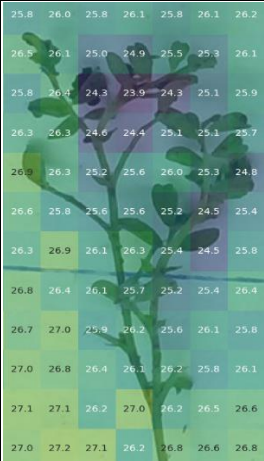


Εικόνα 2.16. (A) Τεχνητή μόλυνση των φυτών τριανταφυλλιάς με σταγόνες νερού με κονίδια και με κομμάτια μολυσμένων με ωίδιο φύλλων. (B) Τα φυτά τριανταφυλλιάς που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις με το σύστημα θερμογραφίας σε εξωτερικό χώρο. (Όλες οι φωτογραφίες αποτελούν υλικό των εργαστηρίων ανθοκομίας και φυτοπαθολογίας).

3. Αποτελέσματα

3.1. Μετρήσεις με το σύστημα των καμερών RGB-Infrared σε φυτά φακής προσβεβλημένα από περονόσπορο

Από τους διάφορους φυτικούς ιστούς που θερμομετρήθηκαν, έγινε στατιστική ανάλυση των μετρήσεων στα φυτά φακής που εμφάνιζαν συμπτώματα από μόλυνση Περονόσπορου. Εξετάστηκαν πέντε βλαστοί από νεαρά φυτά φακής και οι τιμές των θερμοκρασιών κάθε εικονοστοιχείου περάστηκαν χειροκίνητα σε πίνακες για να γίνει ο στατιστικός έλεγχος σημαντικότητας των αποτελεσμάτων. Φυσικά χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα εικονοστοιχεία με τιμές που αντιστοιχούσαν σε τμήματα των φυτών φακής και όχι αυτά που περιείχαν μεγάλα τμήματα του περιβάλλοντος. Τα πέντε φυτά φακής που μελετήθηκαν και ελέγχθηκαν στατιστικά ονομάστηκαν Α., Β., C., D. και Ε. (Εικ. 3.1.-3.5.).

Φυτό Φακής Α.		
Τμήμα χωρίς φανερά συμπτώματα (T°C ± 0,1)	Τμήμα με συμπτώματα (T°C ± 0,1)	
26,4	24,9	
26,1	25,5	
26,5	25,3	
26,3	24,3	
26,9	23,9	
25,1	24,3	
25,3	24,6	
25,2	24,5	
25,4	24,8	

Πίνακας 3.1. Τιμές θερμοκρασίας για το φυτό φακής Α. μολυσμένο από περονόσπορο (Αριστερά)

Εικόνα 3.1. Φωτογραφία σε συνδυασμό με τον θερμικό χάρτη για το φυτό φακής Α. με τις τιμές του Πίνακα 4.1. (Δεξιά)

Φυτό Φακής Β.		
Τμήμα χωρίς φανερά συμπτώματα (T°C ± 0,1)	Τμήμα με συμπτώματα (T°C ± 0,1)	
25,5	24,1	
25,6	24,1	
25,3	23,4	
26,9	23,5	
25,7	23,4	
25,6	23,4	
26,5	24,3	

Πίνακας 3.2. Τιμές θερμοκρασίας για το φυτό φακής Β. μολυσμένο από περονόσπορο (Αριστερά)

Εικόνα 3.2. Φωτογραφία σε συνδυασμό με τον θερμικό χάρτη για το φυτό φακής Β. με τις τιμές του Πίνακα 4.2. (Δεξιά)

Φυτό Φακής C.		
Τμήμα χωρίς φανερά συμπτώματα (T°C ± 0,1)	Τμήμα με συμπτώματα (T°C ± 0,1)	
26,2	23,2	
25,4	23,1	
26,4	23,2	
25,1	23,2	
26,3	23,2	
25,9	24,0	

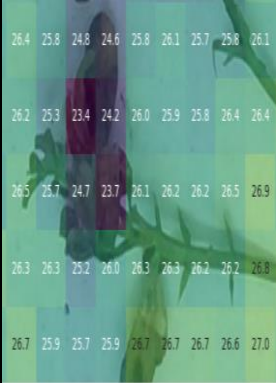
Πίνακας 3.3. Τιμές θερμοκρασίας για το φυτό φακής C. μολυσμένο από περονόσπορο (Αριστερά)

Εικόνα 3.3 Φωτογραφία σε συνδυασμό με τον θερμικό χάρτη για το φυτό φακής C. με τις τιμές του Πίνακα 4.3. (Δεξιά)

Φυτό Φακής D.		
Τμήμα χωρίς φανερά συμπτώματα (T°C ± 0,1)	Τμήμα με συμπτώματα (T°C ± 0,1)	
26,0	24,9	
25,9	24,9	
26,2	24,6	
26,3	24,5	
25,9	25,0	
26,9	24,4	
25,8	24,5	

Πίνακας 3.4. Τιμές θερμοκρασίας για το φυτό φακής D. μολυσμένο από περονόσπορο (Αριστερά)

Εικόνα 3.4. Φωτογραφία σε συνδυασμό με τον θερμικό χάρτη για το φυτό φακής D. με τις τιμές του Πίνακα 4.4. (Δεξιά)

Φυτό Φακής E.		
Τμήμα χωρίς φανερά συμπτώματα (T°C ± 0,1)	Τμήμα με συμπτώματα (T°C ± 0,1)	
26,1	24,8	
26,3	24,6	
26,3	23,4	
26,2	24,2	
26,2	24,7	
26,7	23,7	
26,2	25,2	

Πίνακας 3.5. Τιμές θερμοκρασίας για το φυτό φακής E. μολυσμένο από περονόσπορο (Αριστερά)

Εικόνα 3.5. Φωτογραφία σε συνδυασμό με τον θερμικό χάρτη για το φυτό φακής E. με τις τιμές του Πίνακα 4.5. (Δεξιά)

Στη συνέχεια, οι πίνακες αναλύθηκαν στο πρόγραμμα JASP. Αρχικά έγινε περιγραφική στατιστική για τις τιμές θερμοκρασίας κάθε φυτού με βάση το αν η τιμή ανήκει σε τμήμα με εμφανή ή μη συμπτώματα μόλυνσης από Περονόσπορο. Υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών, το στατιστικό σφάλμα των τιμών και η διακύμανση των θερμοκρασιών για τα εικονοστοιχεία των περιοχών με εμφανή συμπτώματα, και με αυτών χωρίς εμφανή συμπτώματα. Από αυτά τα δεδομένα δημιουργήθηκαν στατιστικά γραφήματα τύπου Boxplot όπου γίνονται εμφανείς οι διακυμάνσεις των τιμών θερμοκρασίας για τις δυο περιοχές των φυτών. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Jitter element του προγράμματος JASP ώστε να εμφανίζονται πάνω στο διάγραμμα Boxplot όλες οι σημειακές τιμές θερμοκρασίας κάθε εικονοστοιχείου.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα πέντε φυτά φακής που χρησιμοποιήθηκαν ονομάστηκαν A., B., C., D. και E. . Όλα εμφάνιζαν συμπτώματα σε κάποια σημεία τους. Συγκεκριμένα, στο φυτό A, η μέση θερμοκρασία των τμημάτων με συμπτώματα

ήταν περίπου $24,7 \pm 0,17^{\circ}\text{C}$ ενώ στα τμήματα χωρίς συμπτώματα ήταν σχεδόν $26 \pm 0,22^{\circ}\text{C}$. Δηλαδή υπήρχε μια διαφορά μεταξύ των δυο μέσων όρων ίση με $1,3^{\circ}\text{C}$.

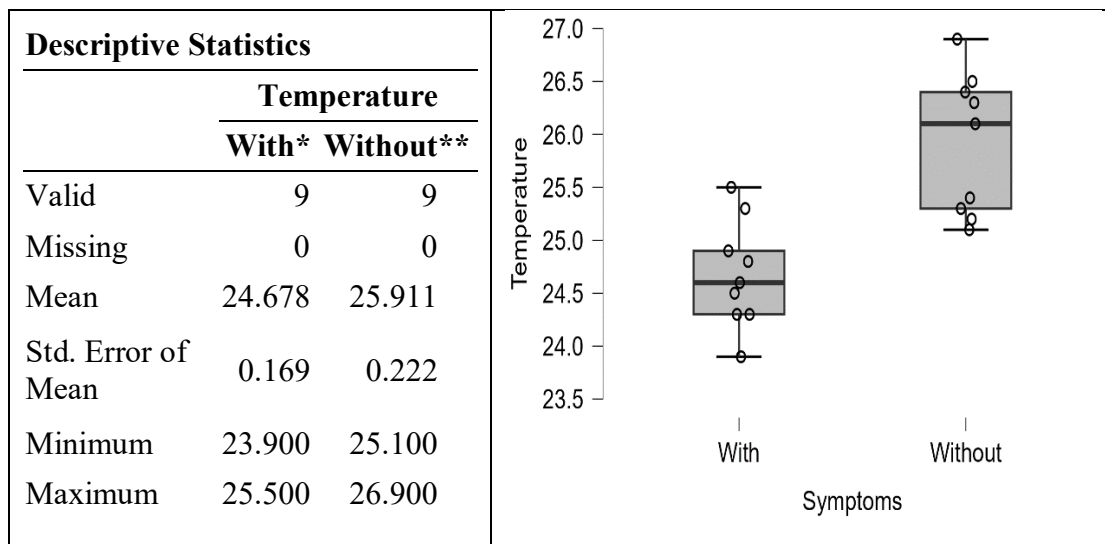
Στο φυτό B, η μέση θερμοκρασία των τμημάτων με συμπτώματα ήταν περίπου $23,7^{\circ} \pm 0,17^{\circ}\text{C}$ ενώ στα τμήματα χωρίς συμπτώματα ήταν $25,9 \pm 0,22^{\circ}\text{C}$. Δηλαδή υπήρχε μια διαφορά μεταξύ των δυο μέσων όρων ίση με $2,2^{\circ}\text{C}$.

