

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ-ΑΓΡΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΜΣ: «ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΩΝ
ΦΥΤΩΝ : Καλλιέργεια Μεταποίηση και Παραγωγή Προϊόντων Υψηλής Προστιθέμενης
Αξίας»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Πρόβλεψη παραγωγής με χρήση UAV σε αμυγδαλέονα."

ΕΚΠΟΝΗΣΗ: ΤΣΟΛΑΚΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΑΔΑΜ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

(υπογραφή)

(υπογραφή)

(υπογραφή)

(Επιβλέπων)

Παπαχατζής Αλέξανδρος

Αλαμανής Νικόλαος

Επίκουρος Καθηγητής

Λιάκος Βασίλειος

2024

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την εφαρμογή τεχνικών γεωργίας ακριβείας σε συνδυασμό με τη χρήση ιπτάμενων μη επανδρωμένων οχημάτων (Unmanned Aerial Vehicles - UAVs) και πολυφασματικών καμερών σε καλλιέργειες αμυγδάλων. Τα UAVs αποτελούν ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη συλλογή ακριβών γεωγραφικών δεδομένων, ενώ οι πολυφασματικές κάμερες καταγράφουν εικόνες σε διάφορα φάσματα φωτός. Στην εργασία αναλύονται οι τεχνικές και οι δυνατότητες της γεωργίας ακριβείας συνδυαστικά με UAV για την παρακολούθηση και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης ποικίλων γεωργικών καλλιεργειών. Επιπλέον, αναλύονται οι πολυφασματικές κάμερες και η δυνατότητά τους να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για την ευρωστία των φυτών και άλλων γεωργικών παραμέτρων. Στο πλαίσιο της γεωργίας ακριβείας, οι πολυφασματικές κάμερες χρησιμοποιούνται για τη συλλογή εικόνων σύμφωνα με τις οποίες επιτυγχάνεται η ανάλυση και η αξιολόγηση της ευρωστίας των φυτών σε διάφορες χρονικές περιόδους. Με τη χρήση των πολυφασματικών καμερών, μπορούν να ανιχνευθούν διάφορα χαρακτηριστικά των φυτών, όπως η πυκνότητα του φυλλώματος των φυτών, οι ασθένειες, οι ενδείξεις ξηρασίας και η απορρόφηση της χλωροφύλλης. Με τη χρήση των πολυφασματικών καμερών και του δείκτη NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) που αναφέρεται στο πειραματικό κομμάτι της εργασίας, οι γεωργοί μπορούν να ανιχνεύουν προβλήματα στις καλλιέργειές τους, να εκτιμούν την ποιότητα της καλλιέργειας τους, να λαμβάνουν αποφάσεις για την απαιτούμενη γεωργική παρέμβαση και να βελτιστοποιούν τις αποδόσεις των καλλιεργειών τους. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη παραγωγή, μείωση των δαπανών και την προστασία του περιβάλλοντος μέσω της αποτελεσματικής χρήσης των γεωργικών πόρων. Τα πειράματα που περιλαμβάνονται στην εργασία επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου, προσφέροντας πρακτικές εφαρμογές στη γεωργία ακριβείας, συγκεκριμένα, πάνω σε καλλιέργειες αμυγδάλων. Τέλος, παρουσιάζονται συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις στον τομέα αυτό. Η διπλωματική εργασία αυτή προσφέρει σημαντική συνεισφορά στον τομέα της γεωργίας ακριβείας και ανοίγει τον δρόμο για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη πάνω στις καλλιέργειες αμυγδάλων.

Λέξεις κλειδιά: Μη επανδρωμένα αεροσκάφη, Τηλεπισκόπηση, Δείκτες βλάστησης, NDVI, NDRE, καλλιέργεια αμυγδάλων

Abstract

The present thesis aims to implement precision agriculture techniques in conjunction with the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and multispectral cameras in almond crops. UAVs serve as an effective tool for collecting precise geographic data, while multispectral cameras capture images in various light spectra. The thesis analyzes the techniques and possibilities of precision agriculture combined with UAVs for monitoring and optimizing the performance of various agricultural crops. Additionally, it explores multispectral cameras and their ability to provide accurate information on plant resilience and other agricultural parameters. Within the scope of this thesis, multispectral cameras are utilized for image collection, enabling the analysis and assessment of plant resilience at different time intervals. Various plant characteristics, such as leaf density, diseases, signs of drought, and chlorophyll absorption, can be detected using multispectral cameras. Using multispectral cameras various vegetation indices mentioned in the experimental part of the thesis, farmers can identify issues in their crops, evaluate the quality of their cultivation, make decisions regarding necessary agricultural interventions, and optimize crop yields. This approach can lead to increased production, reduced costs, and environmental protection through efficient use of agricultural resources. The experiments included in the thesis confirm the effectiveness of this method, offering practical applications in precision agriculture, specifically in almond cultivation. Finally, the thesis presents conclusions and suggestions for future expansions and improvements in this field. This thesis provides a significant contribution to the precision agriculture sector and paves the way for further research and development in almond cultivation.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles, Remote Sensing, Vegetation Indices, NDVI, NDRE, almond cultivation

Ευχαριστίες

Στη Μητέρα μου.... Γεωργία

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Γεωπονίας – Αγροτεχνολογίας,

Μέσα στις επόμενες λίγες γραμμές θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την τριμελή εξεταστική επιτροπή της παρούσας εργασίας και την Καθηγήτρια Ελένη Καμβούκου-Βογιατζή και Διευθύντρια του Π.Μ.Σ. του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Καθώς και τον επιβλέποντα, Λιάκο Βασίλειο Επίκουρο Καθηγητή του Εργαστηρίου Γεωργίας Ακριβείας του Τμήμα Γεωπονίας-Αγροτεχνολογίας. Αισθάνομαι απέραντη ευγνωμοσύνη για την καθοδήγησή του καθώς και για τις γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσε όπου χρειαζόταν καθ' όλη την διάρκεια συγγραφής της εργασίας μου καθώς και τις συμβουλές του στη διόρθωση της εργασίας μου.

Ένα ξεχωριστό ευχαριστώ στον υποψήφιο μεταπτυχιακό φοιτητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών Τουμπαρίδη Χρήστο για την βοήθεια και την καθοδήγηση πάνω σε θέματα τηλεπισκόπησης και γεωργίας ακριβείας καθώς και για τον χρόνο που διέθεσε για τις πτήσεις όπως επίσης και την παροχή εξοπλισμού από τον ίδιο και από την εταιρεία Geomap και το τεχνικό γραφείο Σαλβανά.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον πατέρα και στην αδερφή μου που ήταν αρωγοί και με στήριξαν σταθερά όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Ευχαριστίες	2
Εικόνες	3
Πίνακες	5
1. Εισαγωγή	7
1.1 Αντικείμενο και στόχοι	7
1.2 12	
2. Γεωργία ακριβείας	9
2.1 Τεχνικές παρακολούθησης καλλιεργειών	9
2.2 Τηλεπισκόπηση στη γεωργία ακριβείας	11
2.2.1 Τηλεπισκόπηση και αισθητήρες	12
2.3 UAVs και Γεωργία ακριβείας	14
2.3.1 Είδη Μη επανδρωμένων αεροσκαφών	15
2.3.2 Νομοθεσία για τα UAVs	17
2.3.3 Χρήση των UAVs στις γεωργικές διαδικασίες	18
2.4 Ανάλυση δεδομένων πολυφασματικών αισθητήρων στον αγρό	22
2.4.1 Δείκτες βλάστησης	24
3. Μεθοδολογία	27
3.1 Καλλιέργεια και είδη δένδρων αμυγδαλιάς	28
3.2 Συλλογή δείγματος εικόνων	32
3.3 Εξοπλισμός Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους	32
3.3 Μετρικοί δείκτες	35
3.3 Ανάλυση εδάφους με τη χρήση λογισμικού	36
3.3.1 Ανάλυση περιόδων	40
4. Συμπεράσματα	44
Παράρτημα 1	45
Βιβλιογραφία	50

Εικόνες

ΕΙΚΟΝΑ 1 ΛΗΨΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΑΠΟ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΚΑΜΕΡΑ

ΕΙΚΟΝΑ 2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΖΩΤΟΥ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ FRITZMEIER ISARIA.

ΕΙΚΟΝΑ 3 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΟΡΑΣΗΣ

ΕΙΚΟΝΑ 4 Α) RGB ΚΑΜΕΡΑ Β) ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΚΑΜΕΡΑ Γ) ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΚΑΜΕΡΑ Δ) FLIR VUE PRO R Ε) LIDAR

ΕΙΚΟΝΑ 5 ΑΥΤΟΑΝΑΦΛΕΓΟΜΕΝΟ ΙΑΠΩΝΙΚΟ ΒΟΜΒΑΡΔΙΣΤΙΚΟ ΜΠΑΛΟΝΙ FU-GO

ΕΙΚΟΝΑ 6 DRONE ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥΣ ΡΟΤΟΡΕΣ (DJI MATRICE 210)

ΕΙΚΟΝΑ 7 UAV ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ (SENSEFLY EBBE X)

ΕΙΚΟΝΑ 8 UAV ΜΟΝΟΥ ΡΟΤΟΡΑ ΓΙΑ ΨΕΚΑΣΜΟ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ

ΕΙΚΟΝΑ 9 UAV VTOL ΑΡΧΥΤΑΣ

ΕΙΚΟΝΑ 10 ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΑ

ΕΙΚΟΝΑ 11 ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΥΓΕΙΑΣ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ. ΟΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΕΞΗΣ : Α) **ΥΓΙΑ ΦΥΛΛΑ**. ΣΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΥΤΗ Η ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ ΚΑΙ ΥΠΕΡΥΘΡΟ ΦΑΣΜΑ. Β) **ΣΤΡΕΣΑΡΙΣΜΕΝΟ ΦΥΛΛΑ**. ΣΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΥΤΗ Η ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΛΙΓΟΤΕΡΑ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΥΠΕΡΥΘΡΟ ΦΑΣΜΑ ΚΑΙ Γ) **ΝΕΚΡΑ ΦΥΛΛΑ**. ΣΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΥΤΗ Η ΕΙΚΟΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΛΙΓΟΤΕΡΑ ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΠΡΑΣΙΝΟ ΚΑΙ ΥΠΕΡΥΘΡΟ ΦΑΣΜΑ [27].

ΕΙΚΟΝΑ 12 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ [26].

ΕΙΚΟΝΑ 13 Α) ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ Β) ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ [25].

ΕΙΚΟΝΑ 14 ΒΑΘΙΑ ΜΑΘΗΣΗ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ [37].

ΕΙΚΟΝΑ 15 ΚΑΤΟΨΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ.

ΕΙΚΟΝΑ 16 ΠΟΙΚΙΛΙΑ TARRACO [52].

ΕΙΚΟΝΑ 17 ΠΟΙΚΙΛΙΑ MARINADA [50].

ΕΙΚΟΝΑ 18 ΠΟΙΚΙΛΙΑ VAYRO [50].

ΕΙΚΟΝΑ 19 ΠΟΙΚΙΛΙΑ FERRAGNES [50].

ΕΙΚΟΝΑ 20 ΠΟΙΚΙΛΙΑ FERRADUEL [50].

ΕΙΚΟΝΑ 21 ΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΤΜΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΩΡΑΦΙΟΥ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΠΟΙΚΙΛΙΕΣ ΑΜΥΓΔΑΛΟΥ. 1) ΠΡΑΣΙΝΟ ΧΡΩΜΑ ΠΟΙΚΙΛΙΑ FERRAGNES, 2) ΚΑΦΕ ΧΡΩΜΑ ΠΟΙΚΙΛΙΑ FERRADUEL, 3) ΚΙΤΡΙΝΟ ΧΡΩΜΑ ΠΟΙΚΙΛΙΑ MARINDA, 4) ΜΠΛΕ ΧΡΩΜΑ ΠΟΙΚΙΛΙΑ VAYRO ΚΑΙ 5) ΠΟΡΤΟΚΑΛΙ ΧΡΩΜΑ ΠΟΙΚΙΛΙΑ TARRACO.

ΕΙΚΟΝΑ 22 ΕΒΕΕ Χ DRONE.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΤΗΣΗΣ ΕΒΕΕ Χ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ DRONE ΕΒΕΕ Χ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΜΕΡΑΣ SENSEFLY DUET M.

ΕΙΚΟΝΑ 23 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΧΑΡΤΗ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PIX4D.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4 ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ NDRE ΑΝΑ ΠΕΡΙΟΔΟ. ΣΤΟ ΠΙΝΑΚΑ ΑΝΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΚΑΙ ΟΙ ΤΙΜΕΣ "MIN", ΔΗΛΑΔΗ Η ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ ΤΙΜΗ, "MAX", ΔΗΛΑΔΗ Η ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΤΙΜΗ, "StDev", ΔΗΛΑΔΗ Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΚΑΙ "AVG", ΔΗΛΑΔΗ Ο ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ.

ΕΙΚΟΝΑ 24 ΓΕΝΙΚΗ ΠΡΟΟΔΟΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ NDRE ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5 ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ NDVI ΑΝΑ ΠΕΡΙΟΔΟ. ΣΤΟ ΠΙΝΑΚΑ ΑΝΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΚΑΙ ΟΙ ΤΙΜΕΣ "MIN", ΔΗΛΑΔΗ Η ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ ΤΙΜΗ, "MAX", ΔΗΛΑΔΗ Η ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΤΙΜΗ, "StDev", ΔΗΛΑΔΗ Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΚΑΙ "AVG", ΔΗΛΑΔΗ Ο ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ.

ΕΙΚΟΝΑ 25 ΓΕΝΙΚΗ ΠΡΟΟΔΟΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ NDVI ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.

ΕΙΚΟΝΑ 26 ΧΑΡΤΕΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΔΕΙΚΤΗΣ NDVI, (ΚΕΝΤΡΟ) ΔΕΙΚΤΗΣ NDRE ΚΑΙ (ΔΕΞΙΑ) RGB ΕΙΚΟΝΑ. ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΨΗΣ 22/04/2022.

ΕΙΚΟΝΑ 27 ΧΑΡΤΕΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΔΕΙΚΤΗΣ NDVI, (ΚΕΝΤΡΟ) ΔΕΙΚΤΗΣ NDRE ΚΑΙ (ΔΕΞΙΑ) RGB ΕΙΚΟΝΑ. ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΨΗΣ 15/05/2022.

ΕΙΚΟΝΑ 28 ΧΑΡΤΕΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΔΕΙΚΤΗΣ NDVI ΚΑΙ ΜΕΣΗ ΔΕΙΚΤΗΣ NDRE ΚΑΙ ΔΕΞΙΑ RGB ΕΙΚΟΝΑ. ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΨΗΣ 17/06/2022.

ΕΙΚΟΝΑ 29 ΧΑΡΤΕΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΔΕΙΚΤΗΣ NDVI ΚΑΙ ΜΕΣΗ ΔΕΙΚΤΗΣ NDRE ΚΑΙ ΔΕΞΙΑ RGB ΕΙΚΟΝΑ. ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΨΗΣ 22/07/2022.

ΕΙΚΟΝΑ 30 ΧΑΡΤΕΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΔΕΙΚΤΗΣ NDVI ΚΑΙ ΜΕΣΗ ΔΕΙΚΤΗΣ NDRE ΚΑΙ ΔΕΞΙΑ RGB ΕΙΚΟΝΑ. ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΨΗΣ 12/09/2022.

Πίνακες

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΤΗΣΗΣ ΕΒΕΕ Χ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ DRONE ΕΒΕΕ Χ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΜΕΡΑΣ SENSEFLY DUET M.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4 ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ NDRE ΑΝΑ ΠΕΡΙΟΔΟ. ΣΤΟ ΠΙΝΑΚΑ ΑΝΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΚΑΙ ΟΙ ΤΙΜΕΣ "MIN", ΔΗΛΑΔΗ Η ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ ΤΙΜΗ, "MAX", ΔΗΛΑΔΗ Η ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΤΙΜΗ, "StDev", ΔΗΛΑΔΗ Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΚΑΙ "Avg", ΔΗΛΑΔΗ Ο ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5 ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ NDVI ΑΝΑ ΠΕΡΙΟΔΟ. ΣΤΟ ΠΙΝΑΚΑ ΑΝΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΚΑΙ ΟΙ ΤΙΜΕΣ "MIN", ΔΗΛΑΔΗ Η ΜΙΚΡΟΤΕΡΗ ΤΙΜΗ, "MAX", ΔΗΛΑΔΗ Η ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΤΙΜΗ, "StDev", ΔΗΛΑΔΗ Η ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΚΑΙ "Avg", ΔΗΛΑΔΗ Ο ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ.

1. Εισαγωγή

Η γεωργία ακριβείας αναπτύχθηκε ως μία προηγμένη προσέγγιση που συνδυάζει τη χρήση τεχνολογίας και πληροφοριών για τη βελτιστοποίηση της γεωργικής παραγωγής. Η γεωργία ακριβείας βασίζεται σε μία σειρά βασικών αρχών που περιλαμβάνουν τη συλλογή ακριβών δεδομένων για το έδαφος, τα φυτά και τις καιρικές συνθήκες και έχει αποδειχθεί ότι έχει θετική επίδραση στην αύξηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών. Με τη χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS) και του παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού θέσης (GNSS), μπορούν να καταγραφούν ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τη γεωγραφική κατανομή των εκτάσεων και τις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν την παραγωγή. Η γεωργία ακριβείας μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορους τομείς της γεωργικής παραγωγής. Ένας από τους σημαντικότερους τομείς είναι η διαχείριση της άρδευσης και η χρήση λιπάσματος. Με τη χρήση αισθητήρων υγρασίας και την παρακολούθηση των παραμέτρων του εδάφους, μπορεί να γίνει ακριβής προσαρμογή της ποσότητας νερού που χρησιμοποιείται κατά την άρδευση, εξοικονομώντας πόρους και μειώνοντας τον κίνδυνο επιπλέον άρδευσης. Ένας άλλος τομέας που μπορεί να επωφεληθεί από τη γεωργία ακριβείας είναι η εφαρμογή λιπάσματος. Μέσω της ανάλυσης των δεδομένων για την περιεκτικότητα του εδάφους σε θρεπτικά στοιχεία, μπορούν να καθοριστούν ακριβείς ποσότητες λιπασμάτων που χρειάζονται οι καλλιέργειες, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη διατροφή των φυτών και μειώνοντας την υπερβολική χρήση λιπασμάτων. Η γεωργία ακριβείας αναδεικνύεται ως μία προηγμένη προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση της γεωργικής παραγωγής. Με τη χρήση σύγχρονων τεχνολογιών και πληροφοριών, μπορούν να συλλεχθούν δεδομένα με ακρίβεια και να ληφθούν ακριβείς αποφάσεις για την καλλιέργεια, τη διαχείριση της άρδευσης και την εφαρμογή λιπασμάτων. Αυτό οδηγεί σε αυξημένη παραγωγικότητα, βελτιωμένη ποιότητα των προϊόντων, περιβαλλοντική βιωσιμότητα, μείωση του κόστους παραγωγής και αύξηση του κέρδους των παραγωγών.

1.1 Αντικείμενο και στόχοι

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η εφαρμογή καινοτόμων τεχνικών γεωργίας ακριβείας μέσω της συλλογής δεδομένων από πολυφασματικές κάμερες με τη χρήση ιπτάμενου μη επανδρωμένου οχήματος (MEA), για την ανίχνευση ασθενειών και στρες σε καλλιέργειες αμυγδάλων. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν δύο μέθοδοι συλλογής δεδομένων: 1) η χρήση ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους (Ebee X RTK) και 2) η χρήση δορυφορικών εικόνων Sentinel-2.

Με τη χρήση των προαναφερθέντων τεχνολογιών, επιτυγχάνεται η έγκαιρη και άμεση παρατήρηση της κατάστασης του αγρού με μεγάλη ακρίβεια. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα στον γεωργό να διαχειριστεί κατάλληλα την ποσότητα του ποτίσματος, ειδικότερα σε περιόδους υψηλών θερμοκρασιών, να αντιληφθεί άμεσα τυχόν ασθένειες και να προβεί στην καταπολέμηση τους με χρήση φυτοφαρμάκων. Παρατηρώντας και αναλύοντας συνεχώς τα δεδομένα είναι σε θέση να συλλέξει τη κατάλληλη χρονική περίοδο τους καρπούς που έχουν φτάσει στο σωστό σημείο ωρίμανσης, διασφαλίζοντας καλύτερη ποιότητα και μεγαλύτερη απόδοση της καλλιέργειας. Βασικός στόχος της εργασίας αποτελεί η διερεύνηση των δύο μεθόδων συλλογής δεδομένων τηλεπισκόπησης σε διάφορα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας και να αναλυθεί η συσχέτιση μεταξύ των δεικτών βλάστησης (Εικόνα 1).



Εικόνα 1 Λήψη φωτογραφίας από πολυφασματική κάμερα¹ Αριστερά: εικόνα με χρώματα κόκκινο, πράσινο, μπλε. Δεξιά: εικόνα με δείκτη ευρωστίας NDVI.

1.2 Πολυφασματικές κάμερες και UAVs στην γεωργία ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας αποτελεί μια σύγχρονη προσέγγιση που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των αγροτικών εκτάσεων και την επίτευξη υψηλής παραγωγικότητας και αποδοτικότητας. Στο πλαίσιο αυτό, η χρήση των UAVs που φέρουν πολυφασματικές κάμερες έχει αναδειχθεί ως ένα από τα κυριότερα εργαλεία για την παρακολούθηση και τη διαχείριση των καλλιεργειών. Οι καλλιέργειες αμυγδάλων αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους κλάδους της γεωργίας, με αυξανόμενη ζήτηση σε παγκόσμιο επίπεδο. Ωστόσο, η ανάγκη για αποδοτικότερη άρδευση, η ευαισθησία των καλλιεργειών σε ασθένειες και οι κλιματικές μεταβολές αποτελούν προκλήσεις για την αποδοτική καλλιέργεια των αμυγδάλων. Εδώ εισέρχεται η τεχνολογία των UAVs και οι πολυφασματικές κάμερες, που παρέχουν νέες δυνατότητες στην παρακολούθηση και την αξιολόγηση της κατάστασης των καλλιεργειών αμυγδάλων. Τα UAVs, γνωστά επίσης ως drones, είναι αυτόνομα αεροσκάφη που ελέγχονται απομακρυσμένα και εφοδιάζονται με διάφορα εξαρτήματα, όπως πολυφασματικές κάμερες. Η χρήση τους στις καλλιέργειες αμυγδάλων επιτρέπει τη λήψη αεροφωτογραφιών και τη συλλογή δεδομένων με υψηλή ακρίβεια και ανάλυση, παρέχοντας πληροφορίες για την ποιότητα και την υγρασία του εδάφους και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση των καλλιεργειών. Οι κάμερες αυτές καταγράφουν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα σε πολλά διαφορετικά κανάλια, επιτρέποντας την συλλογή ακόμα περισσότερων πληροφοριών όπως, την ποσότητα χλωροφύλλης του φυλλώματος, φυτοπαθολογικές ανωμαλίες και ανάπτυξη ασθενειών. Τα UAVs έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητά τους στις γεωργικές εργασίες, επιτρέποντας την λεπτομερή παρακολούθηση των φυτών και την αναγνώριση προβλημάτων σε πρώιμο στάδιο, επιτρέποντας έτσι την έγκαιρη λήψη μέτρων πρόληψης και τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των καλλιεργειών. Επίσης, μειώνει τον χρόνο και το κόστος που συνδέεται με την παρακολούθηση των εκτάσεων, καθώς τα ΜΕΑ μπορούν να καλύψουν μεγάλες εκτάσεις γρήγορα και αποτελεσματικά.

