



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΚΑΤΣΙΚΗΣ Ν. ΙΩΑΝΝΗΣ

**ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ UAV
ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΚΡΙΘΑΡΙΟΥ**

Επιβλέπων

Καλύβας Διονύσιος, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ 2020

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΚΑΤΣΙΚΗΣ Ν. ΙΩΑΝΝΗΣ

**ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ UAV
ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΚΡΙΘΑΡΙΟΥ**

**REMOTE SENSING DATA FROM UAV PLATFORM AND
SPATIAL ANALYSIS FOR THE OBSERVATION AND
EVALUATION OF BARLEY EXPERIMENTAL PLOTS**

Επιβλέπων

Καλύβας Διονύσιος, Καθηγητής

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Καλύβας Διονύσιος, Καθηγητής Γ.Π.Α.

Οικονόμου Γαρυφαλλιά Καθηγήτρια Γ.Π.Α.

Ψωμιάδης Εμμανουήλ Ε.Δι.Π. Γ.Π.Α.

Περίληψη

Το κριθάρι αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα φυτά μεγάλης καλλιέργειας στη χώρα μας αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο. Η πρόβλεψη της απόδοσής του είναι πολύ σημαντική και γι' αυτό το λόγο είναι σημαντική και η παρακολούθησή του σε όλα τα στάδια ανάπτυξης. Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η παρακολούθηση της ανάπτυξης, της απόδοσης και της κατάστασης υγείας του κριθαριού. Χρησιμοποιήθηκαν δείκτες βλάστησης και δημιουργήθηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης της ανάπτυξης για τη συγκεκριμένη ποικιλία κριθαριού. Πραγματοποιήθηκε επίσης η διερεύνηση των διαφορών μεταξύ των διαφορετικών τύπων ζιζανιοκτόνων που χρησιμοποιήθηκαν και των πυκνοτήτων σποράς. Τα παραπάνω επιτεύχθηκαν με χρήση νέων τεχνολογιών και συγκεκριμένα Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων και Τηλεπισκόπησης, μέσω του μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος (UAV) Matrice 100 της DJI, που ήταν εξοπλισμένο με τον πολυφασματικό αισθητήρα Parrot Sequoia. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν 40 πειραματικά τεμάχια κριθαριού ποικιλίας Planet η οποία, χαρακτηρίζεται από υψηλές αποδόσεις και ποιότητα καρπού, στο κτήμα Γιαλού Σπάτων του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Τα τεμάχια αυτά φυτεύτηκαν σε 2 διαφορετικές πυκνότητες σποράς, 14 και 20kg/στρ. και δέχτηκαν μεταχειρίσεις με προφυτρωτικά και μεταφυτρωτικά ζιζανιοκτόνα. Τέλος, πραγματοποιήθηκε σπορά ζιζανίων του γένους *Iolium* (γένος γρασιδιού) με σκοπό τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των ζιζανιοκτόνων. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 7 πτήσεις, σε υψόμετρο 20m και οι φωτογραφίες που ελήφθησαν, επεξεργάστηκαν με τα λογισμικά Pix4D και ArcGIS. Συγκεκριμένα έγινε συνδυασμός των εικόνων που ελήφθησαν από το UAV σε ορθομωσαϊκά και στη συνέχεια κατασκευάστηκαν χάρτες των δεικτών βλάστησης. Τέλος, έγινε χωρική στατιστική ανάλυση σε περιβάλλον GIS και συσχέτιση των δεδομένων απόδοσης των συγκεκριμένων τεμαχίων με τους δείκτες βλάστησης, στα στατιστικά πακέτα IBM SPSS και Statgraphics.

Λέξεις - Κλειδιά: Ανάπτυξη Κριθαριού, Δείκτες Βλάστησης, Χωρική Ανάλυση, UAV, Πολυφασματικοί αισθητήρες

Abstract

Barley is one of the most widely grown plants in Greece. Its performance is very important and thus it is important to monitor it during several growth stages. The aim of this study was to monitor the development, yield and health of barley, using vegetation indices and to create a growth prediction model for the Planet variety. The above was achieved through the use of new technologies, namely Geographic Information Systems and Remote Sensing through an Unmanned Aerial Vehicle (UAV), in particular the DJI Matrice 100 model, with the Parrot Sequoia multispectral sensor. More specifically, 40 experimental plots of barley were studied in the Yalos Spata Estate of the Agricultural University of Athens. Characteristics of the Planet variety are the high yield and good crop quality. These pieces were planted at two different seed densities of 14 and 20 kg / str. and treated with pre-emergence and post-emergence herbicides. In addition weeds of the genus *lolium* were also added to investigate the effectiveness of herbicides. Altogether seven flights were taken place at 20m altitude and the photographs taken were processed with the Pix4D and ArcMap software. More specifically the images taken with the UAV were combined into orthomosaics and then vegetation indices were extracted. Finally, spatial statistical analysis was made in ArcGIS and the yield data of the particular plots were correlated with the vegetation indices in IBM SPSS and Statgraphics.

Key words: Barley Growth, Vegetation Indices, Spatial Analysis, UAV, Multispectral Sensors

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στην ερευνητική μονάδα Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Φυσικοί Πόροι, Γεωπεριβάλλον και Γεωργική Μηχανική» και κατεύθυνση Γεωπληροφορική και Χωρική Ανάλυση του τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής.

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο καθηγητή κ. Καλύβα Διονύσιο τόσο για την ανάθεση αυτού του πολύ ενδιαφέροντος θέματος όσο και για τη διαρκή βοήθειά του στα εκάστοτε προβλήματα που ανέκυπταν σε όλα τα στάδια της εκπόνησής της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Οικονόμου Γαρυφαλλιά και τον κ. Ψωμιάδη Εμμανουήλ για τις πολύτιμες παρατηρήσεις τους.

Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα το Δρ. Βαχαμίδα Πέτρο για τη βοήθειά του σε ορισμένα σημεία της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους φίλους μου και τους συναδέλφους μου που μου συμπαραστάθηκαν στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο της ζωής μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract.....	4
1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	9
1.1.1 Γεωργικές Τεχνολογίες.....	9
1.1.2 Η καλλιέργεια του κριθαριού.....	26
1.1.3 Παρακολούθηση του Κριθαριού μέσω Τηλεπισκόπησης.	35
1.2 Αντικείμενα και στόχοι της εργασίας.....	35
1.3 Περιοχή μελέτης.....	36
2. Υλικά και Μέθοδοι.....	39
2.1 Εξοπλισμός πεδίου	39
2.1.1 UAV	39
2.1.2 Πολυφασματικός αισθητήρας.....	40
2.2 Λογισμικά Επεξεργασίας.....	41
2.2.1 Φωτογραμμετρική Επεξεργασία	41
2.2.2 Χωρική Επεξεργασία	44
2.3 Δεδομένα και μεθοδολογία	46
2.3.1 Δεδομένα.....	46
2.3.2 Μεθοδολογία	48
2.3.3 Στατιστική Επεξεργασία	52
2.4 Διάγραμμα ροής της εργασίας	54
3. Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	55
3.1 Χάρτες NDVI	55
3.2 Μονομεταβλητές Στατιστικές Αναλύσεις.....	63
3.3 Πολυμεταβλητές Στατιστικές Αναλύσεις.....	67

3.3.1 Πολλαπλή Ανάλυση Διακύμανσης (MANOVA)	67
3.3.2 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (PCA)	71
3.4 Δείκτες Βλάστησης ανά Στάδιο Ανάπτυξης	74
3.5 Διαχρονικοί Δείκτες Βλάστησης.....	77
3.6 Μοντέλα Πρόβλεψης.....	80
4. Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	86
Βιβλιογραφία	87
Παράρτημα	92

Αφιερώνω την εργασία αυτή στους γονείς μου, Νικόλαο και Μαρία...

1. Εισαγωγή

1.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.1.1 Γεωργικές Τεχνολογίες

Γεωγραφικό Πληροφοριακό Σύστημα ονομάζεται ένα δυναμικό σύνολο εργαλείων για τη συλλογή, αποθήκευση, επανάκτηση, μετασχηματισμό και απόδοση χωρικών δεδομένων του περιβάλλοντος, για την ικανοποίηση ενός συνόλου εξειδικευμένων απαιτήσεων (Burrough, 1986). Τα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα – Γ.Π.Σ. (Geographical Information Systems – G.I.S.) αποτελούν ένα ολοκληρωμένο, σύγχρονο, αλλά και πολυδιάστατο εργαλείο που προέρχεται και συσχετίζεται άμεσα με το χώρο της πληροφορικής. Παρέχουν στον χρήστη τη δυνατότητα να διαχειρίζεται και να συνδυάζει εισερχόμενες πληροφορίες, παράγοντας αποτελέσματα σε μορφή χαρτών και πινάκων. Οι χάρτες, που ονομάζονται θεματικοί χάρτες (thematic maps), παρουσιάζουν την κατανομή στο χώρο οποιουδήποτε παράγοντα για τον οποίο υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία (π.χ. υψομέτρου, απόδοσης, θρεπτικών στοιχείων, εδαφικής υγρασίας, κ.λπ.) και είναι προϊόντα διαδικασιών ολοκλήρωσης ενός περιορισμένου αριθμού γνωστών τιμών.