Στο φυτό C, η μέση θερμοκρασία των τμημάτων με συμπτώματα ήταν περίπου $23,3 \pm 0,14^{\circ}\text{C}$ ενώ στα τμήματα χωρίς συμπτώματα ήταν σχεδόν $25,9 \pm 0,21^{\circ}\text{C}$. Δηλαδή υπήρχε μια διαφορά μεταξύ των δυο μέσων όρων ίση με $2,6^{\circ}\text{C}$ που ήταν και η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας από τα πέντε δείγματα.

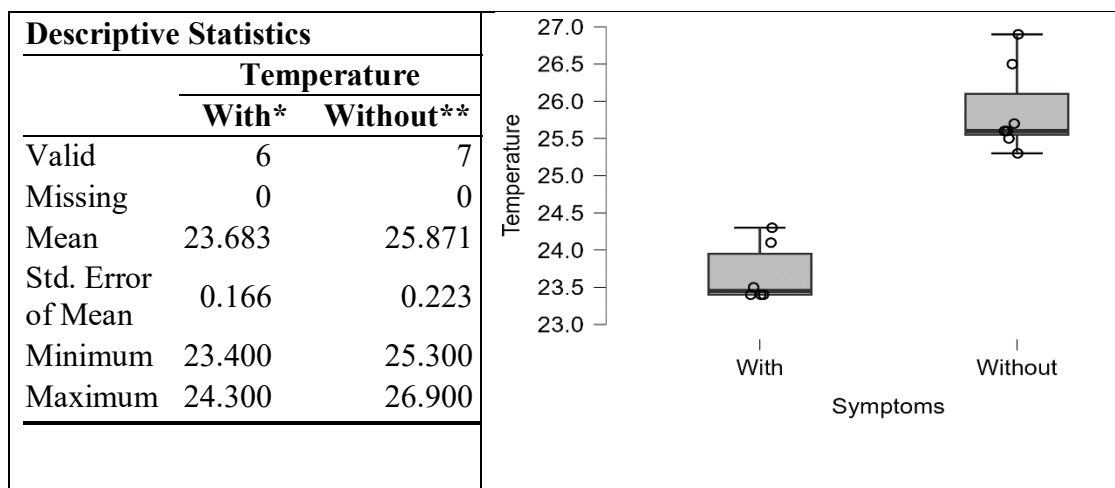
Στο φυτό D, η μέση θερμοκρασία των τμημάτων με συμπτώματα ήταν περίπου $24,7 \pm 0,09^{\circ}\text{C}$ ενώ στα τμήματα χωρίς συμπτώματα ήταν σχεδόν $26,1 \pm 0,14^{\circ}\text{C}$. Δηλαδή υπήρχε μια διαφορά μεταξύ των δυο μέσων όρων ίση με $1,4^{\circ}\text{C}$, αρκετά μικρότερη από τις διαφορές θερμοκρασίας των άλλων δειγμάτων.

Στο φυτό E, η μέση θερμοκρασία των τμημάτων με συμπτώματα ήταν περίπου $24,4 \pm 0,24^{\circ}\text{C}$ ενώ στα τμήματα χωρίς συμπτώματα ήταν σχεδόν $26,3 \pm 0,08^{\circ}\text{C}$. Δηλαδή υπήρχε μια διαφορά μεταξύ των δυο μέσων όρων ίση με $1,9^{\circ}\text{C}$.

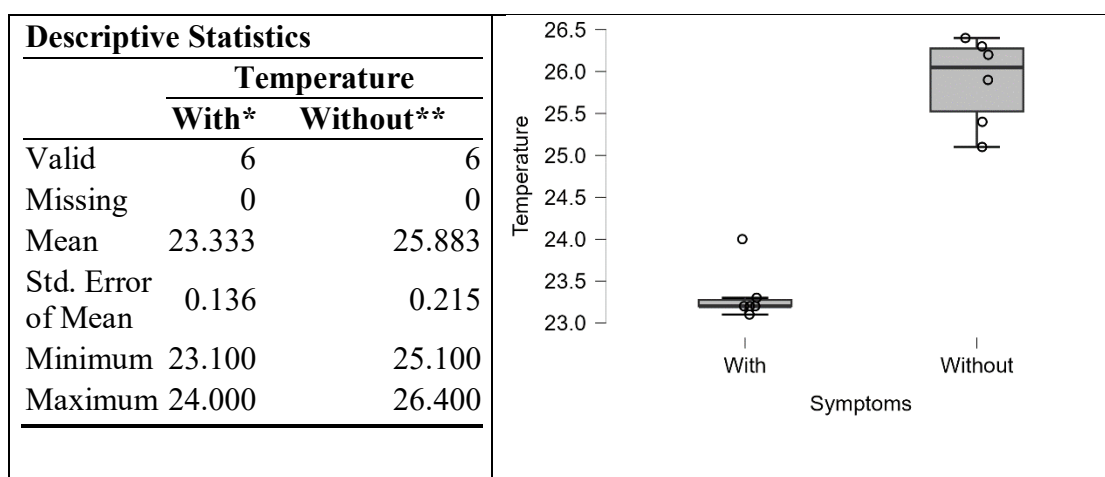
Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα η χαμηλότερη θερμοκρασία παρατηρήθηκε στο φυτό C. και ήταν $23,1^{\circ}\text{C}$ ενώ η μεγαλύτερη θερμοκρασία (max) ήταν η $26,9^{\circ}\text{C}$ και υπήρξε στα φυτά A., B., και C.. Με βάση τις συγκεκριμένες μετρήσεις των πέντε φυτών φακής, η μέση διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των τμημάτων με και χωρίς εμφανή συμπτώματα περονόσπορου είναι $1,88 \pm 0,24^{\circ}\text{C}$.



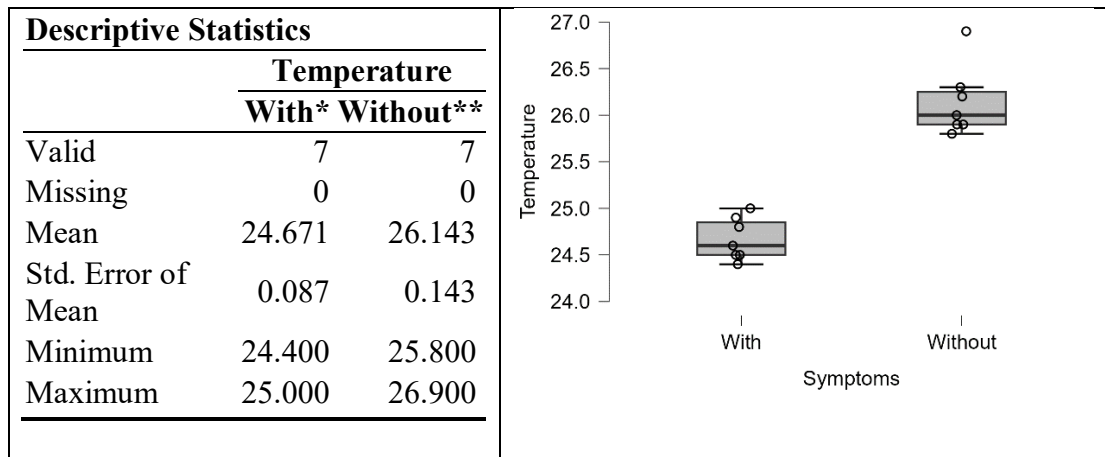
Πίνακας 3.6. Περιγραφική στατιστική του φυτού φακής Α.. Η ανάλυση έγινε με το πρόγραμμα JASP και ο τύπος του διαγράμματος είναι Boxplot.