¹ <https://www.dji.com/gr/p4-multispectral>

2.Γεωργία ακριβείας

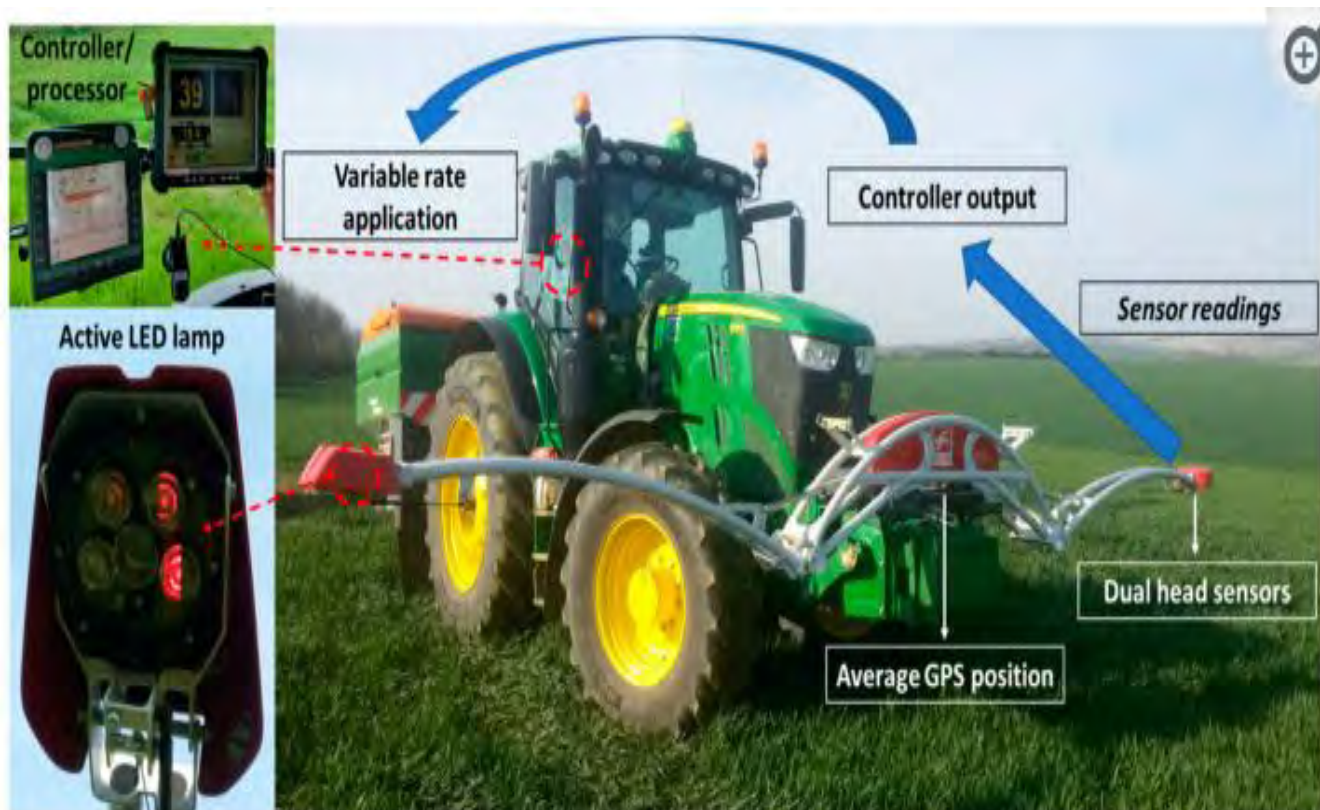
Για να εξασφαλίσουμε τα τρόφιμα για το μέλλον απαιτεί επαρκείς ποσότητες και καλή ποιότητα γεωργικών προϊόντων, με βασικό στόχο τη βιωσιμότητα των πόρων. Επιπλέον, η ικανότητα παρακολούθησης των υλικών παραγωγής τροφίμων από την παραγωγή μέχρι την επεξεργασία, την αποθήκευση και την πώληση τους στη λιανική παρέχει μια πρόσθετη ικανότητα ανταπόκρισης στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της αγοράς τροφίμων, διασφαλίζουν τη σωστή διατροφή και ασφάλεια των τροφίμων και επηρεάζουν τις εθνικές και διεθνείς πολιτικές που σχετίζονται με την επισιτιστική ασφάλεια [1]. Η γεωργία ακριβείας ή βάση πληροφοριών διαχείρισης συστημάτων αγροτικής παραγωγής, εμφανίστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 ως ένας τρόπος εφαρμογής σωστής θεραπείας τη κατάλληλη χρονική στιγμή και στο κατάλληλο μέρος [2]. Η αύξηση της ευαισθητοποίησης σχετικά με τη παραλλακτικότητα του εδάφους (soil variation) και των συνθηκών καλλιέργειας, σε συνδυασμό με την έλευση νέας τεχνολογίας όπως το παγκόσμιο σύστημα πλοήγησης με δορυφόρους (GNSS), των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS) και των μικροϋπολογιστών, αποτέλεσαν κύρια συστατικά για την δημιουργία νέων τεχνικών διαχείρισης του αγρού. Αρχικά, η γεωργία ακριβείας χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή δόσεων λιπάσματος σε ποικίλες εδαφολογικές συνθήκες σε ένα καλλιεργήσιμο χωράφι. Από τότε, έχουν εξελιχθεί πολλές τεχνολογίες και πρακτικές, όπως για παράδειγμα, η αυτόματη καθοδήγηση γεωργικών οχημάτων και εργαλείων, τα αυτόνομα γεωργικά μηχανήματα, η ιχνηλασιμότητα των προϊόντων, η επί τόπου έρευνα στο αγρόκτημα (on-farm research) και ειδικά λογισμικά για τη συνολική διαχείριση των συστημάτων γεωργικής παραγωγής. Εκτός από τη φυτική παραγωγή στον αγρό, οι τεχνολογίες που σχετίζονται με τη γεωργία ακριβείας έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία στις αμπελοκαλλιέργειες και την κηπουρική, συμπεριλαμβανομένων των οπωρώνων, και της κτηνοτροφικής παραγωγής. Οι εφαρμογές κυμαίνονται από τη βιομηχανία τσαγιού στην Τανζανία και τη Σρι Λάνκα έως και την παραγωγή ζαχαροκάλαμου στη Βραζιλία, τις καλλιέργειες ριζικού στη Κίνα, την Ινδία και την Ιαπωνία και την παραγωγή δημητριακών και ζαχαρότευτλων στην Αργεντινή, την Αυστραλία, την Ευρώπη και στις Ηνωμένες Πολιτείες [3]. Παρά τις διαφορές στα είδη της τεχνολογίας και των περιοχών υιοθέτησης, οι στόχοι της γεωργίας ακριβείας είναι πολλαπλοί. Πρώτον, η βελτιστοποίηση της χρήσης των διαθέσιμων πόρων με στόχο την αύξηση της κερδοφορίας και της βιωσιμότητας των γεωργικών διεργασιών. Δεύτερον, η μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τρίτον, η βελτίωση της ποιότητας του εργασιακού περιβάλλοντος και γενικότερα, των κοινωνικών πτυχών της γεωργίας, της κτηνοτροφίας και των σχετικών επαγγελματιών [4]. Λόγω των πολυποίκιλων εφαρμογών και σεναρίων, είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν τα οφέλη της γεωργίας ακριβείας. Σε μια ανασκόπηση 234 μελετών που δημοσιεύθηκαν από το 1988 έως το 2005 [5], διαπιστώθηκε ότι με τη γεωργία ακριβείας αυξήθηκε η κερδοφορία κατά μέσο όρο στο 68% των περιπτώσεων.

2.1 Τεχνικές παρακολούθησης καλλιεργείων

Οι τεχνολογίες τηλεπισκόπησης και κοντινής ανίχνευσης (remote and proximal sensing) έχουν αναπτυχθεί για τη βελτίωση της χωρικής ανάλυσης (spatial resolution). Η τηλεπισκόπηση βασίζεται στη λήψη εικόνων μέσω οπτικών αισθητήρων και αισθητήρων ραδιομέτρησης, όπου συνήθως είναι εγκατεστημένοι σε μία εναέρια πλατφόρμα ή δορυφόρο, ενώ οι αισθητήρες κοντινής ανίχνευσης βασίζονται σε συστήματα στο έδαφος (τοποθετημένα σε όχημα ή

μεταφερόμενα με το χέρι) και συνδέονται σε δέκτη GNSS. Το πλεονέκτημα της τηλεπισκόπησης είναι ότι οι εικόνες ολόκληρου του πεδίου μπορούν να καταγράφονται σε μία λήψη, ενώ οι αισθητήρες ανίχνευσης εδάφους πρέπει να μετακινηθούν σε όλο το πεδίο, έτσι ώστε, να δημιουργηθούν μετρήσεις υψηλής πυκνότητας (high density) που μπορούν να χαρτογραφηθούν. Υπάρχει τεράστια ποικιλία στα δεδομένα τηλεπισκόπησης [6]. Μερικά από τα δεδομένα που αφορούν την ποιότητα του εδάφους, τον αριθμό και το πλάτος των φασματικών ζωνών σε σχέση με την χρονική περίοδο μπορεί να διαφέρει δραματικά ανά περίπτωση. Αν και η τηλεπισκόπηση είναι χρήσιμη για την αξιολόγηση των συνθηκών της καλλιέργειας, παρέχει κακή αναπαράσταση του περιβάλλοντος της ζώνης των ριζών (root zone), καθώς τα δεδομένα αποτυπώνονται ανάλογα με την ανάκλαση της επιφάνειας του υλικού, το οποίο μπορεί να είναι γυμνό έδαφος, κάποιο φυτό ή ένας συνδυασμός και των δύο.

Οι τεχνικές ανίχνευσης της κατάστασης του εδάφους με αισθητήρες (proximal sensing) επιτρέπουν την πιο άμεση ανίχνευση των χαρακτηριστικών του εδάφους αλλά και του φυλλώματος σε σχέση με τη χρήση τηλεπισκόπησης [7] (Εικόνα 2). Οι διαθέσιμοι τύποι αισθητήρων που κυκλοφορούν στο εμπόριο είναι οι εξής: 1) ηλεκτρικοί ή ηλεκτρομαγνητικοί αισθητήρες που μετρούν την ηλεκτρική αντίσταση/αγωγιμότητα ή χωρητικότητα, 2) οπτικοί αισθητήρες που καταγράφουν τα φάσματα υπέρυθρης ακτινοβολίας (Vis-NIR) μέσα από το χώμα και 3) ηλεκτροχημικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούν ιοντοεκλεκτικές (ion-selective) μεμβράνες για την ανίχνευση της δραστηριότητας του ιόντων όπως υδρογόνο, κάλιο ή νιτρικό.



Εικόνα 2 Εφαρμογή συστήματος ανίχνευσης αζώτου σε καλλιέργεια της εταιρείας Fritzmeier ISARIA².

Τέλος, όλα τα συλλεχθέντα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία χαρτών απόδοσης (yield maps) για την αξιολόγηση της απόδοσης της καλλιέργειας. Η παρατηρούμενη χωρική διακύμανση σχετικά με την ποσότητα και ποιότητα της συγκομιδής που λαμβάνεται από τους χάρτες απόδοσης συνδέονται άμεσα με τη κερδοφορία. Στην εντατική φυτική παραγωγή, η χρήση του νερού, του αζώτου και των χημικών για την προστασία των φυτών ρυθμίζεται συνήθως κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Μέσω της ανακλαστικής φασματοσκοπίας Vis-NIR πραγματοποιείται η εκτίμηση της φυτικής βιομάζας, της περιεκτικότητας χλωροφύλλης ή/και του στρες σε νιτρικά άλατα [8]. Η ανίχνευση και ταυτοποίηση των ζιζανίων μέσω συστημάτων μηχανικής όρασης (machine vision) είναι επίσης εφικτή (Εικόνα 3), ενώ

² Mezera J., Lukas V., Elbl J., Smutný V. Comparison of Sentinel-2 and ISARIA winter wheat mapping for variable rate application of nitrogen fertilizers; Proceedings of the MendelNet 2019: Proceedings of International PhD Students Conference; Brno, Czech Republic. 6–7 November 2019; pp. 48–53.



Εικόνα 3 Εντοπισμός ζιζανίων με τη χρήση μηχανικής όρασης.³

άλλες μέθοδοι για την κατανόηση της ωριμότητας του φυτού όπως, ο φθορισμός με λέιζερ (Laser fluorescence), η θερμική απεικόνιση (thermal imaging) και η ανίχνευση εγγύτητας με υπερήχους (ultrasonic proximity sensing), βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο [9].

2.2 Τηλεπισκόπηση στη γεωργία ακριβείας

Η τηλεπισκόπηση είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται στη γεωργία για την παρακολούθηση και παρατήρηση φυσικών διεργασιών που συμβαίνουν σε μια περιοχή. Αυτή η διαδικασία καταγράφει την ακτινοβολία που εκπέμπεται ή ανακλάται από απόσταση, συνήθως μέσω δορυφόρων, επανδρωμένων αεροσκαφών ή συστημάτων μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Για τη συλλογή των δεδομένων, χρησιμοποιούνται ειδικές κάμερες που είναι εξοπλισμένες σε αυτά τα συστήματα και μπορούν να αναγνωρίσουν διάφορα είδη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αυτές οι κάμερες μπορεί να είναι ορατού φάσματος, πολυφασματικές (multispectral), θερμικές (thermal) ή υπερφασματικές (hyperspectral), καθεμία με δικό της πεδίο εφαρμογής. Στη γεωργία ακριβείας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες αυτές οι κάμερες για διάφορες διαδικασίες και γεωργικές πρακτικές σε έναν αγρό.

2.2.1 Τηλεπισκόπηση και αισθητήρες

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη που είναι εξοπλισμένα με εξειδικευμένους αισθητήρες γίνονται ισχυρά συστήματα ανίχνευσης και παρακολούθησης των αγροκτημάτων. Ο ρόλος των αισθητήρων είναι να καταγράφουν εικόνες υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης, η οποία μπορεί να βοηθήσει στην παρακολούθηση πολλών διαφορετικών χαρακτηριστικών, όπως αυτό

³ Irías Tejeda, A.J., & Castro Castro, R. (2019). Algorithm of Weed Detection in Crops by Computational Vision. 2019 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP), 124-128.

της βλάστησης. Μια ποικιλία διαφορετικών τύπων αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα γεωργικό UAV ανάλογα με τους διαφορετικούς παραμέτρους καλλιέργειας που πρέπει να παρακολουθούνται [10]. Ωστόσο, οι περιορισμοί χαμηλού ωφέλιμου φορτίου και η χρήση μικρών πλατφορμών στα UAVs θέτει αρκετούς περιορισμούς στην επιλογή των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν. Τα βασικά κριτήρια που πρέπει να πληρούν οι αισθητήρες είναι το χαμηλό βάρος, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και το μικρό μέγεθος. Φυσικά, όλα τα παραπάνω πρέπει να συνδυαστούν με την ικανότητα καταγραφής εικόνων υψηλής ανάλυσης. Σύγχρονοι εμπορικοί αισθητήρες που συμμορφώνονται με τους παραπάνω, ανήκουν κυρίως στους εξής τέσσερις τύπους:

- Αισθητήρες ορατού φωτός (RGB)
- Πολυφασματικοί αισθητήρες (Multispectral sensors)
- Υπερφασματικοί αισθητήρες (Hyperspectral sensors)
- Θερμικοί αισθητήρες (Thermal sensors)

Εκτός από τους παραπάνω τύπους αισθητήρων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι τύποι αισθητήρων, όπως λέιζερ σαρωτές, που αναφέρονται συνήθως και ως ανιχνευτές φωτός και εμβέλειας (Light Detection and Ranging: LiDAR). Οι αισθητήρες LiDAR είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται εκτενώς στις περιβαλλοντικές επιστήμες, όπως κι αν είναι χρησιμοποιείται κυρίως για επίγεια σάρωση. Ωστόσο, δεν χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στις μελέτες που εξετάστηκαν, κυρίως λόγω του αυξημένου κόστους σε σύγκριση με άλλους τύπους αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την απόκτηση δεδομένων [11]. Κάθε τύπος αισθητήρα μπορεί να παρακολουθεί διαφορετικά χαρακτηριστικά της βλάστησης, όπως το χρώμα και η υφή της βλάστησης ή το γεωμετρικό περίγραμμα των καλλιεργειών. Επιπλέον, ορισμένοι αισθητήρες μπορούν να μετρήσουν την ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Τα δεδομένα που αποκτώνται από αυτούς τους αισθητήρες μπορούν να υποβληθούν σε περαιτέρω επεξεργασία για τη παρακολούθηση της βιομάζας των φυτών, την ευρωστία των φυτών, την υγρασία του εδάφους και άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται τύποι αισθητήρων που χρησιμοποιούνται. Οι αισθητήρες RGB (Red (620–670 nm), Green (500–560 nm), Blue (430–500 nm)) είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες από συστήματα UAVs για εφαρμογές γεωργίας ακριβείας. Έχουν σχετικά χαμηλό κόστος σε σύγκριση με τους άλλους τύπους και μπορεί να καταγράψει εικόνες υψηλής ανάλυσης. Επιπλέον, είναι εύκολο στη χρήση και τη λειτουργία τους καθώς αυτά είναι χαμηλά σε βάρος και μέγεθος. Επιπλέον, οι πληροφορίες που καταγράφονται απαιτούν απλή επεξεργασία. Οι εικόνες μπορεί να καταγραφούν σε διαφορετικές συνθήκες, τόσο σε ηλιόλουστες όσο και σε συννεφιασμένες ημέρες, αλλά σε συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο για την αποφυγή ανεπαρκούς ή υπερβολικής έκθεσης της εικόνας. Λαμβάνοντας υπόψη τα μειονεκτήματα αυτών των αισθητήρων, το κύριο μειονέκτημα τους είναι η αδυναμία ανάλυσης πολλών παραμέτρων βλάστησης που απαιτούν φασματική πληροφορία στο μη ορατό φάσμα. Συνήθως χρησιμοποιούνται παράλληλα με άλλους τύπους αισθητήρων. Με τη χρήση πολυφασματικών ή υπερφασματικών αισθητήρων απεικόνισης, τα MEA μπορούν να αποκτήσουν πληροφορίες σχετικά με τη φασματική απορρόφηση και ανάκλαση της βλάστησης σε πολλές ζώνες [12]. Η φασματική πληροφορία μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην αξιολόγηση πολλών βιολογικών και φυσικών χαρακτηριστικών των καλλιεργειών. Για παράδειγμα, τα ανθυγιεινά μέρη των καλλιεργειών

μπορούν να διακρίνονται σε μια εικόνα, καθώς η ορατή ακτινοβολία στο κόκκινο κανάλι απορροφάται από τη χλωροφύλλη, ενώ η ακτινοβολία κοντά στην υπέρυθρη (Near Infrared Radiation 720–1500 nm) αντανακλάται σε υψηλό ποσοστό. Έτσι, ακόμα κι αν δεν είναι ακόμα ορατό στο κόκκινο κανάλι, μπορεί να αναγνωριστεί από τις πληροφορίες στο κανάλι NIR.



Εικόνα 4 α) RGB κάμερα β) Πολυφασματική κάμερα γ) Υπερφασματική κάμερα δ) FLIR Vue Pro R (θερμική) ε) LiDAR⁴

Για παράδειγμα, τα προβληματικά μέρη των καλλιιεργειών μπορούν να διακρίνονται σε μια εικόνα, καθώς η ορατή ακτινοβολία στο κόκκινο κανάλι απορροφάται από τη χλωροφύλλη, ενώ η ακτινοβολία κοντά στην υπέρυθρη (Near Infrared Radiation 720–1500 nm) αντανακλάται σε υψηλό ποσοστό. Έτσι, ακόμα κι αν δεν είναι ακόμα ορατό στο κόκκινο κανάλι, μπορεί να αναγνωριστεί από τις πληροφορίες στο κανάλι NIR. Η φασματική πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό πολλών δεικτών βλάστησης και με βάση αυτά, παρακολουθούνται πολλά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας. Ως αποτέλεσμα, οι πολυφασματικοί και υπερφασματικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται συχνά, παρά το υψηλό κόστος τους. Ωστόσο, τα μειονεκτήματα αυτών των αισθητήρων προκύπτει από το γεγονός ότι απαιτείται η εφαρμογή πολύπλοκων μεθόδων προεπεξεργασίας για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών από τις ληφθείσες εικόνες. Η διαδικασία προεπεξεργασίας των φασματικών εικόνων συχνά περιέχει τη ραδιομετρική βαθμονόμηση (radiometric calibration), τη

⁴ Bouguettaya, A., Zarzour, H., Kechida, A., & Taberkit, A. M. (2022). Deep learning techniques to classify agricultural crops through UAV imagery: A review. *Neural Computing and Applications*, 34(12), 9511-9536.

γεωμετρική διόρθωση (geometric correction), τη βελτίωση της εικόνας (image enhancement) [13]. Η κύρια διαφορά μεταξύ πολυφασματικών και υπερφασματικών αισθητήρων είναι ο αριθμός των ζωνών (ή καναλιών) που κάθε αισθητήρας μπορεί να καταγράψει πληροφορίες αντανάκλασης καθώς και το πλάτος των ζωνών. Οι πολυφασματικοί αισθητήρες καταγράφουν 5–12 κανάλια, ενώ οι υπερφασματικές εικόνες μπορούν συνήθως να συλλάβουν εκατοντάδες ή χιλιάδες ζώνες, αλλά σε στενότερο εύρος ζώνης. Σε πρόσφατες μελέτες έγινε εμφανές πως οι πολυφασματικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται πολύ περισσότερο από τα υπερφασματικούς, λόγω του χαμηλότερου κόστους τους. Τέλος, οι θερμικοί αισθητήρες υπερύθρων (Thermal infrared sensors) καταγράφουν πληροφορίες σχετικά με τη θερμοκρασία των αντικειμένων και παράγουν εικόνες που τις εμφανίζουν με βάση αυτές τις πληροφορίες. Πιο συγκεκριμένα, οι θερμικές κάμερες χρησιμοποιούν αισθητήρες υπερύθρων και οπτικό φακό για να λαμβάνουν μόνο υπέρυθρη ακτινοβολία. Όλα τα αντικείμενα πιο ζεστά από το απόλυτο μηδέν ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}/-459\text{ }^{\circ}\text{F}$) εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος (LWIR και Ζώνες MWIR), σε ποσότητα ανάλογη με τη θερμοκρασία τους. Ως εκ τούτου, οι θερμικές κάμερες εστιάζουν και ανιχνεύουν την ακτινοβολία σε αυτά τα μήκη κύματος και συνήθως απεικονίζουν τη διαφορά θερμοκρασίας σε μία grayscale εικόνα. Πολλοί αισθητήρες θερμικής απεικόνισης μπορούν επίσης να δημιουργήσουν έγχρωμες εικόνες. Αυτές οι εικόνες συχνά δείχνουν τα θερμότερα αντικείμενα ως κίτρινα και τα ψυχρότερα αντικείμενα ως μπλε. Αυτός ο τύπος αισθητήρων χρησιμοποιείται για πολύ συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στη διαχείριση της άρδευσης (irrigation management).

2.3 UAVs και Γεωργία ακριβείας

Τα Μη επανδρωμένα Αεροσκάφη ή αλλιώς Drones ή UAVs, όπως ξεκίνησαν να συστήνονται στο κοινό, από την βιομηχανία παραγωγής UAVs μετά το 2015, έκαναν την εμφάνισή τους με μία διαφορετική υπόσταση απ' ό,τι γνωρίζουμε σήμερα. Τα πρώτα UAVs χρησιμοποιήθηκαν ως όπλα το 1849, όταν οι Αυστριακοί επιτέθηκαν στην πόλη της Βενετίας, Ιταλία με Μη Επανδρωμένα αερόστατα που κουβαλούσαν εκρηκτικά[14]. Τη σημερινή εποχή τα UAVs έχουν μετατραπεί σε μια ευέλικτη τεχνολογία με αμέτρητες πρακτικές εφαρμογές και δυνατότητες. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των UAVs είναι η ικανότητά τους να έχουν πρόσβαση σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα και πληροφορίες που κάποτε ήταν δύσκολο να αποκτηθούν.