Χωρική Ανάλυση

Η χωρική ανάλυση (spatial analysis) αποτελεί ένα διακριτό τομέα βασικής και εφαρμοσμένης έρευνας όπου κατά την ανάλυση των δεδομένων λαμβάνεται υπόψη η χωρική πληροφορία των δεδομένων αυτών. Είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) και τη Γεωπληροφορική, αφού κατά την ανάλυση δεδομένων λαμβάνεται υπόψη η χωρική πληροφορία των δεδομένων αυτών. Η χωρική ανάλυση ως τμήμα της ποσοτικής γεωγραφίας χρησιμοποιεί την επιστημονική μέθοδο για τη μελέτη των χωρικών φαινομένων με στόχο την καλύτερη κατανόησή τους. Σύμφωνα με τους Fotheringham *et al.* (2000) η ποσοτική γεωγραφία περιλαμβάνει μία ή περισσότερες από τις παρακάτω δραστηριότητες: την ανάλυση αριθμητικών χωρικών δεδομένων, την ανάπτυξη χωρικής θεωρίας και τον ορισμό και έλεγχο μαθηματικών μοντέλων χωρικών διεργασιών. Στις περισσότερες μελέτες με μεθόδους ποσοτικής γεωγραφίας το

ζητούμενο είναι η μεγιστοποίηση της γνώσης για μια χωρική διεργασία με όσο το δυνατό λιγότερο σφάλμα. Σύμφωνα με τον Unwin (1981), χωρική ανάλυση είναι η μελέτη της κατανομής των σημείων, γραμμών, περιοχών και επιφανειών ενός χάρτη, με απλά λόγια η επιστήμη που βγάζει νόημα από τα χωρικά στοιχεία ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών. Οι Bailey and Gatrell (1995) ορίζουν τη χωρική ανάλυση ως την ποσοτική ανάλυση/μελέτη των χωρικών φαινομένων που βρίσκονται στο γεωγραφικό χώρο. Η ανάλυση χωρικών δεδομένων αφορά τις καταστάσεις στις οποίες είναι διαθέσιμα δεδομένα παρατήρησης για κάποιο φαινόμενο που συμβαίνει στο γεωγραφικό χώρο και εξετάζει μοντέλα, μεθόδους και τεχνικές για να περιγράψει ή να ερμηνεύσει τη συμπεριφορά αυτού του φαινομένου και της πιθανής του σχέσης με άλλα χωρικά φαινόμενα (Johnston *et al.*, 2000, Fischer and Wang, 2011).

Γεωργία Ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας (Precision Agriculture) αποτελεί ένα σύστημα παραγωγής αγροτικών προϊόντων που στηρίζεται στη διαχείριση των εισροών σε ένα αγρό σύμφωνα με τις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας τόσο χωρικά, όσο και χρονικά. Με την βοήθεια των νέων τεχνολογιών υπάρχει η δυνατότητα αναγνώρισης των αναγκών της καλλιέργειας στο χωρικό, αλλά και χρονικό φάσμα και στη συνεχεία ανάπτυξη συστημάτων μεταβλητών για τις εισροές που θα χρειαστούν (Εικ. 1.3.1.) Άρχισε να εφαρμόζεται στις αρχές της δεκαετίας του 1990 με πρωτοπόρους χώρες όπως οι ΗΠΑ, η Μ. Βρετανία και άλλες. Οι πρώτες εφαρμογές ήταν σε σιτηρά με χαρτογράφηση της παραγωγής και, ήδη, στο τέλος της δεκαετίας οι εφαρμογές επεκτάθηκαν στις περισσότερες μεγάλες καλλιέργειες και άρχισαν εφαρμογές και σε καλλιέργειες όπως το αμπέλι. Η εφαρμογή της Γεωργίας Ακριβείας άρχισε σχετικά αργά στην Ελλάδα, όπως και σε πολλές χώρες της Νότιας Ευρώπης. Η καθυστέρηση αυτή αποδόθηκε στις επικρατούσες συνθήκες στην Ελλάδα, αλλά και γενικότερα στον Ευρωπαϊκό Νότο που χαρακτηρίζονται (Gemtos *et al.*, 2003):

1. Από μικρές γεωργικές εκμεταλλεύσεις.
2. Από γεωργούς με χαμηλό μορφωτικό επίπεδο.

3. Από γεωργούς προσκολλημένους σε παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής.
4. Από γεωργούς προσκολλημένους σε επιδοτήσεις των προϊόντων.
5. Για τις καλλιέργειες του Ευρωπαϊκού Νότου, κυρίως για τα φρούτα και λαχανικά, δεν υπάρχει αναπτυγμένη τεχνολογία εφαρμογής των μεθόδων γεωργίας ακριβείας.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην γεωργία ακριβείας διαχειρίζονται τις καλλιέργειες χωρίζοντάς τις σε μικρότερες περιοχές, που παρουσιάζουν μια σχετική ομοιομορφία. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις υπόλοιπες συμβατικές μεθόδους αγροτικής παραγωγής σύμφωνα με τις οποίες, οι εισροές παρέχονται ενιαία στον αγρό, υποθέτοντας ότι υπάρχει μια αποδεκτή ομοιογένεια όσον αφορά τα καλλιεργήσιμα φυτά, τους πληθυσμούς ζιζανίων και εντόμων, καθώς και τις ιδιότητες, αλλά και τη γονιμότητα του εδάφους. Με τη γεωργία ακριβείας διαχειρίζεται αποτελεσματικότερα η τοπική παραλλακτικότητα ενός αγρού με στόχο:

1. Την αύξηση της απόδοσης της παραγωγής.
2. Τη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων.
3. Την ορθολογική και αποτελεσματικότερη χρήση των χημικών εισροών.
4. Τη μείωση κατανάλωσης ενέργειας.
5. Την προστασία του εδάφους και των υπογείων υδάτων.

Παγκόσμια Συστήματα Εντοπισμού Θέσης

Τα Παγκόσμια Συστήματα Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning Systems – G.P.S.) είναι συστήματα, που καθιστούν δυνατό τον εντοπισμό και την καταγραφή της θέσης οποιουδήποτε σημείου επάνω στην επιφάνεια της υδρογείου. Αποτελούνται από ειδικούς δορυφόρους σε τροχιά γύρω από τη Γη, οι οποίοι στέλνουν διαρκώς ραδιοσήματα στην επιφάνειά της. Τα σήματα αυτά λαμβάνονται από ειδικά όργανα, τους ραδιολήπτες (radio-receivers), τα οποία υπολογίζουν το γεωγραφικό στίγμα και το υψόμετρο της θέσης τους, καθώς και το χρόνο (Καρυδάς και Συλλαίος, 2000).

Συστήματα Μεταβλητών Εφαρμογών

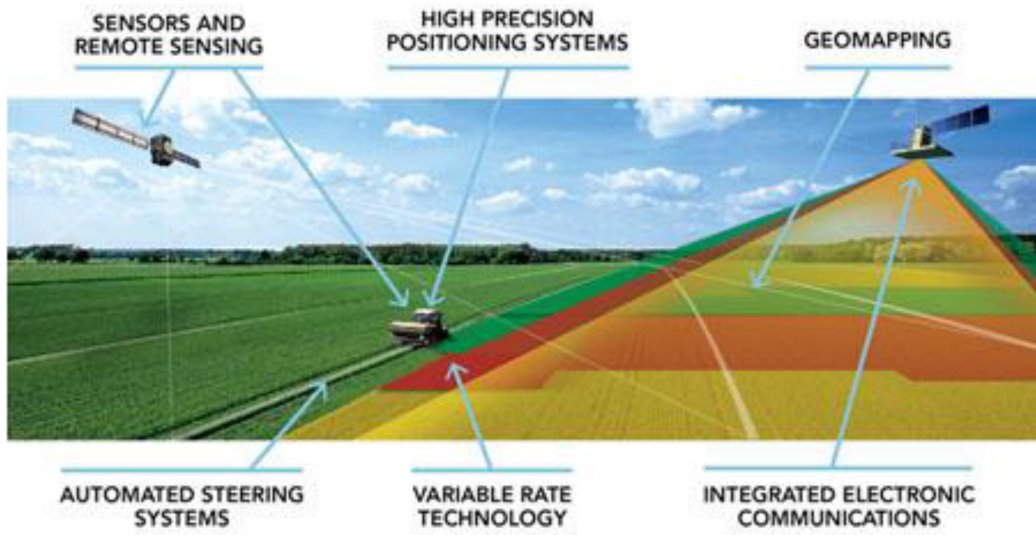
Τα Συστήματα Μεταβλητών Εφαρμογών (Variable Rate Application Technology – V.R.A. ή V.R.T.) είναι συστήματα γεωργικής μηχανικής, που μεταβάλλουν την ποσότητα εφαρμογής των εισροών (σπόρων, λιπασμάτων, νερού, φαρμάκων, κ.λπ.) ή και αλλάζουν το εφαρμοζόμενο είδος (π.χ. την ποικιλία του σπόρου, ή το είδος του λιπάσματος) την ίδια στιγμή που εφαρμόζουν τις εισροές αυτές, αναλόγως με το σημείο του αγροτεμαχίου στο οποίο βρίσκονται.