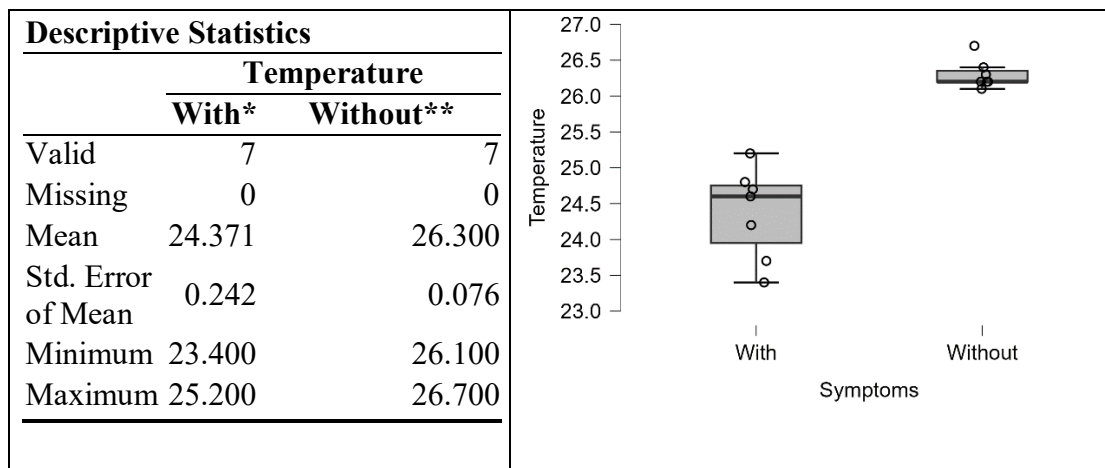
Πίνακας 3.7. Περιγραφική στατιστική του φυτού φακής Β. . Η ανάλυση έγινε με το πρόγραμμα JASP και ο τύπος του διαγράμματος είναι Boxplot.



Πίνακας 3.8. Περιγραφική στατιστική του φυτού φακής C. . Η ανάλυση έγινε με το πρόγραμμα JASP και ο τύπος του διαγράμματος είναι Boxplot.



Πίνακας 3.9. Περιγραφική στατιστική του φυτού φακής D. . Η ανάλυση έγινε με το πρόγραμμα JASP και ο τύπος του διαγράμματος είναι Boxplot.



Πίνακας 3.10. Περιγραφική στατιστική του φυτού φακής E. Η ανάλυση έγινε με το πρόγραμμα JASP και ο τύπος του διαγράμματος είναι Boxplot.

*Το With αναφέρεται στα τμήματα του φύλλου της φακής με εμφανή συμπτώματα του περονόσπορου

**Το Without αναφέρεται στα τμήματα του φύλλου της φακής χωρίς ορατά συμπτώματα του περονόσπορου

Ύστερα, όλες οι τιμές των πέντε φυτών ελέγχθηκαν για στατιστική σημαντικότητα με ανάλυση διακύμανσης (ANOVA). Ουσιαστικά, ελέγχθηκε για το αν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων θερμοκρασιών των εικονοστοιχείων με ορατά συμπτώματα στα φυτά της φακής με Περονόσπορο και των μέσων θερμοκρασιών εικονοστοιχείων με μη ορατά συμπτώματα για καθένα από τα πέντε φυτά φακής (A., B., C., D., E.). Η τιμή p που υπολογίστηκε είναι μικρότερη του 0,01, επομένως η διαφορά των μέσων τιμών θερμοκρασίας μεταξύ των τμήματα του

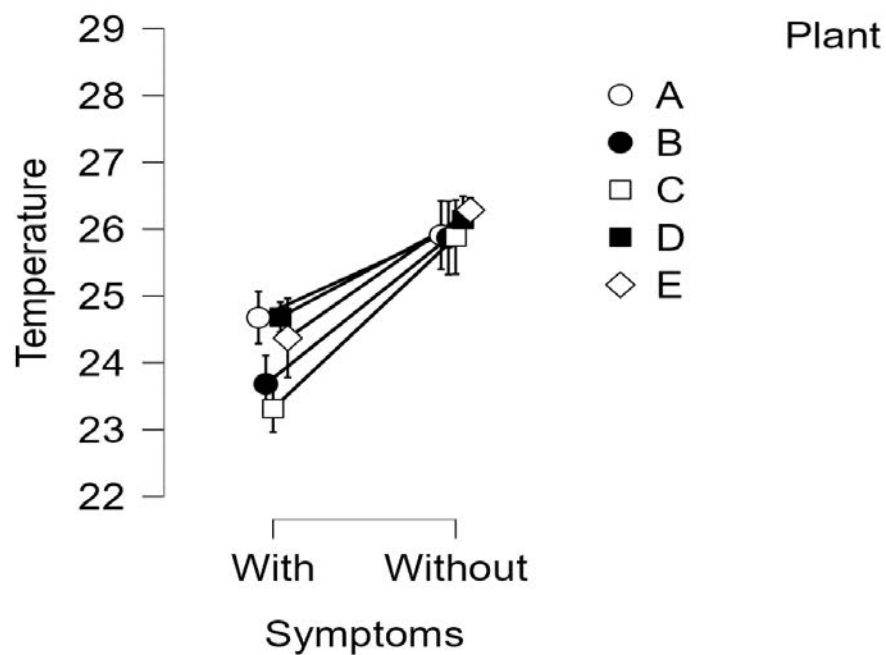
φύλλου της φακής χωρίς ορατά συμπτώματα του περονόσπορου και με ορατά συμπτώματα είναι στατιστικά σημαντική και δηλώνει πως ο παράγοντας θερμοκρασία συνδέεται με την ανάπτυξη του Περονόσπορου στους φυτικούς ιστούς, για τη συγκεκριμένη περίπτωση (Πίν. 3.11.).

ANOVA - Temperature

Cases	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
Symptoms	60.982	1	60.982	258.823	< .001
Plant	7.128	4	1.782	7.563	< .001
Symptoms * Plant	4.150	4	1.037	4.403	0.003
Residuals	14.372	61	0.236		

Note. Type III Sum of Squares

Πίνακας 3.11. Ανάλυση διακύμανσης ANOVA που εξετάζει την υπόθεση ότι φυτά φακής με συμπτώματα Περονόσπορου έχουν διαφορετική θερμοκρασία από φυτά φακής χωρίς με ορατά συμπτώματα.



Εικόνα 3.6. Διάγραμμα με τις μέσες τιμές θερμοκρασίας φυτών φακής με εμφανή συμπτώματα (With) ή μη εμφανή συμπτώματα (Without) για τα πέντε διαφορετικά φυτά φακής A., B., C., D. και E. που μετρήθηκαν από το σύστημα θερμογραφίας που αναπτύχθηκε για τη συγκεκριμένη εργασία.

3.2. Συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας κατά επώαση και ανάπτυξη του μολύσματος

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η στιγμιαία θερμοκρασία και η στιγμιαία σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας στο δωμάτιο που έμεναν τα φυτά τριανταφυλλιάς που χρησιμοποιούνται καθημερινά για θερμογραφία καταγραφόταν πριν πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις, πιο συγκεκριμένα περίπου στις 12.00 το μεσημέρι. Η διακύμανσή της θερμοκρασίας στο δωμάτιο με τις τριανταφυλλιές ήταν από 21,7°C μέχρι 23°C με μέση θερμοκρασία κατά την όλη διάρκεια των πειραμάτων να είναι 22,3°C στο πρώτο πείραμα, ενώ για το δεύτερο οι τιμές θερμοκρασίας ήταν από 23,2°C μέχρι 24,3°C με μέση θερμοκρασία 23,7°C. Η μέση τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα ήταν 46,3% για το πρώτο πείραμα ενώ για το δεύτερο ήταν 54,2%. Υπενθυμίζεται πως το πρώτο πείραμα πραγματοποιήθηκε τον Ιανουάριο ενώ το δεύτερο τον Μάιο που καθιστά την αυξημένη θερμοκρασία στο δεύτερο πείραμα αναμενόμενη.

Συνθήκες Επώασης Πειράματος 1.		
Ημέρα	Θερμοκρασία (°C)	Σχετική Υγρασία Ατμόσφαιρας (%)
0	-	-
1	-	-
2	23,0	45,0
3	22,0	43,4
4	22,4	44,0
5	21,7	45,0
6	21,8	43,4
7	22,3	44,7
8	22,6	55,2
9	22,6	47,8
10	22,5	48,0
M.O.	22,3	46,3

Συνθήκες Επώασης Πειράματος 2.		
Ημέρα	Θερμοκρασία (°C)	Σχετική Υγρασία Ατμόσφαιρας (%)
0	-	-
1	-	-
2	23,6	54,5
3	23,8	53,8
4	24,0	52,3
5	24,3	53,7
6	23,6	55,4
7	23,2	54,5
8	23,3	54,5
9	23,4	53,5
10	23,5	54,5
11	23,7	54,4
12	24,0	55,3
M.O.	23,7	54,2

Πίνακας 3.12. (Αριστερά) και Πίνακας 3.13. (Δεξιά). Οι τιμές στιγμιαίας Θερμοκρασίας και στιγμιαίας Σχετικής Υγρασίας περιβάλλοντος στο δωμάτιο που διατηρούταν τα φυτά στο στάδιο επώασης και ανάπτυξης της ασθένειας πριν την πραγματοποίηση των μετρήσεων, για το πρώτο και το δεύτερο πείραμα αντιστοίχως. Στη τελευταία γραμμή υπάρχει ο μέσος όρος των στιγμιαίων θερμοκρασιών όλων των ημερών των πειραμάτων.