Εξοπλισμένα με προηγμένες κάμερες, αισθητήρες και τεχνολογίες απεικόνισης, τα UAVs μπορούν να καταγράφουν εικόνες και βίντεο υψηλής ανάλυσης από διαφορετικές οπτικές γωνίες, επιτρέποντας εργασίες ακριβούς χαρτογράφησης, δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων και τοπογραφικές εργασίες με αξιοσημείωτη αποτελεσματικότητα. Τα τελευταία χρόνια, τα UAVs έχουν λάβει ευρεία υιοθέτηση σε τομείς όπως η γεωργία, οι κατασκευές, η επιτήρηση, η παραγωγή ταινιών, η περιβαλλοντική παρακολούθηση και πολλά άλλα. Η έκρηξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας και των δυνητικών εφαρμογών της, οδήγησε στην έρευνα και ανάπτυξη ποικίλων τύπων drone, τα οποία λειτουργούν αποτελεσματικότερα σε συγκεκριμένες συνθήκες και τοποθεσίες.

2.3.1 Είδη Μη επανδρωμένων αεροσκαφών

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα μπορούν να ταξινομηθούν σε διαφορετικούς τύπους με βάση τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά τους. Οι τέσσερις κύριοι τύποι είναι: α) πολλαπλών ροτόρων, β) σταθερών πτερύγων, γ) μονού ρότορα και δ) υβριδικής κάθετης απογείωσης και προσγείωσης (VTOL).

UAV με πολλαπλούς ρότορες (Εικόνα 6): Τα πιο γνωστά UAV από επαγγελματίες και χομπίστες. Χρησιμοποιούνται ευρέως για αεροφωτογράφιση, εναέρια χαρτογράφηση και ψυχαγωγικά αθλήματα. Αυτοί οι τύποι UAV είναι αυτή τη στιγμή η φθηνότερη διαθέσιμη επιλογή στην αγορά. Μπορούν να ταξινομηθούν σε διαφορετικούς τύπους με βάση τον αριθμό των ροτόρων στο UAV: τρίπτερο (τρεις ρότορες), τετρακόπτερο (τέσσερις ρότορες), εξακόπτερο (έξι ρότορες) και οκτακόπτερο (οκτώ ρότορες). Γενικά, η ποσότητα του ωφέλιμου φορτίου που μπορούν να μεταφέρουν τα UAV αυξάνεται με τον αριθμό των ροτόρων που διαθέτει το UAV. Παρόλο που τα UAV με πολλαπλούς ρότορες είναι η φθηνότερη διαθέσιμη επιλογή, έχουν τα μειονεκτήματά τους. Έχουν περιορισμένο χρόνο πτήσης και αντοχή σε σύγκριση με τους άλλους τύπους UAV. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα UAV με πολλαπλούς ρότορες χρειάζονται πολλή ενέργεια για να παραμείνουν σταθερά στον αέρα έναντι της βαρύτητας και των ανέμων. Ο μέσος χρόνος πτήσης για UAV με πολλαπλούς ρότορες κυμαίνεται από περίπου 20–40 λεπτά.

⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Incendiary_balloon



Εικόνα 6 Drone με πολλαπλούς ρότορες (DJI Matrice 210).

UAV σταθερών πτερυγίων (Εικόνα 7): Αυτοί οι τύποι UAV κατασκευάζονται παρόμοια με τα κανονικά αεροπλάνα. Σε αντίθεση με τα UAV με πολλαπλούς ρότορες, δεν απαιτούν πολλή ενέργεια για να παραμείνουν στον αέρα επειδή κάνουν χρήση της αεροδυναμικής ανύψωσης που παρέχει η δομή τους. Λόγω αυτού, μπορούν να πετούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σύγκριση με τα UAV με πολλαπλούς ρότορες. Ο μέσος χρόνος πτήσης για UAV σταθερών πτερυγίων μπορεί να κυμαίνεται από 1–2 ώρες. Ένα μειονέκτημα αυτών των τύπων UAV είναι ότι συνήθως χρειάζονται πολύ χώρο για απογείωση και προσγείωση. Δεν έχουν επίσης την ικανότητα να αιωρούνται και θεωρούνται πιο πολύπλοκα και δύσκολα στη χρήση τους, με αποτέλεσμα να απαιτούν αναγκαστική εκπαίδευση. Αυτοί οι τύποι UAV συνήθως κοστίζουν περισσότερο από τα UAV με πολλαπλούς ρότορες.



Εικόνα 7 UAV σταθερών πτερυγίων (senseFly eBee X).

UAV με ένα ρότορα (Εικόνα 8): Αυτοί οι τύποι UAV μοιάζουν πολύ με τα ελικόπτερα στο σχεδιασμό και τη δομή τους. Συνήθως είναι εξοπλισμένα με ένα μεγάλο ρότορα στην κορυφή

και ένα μικρό ρότορα στην ουρά για τον έλεγχο της κατεύθυνσής τους. Αυτά τα UAV συνήθως τροφοδοτούνται από κινητήρες αερίου και επομένως μπορούν να πετούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σύγκριση με τα UAV με πολλαπλούς ρότορες. Το μειονέκτημα αυτών των τύπων UAV είναι οι επιχειρησιακοί κίνδυνοι που συνδέονται με τους μεγάλους ρότορες τους. Είναι επίσης πιο δύσκολο να πετάξουν και απαιτείται σημαντική εκπαίδευση. Συνήθως κοστίζουν ακόμη περισσότερο από τα UAV σταθερής πτέρυγας, αλλά όντως διαθέτουν δυνατότητα βαρύτερου ωφέλιμου φορτίου από τα UAV σταθερής πτέρυγας.



Εικόνα 8 UAV μονού ρότορα για ψεκασμό σε καλλιέργειες [53].

Υβριδικά UAV VTOL (Εικόνα 9): Αυτοί οι τύποι UAV συνδυάζουν τις ικανότητες των UAV σταθερών πτερύγων και πολλαπλών στροφείων με δυνατότητες κάθετης απογείωσης και προσγείωσης. Αυτά τα UAV είναι ακόμα σε πρώιμη ανάπτυξη και υπάρχουν πολύ λίγες διαθέσιμες επιλογές στην αγορά αυτή τη στιγμή. Έχουν μεγάλο χρόνο πτήσης και μπορούν να μεταφέρουν μεγαλύτερα ωφέλιμα φορτία, αλλά η αποτελεσματικότητά τους πρέπει να δοκιμαστεί και να αξιολογηθεί.



Εικόνα 9 UAV VTOL Αρχύτας [54].

2.3.2 Νομοθεσία για τα UAVs

Την εποχή αυτή, η τεχνολογία των UAVs αποτελεί ολοένα και πιο δημοφιλή εργαλείο στο ευρύ κοινό και εφαρμογές τις πληθαίνουν. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε επιτακτική η ανάγκη δημιουργίας κατάλληλων νομοθεσιών, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ασφάλεια των πολιτών. Η

πρώτη θέσπιση κανόνων για τα Μη επανδρωμένα αεροσκάφη στην Ελλάδα έγινε με το ΦΕΚ/Β/3152/30.9.2016, το οποίο θέσπιζε τους κανονισμούς και το γενικό πλαίσιο για τις πτήσεις ΣμηΕΑ. Η ελληνική νομοθεσία θεωρούνταν απαιτητική ως προς την απόκτηση διπλώματος και ως προς τους περιορισμούς πτήσεων. Μέχρι τις 31/12/2020 ο νόμος διαχώριζε τα ΣμηΕΑ ανάλογα με το βάρος απογείωσης και αν η χρήση τους ήταν ερασιτεχνική ή επαγγελματική. Τον Ιούνιο του 2019 ψηφίστηκαν κοινοί ευρωπαϊκοί κανονισμοί και από την 1/1/2021 άρχισαν να ισχύουν με βασικό διαχωρισμό πλέον το ρίσκο, την προστασία των πολιτών και την ασφάλεια των αεροσκαφών. Οι κατηγορίες ισχύουν όπως πριν και απαρτίζονται από την ανοιχτή την ειδική και την πιστοποιημένη, οι οποίες επιμερίζονται σε υποκατηγορίες [15].

2.3.3 Χρήση των UAVs στις γεωργικές διαδικασίες

Η παρακολούθηση της καλλιέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια των διαφορετικών σταδίων ανάπτυξης, ξεκινώντας από τη βλάστηση (germination) πριν ακόμη τα φυτά ανταποκριθούν στα χαρακτηριστικά του εδάφους. Ο σκοπός της παρακολούθησης της καλλιέργειας είναι η καταγραφή φαινοτυπικών χαρακτηριστικών που μπορεί να αντικατοπτρίζουν πιθανά προβλήματα και ο εντοπισμός αυτών των προβλημάτων σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Αργότερα, η ανάπτυξη και η απόδοση της καλλιέργειας μπορούν να αξιολογηθούν για να παρουσιαστούν οι κατάλληλες διαχειριστικές αποφάσεις. Η λήψη εναέριων εικόνων υψηλής ανάλυσης μπορεί να βοηθήσει τους καλλιεργητές να αξιολογήσουν τις συνθήκες του εδάφους, την κατάσταση ανάπτυξης των καλλιεργειών και να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την υγεία των φυτών και το άγχος των καλλιεργειών. Σε αυτήν την ενότητα, εξετάστηκαν τα οφέλη και οι προκλήσεις στη χρήση UAV για τη διεξαγωγή γεωργικών εργασιών.

2.3.3.1 Ακριβής ψεκασμός φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων

Στις γεωργικές πρακτικές, η εφαρμογή χημικών ουσιών όπως τα φυτοφάρμακα και τα λιπάσματα εγκυμονεί διάφορες προκλήσεις. Ο λανθασμένος ψεκασμός αυτών των ουσιών όπως η παράλειψη ή επικάλυψη κάποιου κομματιού της καλλιέργειας μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιόμορφη κατανομή στο χωράφι. Επιπλέον, οι κλιματικές συνθήκες, ιδιαίτερα η ένταση και η κατεύθυνση του ανέμου, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τον ψεκασμό των ουσιών, επηρεάζοντας άθελά τους γειτονικά χωράφια και φυσικά πολλές φορές και την υγεία των εργαζομένων που εκτελούν τη συγκεκριμένη εργασία. Τέλος, όταν χρησιμοποιούνται ψεκαστήρες εδάφους ή διασκορπιστές, υπάρχει κίνδυνος να προκληθούν ζημιές στα φυτά κατά την εφαρμογή [16]. Τα MEA δημιουργώντας χάρτες πεδίου υψηλής ανάλυσης κατά την αιώρηση, μπορούν και προσαρμόζουν την απόστασή τους από το έδαφος βάσει της τοπογραφίας του εδάφους, παρέχοντας έτσι, ακριβή ψεκασμό υγρού σε πραγματικό χρόνο ανά κομμάτι γης (patch spraying). Με τον τρόπο αυτό η χρήση χημικών φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων είναι δυνατό να μειωθεί έως και κατά 15-20%, ελαχιστοποιώντας τη διείσδυση χημικών στα υπόγεια ύδατα [17]. Η εφαρμογή των λιπασμάτων με τη χρήση UAVs αφαιρεί πλήρως τον ανθρώπινο παράγοντα που χρειάζεται κατα των χειροκίνητο ψεκασμό και ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο σχετικά με τη χημική μετατόπιση των ουσιών σε γειτονικά χωράφια. Τα συστήματα UAVs ψεκασμού στο πεδίο έχουν ενισχύσει την ικανότητα κάλυψης, έχουν αυξήσει τη χημική αποτελεσματικότητα και έχουν κάνει τη δουλειά του ψεκασμού ευκολότερη και ταχύτερη. Σήμερα, τα UAVs είναι σε θέση να μεταφέρουν δεξαμενή φυτοφαρμάκων

χωρητικότητα έως και 40 λίτρων και να ακολουθούν προκαθορισμένες διαδρομές, με σκοπό να ψεκάζουν τις καλλιέργειες σύμφωνα με τις απαιτήσεις. Τα UAVs παρουσιάζουν μεγάλες δυνατότητες στην κάλυψη των πεδίων με δύσκολη πρόσβαση για τρακτέρ και αεροσκάφη.



Εικόνα 10 Ψεκασμός με χρήση UAV.

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η αποτελεσματικότητα του ψεκασμού με τη χρήση UAVs επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- Οι καιρικές συνθήκες όπως για παράδειγμα η ταχύτητα άνεμου, θερμοκρασία περιβάλλοντος, κτλ
- Η ροή του αέρα των ροτόρων αλληλεπιδρά με τους ψεκαστήρες και σχηματίζει μια κωνική δίνη, επηρεάζοντας άμεσα τα αποτελέσματα του ψεκασμού.
- Των παραμέτρων πτήσης, του μεγέθους της γεωργικής γης και της ανάγκης για πολλαπλές στάσεις για επιτόπιο ψεκασμό.
- Τη συχνότητα επαναφόρτισης των μπαταριών και της επαναπλήρωσης της δεξαμενής του ψεκαστήρα.

2.3.3.2 Παρακολούθηση Ανάπτυξης Βλάστησης για Εκτίμηση Απόδοσης

Οι καλλιέργειες συχνά δεν αναπτύσσονται ομοιόμορφα στα χωράφια, κατά συνέπεια, η απόδοση των καλλιεργειών μπορεί να διαφέρει σημαντικά από το ένα σημείο του χωραφιού στο άλλο. Αυτές οι διαφορές ανάπτυξης μπορεί να προκύψουν από βιοτικούς (παράσιτα) ή αβιοτικούς (έδαφος, νερό κ.λπ.) παράγοντες. Η παρακολούθηση και η αξιολόγηση της κατάστασης της καλλιέργειας σε πραγματικό χρόνο μπορεί να βοηθήσει στην επινόηση κατάλληλων στρατηγικών διαχείρισης για τη βελτίωση της απόδοσης [18]. Για παράδειγμα, τα δεδομένα NDVI (Normalized difference vegetation index) και οι κηλίδες ασθένειας/παράσιτων που απεικονίζονται από τα UAV σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης της

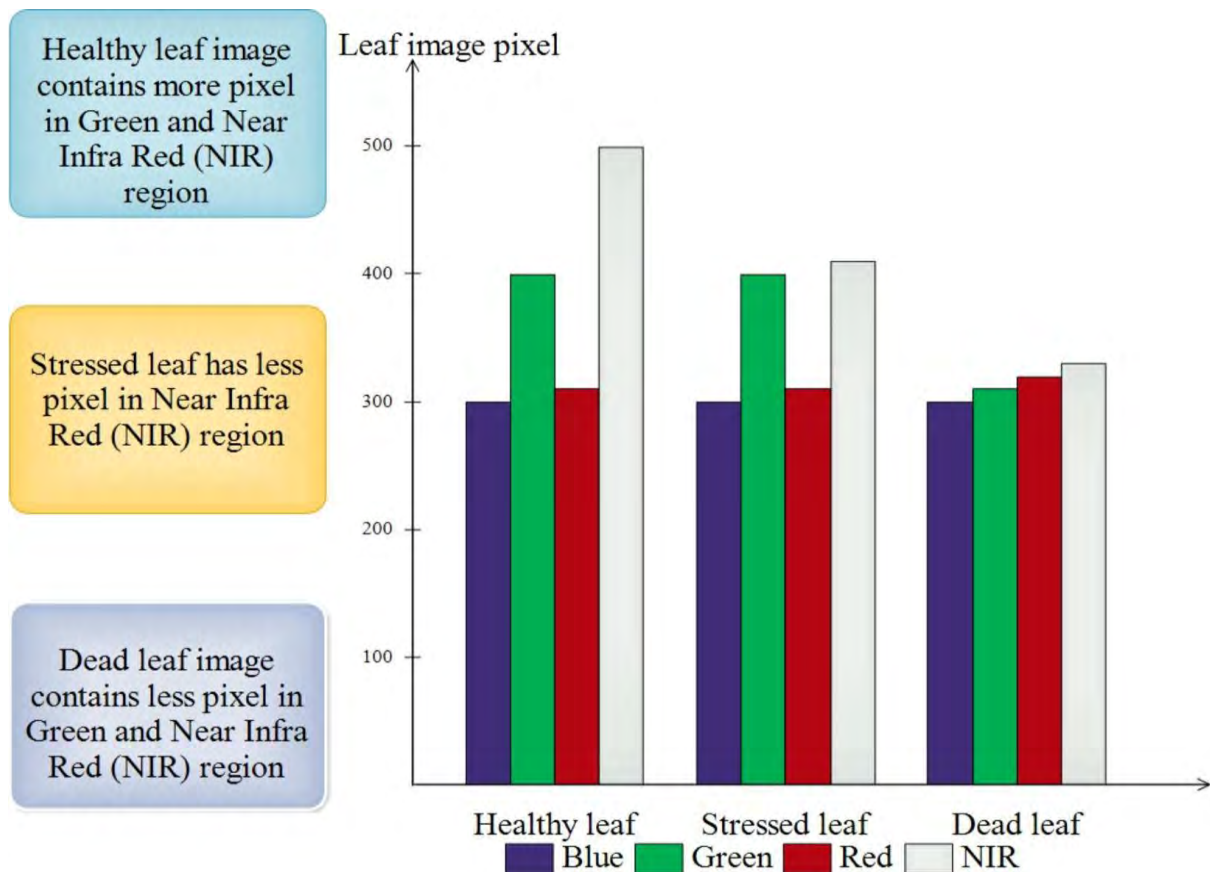
καλλιέργειας θα μπορούσαν να συγκριθούν, μαζί με δεδομένα απόδοσης για αρκετές εποχές. Θα βοηθούσε στην προετοιμασία χαρτών που απεικονίζουν την τυπική απόκλιση και τον συντελεστή διακύμανσης. Είναι δυνατό να υπολογιστεί η υψηλότερη και η χαμηλότερη απόδοση που παράγεται από την ίδια τοποθεσία στο χωράφι, για καθεμία από τις διάφορες εποχές και καλλιέργειες. Σε σύγκριση με τις δορυφορικές εικόνες, δεν υπάρχει περιορισμός στο να χρησιμοποιούνται UAV περιοδικά πάνω από το ίδιο πεδίο και να συλλέγουν δεδομένα για πολλά χρόνια. Με την εξέταση χαρτών απόδοσης πολλών ετών, είναι δυνατό να χαρτογραφηθούν μπλοκ διαχείρισης για μεγαλύτερη αυθεντικότητα και σταθερότητα απόδοσης [19]. Η ικανότητα των UAVs να λειτουργούν σε χαμηλά υψόμετρα κάτω από τα σύννεφα ελαχιστοποιεί επίσης την κάλυψη νέφους στην ποιότητα των εικόνων.

2.3.3.3 Παρακολούθηση Υγείας της Βλάστησης και Διαχείριση Παρασίτων

Η επίγεια παρακολούθηση είναι κουραστική, καταστροφική ή δεν προσφέρει τα καλύτερα δεδομένα με γρήγορο ρυθμό. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι παραγωγοί δεν μπορούν να παρακολουθούν όλες τις καλλιεργημένες εκτάσεις και ορισμένα τμήματα των αγρών παραμελούνται [20]. Επιπλέον, ενώ η τεχνολογία των δορυφορικών εικόνων έχει εξελιχθεί αισθητά, η χρήση της παραπάνω μεθόδου για την παρακολούθηση της καλλιέργειας υστερεί στην ανάλυση των εικόνων, στα κοντινά πλάνα και την ευκρίνεια σε σχέση με τους αισθητήρες των UAVs που βρίσκονται μόλις λίγα μέτρα πάνω από το χωράφι [21]. Τα UAVs εξοπλισμένα με ειδικό εξοπλισμό απεικόνισης (πολυφασματικές και RGB κάμερες) είναι σε θέση να υποδείξουν την υγεία των φυτών όσον αφορά τη θερμοκρασία, τα επίπεδα χλωροφύλλης, τους ρύπους στο περιβάλλοντα χώρο και το πάχος των φύλλων, κάτι που επιτρέπει στους αγρότες να παρακολουθούν τις καλλιέργειες καθώς αναπτύσσονται. Οι εικόνες που εξάγονται μέσω drone για την ανίχνευση παρασίτων θα πρέπει προσφέρουν τα εξής:

- Ανίχνευση ενός συμπτώματος
- Διαφοροποίηση συμπτωμάτων
- Εκτίμηση της βαρύτητας των συμπτωμάτων

Στη διαχείριση παρασίτων είναι σημαντικό να βρεθούν τα πιο σημαντικά φασματικά κανάλια για την ανίχνευση συμπτωμάτων σε διαφορετικές καλλιέργειες. Σύμφωνα με τον Al-Saddik (2017) ένα καλό αποτέλεσμα ανίχνευσης ασθενειών με χρήση UAV λήφθηκε όταν συνδυάστηκαν φασματικά δεδομένα και δεδομένα υψής [22].



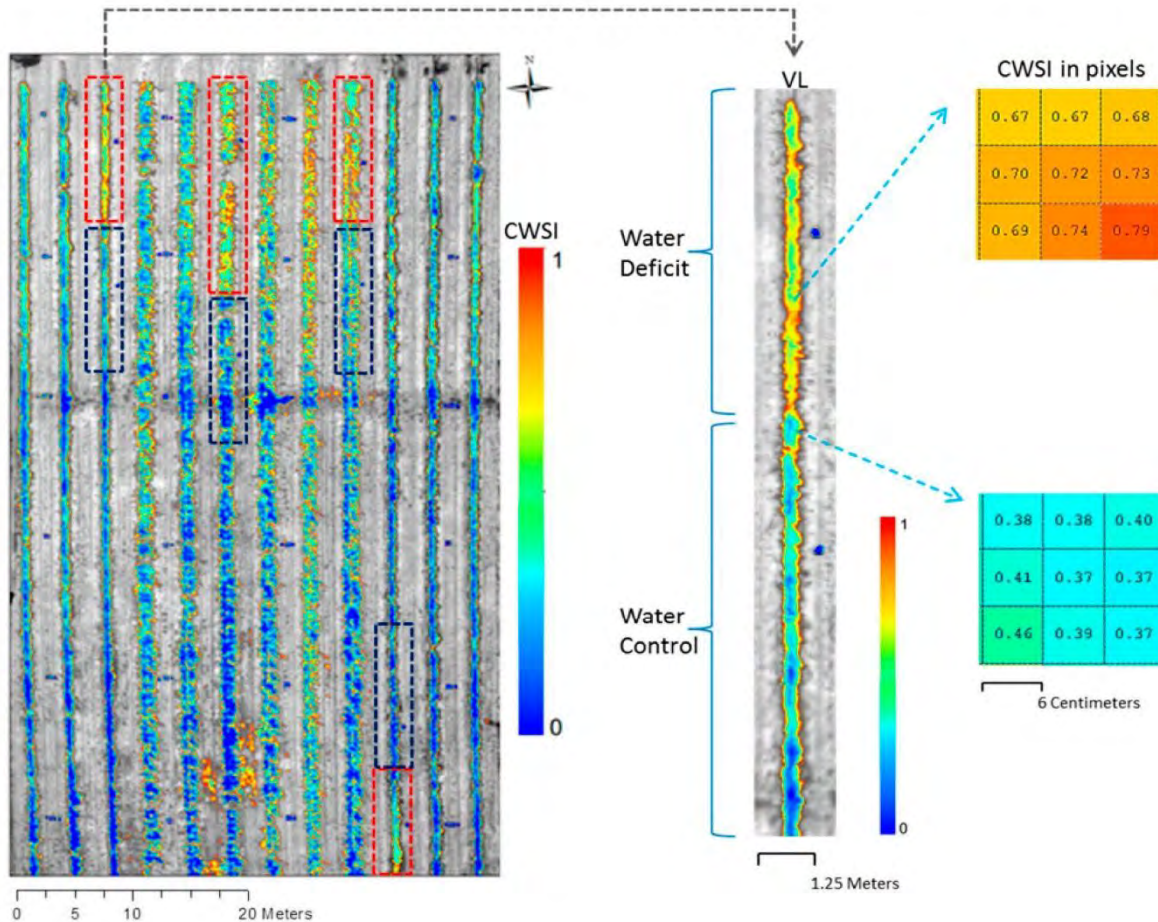
Εικόνα 11 Ανάλυση φάσματος για την αξιολόγηση της υγείας του φυτού. Οι κατηγορίες αξιολόγησης είναι οι εξής : α) **Υγιές φύλλα**. Στη περίπτωση αυτή η εικόνα αποτελείται από περισσότερα εικονοστοιχεία κοντά στο Πράσινο και Υπέρυθρο φάσμα. β) **Στρεσαρισμένο φύλλα**. Στη περίπτωση αυτή η εικόνα αποτελείται από λιγότερα εικονοστοιχεία κοντά στο Υπέρυθρο φάσμα και γ) **Νεκρά φύλλα**. Στη περίπτωση αυτή η εικόνα αποτελείται από λιγότερα εικονοστοιχεία κοντά στο Πράσινο και Υπέρυθρο φάσμα [27].