Συστήματα Παρακολούθησης Αποδόσεων

Τα Συστήματα Παρακολούθησης Αποδόσεων (Yield Monitoring Systems) είναι συστήματα που μετρούν και καταγράφουν τις αποδόσεις των καλλιεργειών κατά τη συγκομιδή. Τα υλικά μετρούνται, είτε ποσοτικά, είτε ποιοτικά (π.χ. ποσότητα συγκομιζόμενων κόκκων ενός σιτηρού, είτε περιεχόμενη υγρασία στους κόκκους, αντίστοιχα) και για τις μετρήσεις αυτές έχουν επινοηθεί διάφορα συστήματα, όπως του ποτενσιόμετρου, το ραδιομετρικό, το σύστημα φόρτισης κελιού, το ογκομετρικό, κ.ά. Οι μετρήσεις καταγράφονται σε πίνακες μαζί με τις τιμές των αντίστοιχων χωρικών συντεταγμένων, που λαμβάνονται την ίδια στιγμή από G.P.S., ώστε με αυτόν τον τρόπο οι στοιχειώδεις αποδόσεις συνδέονται με τη θέση. Μέσω των Γ.Π.Σ., οι παραπάνω πίνακες μετατρέπονται σε χάρτες αποδόσεων (yield maps)

Μετρήσεις στο Πεδίο

Οι μετρήσεις στο πεδίο είναι μετρήσεις των χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων των καλλιεργειών ή του εδάφους με δειγματοληψία και γίνονται, είτε με αναλύσεις στο εργαστήριο, είτε με αισθητήρες. Οι αναλύσεις στο Εργαστήριο γίνονται σε δύο βήματα (λήψη δειγμάτων - ανάλυση), ενώ οι Αισθητήρες είναι όργανα αυτόματης δειγματοληψίας και ταχείας μέτρησης (επί τόπου, σε ένα μόνο βήμα).



Εικόνα 1.1. Εφαρμογές της Γεωργίας Ακριβείας.

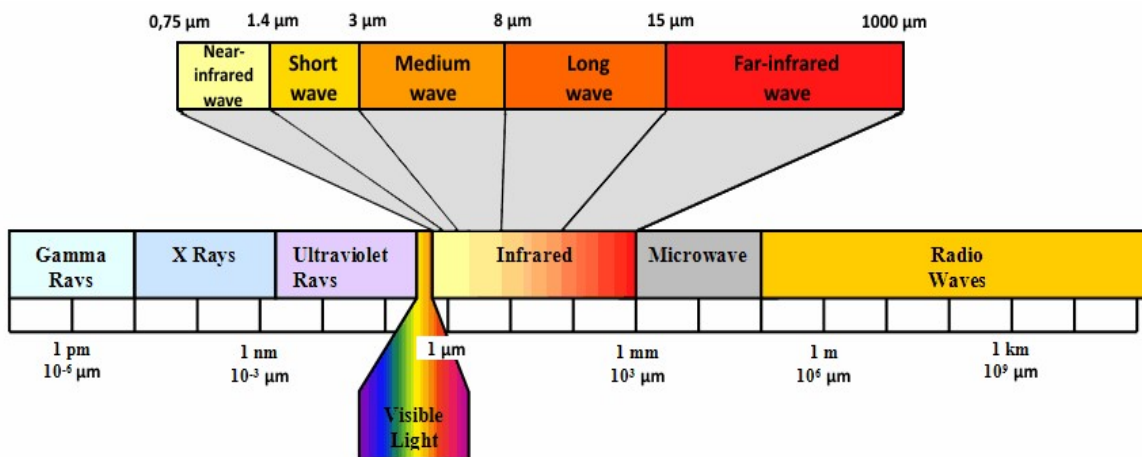
Τηλεπισκόπηση

Η λέξη τηλεπισκόπηση συντίθεται από το αρχαίο επίρρημα «τηλέ» (= από μακριά), ως πρώτο συνθετικό της, και το ρήμα «επισκοπέω-ώ», που σημαίνει εξετάζω, βλέπω από ψηλά, επιθεωρώ. Τηλεπισκόπηση, επομένως, σημαίνει αντίληψη αντικειμένων ή φαινομένων από απόσταση. Ορίζεται ως η επιστήμη της συλλογής, ανάλυσης και ερμηνείας της πληροφορίας γύρω από έναν στόχο για την αναγνώριση και μέτρηση των ιδιοτήτων του, εξετάζοντας τις αλληλεπιδράσεις του με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, χωρίς στην πραγματικότητα ο ερευνητής να έρθει σε απευθείας επαφή με αυτόν (Μέρτικας, 1999).

Η τηλεπισκόπηση περιλαμβάνει τρία τμήματα: τους στόχους που συνιστούν τα υπό μελέτη αντικείμενα ή τα φαινόμενα μιας περιοχής, τη συλλογή δεδομένων με τη χρήση ορισμένων οργάνων και την ανάλυση και ερμηνεία των δεδομένων. Ο ορισμός της τηλεπισκόπησης είναι πολύ ευρύς. Παραδείγματα μετρήσεων τηλεπισκόπησης περιλαμβάνουν τη συμβατική φωτογραφία, την αεροφωτογραφία, τη λήψη εικόνων με Radar, τις μετρήσεις βαρύτητας, κ.λπ. Στην πράξη όμως, οι μελέτες τηλεπισκόπησης περιορίζονται μόνο σε συστήματα απεικονίσεων ή εικόνων, όπως αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες. Έτσι, λοιπόν, ένα τμήμα της τηλεπισκόπησης είναι η απόκτηση ψηφιακών δεδομένων και πληροφοριών στην ανακλώμενη, θερμική και μικροκυματική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (ΗΜΦ). Οι μετρήσεις του ΗΜΦ γίνονται συνήθως μέσω δορυφόρων, αεροσκαφών, εδαφικών και εναέριων συστημάτων (π.χ ραντάρ, Unmanned Aerial Vehicles) και γενικότερα σε απόσταση από τον στόχο. Οι εικόνες μπορούν να υποστούν επεξεργασία μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών με τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών, για την εξαγωγή πληροφοριών, ανάλογα με το αντικείμενο της εφαρμογής (γεωπονία, μετεωρολογία, γεωλογία κλπ.). Κάθε εικόνα αποτελείται από εικονοστοιχεία, τα οποία συνεισφέρουν με μετρήσεις σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος του ΗΜΦ, με συγκεκριμένη χωρική διακριτική ικανότητα για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η φασματική διακριτική ικανότητα, το εύρος, καθώς και τα χωρικά και χρονικά χαρακτηριστικά (χωρική και χρονική διακριτική ικανότητα) παίζουν σημαντικό ρόλο στον χαρακτηρισμό και την επιλογή των εικόνων. Το φασματικό εύρος περιγράφει τις περιοχές του ΗΜΦ που

χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της πληροφορίας π.χ. χρησιμοποιείται μόνο το ορατό φάσμα ή το εύρος επεκτείνεται και στο θερμικό. Η φασματική διακριτική ικανότητα αναφέρεται στον αριθμό των περιοχών (bands) σε ένα συγκεκριμένο ή μη τμήμα του ΗΜΦ, π.χ. οι πολυφασματικοί αισθητήρες χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη φασματική διακριτική ικανότητα από τα όργανα ευρείας περιοχής φάσματος. Το χωρικό εύρος είναι η περιοχή η οποία καλύπτεται από την εικόνα. Η χωρική διακριτική ικανότητα αναφέρεται στο μέγεθος των εικονοστοιχείων (pixel) από τα οποία αποτελείται η εικόνα. Το χρονικό εύρος είναι η περίοδος καταγραφής των δεδομένων. Η χρονική διακριτική ικανότητα αναφέρεται στη συχνότητα επανάληψης λήψεως δεδομένων από τον δορυφόρο και για μερικές εφαρμογές στη διαθεσιμότητα λήψεως δεδομένων, που δεν υπόκεινται σε περιορισμούς από νεφοκάλυψη. Το εύρος και η διακριτική ικανότητα των τηλεπισκοπικών δεδομένων, καθώς και άλλων πηγών δεδομένων, όπως επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα, είναι ανάγκη να είναι απολύτως κατανοητά για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παρακολούθηση και χαρτογράφηση της επίγεια βλάστησης και της κατάστασης αυτής. Η τηλεπισκόπηση της επιφάνειας του εδάφους λαμβάνει χώρα σε μήκη κύματος του ΗΜΦ στα οποία το φως μπορεί να διαπεράσει την ατμόσφαιρα χωρίς ιδιαίτερες αλληλεπιδράσεις. Αυτές οι περιοχές του ΗΜΦ ονομάζονται ατμοσφαιρικά παράθυρα και αναφέρονται στο φασματικό εύρος, στο οποίο η ακτινοβολία που καταγράφεται από τα τηλεπισκοπικά όργανα περιέχει πληροφορίες για την επιφάνεια της γης. Αυτά τα ατμοσφαιρικά παράθυρα ορίζονται από τα συστατικά της γήινης ατμόσφαιρας.

Υπάρχουν κάποια αέρια που σε συγκεκριμένα μήκη κύματος απορροφούν όλη την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, απαγορεύοντας τη χρήση αυτών των περιοχών στην τηλεπισκόπηση. Οι περιοχές του ΗΜΦ, περιγράφονται συνοπτικά στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1. Περιοχές του ΗΜΦ.