3.3.Αποτελέσματα θερμογράφησης φυτών τριανταφυλλιάς μολυσμένα με ωίδιο

Από τα φυτά τριανταφυλλιάς που μολύνθηκαν τεχνητά με ωίδιο, γινόνταν καταγραφή θερμοκρασίας των φύλλων τους με το σύστημα θερμογραφίας με την κάμερα RGB και Infrared για 21 ημέρες συνεχόμενα. Σε φύλλο που εμφανίστηκαν τα συμπτώματα της ασθένειας του ωιδίου, πραγματοποιήθηκε ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για να ελεγχθεί η στατιστική σημαντικότητα της διαφοράς των μέσων τιμών θερμοκρασίας στα τμήματα του φύλλου που μολύνθηκαν τεχνητά με κονίδια του μύκητα *Sphaerotheca pannosa* και των τμημάτων του ίδιου φύλλου που δεν χρησιμοποιήθηκε μόλυσμα κατά την τεχνητή μόλυνση. Για την ανάλυση διακύμανσης σχεδιάστηκαν πίνακες με εννέα θερμοκρασίες από εικονοστοιχεία τμημάτων του φύλλου που είχε χρησιμοποιηθεί μόλυσμα ωιδίου και με εννέα θερμοκρασίες από εικονοστοιχεία τμημάτων του ίδιου φύλλου που δεν χρησιμοποιήθηκε μόλυσμα (Εικ. 3.8.). Τελικά, για την ανάλυση διακύμανσης έγινε χρήση των θερμοκρασιών από τις ημέρες 15, 16, 17 και 18 των μετρήσεων θερμογράφησης και τέθηκαν ως χρόνοι t1, t2, t3 και t4 αντιστοίχως.

ANOVA - Data

Cases	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
Time	2.167	3	0.722	26.502	< .001
Treatment	4.157	1	4.157	152.504	< .001
Time * Treatment	1.768	3	0.589	21.624	< .001
Residuals	1.744	64	0.027		

Note. Type III Sum of Squares

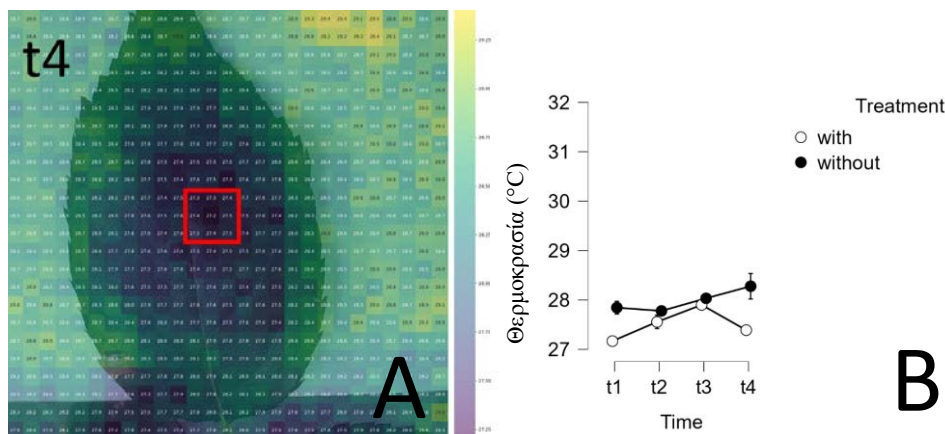
Πίνακας 3.13. Ανάλυση διακύμανσης ANOVA που εξετάζει την υπόθεση ότι τμήματα από φύλλα τριανταφυλλιάς που αναπτύσσεται μυκήλιο ωιδίου στο εσωτερικό των ιστών τους, έχουν διαφορετική θερμοκρασία από τμήματα που δεν υπάρχει προσβολή ωιδίου.

Η ανάλυση διακύμανσης με τις θερμοκρασίες των φύλλων φυτών τριανταφυλλιάς έδειξε πως το p είναι μικρότερο του 0,01, συνεπώς η διαφορετική

θερμοκρασία στα σημεία που αναπτύσσεται μυκήλιο του ωιδίου και σε αυτά που δεν αναπτύσσεται είναι στατιστικά σημαντική (Εικ. 3.13.). Με άλλα λόγια, η θερμοκρασία του φύλλου σε φυτά τριανταφυλλιάς είναι παράγοντας που φαίνεται πως συνδέεται με την ανάπτυξη μυκηλίου από ωίδιο σε αυτούς τους ιστούς, σύμφωνα με τα συγκεκριμένα δεδομένα.



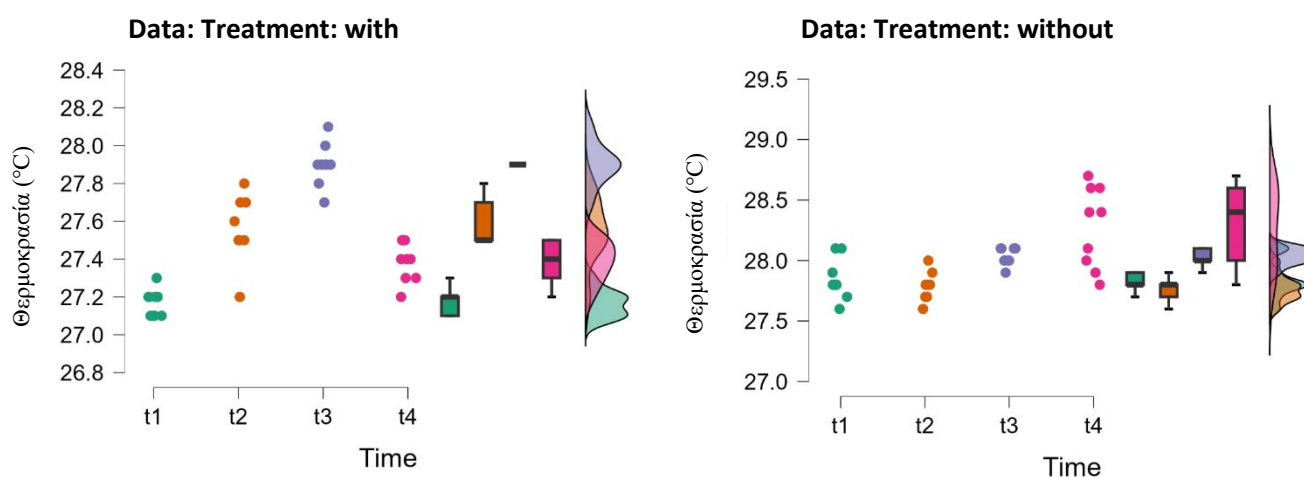
Εικόνα 3.7. Τα φύλλα τριανταφυλλιάς που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα θερμογραφίας όπου αριστερά φαίνεται το μόλυσμα, δηλαδή η σταγόνα απιονισμένο νερού που περιέχει τα κονίδια του ωιδίου από το φύλλο που αναλύθηκε στατιστικά με ανάλυση διακύμανσης, ενώ δεξιά φαίνεται η ανάπτυξη του μυκηλίου ωιδίου την τελευταία μέρα του πειράματος.



Εικόνα 3.8. (Α) Θερμικός χάρτης με τις θερμοκρασίες του φύλλου σε συνδυασμό με εικόνα RGB του φύλλου τριανταφυλλιάς που αναπτυσσόταν μυκήλιο ωιδίου την ημέρα 18 από τις 21 του πειράματος θερμογραφίας. Το κόκκινο τετράγωνο δηλώνει τα 9 εικονοστοιχεία των οποίων οι θερμοκρασίες αναλύθηκαν στατιστικά με ανάλυση διακύμανσης. (Β) Διάγραμμα με τη θερμοκρασία του φύλλου τριανταφυλλιάς για τέσσερις μέρες ανάπτυξης μυκηλίου (t1-t4). Η μαύρη γραμμή είναι η διακύμανση της θερμοκρασίας στα τμήματα που δεν χρησιμοποιήθηκε

μόλυσμα ενώ η λευκή γραμμή είναι η θερμοκρασία των τμημάτων φύλλου όπου αναπτυσσόταν το ωίδιο. Το διάγραμμα σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα JASP.

Μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας παρατηρήθηκε την ημέρα δεκαπέντε, όπως και την ημέρα δεκαοκτώ του πειράματος θερμογραφίας, δηλαδή στο χρόνο t1 και t4, όπου η θερμοκρασία στα σημεία που αναπτύσσεται το μυκήλιο ήταν χαμηλότερη κατά περίπου 0,9°C από την θερμοκρασία στα σημεία χωρίς μόλυνση (Εικ. 3.8. (B)). Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι σημάδια μυκηλίου στο φύλλο αυτό μέχρι και την ημέρα δεκαοκτώ των πειραμάτων δεν ήταν ορατά με γυμνό μάτι. Επιπλέον, δημιουργήθηκαν με το πρόγραμμα JASP διαγράμματα τύπου Raincloud Plot, τα οποία παρέχουν αυξημένη κατανόηση της διακύμανσης των τιμών θερμοκρασίας. Σε αυτά τα διαγράμματα, δημιουργούνται σχήματα παρόμοια με σύννεφα όπου φαίνεται πως στη περίπτωση των θερμοκρασιών για τα τμήματα με παρουσία του ωιδίου υπάρχει μεγαλύτερη διασπορά των θερμοκρασιών, ενώ οι τιμές για τα τμήματα του φύλλου χωρίς προσβολή ωιδίου είναι πιο σταθερές κατά την περίοδο των τεσσάρων ημερών (t1-t4) (Εικ. 3.9. και 3.10.).