Ο συνδυασμός υπερφασματικών και θερμικών αισθητήρων έδειξε επίσης πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα στην ανίχνευση της νόσου στα πρώιμα στάδια. Ωστόσο, η συγχώνευση των δεδομένων από δύο τύπους αισθητήρων θα μπορούσε να αυξήσει τη δυσκολία επεξεργασίας των δεδομένων [23].

2.3.3.4 Διαχείριση Άρδευσης

Η διαθεσιμότητα νερού άρδευσης είναι μια κορυφαία παράμετρος παραγωγής που επηρεάζει την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Το γεγονός ότι το 70% του νερού που καταναλώνεται παγκοσμίως χρησιμοποιείται για την άρδευση των καλλιεργειών υπογραμμίζει τη σημασία της άρδευσης ακριβείας [24]. Η υγρασία του εδάφους συσχετίζεται άμεσα με την ποσότητα χρήσης του λιπάσματος αλλά και της αποτελεσματικότητάς του. Το μειωμένο διαθέσιμο νερό στο έδαφος επιδρά άμεσα στη διεργασία της εξατμισοδιαπνοής (evapotranspiration) οδηγώντας σε υδατική καταπόνηση της καλλιέργειας. Έτσι, ένας καλλιεργητής χρησιμοποιώντας ένα UAV εξοπλισμένο με φασματικές και θερμικές κάμερες μπορεί να εντοπίσει σημεία όπου λείπει νερό, με κατάλληλη χρήση ειδικού λογισμικού και να δράσει άμεσα σε αυτές τις περιοχές. Οι αλγόριθμοι επεξεργασίας εικόνας και τεχνητής νοημοσύνης με διαφορετικές τεχνικές απεικόνισης διασφαλίζουν ότι το νερό χρησιμοποιείται στο απαιτούμενο μέρος και σε επαρκείς ποσότητες. Η μορφολογία του εδάφους που λαμβάνεται από τα UAV επιτρέπει αυτές τις

εφαρμογές και αποτρέπεται η σπατάλη νερού [25]. Στη Εικόνα 12 παρουσιάζεται η χρήση της μεθόδου CWSI (crop water stress index) για την ανάλυση του επιπέδου νερού στο έδαφος.



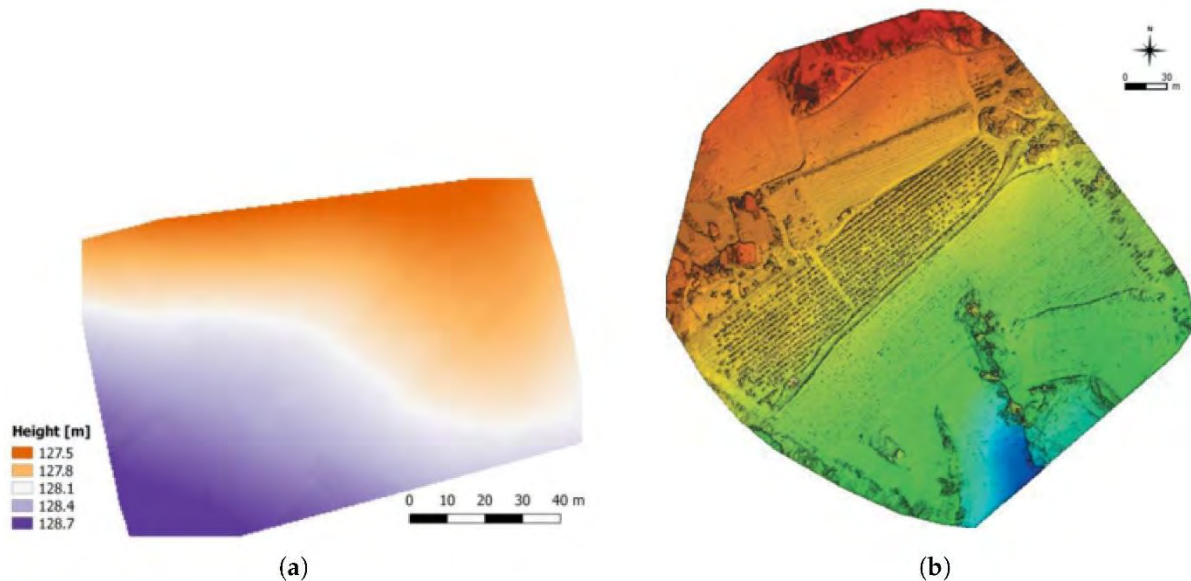
Εικόνα 12 Επεξεργασία εικόνας για την ανάλυση υγρασίας του εδάφους [26].

2.4 Ανάλυση δεδομένων πολυφασματικών αισθητήρων στον αγρό

Με τη χρήση εξειδικευμένων αισθητήρων, τα UAV μπορούν να αποκτήσουν πληροφορίες για διάφορα χαρακτηριστικά του καλλιεργούμενου αγρού. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, δεν υπάρχει ακόμα τυποποιημένη ροή εργασίας ή καλά καθιερωμένες τεχνικές που πρέπει να ακολουθηθούν για την ανάλυση και την οπτικοποίηση των πληροφοριών που αποκτήθηκαν. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι επεξεργασίας εικόνας για την ανάλυση εικόνων από UAV για σκοπούς γεωργίας ακριβείας είναι οι ακόλουθες:

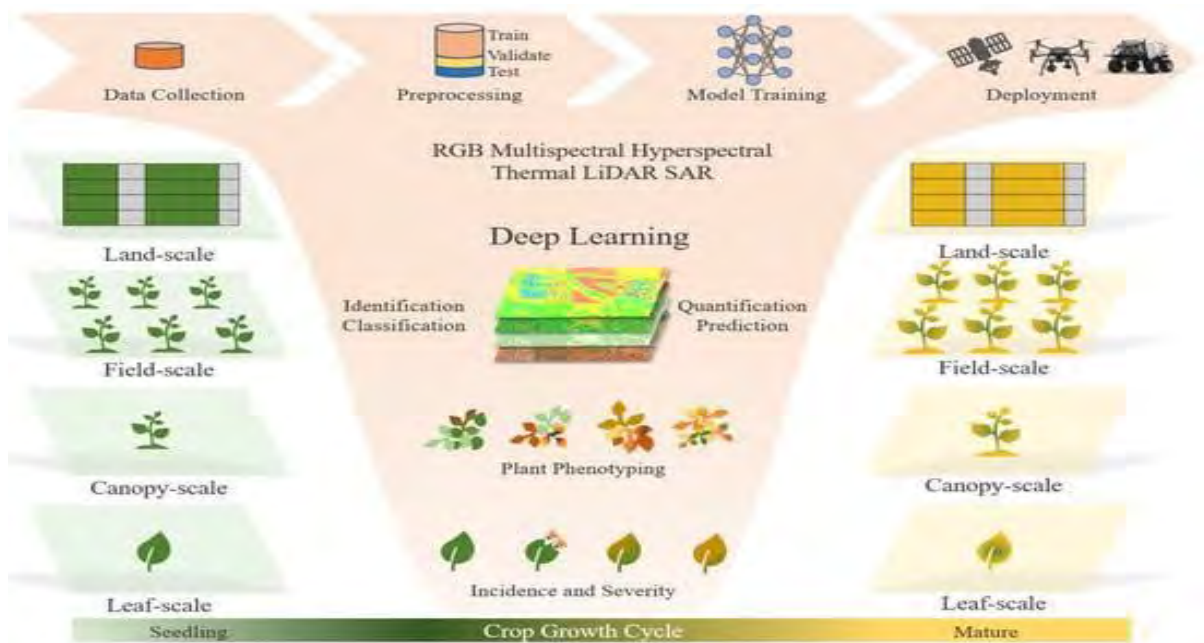
Τεχνικές φωτογραμμετρίας: Η φωτογραμμετρία (Photogrammetry) αφορά την ακριβή ανακατασκευή μιας σκηνής ή ενός αντικειμένου από πολλές επικαλυπτόμενες εικόνες. Οι φωτογραμμετρικές τεχνικές μπορούν να επεξεργαστούν τα δεδομένα 2D και να καθορίσουν τις γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ των διαφορετικών εικόνων και των αντικειμένων, λαμβάνοντας τρισδιάστατα μοντέλα. Για την κατασκευή των τρισδιάστατων μοντέλων, η φωτογραμμετρία απαιτεί τουλάχιστον δύο επικαλυπτόμενες εικόνες της ίδιας σκηνής ή/και αντικειμένου(ων), που έχουν ληφθεί από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Αυτού του είδους οι τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων επιφάνειας ή εδάφους [36]. Ωστόσο, απαιτείται ενός μεγάλου δείγματος εικόνων για να καλυφθεί ολόκληρο το υπό μελέτη πεδίο. Έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι

απαραίτητο να συλλεχθούν πολλές επικαλυπτόμενες εικόνες για να κατασκευαστούν Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα (DEMs) των καλλιεργειών ή/και να δημιουργηθούν ορθοφωτογραφίες (που αναφέρονται επίσης ως ορθομωσαϊκά). Τα τρισδιάστατα μοντέλα και οι ορθοφωτογραφίες περιλαμβάνουν πληροφορίες για τα τρισδιάστατα χαρακτηριστικά των καλλιεργειών με βάση τη δομή της βλάστησης (π.χ. ύψος βλάστησης, φύλλωμα, πυκνότητα κ.λπ.) και μπορεί να είναι πολύ χρήσιμες για εφαρμογές που μπορούν να εκμεταλλευτούν μόνο το RGB εικόνες (Εικόνα 13). Οι εργασίες που εξετάστηκαν έδειξαν ότι οι φωτογραμμετρικές τεχνικές χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε όλους τους τύπους εφαρμογών, καθώς απαιτούνται επίσης για τη δημιουργία χαρτών δεικτών βλάστησης [25].



Εικόνα 13 α) Ψηφιακό μοντέλο εδάφους β) Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας [25].

Μέθοδοι Μηχανικής μάθησης και Βαθιάς μάθησης: Τα τελευταία χρόνια, με την αύξηση της επεξεργαστικής ισχύς, τεχνικές μηχανικής μάθησης (Machine Learning) και βαθιάς μάθησης (Deep Learning) εφαρμόζονται για σκοπούς πρόβλεψης ή/και επεξεργασίας δεδομένων, με εξαιρετικά αποτελέσματα σε πολλούς τομείς, όπως ιατρικά συστήματα, μάρκετινγκ, βιολογία, κ.λπ. Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης εφαρμόζονται συχνά στη γεωργία ακριβείας για την εκμετάλλευση των πληροφοριών από τον μεγάλο όγκο δεδομένων που αποκτώνται από τα drone. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης είναι σε θέση να εκτιμήσουν ορισμένες παραμέτρους σχετικά με τον ρυθμό ανάπτυξης των καλλιεργειών, να ανιχνεύσουν ασθένειες ή ακόμα και να αναγνωρίσουν αντικείμενα στις εικόνες (Εικόνα 14).



Εικόνα 14 Βαθιά μάθηση στη γεωργία ακριβείας [37]. Τα μοντέλα βαθιάς μάθησης, για την αποτελεσματική εκπαίδευση τους, βασίζονται σε μεγάλες συλλογές εικόνων (dataset) με συγκεκριμένες κλάσεις. Μετά από κάποιες επαναλαμβανόμενες εκπαιδεύσεις πάνω σε ένα συγκεκριμένο σετ εικόνων, όπως για παράδειγμα φυτά με ασθένειες, οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να μάθουν να αναγνωρίζουν τα φυτά που έχουν καταβληθεί από κάποια ασθένεια. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να ενσωματωθούν πάνω σε αυτόνομα ρομπότ (π.χ UAV ή επίγεια ρομπότ) για τον έλεγχο τη σοδειάς με κάμερες.

Δείκτες βλάστησης: Οι δείκτες βλάστησης (Vegetation Indices) αποτελούν το πιο αποτελεσματικό μέσο για τη παρακολούθηση καλλιεργειών στη γεωργία ακριβείας. Η χρήση διαφορετικών μαθηματικών εξισώσεων που συνδυάζουν τουλάχιστον δύο φασματικές ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, είναι σχεδιασμένοι να μεγιστοποιούν τη συμβολή των χαρακτηριστικών της βλάστησης, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την επιρροή των εξωγενών παραγόντων. Μπορούν να παρέχουν αξιόπιστες χωρικές και χρονικές πληροφορίες σχετικά με τις γεωργικές καλλιέργειες που παρακολουθούνται. Στις περισσότερες περιπτώσεις, εξάγονται πολλαπλοί δείκτες βλάστησης και χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή πληροφοριών που αφορούν τη κατάσταση της καλλιέργειας. Μπορούν να υπολογιστούν, είτε για κάθε φωτογραφία ξεχωριστά είτε μετά την παραγωγή ορθοφωτογραφιών που απεικονίζουν ολόκληρη την καλλιέργεια. Ο υπολογισμός των δεικτών βλάστησης μπορεί να χρησιμεύσει στον προσδιορισμό χρήσιμων χαρακτηριστικών της καλλιέργειας, όπως βιολογικές και φυσικές παράμετροι της βλάστησης [38].

2.4.1 Δείκτες βλάστησης

Είναι γνωστό ότι η ανάκλαση του φωτός από τα φυτά αλλάζει ανάλογα με τον τύπο του φυτού, την περιεκτικότητα σε νερό στους ιστούς και άλλους εγγενείς παράγοντες [28]. Η ανάκλαση από τη βλάστηση στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (spectral reflectance) καθορίζεται από τα χημικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας των φύλλων [29]. Οι κύριες εφαρμογές για την τηλεπισκόπηση της βλάστησης βασίζονται στα ακόλουθα φάσματα φωτός:

- Το υπεριώδες φάσμα (UV), το οποίο κυμαίνεται από 10 έως 380 nm.
- Το ορατό φάσμα, το οποίο αποτελείται από τις μπλε (450–495 nm), τις πράσινες (495–570 nm) και τις κόκκινες (620–750 nm) περιοχές μήκους κύματος και
- Το φάσμα κοντά στην υπέρυθη ζώνη (850–1700 nm) [30].

Ο ρυθμός εκπομπής (emissivity rate) της επιφάνειας των φύλλων ενός πλήρως αναπτυγμένου πράσινου φυτού χωρίς καμία βιοτική ή αβιοτική καταπόνηση είναι γενικά στο εύρος 0,96-0,99 και είναι συχνότερα μεταξύ 0,97 και 0,98 . Αντίθετα, για τα ξερά φυτά, ο ρυθμός εκπομπής έχει γενικά μεγαλύτερο εύρος και τιμές από 0,88 έως 0,94 [31]. Οι δείκτες που εξάγονται από αυτό τα φάσματα φωτός μπορούν να αποδοθούν, πέρα από την ποσοτικοποίηση της ανάπτυξης και της υγείας των φυτών, σε μια σειρά χαρακτηριστικών που σχετίζονται με την περιεκτικότητα σε νερό, τις χρωστικές, την περιεκτικότητα σε ζάχαρη και υδατάνθρακες, την περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες και τα αρωματικά, μεταξύ άλλων. Άλλες εφαρμογές βασίζονται σε δεδομένα όπως, οι κορυφές (peaks) ή τους τόνους ανακλαστικότητας για συγκεκριμένες ενώσεις εντός του ορατού φάσματος και περιοχών κοντά στο υπέρυθρο φάσμα φωτός [32].

Με τη χρήση φασματικών οργάνων υψηλής ανάλυσης, ο αριθμός των ζωνών που λαμβάνονται με τηλεπισκόπηση αυξάνεται και το εύρος ζώνης (bandwidth) στενεύει [33]. Ένας από τους πιο χρησιμοποιούμενους και εφαρμοσμένους δείκτες που υπολογίζονται από δεδομένα πολυφασματικών αισθητήρων ως κανονικοποιημένη αναλογία μεταξύ της κόκκινης και της ακτινοβολίας κοντά στην υπέρυθρη ζώνη είναι ο **Δείκτης Κανονικής Διαφοράς Βλάστησης (NDVI)** [34]. Μια άμεση χρήση του NDVI είναι ο χαρακτηρισμός της ανάπτυξης ή της υγείας του φυλλώματος (canopy).

$$NDVI = \frac{(P_{NIR} - P_R)}{P_{NIR}} + \rho_R, \quad (1)$$

Όπου ρ_{NIR} είναι η ανάκλαση κοντά στο φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας και ρ_R είναι η ανάκλαση στο φάσμα του κόκκινου. Δεδομένου ότι ο δείκτης υπολογίζεται μέσω μιας διαδικασίας κανονικοποίησης, το εύρος των τιμών NDVI είναι μεταξύ 0 και 1, έχοντας μια ευαίσθητη απόκριση στην πράσινη βλάστηση ακόμη και για περιοχές με χαμηλή βλάστηση. Ως εκ τούτου, πολλές μελέτες το έχουν συγκρίνει με τον **Δείκτη Επιφάνειας Φύλλων (LAI)**, όπου ο LAI ορίζεται ως η περιοχή των φύλλων ανά περιοχή εδάφους [35]. Η πιο κοινή διαδικασία ελέγχου είναι μέσω άμεσων ή έμμεσων συσχετισμών μεταξύ των Δεικτών βλάστησης (VI's) που λαμβάνονται και των χαρακτηριστικών της βλάστησης που μετρούνται επί τόπου, όπως η κάλυψη βλάστησης, το LAI, η βιομάζα, η ανάπτυξη, κ.τ.λ. Ωστόσο, ο NDVI είναι ευαίσθητος στις διακυμάνσεις της φωτεινότητας του εδάφους, του χρώματος του εδάφους, της ατμόσφαιρας, της σκιάς των νεφών και των νεφών και της σκιάς των φύλλων και απαιτεί βαθμονόμηση.

Ένας από τους παλαιότερους δείκτες, που προτάθηκε από τον Jordan [39] το 1969, είναι ο **Δείκτης Αναλογίας Βλάστησης (RVI)**, που βασίζεται στην αρχή ότι τα φύλλα απορροφούν σχετικά περισσότερο κόκκινο από το υπέρυθρο φως. Ο δείκτης RVI μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως:

$$RVI = \frac{R}{NIR}, \quad (2)$$

Όπου R η ανάκλαση στη κόκκινη περιοχή και NIR η ανάκλαση κοντά στο υπέρυθρο φάσμα. Σύμφωνα με τα φασματικά χαρακτηριστικά της βλάστησης, τα θαμνώδη φυτά έχουν χαμηλή ανάκλαση στην κόκκινη ζώνη και έχουν δείξει υψηλή συσχέτιση με το δείκτη LAI, τον δείκτη LDBM και την περιεκτικότητα των φύλλων σε χλωροφύλλη [40]. Ο δείκτης RVI χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση και παρακολούθηση της πράσινης βιομάζας, και πιο

συγκεκριμένα σε περιοχές με υψηλή πυκνότητας βλάστηση, καθώς αυτός ο δείκτης έχει καλή συσχέτιση με τη φυτική βιομάζα. Ωστόσο, όταν η έκταση της βλάστησης είναι αραιή (κάτω από 50% κάλυψη), ο δείκτης RVI είναι ευαίσθητος στις ατμοσφαιρικές συνθήκες και η αναπαράστασή της βιομάζας είναι ασθενής.

Ο Δείκτης Κάθετης Βλάστησης (PVI) [41] είναι μια προσομοίωση του Δείκτη Πράσινης Βλάστησης (GVI) βασισμένος σε δεδομένα NIR και R, με απεικόνιση στο δισδιάστατο χώρο. Στο σύστημα συντεταγμένων NIR και R, η φασματική απόκριση από το έδαφος παρουσιάζεται ως επιμήκης τομή (γραμμή φωτεινότητας του εδάφους). Το τελευταίο αποτέλεσμα μπορεί να εξηγηθεί καθώς το έδαφος παρουσιάζει υψηλή φασματική απόκριση στο NIR και τις ζώνες. Η απόσταση μεταξύ του σημείου ανακλαστικότητας (NIR) και της γραμμής του εδάφους έχει οριστεί ως η Κάθετη VI, η οποία μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$PVI = \sqrt{(\rho_{soil} - \rho_{veg})_R^2 - (\rho_{soil} - \rho_{veg})_{NIR}^2} \quad (3)$$

Όπου ρ_{soil} είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους και ρ_{veg} είναι η ανακλαστικότητα της βλάστησης. Ο δείκτης PVI χαρακτηρίζει τη βιομάζα της βλάστησης στο επίπεδο του εδάφους. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση, τόσο μεγαλύτερη είναι η βιομάζα.

Όπως φαίνεται προηγουμένως, ο δείκτης NDVI είναι πολύ ευαίσθητος στις διακυμάνσεις του φόντου, όπως η φωτεινότητα και η απόχρωση των φυλλωμάτων της βλάστησης και η φωτεινότητα του φόντου από το έδαφος. Έρευνες έχουν δείξει ότι όταν αυξάνεται η φωτεινότητα του φόντου, ο NDVI αυξάνεται επίσης συστηματικά. Δεδομένης της επίδρασης του εδάφους, η ακτινοβολία αυξάνεται σημαντικά όταν η βλάστηση είναι αραιή. Αντίθετα, η ακτινοβολία NIR μειώνεται για να κάνει τη σχέση μεταξύ βλάστησης και εδάφους πιο λογική. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφοροι δείκτης βλάστησης για να προσαρμοστούν στις αλλαγές του εδάφους. Δεδομένου ότι οι δείκτες NDVI και PVI έχουν κάποιες ελλείψεις στην περιγραφή της φασματικής συμπεριφοράς της βλάστησης και του εδάφους, ο Huete [42] καθιέρωσε τον δείκτη βλάστησης προσαρμοσμένου στο έδαφος (SAVI), ο οποίος μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$SAVI = \frac{(\rho_n - \rho_r)(1+L)}{(\rho_n + \rho_r + L)} \quad (4)$$

Το παραπάνω καθιερώθηκε για να βελτιώσει την ευαισθησία του NDVI στο εδαφικό υπόβαθρο, όπου L είναι ο δείκτης ρύθμισης του εδάφους, ο οποίος βελτιώνει την ευαισθησία του NDVI στο εδαφικό υπόβαθρο. Το εύρος του είναι από 0 έως 1. Σε πρακτικές εφαρμογές, οι τιμές του καθορίζονται σύμφωνα με τις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Όταν ο βαθμός κάλυψης της βλάστησης είναι υψηλός, είναι κοντά στο 1, δείχνοντας ότι το υπόβαθρο του εδάφους δεν επηρεάζει την εξαγωγή πληροφοριών για τη βλάστηση. Αυτό το είδος ιδανικών συνθηκών συναντάται σπάνια σε φυσικά περιβάλλοντα και μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στην περίπτωση μεγάλης πυκνότητας και κάλυψης των φυλλωμάτων [43]. Η τιμή του είναι περίπου 0,5 στις πιο συνηθισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Όταν είναι κοντά στο 0, η τιμή του δείκτη SAVI είναι ίση με αυτή του δείκτη NDVI. Ωστόσο, ο παράγοντας θα πρέπει να ποικίλλει αντιστρόφως ανάλογα με την ποσότητα της βλάστησης που υπάρχει για να επιτευχθεί η βέλτιστη προσαρμογή στην επίδραση του εδάφους.