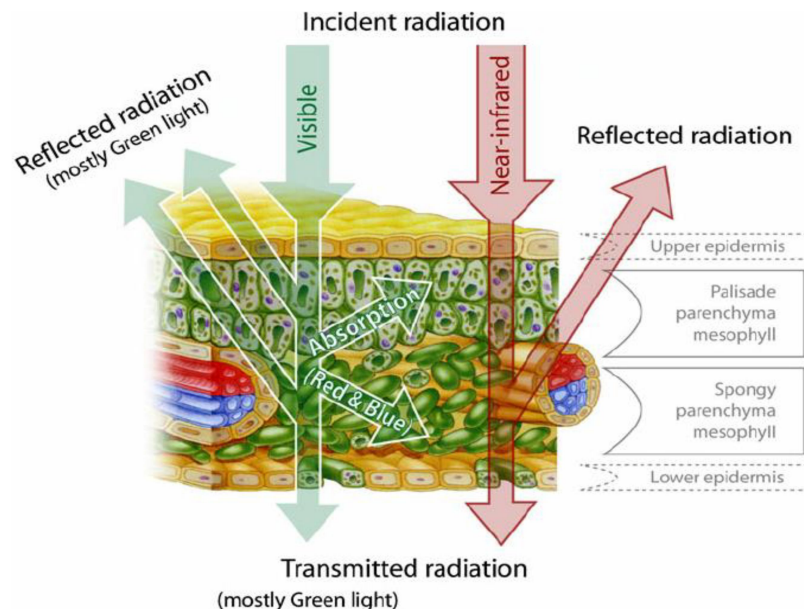
Δείκτες Βλάστησης

Η ανακλώμενη περιοχή του ΗΜΦ κυμαίνεται από τα 0,4 έως 3,75 μm και υποδιαιρείται στο ορατό (0,4 - 0,7 μm), στο εγγύς υπέρυθρο (NIR, 0,7 - 1,4 μm) στο υπέρυθρο χαμηλού μήκους (SWIR, 1,4 - 3 μm) και μέρος του υπέρυθρου μέσου μήκους (MWIR, 3 - 8 μm). Η ορατή περιοχή του ΗΜΦ είναι αυτή την οποία αισθάνεται το ανθρώπινο μάτι με αποτέλεσμα την ικανότητα της όρασης. Οι διαφορετικές ανακλαστικές ιδιότητες των υλικών και επιφανειών έχουν ως αποτέλεσμα τον διαχωρισμό των χρωμάτων στο ορατό φάσμα του ΗΜΦ. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των φύλλων και του φωτός που προσκρούει σε αυτά είναι ένας καθοριστικός παράγοντας της διαφορετικής απόκρισης στην ερυθρή και στην κοντινή υπέρυθη περιοχή του ανακλώμενου φωτός. Η χρωστική χλωροφύλλη που περιέχεται στα φύλλα, παρουσιάζει τη μέγιστη απορρόφηση στην ερυθρή περιοχή του ορατού φάσματος. Στην περιοχή του εγγύως υπέρυθρου η ακτινοβολία ανακλάται ισχυρά από τον μεσοκυττάριο χώρο του φύλλου με αποτέλεσμα την αύξηση των ραδιομετρικών τιμών (Σχήμα 1.1). Έτσι, πολλοί αισθητήρες δορυφόρων είναι σχεδιασμένοι να καταγράφουν το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τη βλάστηση (π.χ. Landsat TM και NOAA/AVHRR). Χρησιμοποιώντας την πληροφορία στην ορατή και εγγύς υπέρυθη περιοχή του ΗΜΦ μπορούν να προκύψουν δείκτες βλάστησης που έχουν αποδειχθεί σημαντικό εργαλείο στην μελέτη της κατάστασης της βλάστησης από τις

αρχές της δεκαετίας του '70 (Tarpley *et al.*, 1984). Σε σχέση με τη βλάστηση η ανακλώμενη περιοχή του ΗΜΦ χρησιμοποιείται μεταξύ των άλλων για:

1. Τον προσδιορισμό της τρέχουσας κατάστασης της βλάστησης (McVicar – Jupp, 1998).
2. Τη χαρτογράφηση των εδαφικών επιφανειών με τη χρήση δυο κύριων χαρακτηριστικών της βλάστησης: της εδαφικής φυτοκάλυψης και των φαινολογικών σταδίων της ανάπτυξης των φυτών (McVicar – Jupp, 1998).
3. Τη χαρτογράφηση της επανασύστασης των φυσικών πόρων (π.χ. δάση), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πρόβλεψη πυρκαγιών κατά τη διάρκεια περιόδων ξηρασίας (Chladil and Nunez, 1995, Illera *et al.*, 1996).

Προηγούμενες έρευνες απέδειξαν ότι υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ της παρουσίας του φυλλώματος, συμπεριλαμβάνοντας μετρήσεις του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI = Leaf Area Index) (Tucker, 1979), της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το φυτό (Sellers, 1985) και δεικτών βλάστησης, όπως ο απλός λόγος εγγύως υπέρυθρου - ερυθρού και ο δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index) (Tian *et al.*, 1989).



Εικόνα 1.2. Εγκάρσια τομή φύλλου και απεικόνιση της ανάκλασης και απορρόφησης της ακτινοβολίας στον μεσοκυττάριο χώρο (Solomon *et al.*, 2005).

Το ποσοστό φυτοκάλυψης είναι μία από τις συνιστώσες που ορίζουν την ισχύ του σήματος στην ανακλώμενη περιοχή του ΗΜΦ. Υπάρχουν, όμως, και άλλοι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την τελική τιμή του εικονοστοιχείου. Σε αυτούς περιλαμβάνεται και η γεωμετρία των θέσεων ήλιου - στόχου - αισθητήρα. Αυτός ο παράγοντας ελέγχει την συνεισφορά του ποσοστού σκίασης στο σήμα. Η σκίαση μπορεί να είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του ηλίου με την τοπογραφία και το ανάγλυφο της περιοχής και να επηρεάζεται από τις σκιάσεις που προκαλεί η βλάστηση. Αυτή η επίδραση, που ορίζεται από την συνάρτηση κατανομής της ανακλαστικότητας διπλής κατεύθυνσης (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) (Deering, 1989, Burgess and Pairman, 1997), είναι χαρακτηριστικό της δομής της βλάστησης. Άλλοι παράγοντες, που επηρεάζουν την ισχύ του σήματος στην ανακλώμενη περιοχή του ΗΜΦ, είναι οι μεταβολές στο χρώμα του εδάφους, στο σήμα παρατήρησης σε σχέση με τις μεταβολές της ατμοσφαιρικής συνιστώσας του σήματος, εμπεριέχοντας σε αυτές και τα ατμοσφαιρικά υδάτινα κατακρημνίσματα (Choudhury and DiGirolamo, 1995, Hobbs, 1997), καθώς και οι μεταβολές στην απόκριση του αισθητήρα με την πάροδο του χρόνου. Υπάρχουν πολλοί τρόποι και μέθοδοι με τους οποίους μπορεί η τηλεπισκόπηση να συνεισφέρει στη χαρτογράφηση των χρήσεων γης με απώτερο σκοπό την αναγνώριση και την παρακολούθηση του φαινομένου της ξηρασίας. Σε αυτές περιλαμβάνονται η χαρτογράφηση των τύπων βλάστησης και η παρακολούθηση της κατάστασης της βλάστησης (Kogan, 1990, Samarasinghe, 2003).

Φυσιολογικές διεργασίες του φυτού και προσπίπτουσα ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία (0,4 – 2,5 μm) που διεισδύει στο φύλλο ενός φυτού, υπόκειται σε ανάκλαση, διάθλαση και απορρόφηση. Η ανάκλαση λαμβάνει χώρα λόγω των διαφορετικών δεικτών διάθλασης μεταξύ των αερίων του μεσοκυττάριου χώρου του φύλλου και των ιδίων των κυττάρων. Επίσης κάποιο ποσοστό διάθλασης οφείλεται σε αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενδοκυτταρικών συστατικών, όπως μακρομορίων και λυσοσωμάτων, το οποίο όμως, ανέρχεται στο 10% μόνο της συνολικής διάθλασης. Οι χρωστικές των φυτών και το νερό στο μεσόφυλλο απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία στις περιοχές 0,4 – 0,7 μm και 1,3 – 2,5 μm ,

αντίστοιχα, του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία στην πρώτη περιοχή είναι γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία ως PAR (Photosynthetic Active Radiation) ή ενεργός/αποτελεσματική για τη φωτοσύνθεση ακτινοβολία και απορροφάται κυρίως από τη χλωροφύλλη (a και b), συστατικό των χλωροπλαστών και δευτερευόντως από τα καροτενοειδή. Στην περιοχή 0,7 – 1,3 μm πραγματοποιείται μηδαμινή ή καθόλου απορρόφηση και έτσι κυριαρχούν οι μηχανισμοί ανάκλασης και εκπομπής. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία τελικά είτε απορροφάται, είτε ανακλάται και διαχέεται διαμέσου της φυτικής μάζας ή στο υπόβαθρο αυτής (έδαφος, ατμόσφαιρα κλπ) (Δαλέζιος, 2002).

Η φασματική συμπεριφορά της φυτικής κάλυψης στο εύρος 0,4 – 0,7 μm προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης των μεταβολών στα διάφορα στάδια καλλιεργούμενων και μη φυτών, λαμβάνοντας όμως υπόψη και την αντίστοιχη συμπεριφορά του γύρω μικροπεριβάλλοντος, π.χ. του εδάφους. Έτσι, σε γενικές γραμμές, όπως προκύπτει από μελέτες και έρευνες, τέσσερις είναι οι φασματικές περιοχές που ενδιαφέρουν στην παρακολούθηση της βλάστησης, διότι σ' αυτές κυριαρχούν πολύ σημαντικά φυσιολογικά φαινόμενα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.1 (Δαλέζιος, 2002).