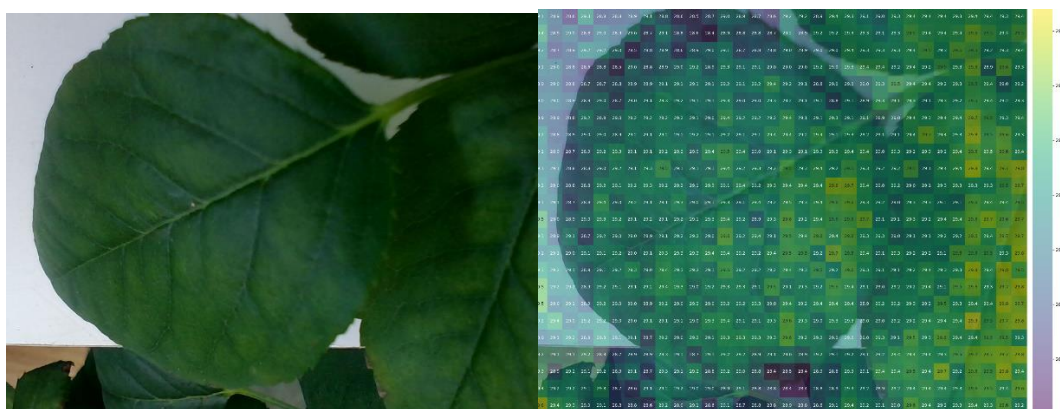
Εικόνα 3.9. και Εικόνα 3.10. Διαγράμματα τύπου Raincloud plots για τις μετρήσεις θερμοκρασίας στο φύλλο τριανταφυλλιάς μολυσμένο με ωίδιο. Αριστερά φαίνονται οι τιμές για τα τμήματα με παρουσία του ωιδίου, ενώ δεξιά φαίνονται οι τιμές για τα τμήματα του φύλλου χωρίς προσβολή ωιδίου.

4. Συζήτηση

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία, αφού πρώτα μελετήθηκαν οι τεχνικές υπέρυθρης θερμογραφίας αλλά και οι δυνατότητές στους στις Γεωπονικές επιστήμες, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε σύστημα θερμογραφίας με αρκετά χαμηλό κόστος. Το σύστημα θερμογραφίας που δημιουργήθηκε αποτελείται από την θερμική κάμερα MLX90640 Standard (55°), την κάμερα RGB Tyro Full HD Webcam (64°) και τον μικροεπεξεργαστή Teensy 4.0. Η χρήση δυο διαφορετικών καμερών ήταν μια οικονομική λύση, καθώς η αγορά θερμικής κάμερας με ενσωματωμένη RGB απεικόνιση είναι πολύ ακριβότερη επιλογή, αλλά δημιουργούσε πρόβλημα στην κοινή εστίαση λόγω των διαφορετικών οπτικών γωνιών. Την επίλυση αυτού του προβλήματος πρόσφερε ο σχεδιασμός και η τρισδιάστατη εκτύπωση βάσης ειδικά προσαρμοσμένη ώστε να δέχεται τις συγκεκριμένες κάμερες και να ρυθμίζει τις αποστάσεις των καμερών από την επιφάνεια καταγραφής αλλά και την μεταξύ τους απόσταση, επιτυγχάνοντας ορθή εστίαση. Φυσικά, ήταν απαραίτητη η δημιουργία κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού, ώστε να ρυθμιστεί η κοινή λειτουργία των καμερών αλλά και όσοι παράμετροι χρειαζότανε, όπως την ενδιάμεση αναμονή μεταξύ λήψης των εικόνων RGB και Infrared και ρύθμιση της εστίασης της κάμερας RGB με βάση την απόσταση από την επιφάνεια καταγραφής. Επομένως, η κάθε χρήση του συστήματος θερμογραφίας, έδινε τα εξής δεδομένα: αρχεία με τις θερμοκρασίες των έξι επαναλήψεων και τον μέσο όρο τους, εικόνα με φυσικά χρώματα RGB, εικόνα RGB με πλέγμα των τιμών θερμοκρασίας από επάνω, εικόνα του θερμικού χάρτη με χρωματιστά εικονοστοιχεία ανάλογα την θερμοκρασία τους και συνδυασμό της εικόνας RGB, του πλέγματος τιμών θερμοκρασίας και του θερμικού χάρτη σε μια εικόνα.

Με την ολοκλήρωση του συστήματος θερμογραφίας, ξεκίνησαν δοκιμαστικές μετρήσεις σωμάτων με υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντα χώρου ώστε να ελεγχθεί η απόδοση και η ακρίβεια του συστήματος και να διορθωθούν τεχνικά λάθη. Από τις μετρήσεις βγήκαν κάποια γενικά συμπεράσματα. Για μια ακριβή θερμογράφηση, θα πρέπει το αντικείμενο που καταγράφεται να είναι όσο το δυνατόν πιο επίπεδο, καθώς μια ανομοιόμορφη επιφάνεια δίνει μετρήσεις θερμοκρασίας με μεγάλη απόκλιση μεταξύ των διαφορετικών της σημείων. Πιο συγκεκριμένα, αν ένα

σώμα βρίσκεται πολύ κοντά στην θερμική κάμερα, η τιμή θερμοκρασίας στα σημεία που είναι κοντά με τη κάμερα θα είναι πιο υψηλή από το να απείχαν τα ίδια σημεία μεγαλύτερη απόσταση από την κάμερα (Εικ. 4.1). Επομένως, για τα πειράματα επιλεγόταν από την αρχή φύλλα με όσο το δυνατόν πιο οριζοντιωμένα ελάσματα, ώστε να μένουν παράλληλα με το οπτικό πεδίο καταγραφής. Ένα σημείο που χρειάζεται προσοχή, είναι η μειωμένη ακρίβεια της θερμικής κάμερας στα τμήματα μακριά από το κέντρο της εστιάσής της. Επομένως προτείνεται να μην λαμβάνονται υπόψιν οι θερμοκρασίες των εικονοστοιχείων του περιγράμματος μιας θερμικής απεικόνισης (Oerke et al. 2006).

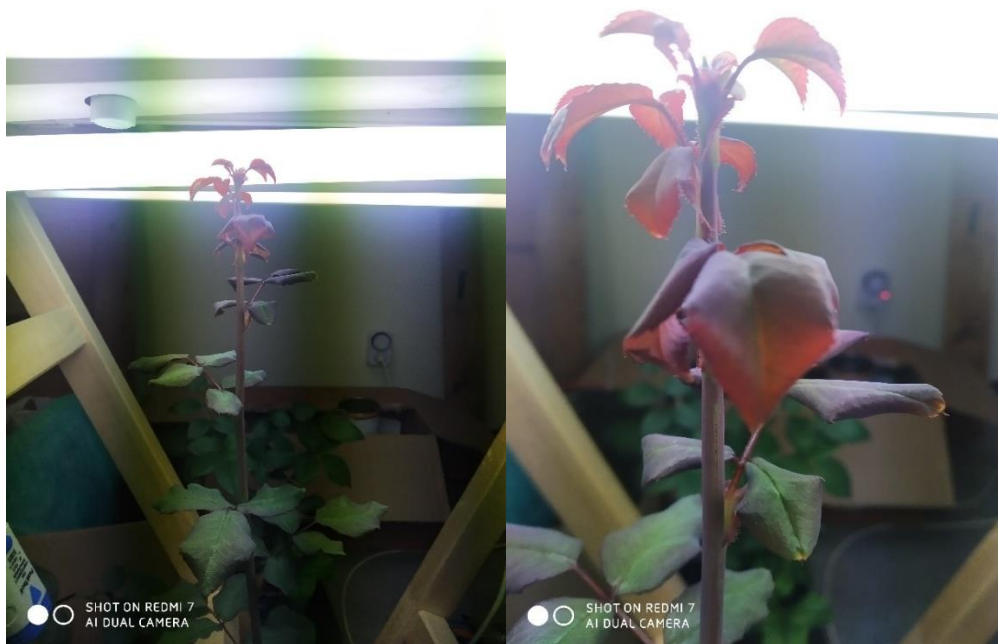


Εικόνα 4.1 Παράδειγμα κακής θερμικής απεικόνισης ενός φύλλου που βρίσκεται με κλίση κάτω από την θερμική κάμερα με αποτέλεσμα τα τμήματα του φύλλου που βρίσκονται πιο κοντά στην κάμερα λόγω της κλίσης που έχει το φύλλο να εμφανίζονται ως πιο θερμά (μέχρι και 1°C θερμότερα) και αυτά που είναι πιο μακριά εμφανίζονται ως πιο ψυχρά. Αν το φύλλο παρέμενε επίπεδο κάτω από τη θερμική εικόνα, οι θερμοκρασίες του δεν θα διαφέραν τόσο κατά μήκος του φύλλου.