3. Μεθοδολογία

Για το πειραματικό μέρος της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένας χωράφι με καλλιέργεια αμυγδάλου συνολικής έκτασης 14 στρεμμάτων με ΧΨ (41.0373649, 25.0727316) και βρίσκεται στην περιφερειακή ενότητα Ξάνθης και πιο συγκεκριμένα στην Ν. Κεσσάνη Ξάνθης. Η Νέα Κεσσάνη βρίσκεται στην πεδιάδα της Ξάνθης με υψόμετρο 8 μέτρα δίπλα στις δυτικές όχθες της λίμνης Βιστωνίδας, με πεδινές εκτάσεις και χαμηλούς λόφους. Η σύσταση του εδάφους, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της δειγματοληπτικής ανάλυσης που διεξήχθη στις 22/10/2027, χαρακτηρίζεται ως «Αμμοπηλώδες Βαρύ» βάσει της ποσόστωσης αργίλου (39%), άμμου (48%) και ιλύος (13). Το γεγονός αυτό μπορεί να επηρεάσει την αφύδατη αποθήκευση νερού και θρεπτικών στοιχείων, καθώς και την ευρωστία του εδάφους σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Σε ό,τι αφορά τα θρεπτικά στοιχεία, η ανάλυση έδειξε ότι το εδαφικό περιβάλλον έχει αρκετά υψηλές ποσότητες καλίου (280 mg/kg), μαγνησίου (230 mg/kg) και ασβεστίου (9200 mg/kg), που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών. Ωστόσο, η ανάλυση έδειξε ελλείψεις σε νιτρικό άζωτο (14 mg/kg), ψευδάργυρο (0,37 mg/kg) και μαγγάνιο (4,2 mg/kg). Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή κατάλληλων λιπασμάτων και άλλων διορθωτικών μέτρων σε συνδυασμό με την ανάλυση δεικτών βλάστησης. Τέλος, οι ποσοτικές μετρήσεις του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) είναι κρίσιμες για την κατανόηση της χημικής φύσης του εδάφους. Το υψηλό pH 7.7 υποδηλώνει αλκαλικό περιβάλλον, ενώ η υψηλή αγωγιμότητα (0,51 mS/cm) μπορεί να επηρεάσει την υγεία των φυτών λόγω της συγκέντρωσης αλάτων στο έδαφος.



Εικόνα 15 Κάτοψη καλλιέργειας. Βόρεια του χωραφιού υπάρχει καλλιέργεια θαμβακιου, νότια υπάρχει οικισμός, δυτικά σιτάρι και ανατολικά καλαμπόκι.

3.1 Καλλιέργεια και είδη δένδρων αμυγδαλιάς

Στο περίπτωσή μας, το χωράφι που πραγματοποιήθηκε η έρευνα ενσωματώνει διαφορετικά είδη αμυγδαλιάς, τα οποία είναι τα εξής:

Tarraco. Η συγκεκριμένη ποικιλία δημιουργήθηκε από τη διασταύρωση «FLTU18» × «Anxaneta» το 1991 [52]. Οι καρποί αυτής της ποικιλίας αμυγδάλου είναι εξαιρετικής ποιότητας, με μέγεθος που υπερβαίνει κατά 30% αυτόν της ποικιλίας Ferragnes. Τα δέντρα αυτής της ποικιλίας είναι πολύ παραγωγικά και μπορούν να παράγουν έως 800 κιλά αμύγδαλο ανά στρέμμα. Όσον αφορά την περίοδο άνθησης, αυτή εμφανίζεται περίπου 10 μέρες μετά από την ποικιλία Ferragnes. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι αυτή η ποικιλία δεν είναι αυτογόνιμη και χρειάζεται την επικονίαση από την ποικιλία Marinada για να παραγάγει καρπούς (Εικόνα 16).



Εικόνα 16 Ποικιλία Tarraco [52].

Marinada. Η αμυγδαλιά αυτής της ποικιλίας αναπτύσσεται σε μέτριο ρυθμό και εμφανίζει μέτρια πυκνή βλάστηση (Εικόνα 17). Οι καρποί της αναπτύσσονται σε μόνιμα καρποφόρα όργανα (spurs), ενώ η ποικιλία αυτή χαρακτηρίζεται από όψιμη άνθηση που συνήθως παρατηρείται περίπου 10 μέρες αργότερα από τη ποικιλία Ferragnes. Κατά τη διάρκεια της ανθοφορίας, παρατηρούνται πολλά άνθη με μέτρια διάρκεια άνθισης. Το φυτό είναι πολύ ανθεκτικό στο ψύχος κατά την περίοδο της ανθοφορίας, αν και θα χάσει το 50% των ανθέων σε θερμοκρασίες $-3,5^{\circ}\text{C}$ έως -4°C . Τα δέντρα αυτής της ποικιλίας είναι πολύ παραγωγικά, καθώς μπορούν να παράγουν περίπου 700 έως 800 κιλά καρπού ανά δέντρο. Για τη φύτευση, συνίσταται η τοποθέτηση των δέντρων σε αποστάσεις 4,5x5,5 ή 4x6,00 μέτρα, με περίπου 40 φυτά ανά στρέμμα. Αυτή η ποικιλία εισέρχεται γρήγορα στην παραγωγή χωρίς το φαινόμενο παρενιαυτοφορίας και είναι ανθεκτική σε ασθένειες όπως το φουζίκωκο (*fusicoccum-Phomopsis amygdale*), το πολύστιγμα (*Polistigma ochraceum*) και η μονίλια (*Monilia laxa*). Οι καρποί αυτής της ποικιλίας είναι ανθεκτικοί στην καρπόπτωση και είναι ευκολότερο να

συγκομιστούν. Το ποσοστό ψίχας φτάνει το 31% του καρπού, ενώ τα μεγέθη των καρπών αντιστοιχούν στο 90% των καρπών της ποικιλίας Feragnes, διατηρώντας παράλληλα την καλή τους γεύση. Τέλος, το ποσοστό διπλής ψίχας παραμένει χαμηλό, λιγότερο από 0,3%, και οι καρποί είναι απαλλαγμένοι από χνούδια και αυλακώσεις [50].



Εικόνα 17 Ποικιλία Marinada [50].

Vayro. Η αμυγδαλιά αυτή ανήκει στα ζωνηρά φυτά και χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητά της για εύκολο κλάδεμα. Προκειμένου να αποδώσει τα καρποφόρα της, μπορεί να φυτευτεί σε όλους τους τύπους των εδαφών. Τα δέντρα αυτής της ποικιλίας είναι πολύ παραγωγικά, με την δυνατότητα παραγωγής 700 έως 800 κιλά καρπού ανά δένδρο. Για τη φύτευση, συνιστάται η τοποθέτηση των δέντρων σε αποστάσεις 5,5x5,5 ή 5,5x6,0 μέτρα με 30 έως 33 φυτά ανά στρέμμα.



Εικόνα 18 Ποικιλία Vayro [50].

Η περίοδος ανθοφορίας συμπίπτει με αυτήν της ποικιλίας Ferragnes, και παρά την ανθεκτικότητά της στο ψύχος, η θερμοκρασία κάτω από -5°C έως -6°C μπορεί να προκαλέσει απώλεια του 50% των ανθέων. Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά αυτής της ποικιλίας είναι η απουσία φαινομένου παρενιαυτοφορίας, επιτρέποντας την γρήγορη είσοδο στην παραγωγή. Επιπλέον, είναι ανθεκτική σε ασθένειες όπως το φουζίκικο (fusisocum-Phomopsis amygdale), το πολύστιγμα (Polistigma ochraceum), και η μονίλια (Monilia laxa). Οι καρποί αυτής της ποικιλίας είναι ανθεκτικοί στην καρπόπτωση, και η συγκομιδή τους είναι ευκολότερη. Ο όγκος της ψίχας φτάνει το 30% του καρπού, και τα καρποί έχουν μέγεθος που αντιστοιχεί στο 80% της φυρανιάς, διατηρώντας παράλληλα την καλή τους γεύση. Επιπλέον, το ποσοστό διπλής ψίχας παραμένει χαμηλό, λιγότερο από 0,1%, και οι καρποί είναι απαλλαγμένοι από χνούδια και αυλακώσεις. Τέλος, ο κορμός του δέντρου είναι ανθεκτικός σε δονήσεις και εξωτερικούς παράγοντες [49].

Ferragnes. Ο καρπός της έχει σχήμα επίμηκες, περικάρπιο χοντρό και κέλυφος ημίσκληρο. Η ψίχα έχει επιφάνεια ελαφρά τραχεία και γεύση γλυκιά. Θεωρείται ποικιλία παραγωγική, πολύ καλής ποιότητας, με ποσοστό ψίχας 35-39%. Χαρακτηρίζεται από την παραγωγή μονόσπερμων αμυγδάλων. Ωριμάζει το τρίτο πενθήμερο του Σεπτεμβρίου. Σαν δέντρο, είναι πολύ ζωντανό, με βλάστηση ορθόκλαδη. Είναι ευαίσθητη στο κορύνεο και ανθεκτική στη μονίλια. Καρποφορεί νωρίς και έχει πολύ μικρή τάση για παρενιαυτοφορία. Ως προς την άνθηση χαρακτηρίζεται ως ονιμανθής (από αρχές έως τέλη Μαρτίου). Κατάγεται από τη Γαλλία και είναι υβρίδιο αφού έχει διασταυρωθεί η Αι με την Cristomorto [51].



Εικόνα 19 Ποικιλία Ferragnes [50].

Ferraduel. Ο καρπός της έχει σχήμα επίμηκες, περικάρπιο χοντρό και κέλυφος σκληρό. Η ψίχα είναι αρκετά μεγάλη, με καλή γεύση. Θεωρείται ποικιλία παραγωγική, πολύ καλής ποιότητας, με ποσοστό ψίχας 25-28%. Χαρακτηρίζεται από την παραγωγή μονόσπερμων αμυγδάλων. Ωριμάζει το δεύτερο πενθήμερο του Σεπτεμβρίου. Σαν δέντρο είναι μέτρια έως πολύ

ζωηρή, με βλάστηση ορθόκλαδη, ανθεκτική στη μονίλια. Καρποφορεί νωρίς και έχει πολύ μικρή τάση για παρεννιαυτοφορία. Ως προς την άνθηση χαρακτηρίζεται ως οψιμαθής (από αρχές έως τέλος Μαρτίου). Κατάγεται από τη Γαλλία και είναι υβρίδιο αφού έχει διασταυρωθεί η Αι με την Cristomorto[51].



Εικόνα 20 Ποικιλία Ferraduel [50].

Οι παραπάνω ποικιλίες αμυγδάλων έχουν κατανεμηθεί σε διάφορα τμήματα του χωραφιού. Για την καλύτερη κατανόηση έχει χωριστεί χρωματικά ανά ποικιλία.



Εικόνα 21 Χρωματική τμηματοποίηση χωραφιού σε σχέση με τις ποικιλίες αμυγδάλου. 1) Πράσινο χρώμα ποικιλία Ferragnes, 2) Καφέ χρώμα ποικιλία Ferraduel, 3) Κίτρινο χρώμα ποικιλία Marinda, 4) Μπλε χρώμα ποικιλία Veyro και 5) Πορτοκαλί χρώμα ποικιλία Tarraco.

3.2 Συλλογή δείγματος εικόνων

Για την ορθή διενέργεια του πειράματος κρίθηκε σκόπιμο να συλλεχθεί πλήθος εικόνων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η τεχνική αυτή μας επιτρέπει να παρατηρήσουμε με μεγαλύτερη προσοχή την κατάσταση της καλλιέργειας με το πέρασμα του χρόνου και να ερμηνεύσουμε τυχόν διακυμάνσεις στην υγεία των δένδρων. Έτσι, επιλέχθηκαν οι μήνες του:

- Απριλίου
- Μαΐου
- Ιουνίου
- Ιουλίου
- Σεπτεμβρίου

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν το έτος 2022. Τα δείγματα εικόνων ανα μήνα εμπεριέχουν 2 τύπους αρχείων:

- 1) Εικόνες RGB
- 2) Πολυφασματικές εικόνες

Οι εικόνες τύπου RGB τραβήχθηκαν παράλληλα με τις πολυφασματικού τύπου εικόνες κατά τη διάρκεια της πτήσης.

3.3 Εξοπλισμός Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των δεδομένων αποτελείται από τα εξής:

eBee X. Το eBee X είναι ένα αεροσκάφος UAV (Unmanned Aerial Vehicle) που αναπτύχθηκε από την εταιρεία senseFly (Εικόνα 3.2.1). Η senseFly ειδικεύεται στην κατασκευή επαγγελματικών drones για χαρτογράφηση και έρευνες. Το eBee X σχεδιάστηκε για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της γεωργίας, της περιβαλλοντικής παρακολούθησης, της εξόρυξης και της γεωγραφικής έρευνας. Είναι γνωστό για την ευελιξία του, την μεγάλη διάρκεια πτήσης και τη δυνατότητα μεταφοράς διάφορων φορτίων, συμπεριλαμβανομένων φωτογραφικών μηχανών και αισθητήρων για την καταγραφή υψηλής ανάλυσης εικόνων και δεδομένων.



Εικόνα 22 eBee X drone.

Πιο συγκριμένα, στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 1,2) υπάρχουν τα βασικά χαρακτηριστικά του eBee X:

Πίνακας 1 Χαρακτηριστικά πτήσης eBee X.

Χαρακτηριστικά πτήσης

Ταχύτητα	11-30 m/s ή 25-68 mph (40-110 km/h)
Μέγιστη αντοχή στον άνεμο	Έως 12.8 m/s ή 28.6 mph (46 km/h)
Τύπος προσγείωσης	Αυτόματη γραμμική προσγείωση (με ακρίβεια 5 μέτρων σε άνοιγμα 35°)
Θερμοκρασία λειτουργίας	-15° έως 40°C
Αντοχή σε ελαφρά βροχή	Ναι
Αποφυγή εμποδίων στο έδαφος	Ναι - LiDAR (εύρος 120 μέτρα)
Ανάλυση στο έδαφος	Κάτω από 0.6 ίντσες (1.5 εκατοστά)
Μέγιστος χρόνος πτήσης	90 λεπτά
Μέγιστη απόσταση πτήσης	27.7 χιλιόμετρα (μαζί με την επιστροφή)
Τεχνικά χαρακτηριστικά	
Άνοιγμα φτερών	45.7 ίντσες (116 εκ.)
Υλικό	Expanded Polypropylene (EPP)
Κάλυμμα κάτω μέρους	Curv® Polypropylene thermoplastic composite
Μέγιστο βάρος απογείωσης	3.5 λίβρες (1.6 κιλά)
Διαστάσεις σακιδίου μεταφοράς	75x50x29 εκατοστά (30x20x11 ίντσες)
Κινητήρας	Χαμηλού θορύβου, Brushless, ηλεκτρικός
Αφαιρούμενα φτερά	Ναι
Εύρος σύνδεσης	1.9 μίλια (έως 5 μίλια)
Συχνότητα	2.400 - 2.4835 GHz
Αποθήκευση δεδομένων	Κάρτα SD

Πίνακας 2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του drone eBee X.

SenseFly Duet M. Η senseFly duet M είναι μια καινοτόμος διπλής χρήσης κάμερα, καθώς απαρτίζεται από δύο επιμέρους κάμερες, μία RGB (senseFly S.O.D.A.) και μία πολυφασματική (Parrot Sequoia+) [48]. Τα κύρια χαρακτηριστικά της εμφανίζονται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3):

Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά κάμερας senseFly Duet M.

Χαρακτηριστικά

<i>Φακός RGB</i>	F/2.8-11, 10.6 mm (35 mm παρόμοιο με: 29 mm)
<i>RGB ανάλυση</i>	5,472 x 3,648 px (3:2)
<i>RGB Κλείστρο</i>	Global Shutter 1/30 – 1/2000s
<i>Εύρος ISO RGB</i>	125-6400
<i>Ισορροπία λευκού (White Balance)</i>	Auto, sunny, cloudy, shady
<i>Φάσματα πολυφασματικού αισθητήρα</i>	Green (550nm ± 40nm)
	Red (660nm ± 40nm)
	Red edge (735nm ± 10nm)
	Near infrared (790nm ± 40nm)
<i>Αισθητήρας Multispectral Ανάλυση</i>	1.2 MP, 1,280 x 960 px
<i>FOV Πολυφασματικού αισθητήρα</i>	HFOV: 64° VFOV: 50° DFOV: 74°
<i>Κλείστρο Πολυφασματικού αισθητήρα</i>	Global
<i>Calibration</i>	Αυτόματη ραδιομετρική βαθμονόμηση
<i>Υποστήριξη RTK/PPK</i>	Ναι
<i>Μορφή εικόνας RGB</i>	RGB – JPEG
<i>Μορφή εικόνας Multispectral</i>	Multispectral – TIFF
<i>Συμβατότητα</i>	eBee X, eBee Ag

Σημαντικό χαρακτηριστικό της πολυφασματικής κάμερας “Sequoia” που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα αποτελεί το Average Ground Sampling Distance (GSD), δηλαδή το «πόση επιφάνεια καλύπτει το κάθε εικονοστοιχείο της κάμερας στο έδαφος».

$$GSD = \frac{(Altitude \times Pixel\ size)}{Focal\ length} \quad (5)$$

Όπου, Altitude (m), το ύψος πτήσης του drone από το έδαφος, Pixel size (mm), το μέγεθος των εικονοστοιχείων της κάμερας και τέλος, Focal length (mm), το εστιακό μήκος του αισθητήρα της κάμερας, δηλαδή η απόσταση του φακού της κάμερας και του επιπέδου φωτοαισθητήρα που συνθέτει την εικόνα. Στη περίπτωση μας έχουμε ο GSD κυμαίνεται από **10 cm** έως **12,08 cm**.

3.3 Μετρικοί δείκτες

Ο δείκτης NDVI είναι ένα αναλυτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα της αγροτικής και περιβαλλοντικής μελέτης για την αξιολόγηση της φυτικής κάλυψης και της υγείας των φυτών. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται από την ανάλυση των φασμάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, συγκεκριμένα από τις περιοχές του φωτεινού υπέρυθρου (NIR) και του κόκκινου (RED). Ο υπολογισμός του NDVI γίνεται με τον εξής τύπο (1). Ο NDVI κινείται σε ένα εύρος τιμών από -1 έως +1. Οι τιμές του δείκτη NDVI μπορούν να ερμηνευθούν ως εξής:

- Τιμές κοντά στο -1 υποδηλώνουν μη φυτικές εκτάσεις, όπως νερά, πέτρες ή αστικές περιοχές.
- Τιμές κοντά στο 0 υποδηλώνουν εκτάσεις με ελάχιστη ή καθόλου φυτική κάλυψη.
- Τιμές μεταξύ 0 και 1 υποδηλώνουν φυτική κάλυψη, με υψηλότερες τιμές να υποδηλώνουν πυκνότερη και υγιή φυτική βλάστηση.

Ο NDVI χρησιμοποιείται για πολλούς σκοπούς, όπως η παρακολούθηση της ανάπτυξης των φυτών, η ανίχνευση ασθενειών και ξηρασίας, η παραγωγή χαρτών φυτικής κάλυψης, και η αξιολόγηση της υγείας των φυτών σε γεωργικές εκτάσεις. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό άλλων δεικτών που σχετίζονται με την υγεία των φυτών, όπως ο δείκτης NDRE. Ο δείκτης NDRE (Normalized Difference Red Edge) είναι ένας δείκτης αξιολόγησης της φυτικής υγείας που χρησιμοποιεί πληροφορίες από τις περιοχές του φωτεινού υπέρυθρου (NIR) και του κόκκινου φάσματος (Red Edge) [44]. Αναπτύχθηκε για να παρέχει μια ακόμα πιο ευαίσθητη εικόνα της φυτικής κάλυψης και της κατάστασης των φυτών από ό,τι ο δείκτης NDVI. Ο δείκτης NDRE υπολογίζεται ως εξής:

$$NDRE = \frac{NIR - REDGE}{NIR + REDGE} \quad (6)$$

Όπου, REDGE η ζώνη του NDRE (σε αντίθεση με την κόκκινη ζώνη του NDVI) που κυμαίνεται μεταξύ 670-760 nm. Αυτό έχει σημασία γιατί το φάσμα Red Edge είναι το σημείο όπου ανιχνεύεται για πρώτη φορά το φυτικό στρες, δίνοντας στοιχεία για πιθανά προβλήματα.

Οι τιμές του NDRE κυμαίνονται σε ένα εύρος από -1 έως +1, όπου:

- Τιμές κοντά στο -1 υποδηλώνουν μη φυτικές εκτάσεις ή εκτάσεις με πολύ περιορισμένη φυτική κάλυψη.

- Τιμές κοντά στο 0 υποδηλώνουν εκτάσεις με ελάχιστη φυτική κάλυψη ή προβλήματα υγείας στα φυτά.
- Τιμές κοντά στο +1 υποδηλώνουν υγιή και πυκνά φυτά.

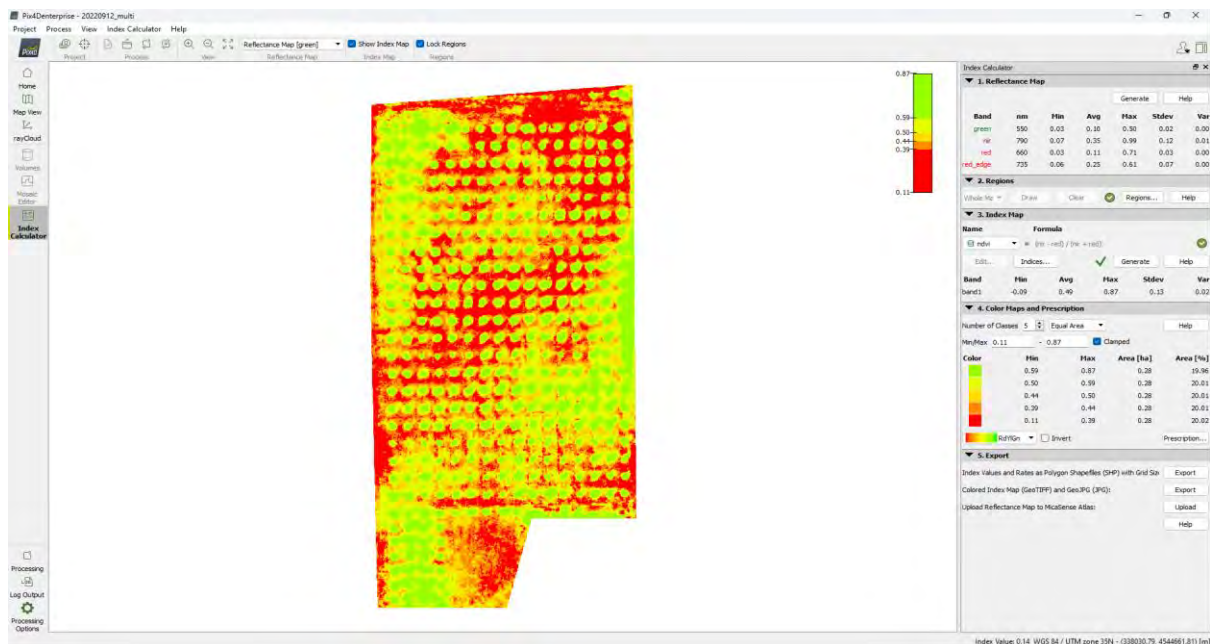
Ο δείκτης NDRE είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την παρακολούθηση της υγείας των φυτών, καθώς είναι ευαίσθητος σε αλλαγές στη χλωροφύλλη και την υδατική περιεκτικότητα των φυτών. Επίσης, παρέχει μια μέτρηση που δεν απορροφάται τόσο έντονα μόνο από τα ανώτερα στρώματα φύλλων, σε σχέση με τον NDVI [45]. Επομένως, εάν υπάρχει στρες στα φυτά, είτε αυτό οφείλεται σε κακή άρδευση, ασθένειες, ακατάλληλη χρήση λιπασμάτων ή παράσιτα, ο NDRE μπορεί να εντοπίσει αυτές τις αλλαγές, ακόμα κι αν δεν είναι ακόμη ορατές στην επιφάνεια. Για παράδειγμα, ο NDRE είναι λιγότερο επιρρεπής σε κορεσμό με τη παρουσία πυκνής βλάστησης, κάτι που μπορεί να συναντηθεί στις μετρήσεις εκτίμησης της βιομάζας των βοσκοτόπων. Ως εκ τούτου, ο NDRE μπορεί να παρέχει καλύτερη μέτρηση σε μια περιοχή που ο NDVI θα μετρούσε απλώς ως ομοιόμορφο +1,0.