Στις περιοχές 1 και 2 στα εύρη τιμών μηκών κύματος ≤ 0.5 μm και 0.62 - 0.7 μm (Πίνακας 1.1) λαμβάνει χώρα η μέγιστη αντίθεση στη φασματική συμπεριφορά ανάμεσα στο γυμνό έδαφος και τη βλάστηση και, πιο συγκεκριμένα, από 0,62 έως 0,68 μm. Οι περιοχές 2 και 3 αναφέρονται στην περιοχή του ΗΜΦ που θεωρείται σημαντική βάσει της φυσιολογίας των φυτών για την εξαγωγή των δεικτών βλάστησης. Έτσι, από τις περιοχές 1 και 2 είναι δυνατό να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά στο ρυθμό φωτοσύνθεσης και από τις περιοχές 2 και 3 όσον αφορά στην πυκνότητα της χλωροφύλλης και στο ποσό του φυλλώματος στη φυτική μάζα. Η περιοχή 4 παρέχει χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν στο περιεχόμενο νερό στα φύλλα, γεγονός άμεσα συνδεδεμένο με το ρυθμό διαπνοής και, κατ' επέκταση, με την επίδραση αυτού στη φυσιολογική διεργασία της φωτοσύνθεσης. Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση ελλείμματος νερού στους μεσοκυττάριους χώρους στο φύλλο, κάτω από προκαθορισμένα από το φυτό όρια, συνεπάγεται κλείσιμο των στοματίων για διακοπή της διαπνοής, άρα και φωτοσύνθεσης, αφού

παρεμποδίζεται η ανταλλαγή αερίων με το μικροπεριβάλλον (CO_2 , $C > 2$ κλπ). Τα πράσινα φυτά έχουν μια μοναδική φασματική αντίδραση που επηρεάζεται από τη δομή και τη σύνθεσή τους. Το ποσοστό της ακτινοβολίας που αντανακλάται σε διαφορετικά μέρη του φάσματος εξαρτάται από την κατάσταση, τη δομή και τη σύνθεση του φυτού. Γενικά, υγιή φυτά και πυκνό φύλλωμα, θα αντανακλά περισσότερη ακτινοβολία ειδικά στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή του φάσματος. Στο ορατό μέρος του φάσματος (0,4 μm - 0,7 μm), τα φυτά απορροφούν φως στην μπλε (0,45 μm) και στην κόκκινη περιοχή (0,6 μm) και αντανακλούν σχετικά περισσότερο στο πράσινο μέρος του φάσματος εξαιτίας της παρουσίας χλωροφύλλης. Υψηλή φωτοσυνθετική δραστηριότητα θα έχει ως συνέπεια χαμηλότερη αντανάκλαση στην κόκκινη περιοχή και υψηλή αντανάκλαση στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος. Σε περιπτώσεις που τα φυτά υποβάλλονται σε υδατικό στρες ή σε άλλες συνθήκες που επιβραδύνουν την ανάπτυξη, η παραγωγή χλωροφύλλης θα μειωθεί. Αυτό με τη σειρά του θα οδηγήσει σε λιγότερη απορρόφηση στις μπλε και τις κόκκινες περιοχές του φάσματος (Sawasawa, H., 2003).

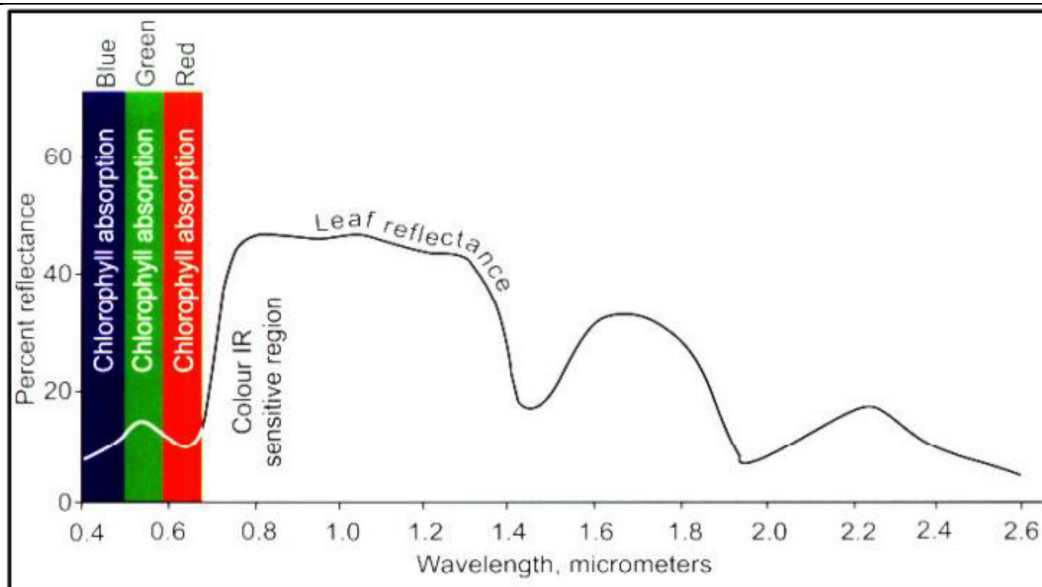
Στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα του φάσματος (0,7 - 2,5 μm), η αντανάκλαση των πράσινων φυτών αυξάνεται στο 40 - 60%. Πέρα από τα 1,3 μm , υπάρχουν πτώσεις στην καμπύλη αντανάκλασης εξαιτίας της απορρόφησης από το νερό από τα φύλλα, περισσότερο ελεύθερο νερό καταλήγει σε λιγότερη αντανάκλαση. Η Εικόνα 1.4 δείχνει μια ιδανική καμπύλη αντανάκλασης για υγιή βλάστηση. Όσο τα φύλλα ξεραίνονται ή όσο το φυτό μαραίνεται ή γερνάει ή αρρωσταίνει ή τα κύτταρα πεθαίνουν, υπάρχει μείωση στη χρωστική ουσία της χλωροφύλλης. Αυτό καταλήγει σε μια αύξηση αντανάκλασης στο ορατό φάσμα και μια μείωση στην αντανάκλαση στο μέσο υπέρυθρο (MIR) εξαιτίας της χειροτέρευσης των κυττάρων. Έτσι, η φασματική αντίδραση του φυλλώματος μιας καλλιέργειας επηρεάζεται από την υγεία του φυτού, το ποσοστό της εδαφικής κάλυψης, το στάδιο ανάπτυξης, διαφορές σε καλλιεργητικές πρακτικές, συνθήκες στρες και αρχιτεκτονική φυλλώματος (Sawasawa, H., 2003).

Αυτή η διαφορετική αντανάκλαση των πράσινων φυτών στα ορατά και στα υπέρυθρα μέρη της ακτινοβολίας καθιστά ικανή την ανίχνευση των πράσινων φυτών από δορυφορικά δεδομένα, μιας και άλλα γνωρίσματα στην επιφάνεια της

γης δεν έχουν τέτοια μοναδικά χαρακτηριστικά στο φάσμα μεταξύ 0,65 - 0,75 μm. Αυτή η υπογραφή είναι μοναδική μόνο στα πράσινα φυτά και, έτσι, η αρχή αυτή χρησιμοποιείται στους δείκτες βλάστησης.

Πίνακας 1.1. Φασματικές περιοχές σε αντιστοίχιση με φυσιολογικές διεργασίες των φυτικών κυττάρων (Δαλέζιος, 2002).

1: Απορρόφηση ακτινοβολίας από καροτενοειδή και χλωροφύλλη $\leq 0,5 \mu\text{m}$
2: Ισχυρή απορρόφηση ακτινοβολίας από χλωροφύλλη 0,62 – 0,7 μm
3: Ανάκλαση ακτινοβολίας από τα κυτταρικά τοιχώματα κυττάρων του μεσοφύλλου 0,74 – 1,1 μm
4: Απορρόφηση ακτινοβολίας από το νερό 1,3 – 2,5 μm



Σχήμα 1.2. Ιδανική καμπύλη φασματικής ανάκλασης ενός υγιούς φυτού (Janssen – Huuvenemeten, 2001)

Κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης (NDVI)

Οι δείκτες βλάστησης είναι συνήθως ο συνδυασμός σημάτων από κανάλια του ραδιομέτρου. Αυτοί οι δείκτες παρέχουν καλύτερες πληροφορίες από τα ανεξάρτητα κανάλια σε φυτικές παραμέτρους, όπως είναι η έκταση της φυτομάζας, η βρεγμένη και υγρή βιομάζα, το ύψος του φυτού και η περιεκτικότητα του φύλλου

σε νερό. Επομένως, οι μεταβολές των φασματικών χαρακτηριστικών της βλάστησης ως συνάρτηση της κατάστασης της υγείας της έχουν ιδιαίτερη σημασία (Μαρκογιάννη, 2010).