Από τις μετρήσεις φυτών φακής με περονόσπορο χρησιμοποιώντας το σύστημα θερμογραφίας που αναπτύχθηκε φαίνεται πως ο διαχωρισμός φυτών που εμφανίζουν έντονα τα συμπτώματα της ασθένειας όπως χλώρωση και ξήρανση, μπορεί να γίνει πολύ εύκολα και αποδοτικά. Τα φυτά ή τα τμήματα φυτών φακής που εμφάνιζαν τα συμπτώματα περονόσπορου είχαν κατά μέσο όρο θερμοκρασία $1,88 \pm 0,24^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη από αυτά που δεν εμφάνισαν συμπτώματα οπότε θεωρείται πως η διάκριση έντονα προσβεβλημένων φυτών φακής από υγιή με το σύστημα θερμογραφίας έχει σημαντικές προοπτικές. Πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η ανάπτυξη της ασθένειας και η συμπτωματολογία του περονόσπορου έχει ήδη

εκδηλωθεί και τα φυτά φακής έχουν ήδη δεχθεί σημαντικές βλάβες, σε αντίθεση με τα πειράματα θερμογραφίας φυτών τριανταφυλλιάς όπου μελετάτε η διακύμανση των θερμοκρασιών των φύλλων κατά την ανάπτυξη της μόλυνσης ωιδίου και θα αναλυθεί στις επόμενες παραγράφους.

Όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 2.9, τα δυο πρώτα πειράματα όπου μολύνθηκαν φυτά τριανταφυλλιάς με ωίδιο δεν έδωσαν αποτελέσματα καθώς δεν ήταν επιτυχημένη η ανάπτυξη του μολύσματος στον ιστό. Στο τρίτο όμως σε σειρά πείραμα, το ωίδιο αναπτύχθηκε με επιτυχία στα φυτά τριανταφυλλιάς και τα συμπτώματα έγιναν εμφανή. Τα φυτά που μολύνθηκαν ήταν ακριβώς τα ίδια και στις τρεις περιπτώσεις και το μόλυσμα, δηλαδή τα κονίδια από φύλλα με ωίδιο προέρχονταν και αυτά από τα ίδια μολυσμένα φυτά. Επομένως το μόνο που άλλαξε ήταν το περιβάλλον όπου έγινε η επώαση της ασθένειας. Μια υπόθεση λοιπόν είναι πως η το αίτιο που δεν μολύνθηκαν τα φυτά είναι η κοντινή τους απόσταση με τις λάμπες στο χώρο ανάπτυξης και επώασης του παθογόνου. Τα φυτά τριανταφυλλιάς μεγάλωναν όσο πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις κάθε πειράματος και ερχόταν σε πολύ μικρή απόσταση από τις λάμπες (Εικ. 4.2.). Όσο πιο κοντά στις λάμπες βρισκόταν τα φύλλα, τόσο πιο έντονα παρατηρήθηκε μαρasmus σε αυτά, άλλο ένα σημάδι ότι οι λάμπες επηρέαζαν το φυτικό και ίσως και το μυκηλιακό ιστό. Να σημειωθεί πως οι συνθήκες θερμοκρασίας στο δωμάτιο που λάμβανε χώρο η επώαση του ωιδίου της τριανταφυλλιάς ήταν ιδανικές για τον μύκητα. Το είδος *Sphaerotheca pannosa* var. *rosae* επωάζεται σε θερμοκρασίες 8-28 °C και ο ρυθμός ανάπτυξής του μεγιστοποιείται στους 22-24 °C (Xu 1999). Στο πρώτο πείραμα, ο μέσος όρος των τιμών θερμοκρασίας στο δωμάτιο ήταν 22,3°C και στο δεύτερο ήταν 23,7°C, δηλαδή στο εύρος των πολύ ευνοϊκών θερμοκρασιών για το μύκητα. Οπότε από πλευράς θερμοκρασίας δεν εξηγείται η αποτυχία της μόλυνσης.



Εικόνα 4.2 Τα φυτά τριανταφυλλιάς σε πολύ στενή απόστασή από τις λάμπες στο δωμάτιο που φυλάσσονταν.

Αυτός είναι και ο λόγος που για το τρίτο πείραμά αποφασίστηκε τα φυτά τριανταφυλλιάς να παραμένουν σε εξωτερικό χώρο. Πέρα από αυτήν την επιλογή, αποφασίστηκε ακόμα να μην χρησιμοποιούνται για το πείραμα διαφορετικά φύλλα ως μάρτυρες, αλλά να ελέγχεται η διαφορά θερμοκρασίας στο σημείο που έγινε η μόλυνση σε σχέση με τα γύρω σημεία του ίδιου φύλλου. Από τις μετρήσεις του πρώτου πειράματος παρατηρήθηκε πως κάθε φύλλο είχε την δικιά του ημερήσια θερμοκρασία και διέφερε, λίγο ή πολύ, από τη θερμοκρασία των άλλων φύλλων. Οπότε δεν μπορεί ένα φύλλο που δεν μολύνθηκε να λειτουργεί σαν μάρτυρας για ένα διαφορετικό φύλλο που μολύνθηκε καθώς ακόμα και πριν την εμφάνιση των συμπτωμάτων της ασθένειας του ωιδίου οι θερμοκρασίες τους ήταν διαφορετικές. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τη θεωρία φυσιολογίας των φυτών, καθώς η θέση, η επιφάνεια αλλά και η ηλικία του κάθε φύλλου, παίζουν ρόλο στην θερμοκρασία του (Oerke et al. 2006).

Στο τρίτο σε σειρά πείραμα θερμογραφίας φυτών τριανταφυλλιάς με αναπτυσσόμενη μόλυνση ωιδίου, εμφανίστηκαν τα συμπτώματα της ασθένειας, δηλαδή το λευκό μυκήλιο στα σημεία που έγινε η τεχνητή μόλυνση. Το γεγονός της εμφάνισης των συμπτωμάτων όταν το φυτό βρισκόταν σε εξωτερικό χώρο υποστηρίζει τη θεωρία πως για τις δυο προηγούμενες προσπάθειες για τεχνητή μόλυνση, ίσως ο παράγοντας της λάμπας να επηρέασε την μόλυνση. Όπως συνέβη και στα πειράματα θερμογραφίας στα φυτά φακής με περονόσπορο, η θερμοκρασία στα σημεία του

φύλλου τριανταφυλλιάς που αναπτύχθηκε ο μύκητας του ωιδίου ήταν χαμηλότερη αλλά κατά $0,9^{\circ}\text{C}$ σε σχέση με τα σημεία που δεν αναπτυσσόταν ο μύκητας, στις δεκαπέντε και στις δεκαοκτώ ημέρες από την τεχνητή μόλυνση με ωίδιο. Μια τέτοια διαφορά του σχεδόν ενός βαθμού κελσίου ήταν εύκολο να εντοπιστεί από το σύστημα θερμογραφίας και όπως υποστηρίζεται από την θεωρία αλλά και από λοιπές πειραματικές εργασίες, η πτώση της θερμοκρασίας στους ιστούς που αναπτύσσεται ο μύκητας οφείλεται στην αύξηση της διαπνοής, δηλαδή της διαδικασίας εξάτμισης νερού από τα στόματα των φύλλων, που την προκάλεσε η δράση του μύκητα (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012, Stoll 2008 και Oerke 2016). Όπως έχει αναφερθεί στην εισαγωγή, οι μύκητες με την προσβολή και ανάπτυξή τους στα φύλλα αναγκάζουν με τοξίνες τα στόματα να μείνουν ανοικτά, επομένως δεν μπορούν να σταματήσουν την διαπνοή και το φύλλο ψύχεται (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012). Επιπλέον, οι μύκητες διασπούν την εφυμενίδα, που είναι ένα στρώμα κυττάρων αδιαπέραστο από το νερό, με αποτέλεσμα το νερό να μπορεί να εξατμίζεται ανεξέλεγκτα προκαλώντας μείωση θερμοκρασίας (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012). Από τα πειράματα των Vagelas et al. (2021), με θερμογραφία φυτών τριανταφυλλιάς με ωίδιο, παρατηρήθηκε επίσης χαμηλότερη μέση θερμοκρασία στα φύλλα που νοσούσαν κατά $1,1^{\circ}\text{C}$ τις ημέρες ανάπτυξης της ασθένειας. Η επώαση, όμως, στη συγκεκριμένη εργασία έγινε πιο καθυστερημένα από ότι στην εργασία των Vagelas et al. και ενώ βρέθηκαν παρόμοιες διαφορές θερμοκρασίας, διέφεραν οι συνολικές ημέρες που χρειάστηκε για να εμφανιστούν τα συμπτώματα. Αυτή η καθυστέρηση της εκδήλωσης της ασθένειας πιθανόν να οφείλεται στις συνθήκες θερμοκρασίας του πρώτου εικοσιτετράωρου στο εργαστήριο που πραγματοποιήθηκε η τεχνητή μόλυνση των τριανταφυλλιών με ωίδιο, καθώς η θερμοκρασία εργαστηρίου ήταν περίπου 27°C , που όπως επισημαίνεται από τον Xu 1999, η ανάπτυξη του ωιδίου της τριανταφυλλιάς σε τέτοια θερμοκρασία είναι πάρα πολύ αργή. Μετά την πρώτη ημέρα το φυτό τριανταφυλλιάς μεταφέρθηκε σε εξωτερικό χώρο για τους λόγους που προαναφέρθηκαν με θερμοκρασία ημέρας περίπου 24°C , ιδανική για την ανάπτυξη του ωιδίου. Βέβαια, οι διαφορές θερμοκρασίας που βρέθηκαν στα συγκεκριμένα πειράματα αναφέρονται στα συγκεκριμένα είδη και ποικιλίες φυτών που χρησιμοποιήθηκαν, στα συγκεκριμένα είδη μυκήτων και στις συνθήκες τις οποίες έγιναν οι μετρήσεις και πιθανός η αλληλεπίδραση διαφορετικών φυτών με διαφορετικές ασθένειες να έχει πολύ διαφορετικά αποτελέσματα, λόγω χάρη αντί για μείωση της θερμοκρασίας στα σημεία ανάπτυξης