3.3 Ανάλυση εδάφους με τη χρήση λογισμικού

Έχοντας συλλέξει τα απαραίτητα δεδομένα για την έρευνα μας, ο επόμενο βήμα αποτελεί η ανάλυση των εικόνων από το πρόγραμμα Pix4D. Το πρόγραμμα Pix4D είναι ένα από τα κορυφαία λογισμικά που χρησιμοποιούνται στο χώρο της. Το Pix4D είναι ένα λογισμικό που εξειδικεύεται στην επεξεργασία αεροφωτογραφιών που λαμβάνονται από αεροφωτογραφικά drones [46]. Τα κύρια χαρακτηριστικά του λογισμικού Pix4D περιλαμβάνουν τους τομείς, όπως:

1. **Αγρονομία:** Χρησιμοποιείται για την ανάλυση και παρακολούθηση της καλλιέργειας, την ανίχνευση ασθενειών και προβλημάτων στα φυτά, την εκτίμηση των αποδόσεων και άλλες αγροτικές εφαρμογές.
2. **Κατασκευές και Ακίνητα:** Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων και χαρτών κτιρίων, αρχαιολογικών ανασκαφών, οικοδομικών έργων και πολλών άλλων.
3. **Περιβάλλον:** Χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση των αλλαγών στο περιβάλλον, όπως αλλαγές στα δάση, στην παράκτια γραμμή και την υδρογραφία.
4. **Διαχείριση κρίσεων:** Χρησιμοποιείται σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπως φυσικές καταστροφές, για την αξιολόγηση ζημιών και τη διαχείριση κρίσεων.

Το Pix4D λειτουργεί με την αρχή της φωτογραμμετρίας και χρησιμοποιεί πολυφασματικές πληροφορίες από διάφορες πηγές εικόνων. Αυτό το λογισμικό επεξεργάζεται τις φωτογραφίες για να δημιουργήσει τρισδιάστατα μοντέλα του εδάφους, του αντικειμένου ή της περιοχής που καλύπτουν οι φωτογραφίες. Οι προχωρημένες δυνατότητες επεξεργασίας και ανάλυσης περιλαμβάνουν την δημιουργία ψηφιακών υψομετρικών μοντέλων, την ανίχνευση αντικειμένων και αλλαγών στο χώρο, και τη δημιουργία διαδραστικών χαρτών. Πιο συγκεκριμένα, εισάγοντας τις εικόνες στο λογισμικό Pix4D και ακολουθώντας τα βήματα που αναγράφονται στο Παράρτημα 1, καταλήγουμε στη δημιουργία του χάρτη ανάκλασης (reflectance map) (Εικόνα 23).



Εικόνα 23 Δημιουργία χάρτη ανακλαστικότητα με τη χρήση του λογισμικού Pix4D.

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων του χάρτη ανάκλασης χωρίζουμε τις τιμές των δεικτών NDVI και NDRE σε διακριτά επίπεδα, τα οποία υποδεικνύουν τη κατάσταση της υγείας του κάθε δέντρου ανά περίοδο. Τα επίπεδα τιμών για των δείκτη NDVI είναι τα εξής:

- **Τιμές μεταξύ -1 και 0:**

Αντιπροσωπεύει: Αυτές οι τιμές συνήθως υποδεικνύουν μη φυτικές ή αδιαπέραστες επιφάνειες.

Παραδείγματα: Υδάτινα σώματα, άγονη γη, αστικές περιοχές, βράχοι ή χιόνι.

Ερμηνεία: Οι χαμηλές ή αρνητικές τιμές προκύπτουν από τη χαμηλή ανάκλαση στην κόκκινη ζώνη και την υψηλότερη ανάκλαση στη ζώνη NIR για αυτές τις επιφάνειες.

- **Τιμές μεταξύ 0 - 0,2:**

Αντιπροσωπεύει: Αραιή ή καταπονημένη βλάστηση.

Παραδείγματα: Αραιά λιβάδια, στρεσαρισμένες ή μη υγιείς καλλιέργειες, θάμνοι με αραιά φύλλα.

Ερμηνεία: Ενώ υπάρχει κάποια βλάστηση, πιθανόν να μην είναι πολύ πυκνή.

- **Τιμές μεταξύ 0,2 - 0,5:**

Αντιπροσωπεύει: Μέτρια υγιή ή μέτρια πυκνή βλάστηση.

Παραδείγματα: Υγιείς καλλιέργειες, λιβάδια, μέτρια πυκνά δάση.

Ερμηνεία: Στις περιοχές αυτές η βλάστηση είναι σχετικά υγιής και μέτρια πυκνή.

- **Τιμές μεταξύ 0,5 - 0,8:**

Αντιπροσωπεύει: Υγιή και πυκνή βλάστηση.

Παραδείγματα: Καταπράσινα δάση, πολύ υγιείς καλλιέργειες, πυκνά λιβάδια.

Ερμηνεία: Αυτές οι τιμές υποδηλώνουν ιδιαίτερα υγιή, πυκνή και έντονη βλάστηση.

- **Τιμές πάνω από 0,8 - 1:**

Αντιπροσωπεύει: Εξαιρετικά υγιής και πολύ πυκνή βλάστηση.

Παραδείγματα: Πυκνά τροπικά δάση, πολύ πλούσιες και ακμάζουσες καλλιέργειες.

Ερμηνεία: Αυτές οι τιμές υποδηλώνουν την παρουσία εξαιρετικά πυκνής και υγιούς βλάστησης.

Για τον δείκτη NDRE, οι διαβαθμίσεις των τιμών διαφοροποιούνται καθώς χρησιμοποιεί την μπάντα Red Edge που έχει μικρότερη ανακλαστικότητα. Για το λόγο αυτό οι διαβαθμίσεις του δείκτη NDRE είναι οι εξής:

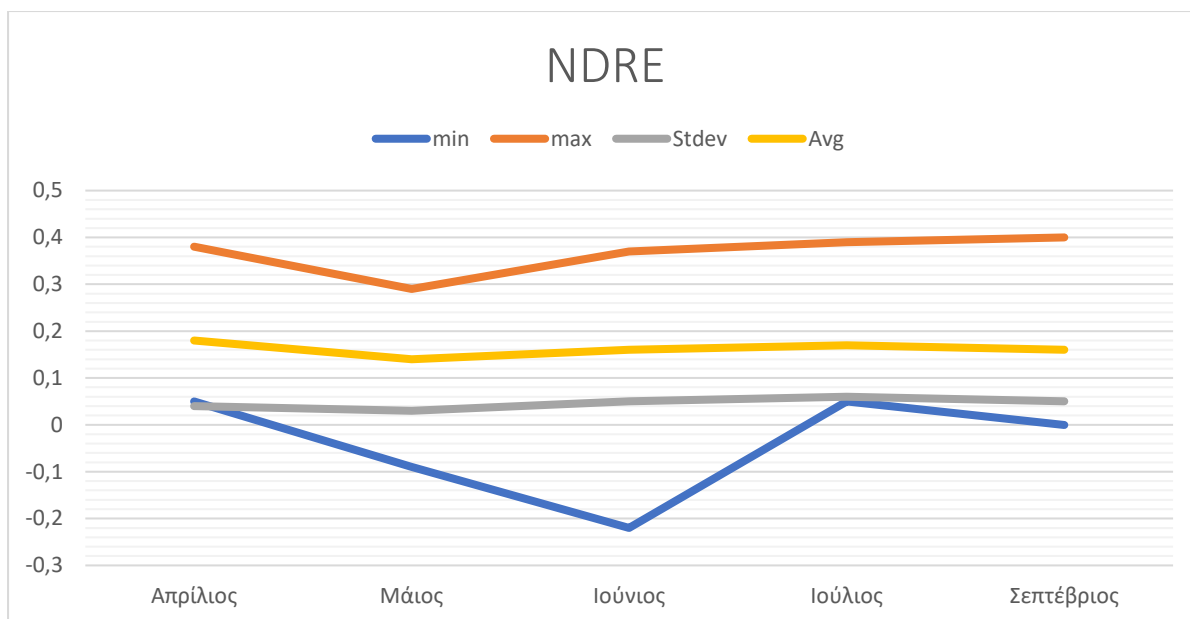
- **Τιμές μεταξύ -1 και 0:** Οι τιμές NDRE κάτω από 0 μπορεί να υποδηλώνουν σοβαρή καταπόνηση στα φυτά. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες όπως η ξηρασία, οι ελλείψεις σε θρεπτικά συστατικά, οι προσβολές από παράσιτα ή οι ασθένειες. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή NDRE, τόσο πιο καταπονημένη είναι η βλάστηση και μπορεί να δυσκολευτεί να παράγει υγιείς αποδόσεις.
- **Τιμές μεταξύ 0 - 0,2:** Οι τιμές NDRE πιο κοντά στο 0 μπορεί να υποδηλώνουν μέτριο στρες στη βλάστηση, ελλείψεις σε θρεπτικά συστατικά ή τα πρώιμα στάδια ενός προβλήματος παρασίτων ή ασθένειας.
- **Τιμές μεταξύ 0,2- 0,9:** Οι τιμές NDRE σε αυτό το εύρος υποδηλώνουν υγιή και δυναμικά αναπτυσσόμενη βλάστηση.

Έχοντας υπολογίσει για όλους τους μήνες τους δείκτες βλάστησης NDVI και NDRE, καταλήγουμε στα παρακάτω αποτελέσματα.

Πίνακας 4 Τιμές του δείκτη βλάστησης NDRE ανά περίοδο. Στο πίνακα αναφέρονται και οι τιμές "min", δηλαδή η μικρότερη τιμή, "max", δηλαδή η μεγαλύτερη τιμή, "StDev", δηλαδή η τυπική απόκλιση και "Avg", δηλαδή ο μέσος όρος.

NDRE

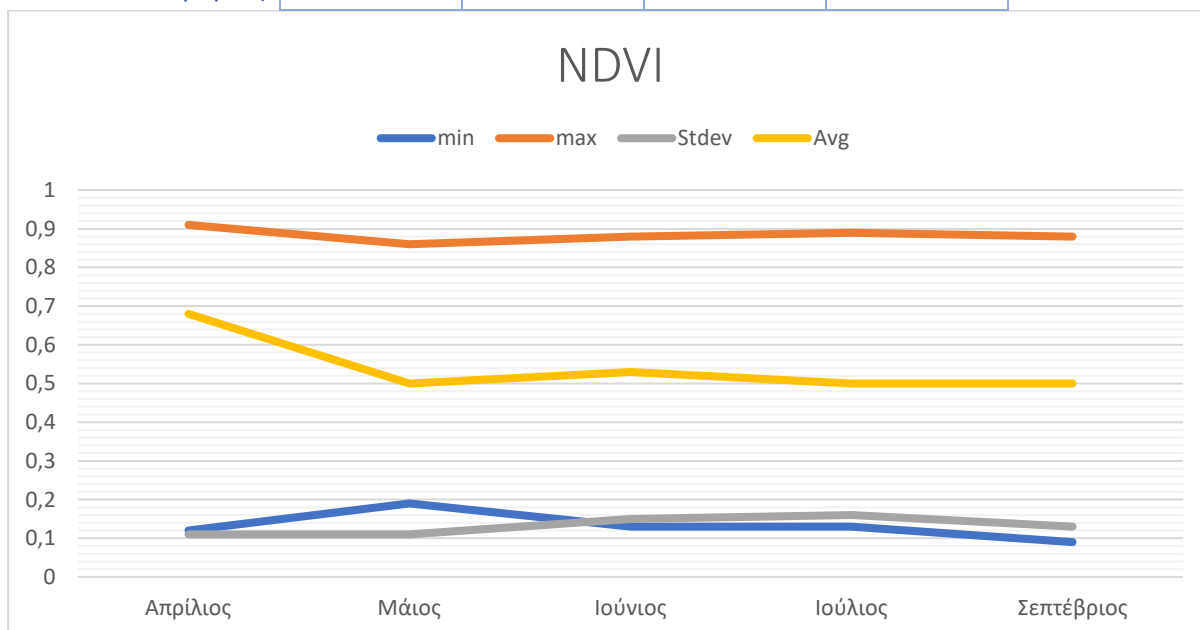
	Min	Max	Stdev	Avg
Απρίλιος	0.05	0.38	0.04	0.18
Μάιος	-0.09	0.29	0.03	0.14
Ιούνιος	-0.22	0.37	0.05	0.16
Ιούλιος	0.05	0.39	0.06	0.17
Σεπτέμβριος	0.01	0.42	0.05	0.16



Πίνακας 5 Τιμές του δείκτη βλάστησης NDVI ανά περίοδο. Στο πίνακα αναφέρονται και οι τιμές "min", δηλαδή η μικρότερη τιμή, "max", δηλαδή η μεγαλύτερη τιμή, "StDev", δηλαδή η τυπική απόκλιση και "Avg", δηλαδή ο μέσος όρος.

Εικόνα 24 Γενική πρόοδος του δείκτη NDRE κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου.

	NDVI			
	min	Max	Stdev	Avg
Απρίλιος	0.12	0.91	0.11	0.68
Μάιος	0.19	0.86	0.11	0.50
Ιούνιος	0.13	0.88	0.15	0.53
Ιούλιος	0.13	0.89	0.16	0.50
Σεπτέμβριος	0.09	0.88	0.13	0.50

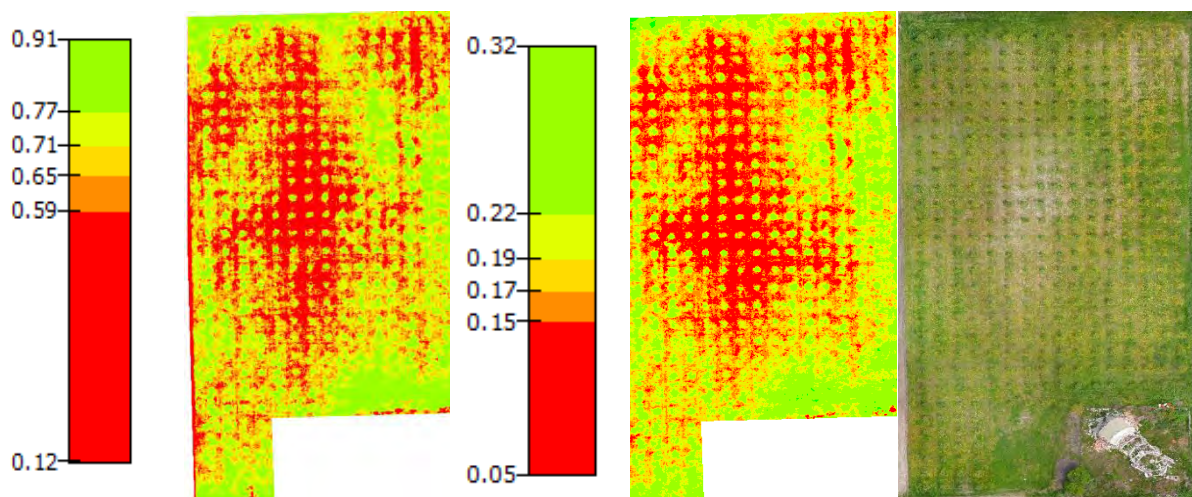


Εικόνα 25 Γενική πρόοδος του δείκτη NDVI κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου.

3.3.1 Ανάλυση περιόδων

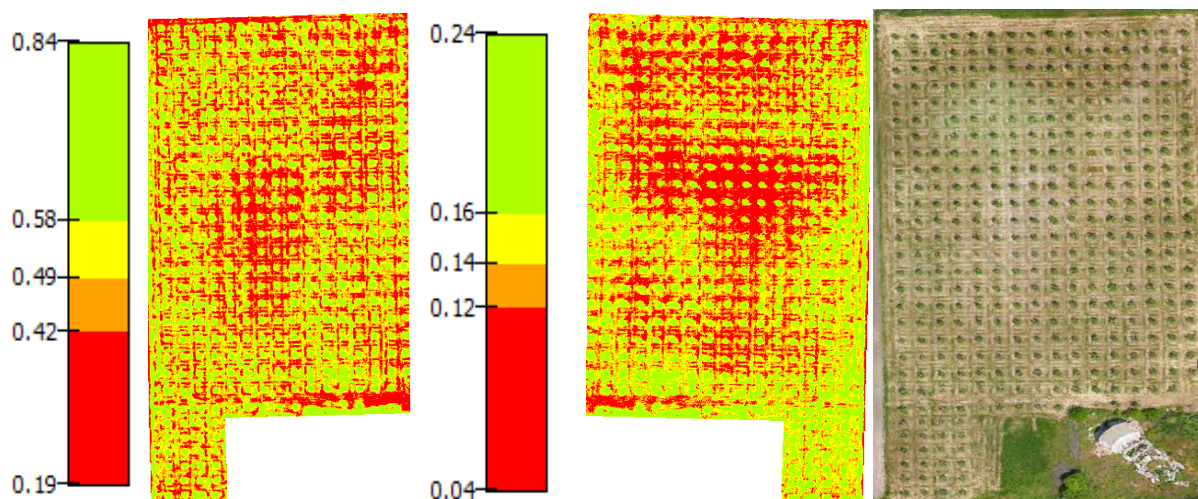
Έχοντας πια θέσει όλες τις επιμέρους παραμέτρους και υπολογίσει τους χάρτες ανακλαστικότητας (Παράρτημα 1) για κάθε περίοδο, είμαστε σε θέση να εξάγουμε αποτελέσματα για την κατάσταση της καλλιέργειας με βάση το χρόνο. Όσο οι τιμές των δεικτών βλάστησης πλησιάζουν το 1, τόσο πιο πράσινο είναι το χρώμα στο χάρτη, ενώ όσο προσεγγίζει το -1, τόσο πιο κόκκινο είναι το χρώμα.

Ξεκινώντας από το μήνα Απρίλιο, παρατηρούμε πως ακόμα τα δένδρα είναι στην αρχή της περιόδου άνθησης, οπότε το φύλλωμα τους μόλις έχει ξεκινήσει να αναπτύσσεται. Η μικρότερη τιμή NDVI είναι μόλις 0.12 και η μεγαλύτερη 0.91 (Πίνακας 5), αντίστοιχα για το δείκτη NDRE έχουμε 0.05 και 0.38. Η μικρότερες τιμές βρίσκονται στους διαδρόμους του χωραφιού που καλύπτεται από χόμα, ενώ οι μεγαλύτερες στο φύλλωμα των δένδρων. Παρατηρείτε πως ο μέσος όρος και για τους δύο δείκτες για το μήνα του Απριλίου είναι δυσανάλογα υψηλοί σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιόδους, καθώς ένα μεγάλο ποσοστό της επιφάνειας του χωραφιού καλύπτεται από χαμηλή βλάστηση (ζιζάνια) (Εικόνα 26). Το πρόβλημα αυτό επηρεάζει ελαφρώς τους υπολογισμούς για τον μήνα του Απριλίου, αλλά με τις κατάλληλες εργασίες καθαρισμού που ακολούθησαν στην συνέχεια, όπως, η χρήση καταστροφέα και μισινέζας, το μεγαλύτερο μέρος της χαμηλής βλάστησης εξαφανίστηκε. Επιπλέον, το μήνα του Απριλίου έγινε και εκκαθάριση των δένδρων από λαίμαργα.



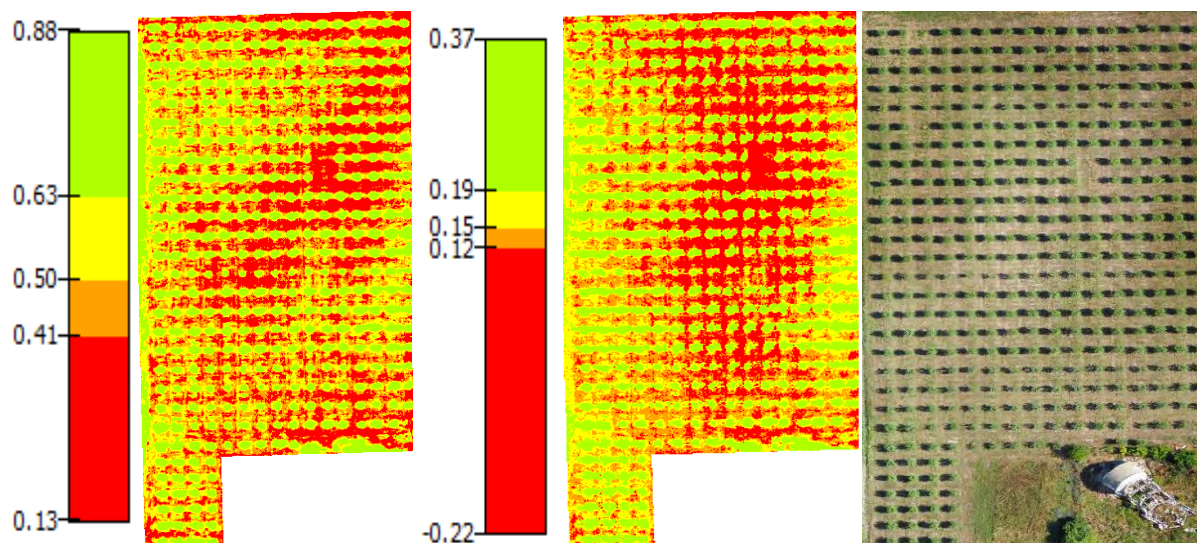
Εικόνα 26 Χάρτες ανακλαστικότητας. (Αριστερά) δείκτης NDVI, (Κέντρο) δείκτης NDRE και (Δεξιά) RGB εικόνα. Ημερομηνία λήψης 22/04/2022.

Με την εκκαθάριση του χωραφιού από τη περιττή βλάστηση, το μήνα Μάιο (Εικόνα 27), ήταν αναμενόμενη η μείωση του μέσου όρου και των δύο δεικτών για τους επόμενους μήνες, κάτι που επιβεβαιώνεται σύμφωνα με τους Πίνακες 4 & 5. Η τιμή του μέσου όρου παραμένει σχεδόν σταθερή για τις επόμενες μετρήσεις με τιμή κοντά στο 0.50, κάτι που υποδεικνύει την σταθερή κατάσταση της υγείας των δένδρων, κατά τη διάρκεια του πειράματος. Με το πέρασμα του χρόνου γίνεται αντιληπτή η ελάχιστη αύξηση της τυπικής απόκλισης και για τους δύο δείκτες βλάστησης. Γεγονός που δικαιολογείται από την έντονη διαφορά μεταξύ του χρώματος (διάδρομοι) και της ανάπτυξης των δένδρων. Παρατηρούμε από τη διαφορά χρώματος, πως και οι δύο δείκτες παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στο σύνολο των δένδρων, χωρίς εμφανή προβλήματα.