Οι δείκτες βλάστησης χρησιμοποιούνται ευρέως ως δείκτες ανάλυσης των διακυμάνσεων της φυτοκάλυψης μιας περιοχής, μεταξύ της βλάστησης αυτής και άλλων παραγόντων. Ο δείκτης NDVI θεωρείται ένα από τα βασικότερα εργαλεία παρακολούθησης των εποχιακών αλλαγών της βλάστησης και βασίζεται στις ιδιότητες ανάκλασης των περιοχών βλάστησης σε σύγκριση με τα σύννεφα, το νερό, το χιόνι από τη μία πλευρά, τους βράχους και τα γυμνά εδάφη από την άλλη. Τα τρία στοιχεία της βλάστησης που επηρεάζουν τη φασματική ποσότητα και ποιότητα της ηλιακής αντανακλώμενης ακτινοβολίας που δέχονται οι δορυφόροι είναι η αφθονία, η σύνθεση και η κατάσταση στην οποία βρίσκεται (Μαρκογιάννη, Β., 2010). Μια μέθοδος φασματικής ενίσχυσης είναι ο δείκτης βλάστησης NDVI, ο οποίος όχι μόνο αναδεικνύει τις περιοχές που έχουν βλάστηση στην εικόνα, αλλά δίνει πληροφορίες σχετικά με το πόσο υγιή είναι τα φυτά. Ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης αποτελεί μια συνηθισμένη και απαραίτητη παράμετρο για την παρακολούθηση της βλάστησης και έχει αποδειχθεί πως είναι ένας σημαντικός και αποτελεσματικός δείκτης. Συνήθως χρησιμοποιείται στην παρακολούθηση της φυτοκάλυψης, στην οικολογική παρακολούθηση και την εκτίμηση της βιομάζας, στην παρακολούθηση της παραγωγικότητας, στον υπολογισμό της γεωργικής παραγωγικότητας, στην υποβάθμιση του εδάφους, καθώς και σε άλλες δραστηριότητες παρακολούθησης (Μαρκογιάννη, 2010). Η βασική αρχή για τον NDVI έγκειται στο γεγονός ότι, τα φύλλα εξαιτίας της σπογγώδους κάτω επιφάνειάς τους, ανακλούν πολύ περισσότερο φως στην περιοχή της εγγύως ερυθράς ακτινοβολίας. Όταν όμως το φυτό βρίσκεται υπό υδατική καταπόνηση ή κάποιου άλλου είδους στρες, αυτή η σπογγώδης επιφάνεια αρχίζει να καταρρέει και το φύλλο ανακλά όλο και λιγότερο εγγύς ερυθρά ακτινοβολία, χωρίς όμως να μεταβληθεί η ανάκλαση στο ορατό φάσμα. Επομένως, συνδυάζοντας αυτά τα 2 στοιχεία, είναι δυνατό να διαφοροποιηθούν τα φυτά από αλλά αντικείμενα μη-φυτά, καθώς και τα υγιή από καταπονημένα φυτά (Εικόνα 1.5).



Εικόνα 1.3. Τιμές NDVI για ένα νεκρό, υπό καταπόνηση και υγιές φύλλο.

Ο δείκτης βλάστησης NDVI δημιουργήθηκε για πρώτη φορά από τη δορυφορική Εικόνα Landsat-1 (Kriegler et al., 1969), με γεωμετρική διόρθωση. Λαμβάνει τιμές από το -1 έως 1 και υπολογίζεται από τη διαφορά του εγγύως υπέρυθρου και του ερυθρού διαιρούμενων με το άθροισμα αυτών. Οι αρνητικές τιμές δηλώνουν θάλασσα ενώ οι τιμές θετικές και μικρότερες από 0,1 φανερώνουν γυμνό έδαφος.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Όπου:

NDVI = κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης

NIR = Εγγύς υπέρυθρο κανάλι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Red = Ερυθρό κανάλι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Παραλλαγές του NDVI

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν εκατοντάδες δείκτες βλάστησης πέραν του NDVI, οι οποίοι αποτελούν διαφορετικούς συνδυασμούς φασματικών καναλιών και χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν διαφορετικές ιδιότητες των φυτών.

Ευρέως χρησιμοποιούμενοι δείκτες βλάστησης είναι οι παραλλαγές του NDVI:

- Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)

$$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$$

- Normalized Difference Red Edge (NDRE)

$$NDRE = \frac{NIR - Red\ Edge}{NIR + Red\ Edge}$$

Εδαφικά Προσαρμοσμένοι Δείκτες Βλάστησης

Άλλοι ευρέως χρησιμοποιούμενοι δείκτες βλάστησης είναι οι εδαφικά προσαρμοσμένοι. Οι δείκτες αυτοί ελαχιστοποιούν τα σφάλματα που δημιουργούνται όταν εμφανίζεται και γυμνό έδαφος εκτός από την καλλιέργεια σε μια εικόνα.

- Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

$$SAVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} \times (1 + L)$$

όπου L ο συντελεστής προσαρμογής ανάλογα με την κάλυψη του εδάφους (συνήθως ορίζεται 0,5)

Μερικές από τις παραλλαγές του παραπάνω δείκτη αποτελούν οι δείκτες OSAVI (Optimized Soil-adjusted Vegetation Index) και RESAVI (Red Edge Soil-adjusted Vegetation Index 2) οι οποίοι δίνονται από τους τύπους:

- $OSAVI = \frac{NIR - R}{NIR + Red + 0,16} \times 1,16$

Ο δείκτης OSAVI θεωρείται βελτιωμένος σε σχέση με το SAVI όσον αφορά την παρακολούθηση της βλάστησης (Steven, 1998).

- $$RESAVI = \frac{NIR - Red\ Edge}{NIR + Red\ Edge} \times 1,5$$

Δείκτες Χλωροφύλλης

Οι δείκτες αυτοί έχουν δημιουργηθεί με σκοπό τη βελτίωση απεικόνισης της χλωροφύλλης. (Gitelson et al., 2003a, 2003c, 2005)

- Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI)

$$MCARI = NIR - Red\ Edge - 0,2 \times (NIR - Green) / Red\ Edge$$

- Green Chlorophyll Index (CL_{Green})

$$CL_{Green} = NIR / Green - 1$$

- Red Edge Chlorophyll Index ($CL_{Red\ Edge}$)

$$CL_{Red\ Edge} = NIR / Red\ Edge - 1$$

Άλλοι Δείκτες Βλάστησης

Τέλος οι δείκτες EVI, EVI2 (Huete et al., 1996, 1997) και RDVI, χρησιμοποιούνται ευρέως στη διεθνή βιβλιογραφία για την παρακολούθηση της βλάστησης.

- *Enhanced Vegetation Index*

$$EVI = 2,5 \times (NIR - Red) / (NIR + 6 \times Red) - (7,5 \times Blue + 1)$$

- *Enhanced Vegetation Index 2*

$$EVI2 = 2,5 \times (NIR - Red) / (NIR + 2,4 \times Red + 1)$$

- *Relative Difference Vegetation Index*

$$RDVI = NIR - Red / \sqrt{NIR + Red}$$

1.1.2 Η καλλιέργεια του κριθαριού

Καταγωγή και διάδοση της καλλιέργειας

Το κριθάρι (*Hordeum vulgare* L.) αποτελεί φυτικό είδος του γένους *Hordeum* και ανήκει στην οικογένεια Poaceae. Το καλλιεργούμενο κριθάρι θεωρείται ότι προήλθε από το άγριο είδος *Hordeum vulgare* L. subsp. *spontaneum* (K. Koch) Thell., το οποίο φύεται ακόμα ως άγριο στη Μέση Ανατολή. Τόσο το άγριο, όσο και το καλλιεργούμενο είδος είναι απλοειδή με $2n=24$ χρωμόσωμα. Το κριθάρι αποτελεί το δεύτερο σε σπουδαιότητα χειμερινό σιτηρό, μετά το σιτάρι. Πρόκειται για ένα από τα πρώτα φυτά που καλλιεργήθηκαν από τον άνθρωπο και, σύμφωνα με αρχαιολογικά ευρήματα, η καλλιέργειά του ξεκίνησε την περίοδο 5.000-7.000 π.Χ. (Harlan, 1979) ή 10.000 χρόνια νωρίτερα, σύμφωνα με μια άλλη μελέτη (Wendorf κ.α, 1979). Κατά τον Νανίλον, τα καλλιεργούμενα κριθάρια κατάγονται από δύο κύρια κέντρα: 1) τη Βορειοανατολική Αφρική και τις ορεινές περιοχές της Αβησσυνίας και 2) τη Νοτιοανατολική Ασία (Κίνα, Ιαπωνία και περιοχές γύρω από το Θιβέτ) (Χρησιτίδης, 1963). Σύμφωνα με τον Wendorf (1979), η κοιλάδα του Νείλου θεωρείται ότι είναι ο πιο πιθανός τόπος καταγωγής του κριθαριού. Η παγκόσμια παραγόμενη ποσότητα του κριθαριού είναι αρκετά χαμηλότερη του σιταριού, ανερχόμενη περίπου στο ένα πέμπτο αυτής. Στην αρχαία Αίγυπτο το ψωμί από κριθάρι, καθώς και η μπίρα που παράγεται από αυτό ήταν συνηθισμένα στις διατροφικές συνήθειες από το 3.200 π.Χ. Ακόμα είναι γνωστή η παρασκευή χυλών και διαφόρων ειδών σούπας με αυτό. Το κριθάρι αποτελεί το μόνο σιτηρό που καλλιεργείται σε τόσο μεγάλο εύρος περιοχών από άποψη κλιματολογικών συνθηκών και είναι γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας παράγωγής του λαμβάνεται από περιοχές όπου το κλίμα δεν είναι ευνοϊκό για αλλά σιτηρά. Η καλλιέργεια του είναι διαδεδομένη σε μικρά γεωγραφικά πλάτη, όπως στην Ινδία σε 11° ΒΠ, αλλά και στην Ινδονήσια όπου σε κάποια υψίπεδά της πλησιάζει ακόμα και τον Ισημερινό (Φασούλας, Σενλόγλου 1966). Επίσης καλλιεργείται και σε οάσεις σε περιοχές της Σαχάρας, αλλά και σε αλατούχες περιοχές της Αυστραλίας εξαιτίας της μεγάλης αντοχής που παρουσιάζει στα άλατα. Ενώ όπως αναφέρεται παραπάνω το κριθάρι κατάγεται από σχετικά θερμές περιοχές, η καλλιέργειά του συνηθίζεται και