μιας ασθένειας, οι Vagelas et al. (2021) παρατήρησαν αύξηση θερμοκρασίας στα φύλλα φυτών χρυσάνθεμου εξαιτίας το μύκητα *Septoria* ssp. .

Τέλος, κρίνεται σημαντικό να αναφερθεί πως σε τεχνικές που περιλαμβάνουν τον υπολογισμό της θερμοκρασίας, όπως τις τεχνικές θερμογραφίας, αξίζει η εστίαση να γίνεται στις διαφορές θερμοκρασίας στα διάφορα τμήματα ενός φύλλου για παράδειγμα, και όχι στην ίδια την θερμοκρασία, καθώς η θερμοκρασία είναι ένα φυσικό μέγεθος που επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες του περιβάλλοντος και συνεχώς αλλάζει (Lipinska et al 2022). Στο παράδειγμα του φύλλου, οι φυσιολογικές λειτουργίες του φυτού όπως η διαπνοή έχουν ρόλο ομοιόστασης, δηλαδή προσπαθούν συνεχώς να διατηρήσουν την θερμοκρασία των ιστών στα επιθυμητά επίπεδα ενώ ταυτόχρονα εξωτερικοί παράγοντες όπως η ηλιακή ακτινοβολία ή ένας ψυχρός άνεμος προκαλούν αυξήσεις και μειώσεις στη θερμοκρασία του φύλλου αντιστοίχως (Καραμπουρνιώτης κ.α. 2012).

Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, στη πειραματική διαδικασία η ανίχνευση ασθενών φυτών φακής με έντονα συμπτώματα από περονόσπορο με το σύστημα θερμογραφίας που αναπτύχθηκε, είχε μεγάλη επιτυχία λόγω των υψηλών διαφορών θερμοκρασίας. Μια τέτοια καθυστερημένη διάγνωση βέβαια δεν θα βοηθήσει στην έγκυρη αντιμετώπιση της ασθένειας αφού οι φυτικοί ιστοί είχαν ήδη δεχθεί σημαντικές βλάβες, είναι όμως ένα ικανό εργαλείο διάκρισης φυτών με αποξηραμένα και νεκρωτικά τμήματα και φυτών χωρίς συμπτώματα. Από τα πειράματα θερμογραφίας φυτών τριανταφυλλιάς μολυσμένων με ωίδιο, υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις πως η ανάπτυξη του μυκηλίου στους ιστούς των φύλλων μπορεί να εντοπιστεί προτού να εκδηλωθούν τα ορατά συμπτώματα της ασθένειας, το οποίο είναι και το σημαντικότερο στοιχείο μιας επιτυχημένης διάγνωσης. Εφόσον έχει αποδειχθεί θεωρητικά και πειραματικά πως η προσβολή μυκήτων συνδέεται με αλλαγές στην θερμοκρασία των ιστών ενός φυτού, η θερμογραφία ως σύγχρονη τεχνική διάγνωσης ασθενειών αξίζει να διαδοθεί περισσότερο λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων όπως ότι δεν επεμβαίνει στα φυτά και τις λειτουργίες τους και μπορεί να παρέχει αυτοματοποιημένη και συνεχή παρακολούθηση φυτικών καλλιεργειών. Στόχος για μελλοντικά πειράματα είναι η περεταίρω μελέτη της αλληλεπίδρασης των παθογόνων μικροοργανισμών με τα φυτά ξενιστές χρησιμοποιώντας διαφορετικούς συνδυασμούς φυτών και μυκήτων, αλλά και η βελτίωση του συστήματος και των τεχνικών θερμογραφίας.

Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία:

Βιβλία:

- Θάνος Κ.(επ), Taiz L., Zeiger E., Mollerr I. M. and Murphy A., 2017. *Φυσιολογία και Ανάπτυξη Φυτών*. Εκδόσεις Utopia, Αγία Παρασκευή, Κεφ.

- Καραθανάση Β.(επ.), Jensen J. R., 2015. *Τηλεπισκόπηση Περιβάλλοντος: Μια προοπτική για τα Φυσικά Διαθέσιμα*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα. Κεφ 1
- Καραμπουρνιώτης Γ. Α., Λιακόπουλος Γ., Νικολόπουλος Δ., 2012. *Φυσιολογία Καταπονήσεων Των Φυτών*. Εκδόσεις Έμβρυο, Αιγάλεω. Κεφ. 13, σελ. 223-224.
- Παναγόπουλος Χ., 2007. *Ασθένειες Καρποφόρων Δένδρων & Αμπέλου*. Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε. Αθήνα, 4^η Έκδοση. Κεφ. 1, σελ. 170-173.
- Τζάμος Ε. Κ., 2017. *Φυτοπαθολογία*. Εκδόσεις Unibooks, Αθήνα 2017. Β' έκδοση. Κεφ.3, Κεφ.4, Κεφ. 8, Κεφ.9, Κεφ. 12.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία:

Βιβλία:

- Jones, H.G. (2013). *Plants and Microclimate, A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge University Press, United Kingdom. DOI:[10.1017/CBO9780511845727](https://doi.org/10.1017/CBO9780511845727)
- Sharma I., Sharma A., Singh I., Kumar R., Kumar Y., Sharma A., 2021. Plant Disease Detection Using Image Sensors: A Step Towards Precision Agriculture. In: Chatterjee (ed.), Jain V., *Internet of Things and Machine Learning in Agriculture*, Nova Science Publisher, Chapter 5

Άρθρα:

- Ahmed, A., Ibrahim, A., & Hussein, S.E. (2018). Detection of Palm Tree Pests Using Thermal Imaging: A Review. *Machine Learning Paradigms*. DOI:[10.1007/978-3-030-02357-7_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-02357-7_12)
- Al-doski, J., Mansor, S.B., & Shafri, H.Z. (2016). Thermal imaging for pests detecting-a review.
- Apriani, Y., Oktaviani, W.A., & Sofian, I.M. (2022). Design and Implementation of LoRa-Based Forest Fire Monitoring System. *Journal of Robotics and Control (JRC)*. DOI:[10.18196/jrc.v3i3.14128](https://doi.org/10.18196/jrc.v3i3.14128)
- Assmann, J.J., Kerby, J.T., Cunliffe, A.M., Cunliffe, A.M., & Myers-Smith, I.H. (2018). Vegetation monitoring using multispectral sensors – best

practices and lessons learned from high latitudes. *bioRxiv*. DOI:[10.1101/334730](https://doi.org/10.1101/334730)