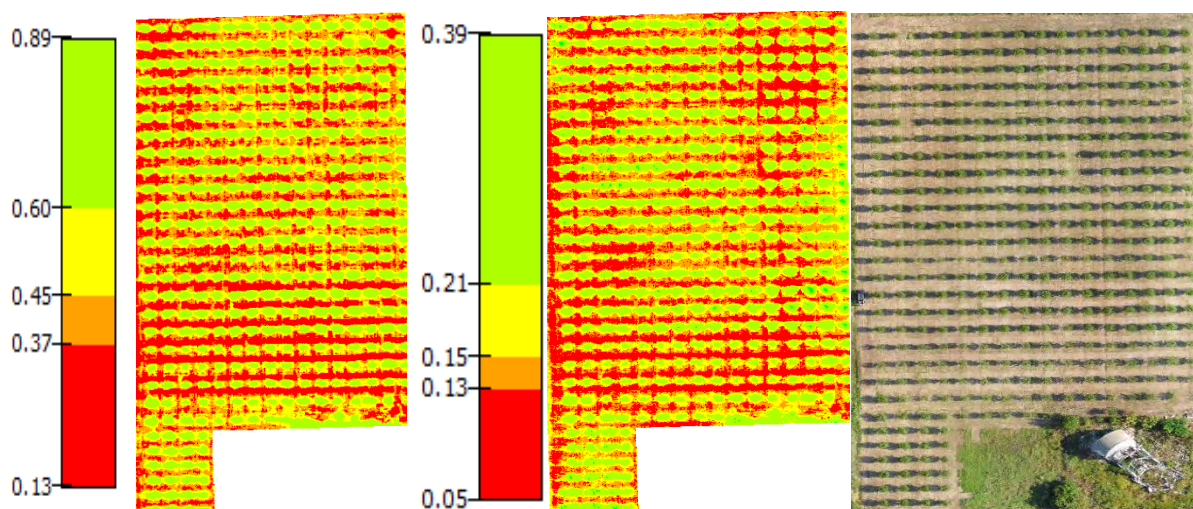
Εικόνα 27 Χάρτες ανακλαστικότητας. (Αριστερά) δείκτης NDVI, (Κέντρο) δείκτης NDRE και (Δεξιά) RGB εικόνα. Ημερομηνία λήψης 15/05/2022.

Κρίνεται σημαντικό να αναφερθεί πως στο τέλος του μήνα Μαΐου, έγινε χρήση λιπασμάτων για την ανάπτυξη της καλλιέργειας και περιορίζει των αρνητικών επιδράσεων σε παράγοντες στρες. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν και μυκητοκτόνα για την αντιμετώπιση μυκητολογικών ασθενειών. Το σκεύασμα που χρησιμοποιήθηκε περιέχει fluxapyroxad, που ανήκει στην ομάδα των καρβοξαμιδικών μυκητοκτόνων και δρα σε βιοχημικό επίπεδο ως παρεμποδιστής της αναπνευστικής αλυσίδας στο σύμπλοκο II (παρεμποδιστής του ενζυμικού συμπλόκου της αφυδρογονάσης του ηλεκτρικού οξέος – SDHI, κατάταξη FRAC C₂). Παρεμποδίζει την βλάστηση των σπορίων, την επιμήκυνση του βλαστικού σωλήνα, την ανάπτυξη του μικκυλίου και τη σποριογένεση. παρεμποδίζει την βλάστηση των σπορίων, την επιμήκυνση του βλαστικού σωλήνα, την ανάπτυξη του μικκυλίου και τη σποριογένεση. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, αναμένουμε την αύξηση ανάπτυξης των δένδρων το προσεχές διάστημα, δηλαδή εντονότερο πράσινο χρώμα στη περιοχή των δένδρων και μεγάλη αντίθεση με το χώμα, στον χάρτη ανακλαστικότητας του Ιουνίου. Γεγονός που επιβεβαιώνεται, καθώς το ανώτερο όριο του δείκτη NDRE έχει αυξηθεί από το 0.24 στο 0.37 και το κατώτατο από 0.16 σε 0.19. Επιπρόσθετα, είναι εμφανής η πτώση του κατώτατου ορίου του δείκτη NDRE κατά 0.22 μονάδες υπό το μηδέν, κάτι που δικαιολογείται και από την χρήση καταστροφέα και μισινέζας το προηγούμενο διάστημα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι τιμές κάτω από το μηδέν, πιθανότατα να παρουσιάζουν μια αυξημένη συγκέντρωση νερού στο έδαφος, έπειτα από μια έντονη βροχή ή περιττό πότισμα. Παρόλα αυτά, η υγεία των δένδρων είναι σταθερή και σε υψηλά επίπεδα, καθώς κάθε δένδρο λαμβάνει τιμές πάνω από 0.6 για το δείκτη NDVI και πάνω από 0.19 για το δείκτη NDRE (Εικόνα 26).



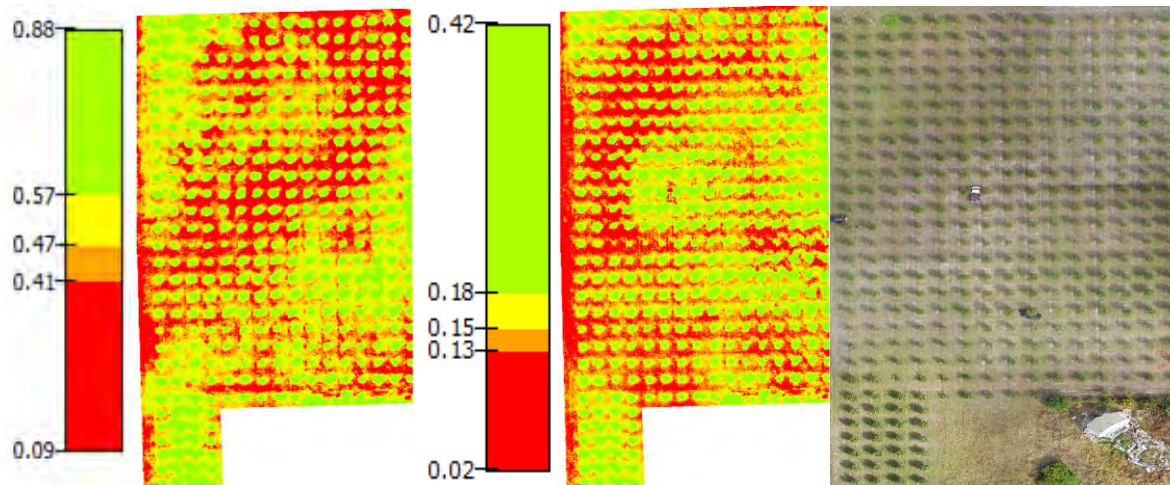
Εικόνα 28 Χάρτες ανακλαστικότητας. Αριστερά δείκτης NDVI και μέση δείκτης NDRE και δεξιά RGB εικόνα. Ημερομηνία λήψης 17/06/2022.

Το μήνα Ιούλιο, τα δένδρα έχουν προσεγγίσει σχεδόν το υψηλότερο σημείο ωρίμανσης τους και το φύλλωμα κάθε δένδρου έχει αναπτυχθεί αρκετά. Όπως βλέπουμε και στους χάρτες ανακλαστικότητας, οι πράσινες περιοχές που καταλαμβάνει το κάθε δένδρο συνεχίζουν να έχουν υψηλές τιμές και στους δύο δείκτες, με τιμές μεγαλύτερες από 0.5 για το δείκτη NDVI και 0.2 για το δείκτη NDRE. Ειδικά για το δείκτη NDRE, παρατηρούμε αξιόλογη αύξηση στο ποσοστό της επιφάνειας που έχει τιμές μεγαλύτερες από 0.2 σε σχέση με το μήνα του Ιουνίου (Εικόνα 29). Αυτό οφείλεται στην χρήση του φάσματος **Red-edged** από το δείκτη NDRE, το οποίο έχει την ιδιότητα να διαπερνάει το φύλλωμα βαθύτερα από το φασμα Red (κόκκινο), που χρησιμοποιεί ο NDVI. Με λίγα λόγια, τα φυλλώματα των δένδρων της καλλιέργειας παρουσιάζουν υγιείς ανάπτυξη και στα κατώτερα επίπεδα τους. Πέρα από την διακύμανση του δείκτη NDRE, ο δείκτης NDVI δεν παρουσιάζει κάποια αξιοσημείωτη διαφορά σε σχέση με τον προηγούμενο μήνα. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με το Πίνακα 4, το μήνα Ιούλιο ο δείκτης NDRE λαμβάνει την υψηλότερη μέση τιμή 0.17, σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες περιόδους.



Εικόνα 29 Χάρτες ανακλαστικότητας. Αριστερά δείκτης NDVI και μέση δείκτης NDRE και δεξιά RGB εικόνα. Ημερομηνία λήψης 22/07/2022.

Κρίνεται σημαντικό να αναφερθεί πως το μήνα του Ιουλίου έγινε η προληπτική χρήση εντομοκτόνων και μυκητοκτόνων, καθώς και υδατοδιαλυτού λιπάσματος. Στην Εικόνα 30 έχουμε τη τελευταία πειραματική μέτρηση της καλλιέργειας αφού είχε πραγματοποιηθεί η συγκομιδή όλων των δένδρων, εκτός από τη ποικιλία Ferraduel. Παρόλο που έχει γίνει η συγκομιδή των καρπών, οι τιμές των δεικτών δεν αλλάζουν δραματικά. Παρατηρώντας τους Πίνακες 4 & 5, ο μήνας του Σεπτεμβρίου έχει τις ίδιες μέγιστες και ελάχιστες τιμές με το προηγούμενο μήνα. Για τους δύο δείκτες η μέση τιμή των χαρτών βλάστησης δεν αλλάζει μεταξύ των μηνών Σεπτεμβρίου-Ιουλίου, κάτι που ισχύει για τις τιμές min, max και τυπική απόκλιση.



Εικόνα 30 Χάρτες ανακλαστικότητας. Αριστερά δείκτης NDVI και μέση δείκτης NDRE και δεξιά RGB εικόνα. Ημερομηνία λήψης 12/09/2022.

Γενικότερα, οι χάρτες ανακλαστικότητας για το μήνα του Σεπτεμβρίου δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη αλλαγή στις μετρικές τους σε σχέση με το μήνα του Ιουλίου. Η ελάχιστη τιμή 0.09 του NDRE μπορεί να υποδεικνύει περιορισμένη ποσότητα χλωροφύλλης. Αν και η μέση τιμή είναι 0.16, υποδεικνύει καλή ποσότητα χλωροφύλλης συνολικά. Οι δείκτες εξακολουθούν να εμφανίζουν θετικά αποτελέσματα, με το δείκτη NDRE να αυξάνει ελάχιστα τη μέγιστη τιμή του από 0.39 σε 0.42 και η πράσινη περιοχή να αυξάνει το ποσοστό της, γεγονός που μπορεί να οφείλεται και στην ανάπτυξη χαμηλής βλάστησης. Οι τιμές του NDVI εμφανίζουν συμπαγή αποτελέσματα, με μια μικρή διακύμανση, υποδεικνύοντας ότι η γενική πράσινη μάζα των φυτών είναι σταθερή.

Συμπερασματικά, η ανάλυση των δεδομένων παρείχε σημαντικές πληροφορίες για την ανάπτυξη των φυτών καθόλη τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου. Οι δείκτες βλάστησης ανέδειξαν την υγιή ανάπτυξη της καλλιέργειας, χωρίς αξιοσημείωτα προβλήματα. Στην αντίθετη περίπτωση που παρατηρούνταν κάποια ανωμαλία στις τιμές των δεικτών, όπως για παράδειγμα η μείωση των τιμών σε συγκεκριμένα σημεία του χωραφιού, ο γεωργός θα είχε τη δυνατότητα να εντοπίσει σύντομα αυτή την ανωμαλία και να πράξει καταλλήλως για την αντιμετώπιση της. Η συγκέντρωση χρήσιμων πληροφοριών που αφορούν την ανάπτυξη των φυτών και η συσχέτιση τους με ενέργειες που έγιναν από το γεωργό, όπως για παράδειγμα η χρήση χημικών σκευασμάτων, συχνότητα και ποσότητα ποτίσματος, ασθενείς κτλ. θα προσφέρει κρίσιμες πληροφορίες για την διαχείριση πιθανών κινδύνων και μείωση των λειτουργικών εξόδων για την επόμενη χρονιά.

4. Συμπεράσματα

Εν κατακλείδι, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στην εφαρμογή τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας, εκμεταλλευόμενη τις δυνατότητες που προσφέρουν τα Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (ΜΕΑ) και οι πολυφασματικές κάμερες (Multispectral cameras). Η συλλογή υψηλής ανάλυσης δεδομένων, όπως εικόνες, παρείχαν σημαντικές πληροφορίες για τη παρακολούθηση της υγείας των φυτών. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφηκε ένα μεγάλο δείγμα εικόνων για τους μήνες Απρίλιο έως Σεπτέμβριο, με στόχο την ανάλυση τους για την εξαγωγή αποτελεσμάτων που αφορούν την ανάπτυξη τους. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν συγκεκριμένοι δείκτες βλάστησης που κρίθηκαν καταλληλότεροι για την ερμηνεία του παρόντος πειράματος. Οι δείκτες βλάστησης που αξιοποιήθηκαν ήταν οι NDVI και NDRE. Έχοντας κατανείμει το δείγμα εικόνων καθόλη τη περίοδο της ανθοφορίας έως την συγκομιδή, ήμασταν σε θέση με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού να αναλύσουμε τη κατάσταση των δένδρων αμυγδαλιάς. Η συστηματική παρακολούθηση των δεικτών βλάστησης, επέτρεψε την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων υγείας, προσφέροντας τη δυνατότητα άμεσης αντίδρασης στο γεωργό. Τα προβλήματα αυτά μπορεί να είναι ασθένειες, έλλειψη θρεπτικών συστατικών, κατάσταση εδάφους, κτλ. Βασιζόμενοι στα εξαχθέντα δεδομένα από την ανάλυση των πολυφασματικών εικόνων και έπειτα από την εκτενή ανάλυση τους, αναδείχθηκε η υγιής ανάπτυξη της καλλιέργειας κατά τη περίοδο καταγραφής των πειραμάτων.

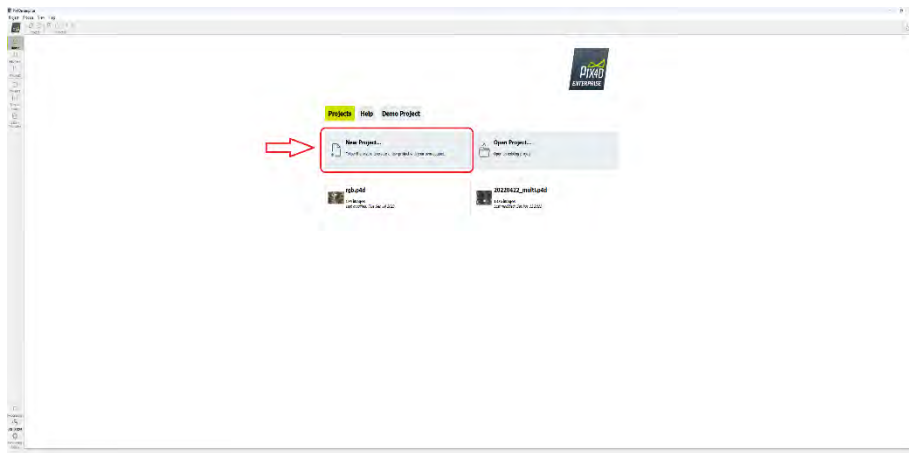
Οι πληροφορίες αυτές, με τη πάροδο του χρόνου είναι πιθανό να βοηθήσουν στην πραγματοποίηση προληπτικών ενεργειών για την αποφυγή ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων στη καλλιέργεια, καθώς και στην αύξηση της παραγωγής. Ο καλλιεργητής μπορεί να λάβει έγκαιρες αποφάσεις για τη χρήση φυτοφαρμάκων για τη πρόληψη ασθενειών και λιπασμάτων για την αποτελεσματικότερη ανάπτυξη των φυτών. Επιπλέον, με την περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί μία φιλική προς το περιβάλλον διαχείριση του χωραφιού, μειώνοντας τη χρήση των χημικών σκευασμάτων, όπως για παράδειγμα λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων κτ.λ, καθώς και περιττών ποτισμάτων, οδηγώντας έτσι σε υψηλότερα επίπεδα βιωσιμότητας για το μέλλον.

Επιπρόσθετα, τα δεδομένα της διεξαχθείσας έρευνα θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε τεχνολογίες αιχμής, όπως η μηχανική μάθηση, προκειμένου να ενισχυθεί περαιτέρω η απόδοση της καλλιέργειας.

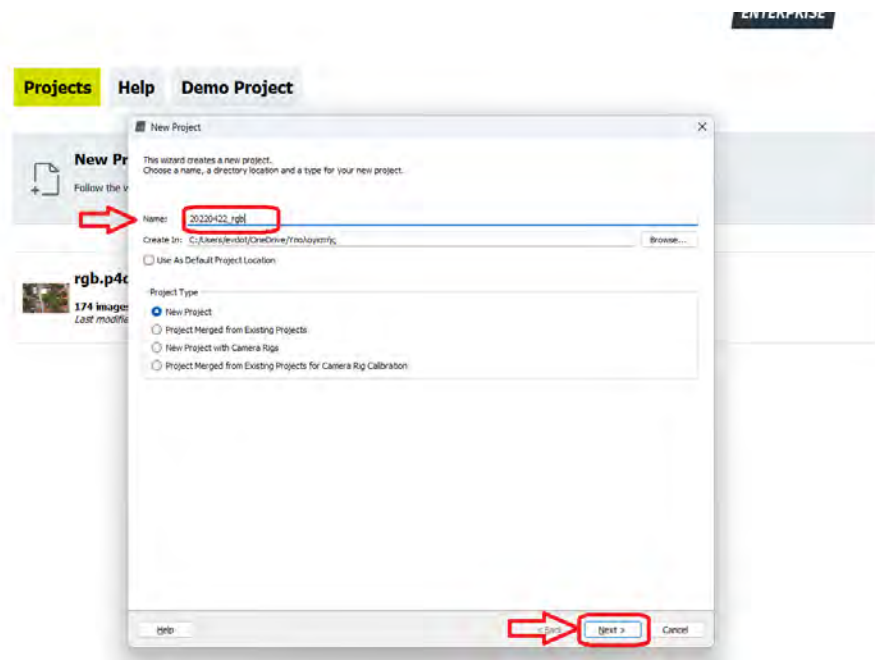
Επιπλέον, η χρήση ενός ΜΕΑ (Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος) με πολυφασματικές κάμερες εξαλείφει το χρονοβόρο κόστος της επί τόπου επιθεώρησης. Οι ακριβείς μετρήσεις που παρέχονται στις διάφορες φάσεις της καλλιέργειας επιτρέπουν στον γεωργό να λαμβάνει στρατηγικές αποφάσεις για το χωράφι του. Παρόλο που η χρήση πολυφασματικών καμερών και των ΜΕΑ στη γεωργία ακριβείας φαίνεται υποσχόμενη, υπάρχουν προκλήσεις όπως η διαχείριση των μεγάλων όγκων δεδομένων και η ανάγκη για εκπαίδευση των γεωργών για την αποτελεσματική χρήση αυτών των τεχνολογιών. Με την πρόοδο της τεχνολογίας και την περαιτέρω έρευνα, αναμένεται ότι αυτές οι μέθοδοι θα συνεχίσουν να συμβάλλουν στην εξέλιξη της γεωργίας ακριβείας για μια βιώσιμη γεωργική παραγωγή.

Παράρτημα 1

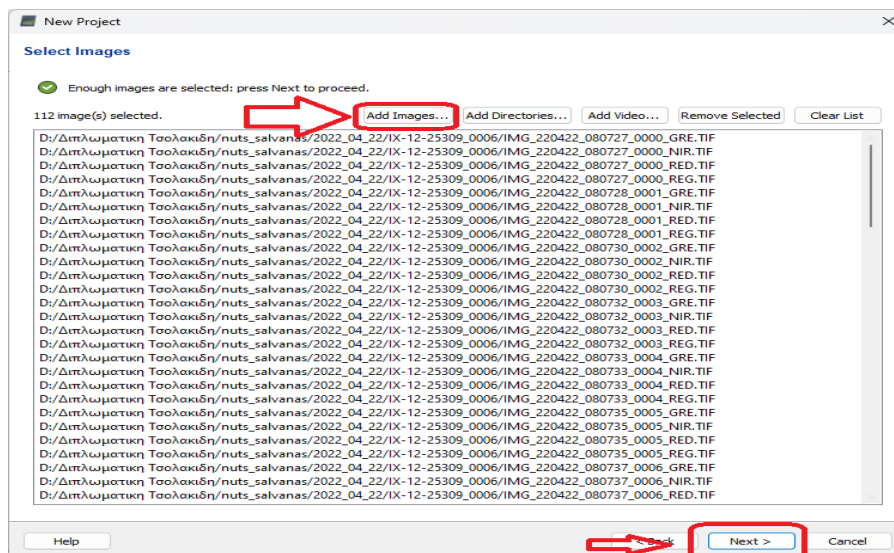
Για τη δημιουργία των χαρτών ανακλαστικότητας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Pix4D. Αρχικά, έγινε ανοίγουμε το λογισμικό Pix4D και δημιουργούμε ένα καινούργιο project.



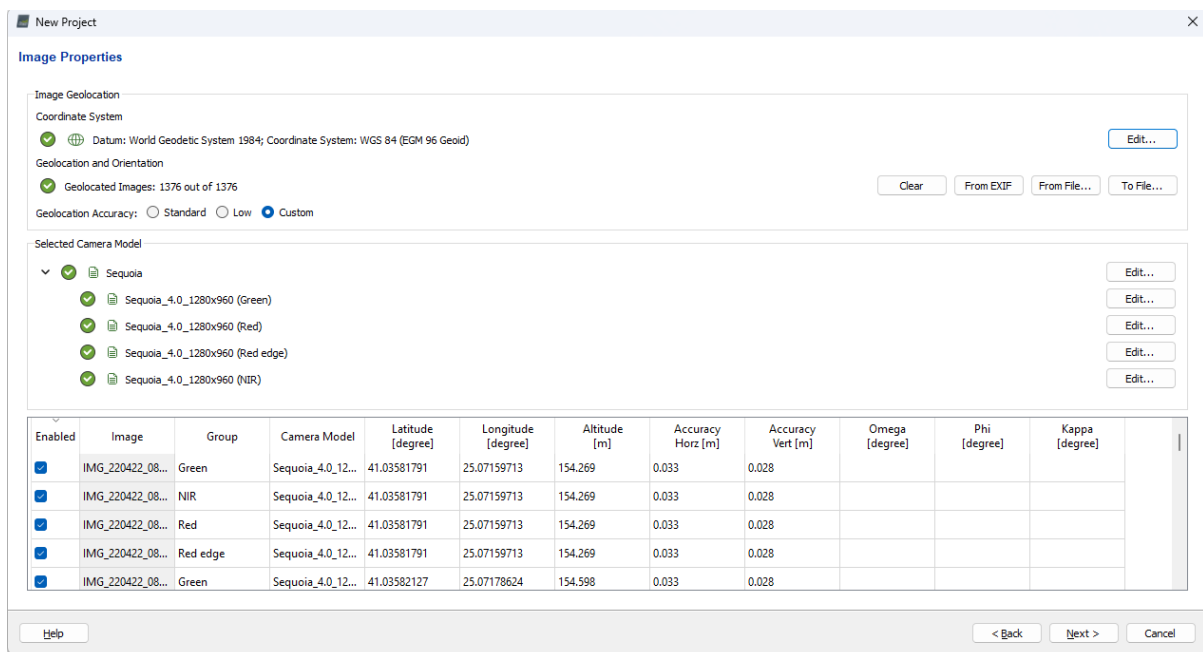
Στη συνέχεια πρέπει να επιλέξουμε τις εικόνες που έχουμε καταγράψει και δημιουργούμε ένα καινούργιο φάκελο, με όνομα την ημερομηνία λήψης των φωτογραφιών. Σε κάθε φάκελο δημιουργούμε έχουμε ένα project για τις RGB εικόνες και ένα project για τις πολυφασματικές εικόνες. Αφού καταχωρήσουμε το κατάλληλο όνομα, πατάμε Next.