σε αρκετά μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και 11 υψόμετρα. Ως παραδείγματα αξίζουν να αναφερθούν η Σιβηρία όπου καλλιεργείται σε 68° ΒΠ, στη Νορβηγία σε 70° ΒΠ αλλά και στα Ιμαλάια σε υψόμετρο κοντά στα 5.000 m. Η δυνατότητα της καλλιέργειάς του σε τέτοιες περιοχές σχετίζεται με την ιδιότητα αρκετών ποικιλιών του κριθαριού να ωριμάζουν σε 60-70 ημέρες και αν σπαρθούν κατά την άνοιξη μπορούν να αξιοποιούν περιοχές όπου η βλαστική τους περίοδος είναι μικρή. Η παγκόσμια καλλιεργούμενη έκταση με κριθάρι ανήλθε το 2014 στα 490 εκατομμύρια στρ. με συνολική απόδοση 144 εκ. τόνους. Η μέση παγκόσμια απόδοση το 2014 ήταν περίπου 290 kg/στρ. Η Ευρώπη είναι η ήπειρος που κυριαρχεί στην παράγωγή κριθαριού με τη Ρωσία να ξεχωρίζει σημαντικά από τις υπόλοιπες χώρες. Το 2014 στην Ευρώπη καλλιεργήθηκε το 64,8% της παγκόσμιας παράγωγης κριθαριού με τη Ρωσία να παράγει 20 εκ. τόνους. Σε φθίνουσα σειρά οι χώρες που ακολούθησαν το 2014 είναι η Γαλλία, η Γερμανία, η Αυστραλία, η Ουκρανία, ο Καναδάς ενώ μικρότερες αλλά σημαντικές ποσότητες παρήχθησαν στην Τουρκία και στις ΗΠΑ (FAOSTAT, 2014).

Στην χώρα μας το κριθάρι αποτελεί το δεύτερο σε σπουδαιότητα χειμερινό σιτηρό μετά από το σιτάρι. Τα τελευταία χρόνια έχει καταγράψει μικρή αύξηση των καλλιεργούμενων εκτάσεων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι από τα 1.120.000 στρ το 2010, η καλλιεργούμενη έκταση αυξήθηκε σε 1.830.000 στρ. το 2014 (FAOSTAT, 2014). Με την καλλιέργεια του κριθαριού αρκετοί παραγωγοί έχουν καταφέρει και έχουν εκμεταλλευτεί αρκετά χωράφια τα οποία θεωρούνται άγονα και αλατούχα και δύσκολα στην εγκατάσταση κάποιας άλλης καλλιέργειας. Η μέση απόδοση το 2014 ήταν 260 kg/στρ. Η παγκόσμια παράγωγή του κριθαριού προβλέπεται ότι θα παραμείνει σε υψηλά επίπεδα και στο μέλλον, εξαιτίας των πολλών χρήσεων και της προσαρμοστικότητας που αποχαρακτηρίζει το φυτό. Η στρεμματική απόδοση αυξήθηκε τα τελευταία χρόνια, όχι όμως με τον ίδιο ρυθμό που αυξήθηκαν οι αποδόσεις του σιταριού ή και του καλαμποκιού. Χρειάζεται στο μέλλον αρκετή έρευνα για την δημιουργία παραγωγικότερων ποικιλιών (Θωμόπουλος, 2018).

Μορφολογικά Χαρακτηριστικά

Το κριθάρι δεν παρουσιάζει μεγάλη παραλλακτικότητα στην μορφή του (Εικ. 1.1.2.), όπως το σιτάρι, αλλά ακολουθεί την τυπική αύξηση και ανάπτυξη των χειμερινών σιτηρών. Χαρακτηριστικό του κριθαριού είναι τα μεγάλα ωτίδια στο σημείο που συνδέεται το έλασμα με τον κολεό και τα όποια το διαφοροποιούν από τα υπόλοιπα χειμερινά σιτηρά. Το ανώτερο φύλλο είναι μικρότερο από όλα τα αλλά, σε αντίθεση με το σιτάρι και σε κάποιες ποικιλίες είναι συνεστραμμένο. Η ταξιανθία του είναι στάχης με τρία σταχύδια σε κάθε άρθρωση της ράχης. Κάθε σταχύδιο έχει δυο τριχοειδή εξωτερικά λέπυρα και δυο εσωτερικά λέπυρα (τον χιτώνα και τη λεπίδα), τα όποια κατά την ωρίμανση είτε παραμένουν προσκολλημένα στο σπόρο (ντυμένος) ή αποχωρίζονται από αυτόν (γυμνός). Όταν μόνο το μεσαίο σταχύδιο κάθε θέσης είναι γόνιμο, τότε το κριθάρι αναφέρεται ως δίστοιχο, ενώ όταν και τα τρία σταχύδια έχουν γόνιμα αντίδια αναφέρεται ως εξάστιχο. Στις περιπτώσεις όπου ο σταχύς είναι αραιός, είναι δυνατόν τα δυο ακραία σταχύδια κάθε κόμβου να σκεπάζονται μερικώς από τα αντίστοιχα του επόμενου κόμβου και έτσι να διακρίνονται τέσσερις στήλες κόκκων. Το άκρο του χιτώνα στις περισσότερες ποικιλίες καταλήγει σε άγανο. Σε ορισμένες ποικιλίες το αγανό έχει αντικατασταθεί από δισχιδές λοφίο. Οι σταγανοφόρες ποικιλίες θεωρούνται ως οι πιο παραγωγικές. Η ράχη στο κριθάρι έχει 10-30 κόμβους και το δύστυχο κριθάρι μπορεί να έχει 25-30 σπόρους, ενώ το εξάστιχο 25-60. Οι δίστιχες ποικιλίες τείνουν να σχηματίζουν περισσότερα παραγωγικά αδέρφια, όποτε οι αποδόσεις δύστυχων και εξάστιχων ποικιλιών τείνουν να είναι παρόμοιες. Το κριθάρι είναι ένα αυστηρά αυτογονιμοποιούμενο φυτό. Η επικονίαση στις περισσότερες ποικιλίες λαμβάνει χώρα όταν ο στάχης δεν έχει εκπτυχθεί πλήρως από τον κολεό του τελευταίου φύλλου. Σε ορισμένες ποικιλίες μάλιστα κατά την ωρίμανση ένα μέρος του στάχου βρίσκεται ακόμα μέσα στον κολεό. Ο καρπός που παράγεται είναι καρύοψη. Οι καρποί των εξάστιχων ποικιλιών μπορεί να είναι λιγότερο ομοιόμορφοι σε μέγεθος σε σχέση με εκείνους των δύστυχων. Ο λόγος είναι ότι οι εξωτερικοί σπόροι στο εξάστιχο τείνουν να συστρέφονται καθώς αναπτύσσονται. Αυτή η συστροφή δημιουργεί ανόμοιους σπόρους ως προς το μέγεθος. Στις νεότερες ποικιλίες αυτό το φαινόμενο έχει αντιμετωπιστεί. Ο σπόρος

έχει κανονικό ατρακτοειδές σχήμα και το έμβρυο είναι τοποθετημένο προς την κοιλιακή πλευρά. Το κριθάρι μπορεί να διακριθεί σε διαφορετικούς τύπους με βάση την αγρονομική και μορφολογική άποψη καθώς και την χρήση για την οποία προορίζεται. Η ταξινόμηση αυτή γίνεται με τα εξής κριτήρια:

1. **Αριθμός σειρών σπόρων στο στάχυ.** Όπως έχει ήδη αναφερθεί αφορά το διαχωρισμό μεταξύ δίστοιχου και εξάστοιχου κριθαριού.
2. **Υπαρξη ή όχι αγάνων.** Οι περισσότερες ποικιλίες παράγουν σπόρο με αγανό, αλλά υπάρχουν και κάποιες που είναι μη αγανοφόρες.
3. **Χρώμα αλευρώνης.** Καθορίζει το χρώμα του σπόρου που κυμαίνεται μεταξύ λευκού, κίτρινου, μπλε ή και τελείως άχρωμου.
4. **Προσκόλληση λεπύρων με τον κόκκο.** Στην πλειονότητα των ποικιλιών ο χιτώνας και η λεπίδα είναι κολλημένα με τον κόκκο (επιθυμητό για κριθάρι ζυθοποιίας). Υπάρχουν και ποικιλίες των οποίων τα λέπυρα αποχωρίζονται από τον κόκκο κατά των αλωνισμό και η καλλιέργειά τους προορίζεται για τη διατροφή του ανθρώπου.
5. **Χρήσεις.** Οι ποικιλίες διακρίνονται σε κτηνοτροφικές, ζυθοποιίας αλλά και διπλής κατεύθυνσης που χρησιμοποιούνται και για τα δυο. Στις ευρωπαϊκές χώρες, οι ποικιλίες που χρησιμοποιούνται για παράγωγη μύρας είναι, κατά κανόνα, δύστοιχες, ενώ στις ΗΠΑ κυρίως εξάστοιχες. Γενικότερα οι διάφορες ποικιλίες του κριθαριού μπορούν να διακριθούν και με βάση αλλά χαρακτηριστικά, που συναντιούνται και σε πολλές άλλες καλλιέργειες, όπως η αντοχή στην αλατότητα, σε διάφορους εχθρούς και ασθένειες, αντοχή στην ξηρασία κ.α. Πιο συγκεκριμένα, έχει διαπιστωθεί ότι κοντόσωμες ποικιλίες παρουσιάζουν οψίμιση, αλλά και ευαισθησία σε ασθένειες (Stoskopf, 1985). Ποικιλίες με μια μέση σταθερότητα στο ύψος έδειξαν να έχουν υψηλές αποδόσεις και σε ευνοϊκές, αλλά και σε δυσμενείς συνθήκες (Μπλαδενόπουλος, 2002).