- Behmann, J., Acebron, K., Emin, D., Bennertz, S., Matsubara, S., Thomas, S., Bohnenkamp, D., Kuska, M.T., Jussila, J., Salo, H., Mahlein, A., & Rascher, U. (2018). Specim IQ: Evaluation of a New, Miniaturized Handheld Hyperspectral Camera and Its Application for Plant Phenotyping and Disease Detection. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18. DOI:[10.3390/s18020441](https://doi.org/10.3390/s18020441)
- Bleasdale, A.J., Blackburn, G.A., & Whyatt, J.D. (2022). Feasibility of detecting apple scab infections using low-cost sensors and interpreting radiation interactions with scab lesions. *International Journal of Remote Sensing*, 43, 4984 - 5005. DOI:[10.1080/01431161.2022.2122895](https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2122895)
- Chaerle, L., Saibo, N.J., & Van Der Straeten, D. (2005). Tuning the pores: towards engineering plants for improved water use efficiency. *Trends in biotechnology*, 23 6, 308-15 . DOI:[10.1016/J.TIBTECH.2005.04.005](https://doi.org/10.1016/J.TIBTECH.2005.04.005)
- Chen, C., Liu, C., Ciou, S., Chen, S., & Chen, Y. (2017). Digitized Hand Skateboard Based on IR-Camera for Upper Limb Rehabilitation. *Journal of Medical Systems*, 41, 1-7. DOI:[10.1007/s10916-016-0682-3](https://doi.org/10.1007/s10916-016-0682-3)
- Chidurala, V., & Li, X. (2022). Detection of moving objects using thermal imaging sensors for occupancy estimation. *Internet Things*, 17, 100487. DOI:[10.1016/j.iot.2021.100487](https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100487)
- Glenn, D.M. (2012). Infrared and Chlorophyll Fluorescence Imaging Methods for Stress Evaluation. *Hortscience*, 47, 697-698. DOI:[10.21273/HORTSCI.47.6.697](https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.6.697)
- Gorb, S.N., & Gorb, E.V. (2019). Egg-laying job makes males hot: body temperature measurements in egg-laying tandems of the dragonfly *Sympetrum vulgatum* using IR camera. *The Science of Nature*, 106.
- Gorb, S.N., & Gorb, E.V. (2019). Egg-laying job makes males hot: body temperature measurements in egg-laying tandems of the dragonfly *Sympetrum vulgatum* using IR camera. *The Science of Nature*, 106. DOI:[10.1007/s00114-019-1639-4](https://doi.org/10.1007/s00114-019-1639-4)
- Gu, N., Yang, B., & Zhang, T. (2020). Dynamic Fuzzy Background Removal for Indoor Human Target Perception Based on Thermopile Array

Sensor. *IEEE Sensors Journal*, 20, 67-76.
 DOI:[10.1109/JSEN.2019.2942320](https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2942320)

- Hassan, N.Y., Abed, A.A., & Abdalla, T.Y. (2022). Surveillance system of mask detection with infrared temperature sensor on Jetson Nano Kit. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. DOI:[10.11591/eei.v11i2.3369](https://doi.org/10.11591/eei.v11i2.3369)
- He, D., Zhang, S., Chen, L., Ying, E., He, L., Yang, N., Zhang, R., Xia, M., & Liu, H. (2020). Research on Temperature Calculation Method of Electrical Equipment Based on IR Data Compensation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 440. DOI:[10.1088/1755-1315/440/3/032112](https://doi.org/10.1088/1755-1315/440/3/032112)
- Jones, H.G., Stoll, M., Santos, T.P., de Sousa, C.B., Chaves, M.M., & Grant, O.M. (2002). Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of experimental botany*, 53 378, 2249-60. DOI:[10.1093/JXB/ERF083](https://doi.org/10.1093/JXB/ERF083)
- Kim, J.D. (2022). Skin temperature characteristics of the ligustrum moth (brahmaea certhia) and the hawk moth (theretra oldenlandiae) using IR camera. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36, 983-990. DOI:[10.1007/s12206-022-0144-4](https://doi.org/10.1007/s12206-022-0144-4)
- Lacotte, V., Peignier, S., Raynal, M., Demeaux, I., Delmotte, F., & da Silva, P. (2022). Spatial–Spectral Analysis of Hyperspectral Images Reveals Early Detection of Downy Mildew on Grapevine Leaves. *International Journal of Molecular Sciences*, 23. DOI:[10.3390/ijms231710012](https://doi.org/10.3390/ijms231710012)
- Lipińska, E., Pobiega, K., Piwowiek, K., & Błażej, S. (2022). Research on the Use of Thermal Imaging as a Method for Detecting Fungal Growth in Apples. *Horticulturae* 9, 972. DOI:[10.3390/horticulturae8100972](https://doi.org/10.3390/horticulturae8100972)
- Mahlein, A. (2016). Plant Disease Detection by Imaging Sensors - Parallels and Specific Demands for Precision Agriculture and Plant Phenotyping. *Plant disease*, 100 2, 241-251 . DOI:[10.1094/PDIS-03-15-0340-FE](https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE)
- Manuel Ionescu, V., & Magda Enescu, F. (2020). Low cost thermal sensor array for wide area monitoring. *2020 12th International Conference on*

Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 1-4.
DOI:[10.1109/ECAI50035.2020.9223193](https://doi.org/10.1109/ECAI50035.2020.9223193)

- Möller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Ostrovsky, V., Sprintsin, M., & Cohen, S. (2006). Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of experimental botany*, 58 4, 827-38 . DOI:[10.1093/JXB/ERL115](https://doi.org/10.1093/JXB/ERL115)
- Nabity, P.D., Zavala, J.A., & DeLucia, E.H. (2009). Indirect suppression of photosynthesis on individual leaves by arthropod herbivory. *Annals of botany*, 103 4, 655-63. DOI:[10.1093/aob/mcn127](https://doi.org/10.1093/aob/mcn127)
- Ng, M., & Teoh, S.S. (2019). Development of a Low-cost Thermal Camera for Electrical Condition Monitoring. *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 6, 94-99. DOI:[10.13189/ujeee.2019.061511](https://doi.org/10.13189/ujeee.2019.061511)
- Oerke, E., Steiner, U., Dehne, H.W., & Lindenthal, M. (2006). Thermal imaging of cucumber leaves affected by downy mildew and environmental conditions. *Journal of experimental botany*, 57 9, 2121-32 . DOI:[10.1093/JXB/ERJ170](https://doi.org/10.1093/JXB/ERJ170)
- Priya, V., Pamela, D., Geard Joe Nigel, K., & Michael, P.A. (2021). PRE-DETECTION OF FOOT ULCER FOR DIABETIC PATIENT USING THERMAL IMAGER. *Journal of Physics: Conference Series*, 1937. DOI:[10.1088/1742-6596/1937/1/012032](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1937/1/012032)
- Ray, M., Ray, A., Dash, S., Mishra, A., Achary, K.G., Nayak, S., & Singh, S. (2017). Fungal disease detection in plants: Traditional assays, novel diagnostic techniques and biosensors. *Biosensors & bioelectronics*, 87, 708-723 . DOI:[10.1016/j.bios.2016.09.032](https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.09.032)
- Spasov, G., Tsvetkov, V., & Petrova, G. (2019). Using IR array MLX90640 to build an IoT solution for ALL and security smart systems. *2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET)*, 1-4. DOI:[10.1109/ET.2019.8878637](https://doi.org/10.1109/ET.2019.8878637)
- Stoll, M., Schultz, H., Baecker, G.P., & Berkelmann-Loehnertz, B. (2008). Early pathogen detection under different water status and the assessment of spray application in vineyards through the use of thermal imagery. *Precision Agriculture*, 9, 407-417. DOI:[10.1007/s11119-008-9084-y](https://doi.org/10.1007/s11119-008-9084-y)

- Tan, E.S., Markom, M.A., Andrew, A.M., Hamid, M., Izham, M.A., Nizam, M.A., Abdullah, A.A., & Lok, H.W. (2021). Facemask quality measurement using AMG8833 multiarray thermal sensor. *Journal of Physics: Conference Series*, 2107. DOI:[10.1088/1742-6596/2107/1/012057](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2107/1/012057)
- Vagelas, I., Papadimos, A., & Lykas, C. (2021). Pre-Symptomatic Disease Detection in the Vine, Chrysanthemum, and Rose Leaves with a Low-Cost Infrared Sensor. *Agronomy*. DOI:[10.3390/agronomy11091682](https://doi.org/10.3390/agronomy11091682)
- Wang, X., Huo, K., Tang, R., Ren, J., Chen, H., Sun, K., & Song, L. (2022). Intelligent Mask Detection and Non-contact Temperature Measurement Mobile Robot based on YOLOv5. *2022 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 1080-1085. DOI:[10.1109/ICMA54519.2022.9856176](https://doi.org/10.1109/ICMA54519.2022.9856176)
- Wisniewski, M., Glenn, D.M., Gusta, L.V., & Fuller, M.P. (2008). Using Infrared Thermography to Study Freezing in Plants. *Hortscience*, 43, 1648-1651. DOI:[10.21273/HORTSCI.43.6.1648](https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.6.1648)
- Wu, Y., Liu, H., Li, B., & Kosonen, R. (2019). Prediction of thermal sensation using low-cost infrared array sensors monitoring system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 609. DOI:[10.1088/1757-899X/609/3/032002](https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/3/032002)
- Xu, X. (1999). Effects of Temperature on the Length of the Incubation Period of Rose Powdery Mildew (*Sphaerotheca pannosa* var. *rosae*). *European Journal of Plant Pathology*, 105, 13-21. DOI:[10.1023/A:1008666605593](https://doi.org/10.1023/A:1008666605593)

Συνέδρια:

- S. Sruthi and M. Sasikala, 2015. A Low Cost Thermal Imaging System for Medical Diagnostic Applications. International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM), Vel Tech Rangarajan Dr. Sagunthala R&D Institute of Science and Technology, Chennai, T.N., India. 6 - 8 May 2015. pp.621-623.

ΤΕΛΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