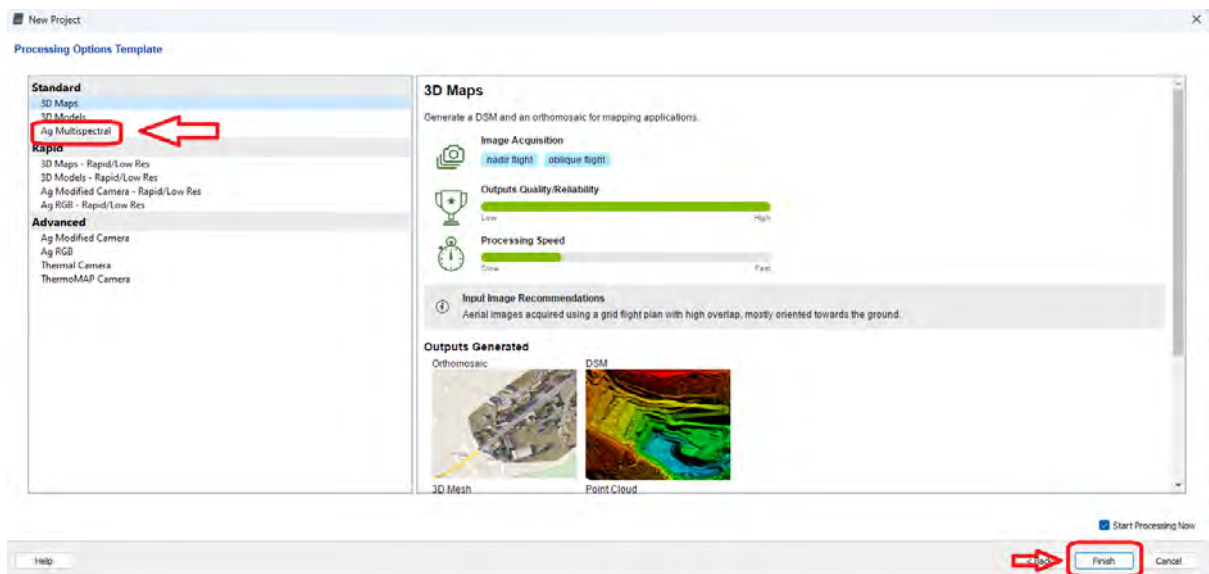
Εφόσον έχουμε δημιουργήσει το project, στο επόμενο βήμα εισάγουμε τις εικόνες που επιθυμούμε για ανάλυση πατώντας το **Add Images**



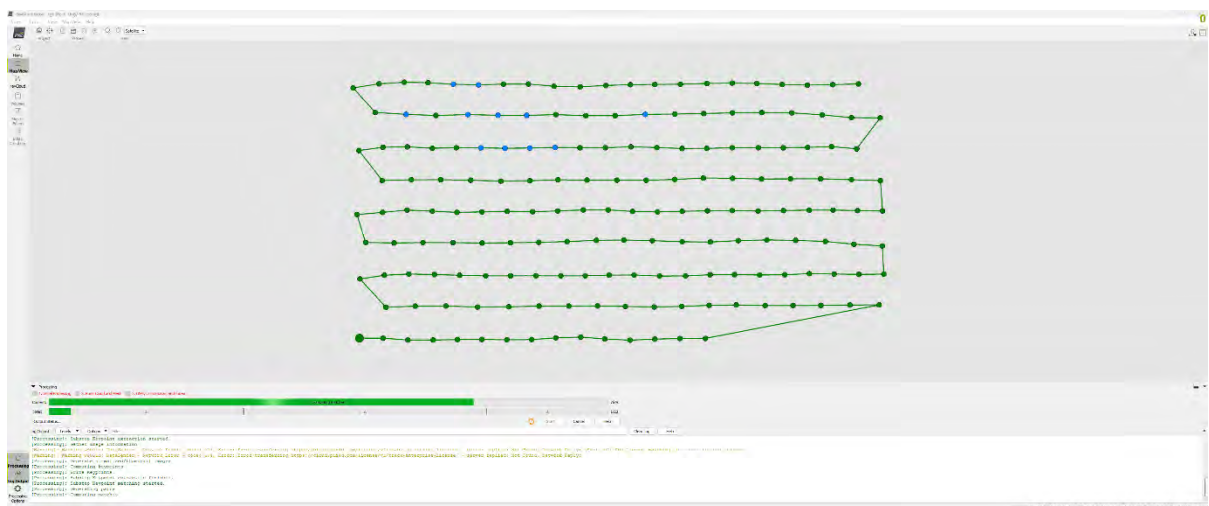
Εφόσον επιλεγθεί σωστά ο φάκελος με τις εικόνες, πατάμε **Next**. Συνεχίζοντας παρατηρούμε πως, μαζί με τις εικόνες κατά την πτήση, η κάθε εικόνα συνδέεται με διάφορα στοιχεία, όπως για παράδειγμα, το ύψος της πτήσης (Altitude), το γεωγραφικό μήκος και πλάτος (Longitude, Latitude), το μοντέλο της κάμερας, κ.τ.λ.



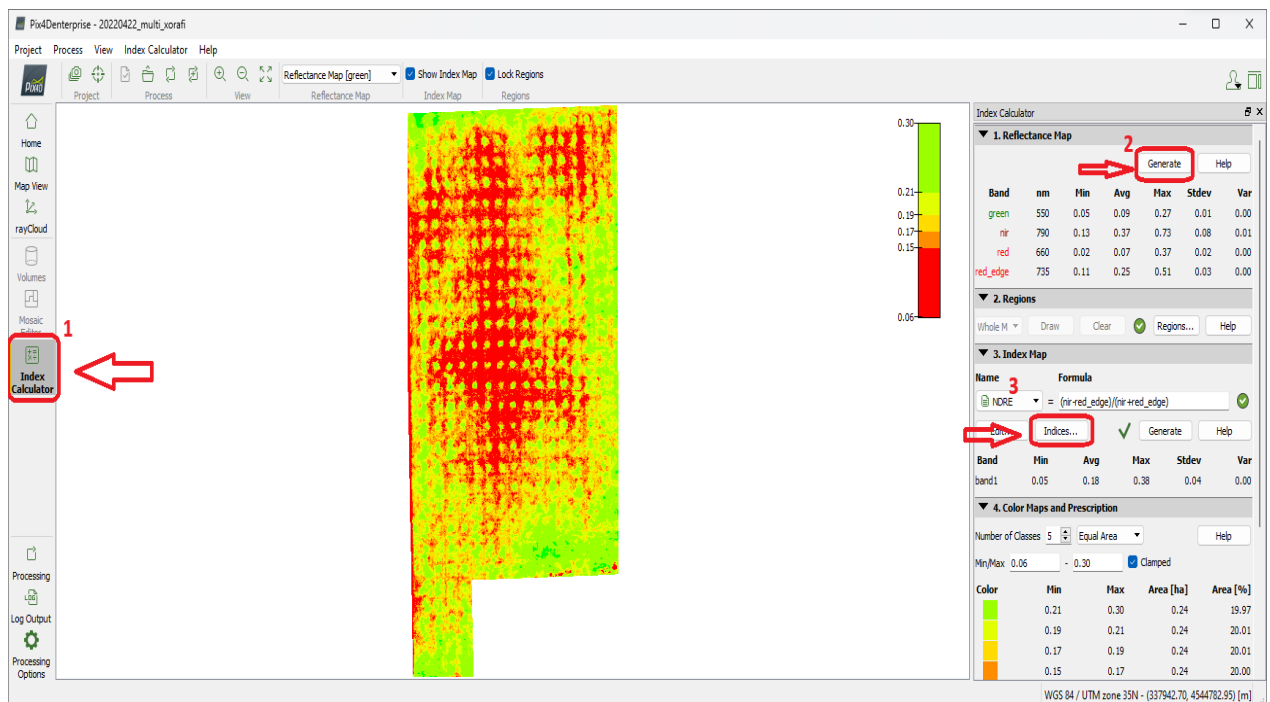
Συνεχίζουμε πατώντας το κουμπί **Next** και χωρίς να αλλάξουμε κάποια άλλη επιλογή καταλήγουμε στο παράθυρο επιλογής του τύπου επεξεργασίας (Processing Options Template), όπου και επιλέγουμε το **AG Multispectral** και πατάμε **Finish**.



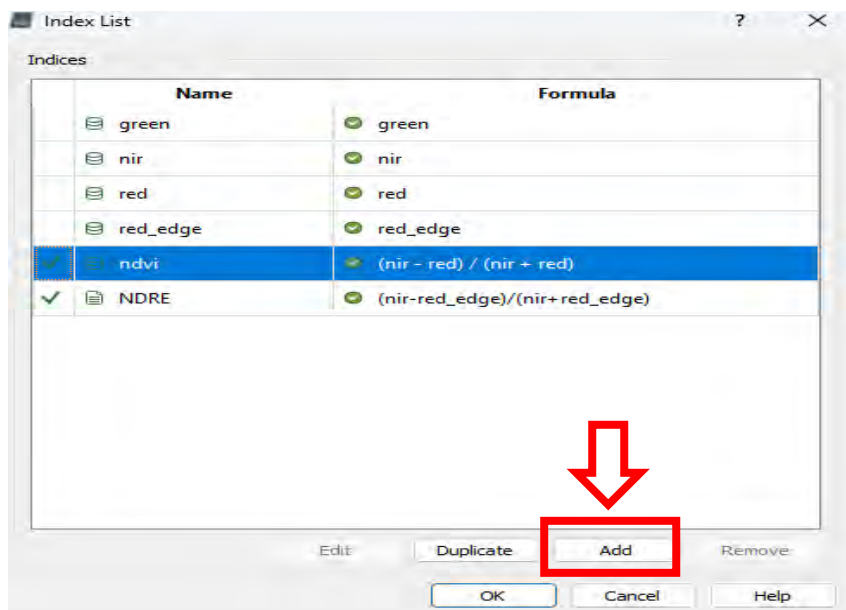
Έχοντας ολοκληρώσει την προαναφερθείσα διαδικασία, το λογισμικό Pix4D θα ξεκινήσει τη διαδικασία δημιουργίας των εξής : 1) Τρισδιάστατο χάρτη, 2) Ορθομωσικό, 3) Pointcloud, 4) χάρτη ανακλαστικότητας. Η παραπάνω διαδικασία θα διαρκέσει για αρκετή ώρα και το λογισμικό θα καταλάβει το μεγαλύτερο μέρος της επεξεργαστικής ισχύς του υπολογιστή.



Με το πέρας της παραπάνω διαδικασίας λαμβάνουμε σαν αποτέλεσμα πλήθος πληροφοριών για την πτήση, τη σύσταση και γεωμετρία του εδάφους, αλλά πιο συγκεκριμένα, το κομμάτι που μας απασχολεί είναι οι χάρτες ανακλαστικότητας. Έτσι, επιλέγουμε από το παράθυρο το κουμπί **Index Calculator**, έπειτα στα δεξιά στο παράθυρο **Reflectance Map** επιλέγουμε το **Generate** και για να εισάγουμε τους δείκτες βλάστησης επιλέγουμε στο παράθυρο **Index Map** το κουμπί **Indices**.



Μας εμφανίζεται ένα καινούργιο παράθυρο στο οποίο πατώντας το κουμπί **add** μπορούμε να προσθέσουμε το δείκτη βλάστησης που επιθυμούμε.



Έτσι, έχοντας πατήσει το κουμπί **add** για τη προσθήκη του δείκτη βλάστησης, ανοίγει ένα καινούργιο παράθυρο, στο οποίο και θα εισάγουμε την εξίσωση που απαιτείται. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ανάλογα με τη κάμερα που χρησιμοποιούμε, μπορούμε και να αξιοποιήσουμε τα διαθέσιμα φάσματα φωτός. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχουμε τη καταχώρηση του δείκτη NDRE. Οπότε, στο παράθυρο **Formula** εισάγουμε την εξίσωση του NDRE, επιλέγοντας τα φάσματα **nir** και **red_edge** με τις κατάλληλες πράξεις, και στο τέλος πατάμε **OK**.

Index Map - NDRE

Reflectance Map Band Selection

Band	nm	Min	Avg	Max	Stdev	Var
green	550	0.03	0.10	0.51	0.02	0.00
nir	790	0.07	0.35	0.96	0.12	0.01
red	660	0.03	0.11	0.50	0.03	0.00
red_edge	735	0.06	0.25	0.59	0.07	0.00

Operations

Formula

$$(nir - red_edge) / (nir + red_edge)$$

Valid Formula

Τέλος, έχοντας εισάγει την επιθυμητή εξίσωση, δίχως να εμφανιστεί κάποιο σφάλμα κατά την εισαγωγή, επανερχόμαστε στην αρχική σελίδα και στο παράθυρο **Index Map**, επιλέγουμε το κουμπί **Generate**, έτσι ώστε το λογισμικό να υπολογίσει τις τιμές του δείκτη που εισάγουμε.

Βιβλιογραφία

- [1] Gebbers, Robin, and Viacheslav I. Adamchuk. "Precision agriculture and food security." *Science* 327.5967 (2010): 828-831.
- [2] C. B. Barrett, E. C. Lentz, in *International Studies Compendium Project*, R. A. Denmark et al., Eds. (Wiley-Blackwell, Oxford, 2010)
- [3] Webb, P., Coates, J., Frongillo, E. A., Rogers, B. L., Swindale, A., & Bilinsky, P. (2006). Measuring household food insecurity: why it's so important and yet so difficult to do. *The Journal of nutrition*, 136(5), 1404S-1408S.
- [4] Barrett, C. B. (2002). Food security and food assistance programs. *Handbook of agricultural economics*, 2, 2103-2190.
- [5] Dasgupta, P. (1997). Nutritional status, the capacity for work, and poverty traps. *Journal of Econometrics*, 77(1), 5-37.
- [6] Fogel, R. W. (2004). *The escape from hunger and premature death, 1700-2100: Europe, America, and the Third World (Vol. 38)*. Cambridge University Press.
- [7] Maxwell, D. G. (1996). Measuring food insecurity: the frequency and severity of "coping strategies". *Food policy*, 21(3), 291-303.
- [8] Arimond, M., & Ruel, M. T. (2004). Dietary diversity is associated with child nutritional status: evidence from 11 demographic and health surveys. *The Journal of nutrition*, 134(10), 2579-2585.
- [10] Yang, G., Liu, J., Zhao, C., Li, Z., Huang, Y., Yu, H., ... & Yang, H. (2017). Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives. *Frontiers in plant science*, 8, 1111.
- [11] Zhao, T., Niu, H., de la Rosa, E., Doll, D., Wang, D., & Chen, Y. (2018). Tree canopy differentiation using instance-aware semantic segmentation. In *2018 ASABE Annual International Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- [12] Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349.
- [13] Hassan, S. I., Alam, M. M., Illahi, U., Al Ghamdi, M. A., Almotiri, S. H., & Su'ud, M. M. (2021). A systematic review on monitoring and advanced control strategies in smart agriculture. *Ieee Access*, 9, 32517-32548.
- [14] Wikipedia contributors. (2023). *History of unmanned aerial vehicles*. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=History_of_unmanned_aerial_vehicles&oldid=1160764900 [Πρόσβαση 16 Ιουνίου 2023].

- [15] Ελληνική Δημοκρατία, Υπουργείο Υποδομών & Μεταφορών. (2023, Ιούλιος 16) *UAS-FRSS: Unmanned Aircraft Systems - Flight Regulation Support System* [Διαδίκτυο] Διαθέσιμο στο: <https://uas.hcaa.gr/Faq#anchor1> [Πρόσβαση 16 Ιουνίου 2023]
- [16] Delavarpour, N., Koparan, C., Nowatzki, J., Bajwa, S., & Sun, X. (2021). A technical study on UAV characteristics for precision agriculture applications and associated practical challenges. *Remote Sensing*, 13(6), 1204.
- [17] Xue, X., Lan, Y., Sun, Z., Chang, C., & Hoffmann, W. C. (2016). Develop an unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system. *Computers and electronics in agriculture*, 128, 58-66.
- [18] Ji-Hua, M., & Bing-Fang, W. (2008). Study on the crop condition monitoring methods with remote sensing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B8), 945-950.
- [19] Diker, K., Heermann, D. F., & Brodahl, M. K. (2004). Frequency analysis of yield for delineating yield response zones. *Precision Agriculture*, 5(5), 435-444.
- [20] Zaman-Allah, M., Vergara, O., Araus, J. L., Tarekegne, A., Magorokosho, C., Zarco-Tejada, P. J., ... & Cairns, J. (2015). Unmanned aerial platform-based multi-spectral imaging for field phenotyping of maize. *Plant methods*, 11(1), 1-10.
- [21] Krishna, K. R. (2018). *Agricultural drones: a peaceful pursuit*. CRC Press.
- [22] Al-Saddik, H., Simon, J. C., & Cointault, F. (2017). Development of spectral disease indices for 'Flavescence Dorée' grapevine disease identification. *Sensors*, 17(12), 2772.
- [23] López-López, M., Calderón, R., González-Dugo, V., Zarco-Tejada, P. J., & Fereres, E. (2016). Early detection and quantification of almond red leaf blotch using high-resolution hyperspectral and thermal imagery. *Remote Sensing*, 8(4), 276.
- [24] Chartzoulakis, K., & Bertaki, M. (2015). Sustainable water management in agriculture under climate change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 88-98.
- [25] Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349.
- [26] Park, S., Ryu, D., Fuentes, S., Chung, H., Hernández-Montes, E., & O'Connell, M. (2017). Adaptive estimation of crop water stress in nectarine and peach orchards using high-resolution imagery from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 9(8), 828.
- [27] Hafeez, A., Husain, M. A., Singh, S. P., Chauhan, A., Khan, M. T., Kumar, N., ... & Soni, S. K. (2022). Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: A review. *Information processing in Agriculture*.
- [28] Liu, C., Sun, P. S., & Liu, S. R. (2016). A review of plant spectral reflectance response to water physiological changes. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40(1), 80.
- [29] Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision agriculture*, 13, 693-712.

- [30] Bin Abdul Rahim, H. R., Bin Lokman, M. Q., Harun, S. W., Hornyak, G. L., Sterckx, K., Mohammed, W. S., & Dutta, J. (2016). Applied light-side coupling with optimized spiral-patterned zinc oxide nanorod coatings for multiple optical channel alcohol vapor sensing. *Journal of Nanophotonics*, 10(3), 036009-036009.
- [31] Arkebauer, T. J. (2005). Leaf radiative properties and the leaf energy budget. *Micrometeorology in Agricultural Systems*, 47, 93-103.
- [32] Batten, G. D. (1998). Plant analysis using near infrared reflectance spectroscopy: the potential and the limitations. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38(7), 697-706.
- [33] Honkavaara, E., Saari, H., Kaivosoja, J., Pölönen, I., Hakala, T., Litkey, P., ... & Pesonen, L. (2013). Processing and assessment of spectrometric, stereoscopic imagery collected using a lightweight UAV spectral camera for precision agriculture. *Remote Sensing*, 5(10), 5006-5039.
- [34] Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R. T., Anderson, M., Imhoff, M. L., Gutman, G. G., ... & Goldberg, A. (2010). Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *Journal of climate*, 23(3), 618-633.
- [35] Zhang, B., Wu, D., Zhang, L., Jiao, Q., & Li, Q. (2012). Application of hyperspectral remote sensing for environment monitoring in mining areas. *Environmental Earth Sciences*, 65, 649-658.
- [36] Torres-Sánchez, J., de Castro, A. I., Pena, J. M., Jiménez-Brenes, F. M., Arquero, O., Lovera, M., & López-Granados, F. (2018). Mapping the 3D structure of almond trees using UAV acquired photogrammetric point clouds and object-based image analysis. *Biosystems engineering*, 176, 172-184.
- [37] Wang, D., Cao, W., Zhang, F., Li, Z., Xu, S., & Wu, X. (2022). A review of deep learning in multiscale agricultural sensing. *Remote Sensing*, 14(3), 559.
- [38] Gao, L., Wang, X., Johnson, B. A., Tian, Q., Wang, Y., Verrelst, J., ... & Gu, X. (2020). Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 364-377.
- [39] Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50(4), 663-666.
- [40] Quan, Z., Xianfeng, Z., & Miao, J. (2011). Eco-environment variable estimation from remote sensed data and eco-environment assessment: models and system. *Acta Botanica Sinica*, 47, 1073-1080.
- [41] Richardson, A. J., & Wiegand, C. L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 43(12), 1541-1552.
- [42] Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309.

- [43] Kaufman, Y. J., & Tanre, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 261-270.
- [44] Osborn, L. (2023). NDVI vs. NDRE: What's the Difference? Διαθέσιμο στο: <https://sentera.com/resources/articles/ndvi-vs-ndre-whats-the-difference/>. [Πρόσβαση 18 Ιουλίου 2023].
- [45] Boiarskii, B., & Hasegawa, H. (2019). Comparison of NDVI and NDRE indices to detect differences in vegetation and chlorophyll content. *J. Mech. Contin. Math. Sci*, 4, 20-29.
- [46] “Professional Photogrammetry and Drone Mapping Software.” Διαθέσιμο στο: <https://www.pix4d.com/>. [Πρόσβαση 19 Ιουλίου].
- [47] *eBee X mapping drone - Drones* (2023) *AgEagle Aerial Systems Inc.* Διαθέσιμο στο: <https://ageagle.com/drones/eb-e-x/> (Πρόσβαση 9 Οκτωβρίου 2023).
- [48] *Duet M - Sensors* (2022) *AgEagle Aerial Systems Inc.* Διαθέσιμο στο: <https://ageagle.com/drone-sensors/duet-m/> (Πρόσβαση 9 Οκτωβρίου 2023).
- [49] ΑΜΥΓΔΑΛΙΑ. (2006) Διαθέσιμο στο: <https://www.aua.gr/roussos/Roussos/pdf/Printing%20Lessons/EFP6/Almond%20vF%202019.pdf> (Πρόσβαση 14 Οκτωβρίου 2023).
- [50] Ποικιλίες αμυγδαλιάς. Διαθέσιμο στο: <https://fytorio-olympos.gr/poikilies-amygdalia> (Πρόσβαση 14 Οκτωβρίου 2023).
- [51] Ποικιλίες αμυγδαλιάς GAIApedia. Διαθέσιμο στο: http://www.gaiapedia.gr/gaiapedia/index.php/%CE%A0%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CE%B9%CE%BB%CE%AF%CE%B5%CF%82_%CE%B1%CE%BC%CF%85%CE%B3%CE%B4%CE%B1%CE%BB%CE%B9%CE%AC%CF%82 (Πρόσβαση 14 Οκτωβρίου 2023).
- [52] Vargas, F., Romero, M., Clavé, J., Vergés, J., Santos, J., & Batlle, I. (2008). ‘Vayro’, ‘Marinada’, ‘Constanti’, and ‘Tarraco’ almonds. *HortScience*, 43(2), 535-537.
- [53] Zhang, P., Zhang, W., Sun, HT. et al. Effects of Spray Parameters on the Effective Spray Width of Single-Rotor Drone in Sugarcane Plant Protection. *Sugar Tech* 23, 308–315 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00890-3>.
- [54] <https://www.kathimerini.gr/society/562041304/drone-archytas-oi-dynatotites-kai-oi-kainotomies-toy-prototy-ellinikoy-uav/>