Βυνοποιήσιμες ποικιλίες κριθαριού

Το κριθάρι αποτελεί ένα ιδανικό δημητριακό, κατάλληλο για την παραγωγή ζύθου. Αυτό οφείλεται κυρίως στην μεγάλη συγκέντρωση υδρολυτικών ενζύμων που παράγονται κατά την διαδικασία βυνοποίησης του. Επιπλέον, ο εξωτερικός φλοιός δρα ως σημαντικός ανοσοποιητικός παράγοντας. Το πλεονέκτημα που έχει το κριθάρι σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σιτηρά, ως προς την ζυθοποίηση, έγινε αντιληπτό από τους αρχαίους πολιτισμούς, όπως αυτό διαφαίνεται από ευρήματα στις περιοχές της Αιγύπτου, Μεσοποτάμιας, αλλά και Ελλάδος. Από τότε γινόταν συνεχής επιλογή των καταλληλότερων ποικιλιών και πληθυσμών κριθαριού, ώστε να γίνει πλήρως εκμεταλλεύσιμη η ιδιότητα του κριθαριού που το καθιστά ιδανικό για ζυθοποίηση. Ο Βαυαρικός Νομός Αγρότητας (1516 μ.Χ.) ήταν αυτός που επιτάχυνε αυτή τη διαδικασία, καθιστώντας το κριθάρι βυνοποίησης την μοναδική πηγή δημητριακών για την παράγωγή μπίρας. Από τότε έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στη βελτίωση των βυνοποιήσιμων χαρακτηριστικών του κριθαριού, όπως την αμυλούχο σύστασή του, το ενζυμικό δυναμικό των καρπών, αλλά και στις τεχνολογικές ιδιότητες που το καθιστούν κατάλληλο για ζυθοποίηση. Τα επιθυμητά για την βυνοζυθοποιία ποιοτικά χαρακτηριστικά του κριθαριού σχετίζονται κυρίως με τη βλαστική του ικανότητα και την περιεκτικότητα του ενδοσπερμίου σε άμυλο και αζωτούχες ουσίες (Καραμάνος, 2008, Esslinger, 2006). Πιο συγκεκριμένα:

- **Βλαστική Ικανότητα.** Οι σπόροι πρέπει να έχουν υψηλή βλαστική ικανότητα (96%), ταχύτητα και ομοιομορφία φυτρώματος.
- **Αλευρώδες ενδοσπέρμιο.** Το ενδοσπέρμιο πρέπει να είναι αλευρώδες και όχι υαλώδες. Το αλευρώδες ενδοσπέρμιο σχετίζεται με ευκολότερη διάσπαση και μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άμυλο.
- **Περιεκτικότητα σε άζωτο.** Δεν είναι επιθυμητή η υψηλή περιεκτικότητα σε ολικό άζωτο, γιατί συνεπάγεται τη μείωση του ολικού ποσού των υδατανθράκων, ενώ παράλληλα αυξάνει την περιεκτικότητα του τελικού εκχυλίσματος σε ανεπιθύμητες αζωτούχες ουσίες.
- **Μέγεθος καρπών.** Το μέγεθος καρπών (βάρους 1000 κόκκων) είναι ενδεικτικό της αποδοτικότητας σε βύνη. Μικρότεροι καρποί σχετίζονται με χαμηλότερο

ποσοστό γεμίσματος και, επομένως, μικρή περιεκτικότητα σε άμυλο που είναι ανεπιθύμητο.

- **Γέμισμα καρπών.** Βαθμιαίο και παρατεταμένο γέμισμα συνεπάγεται υψηλή ποιότητα καρπών λόγω μεγαλύτερης ποσότητας αμύλου. Το κριθάρι αποτελεί τη σημαντικότερη πρώτη υλη για την παράγωγη μύρας.

Υπάρχουν πολλές ποικιλίες κριθαριού που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό. Μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι καταγεγραμμένες περίπου 300 ποικιλίες ανοιξιάτικου κριθαριού, 100 ποικιλίες δίστοιχου χειμερινού και 100 ποικιλίες εξάστοιχου χειμερινού κριθαριού. Αυτό και μόνο δείχνει την διαφορετικότητά τους. Για τον σκοπό της βυνοποίησης το δίστοιχο είναι το πλέον κατάλληλο. Κυρίως χρησιμοποιείται το Ανοιξιάτικο κριθάρι αν και τα τελευταία χρόνια έχουν βελτιωθεί πολύ οι ιδιότητες του χειμερινού, γεγονός που το έχει οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγής για τη χρήση στη ζυθοποιία. Όσον αφορά τις ποικιλίες του κριθαριού που καλλιεργούνται για την χρήση τους στη ζυθοποιία είναι πάρα πολλές και ποικίλουν ανά περιοχή. Στην Ευρώπη κάποιες χαρακτηριστικές ποικιλίες είναι Quench, NFC Tipple, Sebastian, Propino, Odyssey, Concerto, Overture, Belgravia (Θωμόπουλος, 2018).

Οικολογικές απαιτήσεις - Προσαρμοστικότητα

Η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία φυτρώνει το κριθάρι είναι 3-4°C και η άριστη 20°C. Παρουσιάζει μικρότερη αντοχή στο κρύο σε σχέση με το σιτάρι. Ειδικότερα, παρατεταμένες θερμοκρασίες γύρω στους -8°C προκαλούν πάγωμα των φύλλων, ενώ χαμηλότερες που κυμαίνονται από -12°C έως -15°C καταστρέφουν ολόκληρο το φυτό ενώ, όταν καλύπτεται από χιόνι παρουσιάζει αντοχή μέχρι και στους -30°C. Οι φθινοπωρινές ποικιλίες, όπως είναι αναμενόμενο, είναι πιο ανθεκτικές στις χαμηλές θερμοκρασίες σε σχέση με τις ανοιξιάτικες. Στην χώρα μας, στην ανοιξιάτικη σπορά οι θερμοκρασίες δεν πέφτουν αρκετά χαμηλά ώστε να προκαλέσουν κάποιο μη αναστρέψιμο πρόβλημα στα φυτά. Σε περιπτώσεις καταστροφών των φύλλων, γίνεται αναβλάστηση από τους οφθαλμούς της στεφάνης που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το κριθάρι δεν

αντέχει πολύ στην ξηρασία και αναπτύσσεται καλύτερα σε περιοχές με μέτριες, παρά άφθονες βροχοπτώσεις. Η ικανότητά του αυτή να αποδίδει καλά σε ξηροθερμικές συνθήκες οφείλεται στην αποφυγή της περιόδου ξηρασίας εξ'αίτιας της πρωιμότητάς του και όχι λόγω της αντοχής του στην ξηρασία. Για αυτό το λόγο αποτελεί ένα υπερπολυτελές φυτό για ξηροθερμικά μεσογειακά κλίματα. Έλλειψη νερού κατά την περίοδο του αδελφώματος και του ξεσταχιάσματος μειώνει τον αριθμό των σπόρων που θα παραχθούν, ενώ αν παρουσιαστεί και μετά το ξεστάχιασμα μειώνει και το βάρος των σπόρων. Σε περιοχές με μειωμένες βροχοπτώσεις το κριθάρι έχει δείξει ότι αντιδρά θετικά σε συμπληρωματική άρδευση και μπορεί να δώσει μέχρι και διπλάσιες αποδόσεις. Προσαρμόζεται καλύτερα σε βαθιά, πηλώδη εδάφη, με καλή αποστράγγιση και με pH 6 με 8. Η υψηλή γονιμότητα του εδάφους δεν βοηθά την καλλιέργεια, προκαλεί μεγάλη ανάπτυξη των φυτών που έχει σαν αποτέλεσμα ευκολότερο πλάγιασμα. Το κριθάρι είναι αρκετά ευαίσθητο στην οξύτητα του εδάφους, όπως σχεδόν όλα τα χειμερινά σιτηρά, είναι όμως το πιο ανθεκτικό στην αλατότητα και την αλκαλικότητα του εδάφους.

Όσον αφορά τα ζιζάνια το κριθάρι έχει τη δυνατότητα να τα ανταγωνίζεται με μεγάλη αποτελεσματικότητα. Αυτό οφείλεται στην ταχυτάτη ανάπτυξή του, καθώς επίσης και στην υψηλή αλληλοπαθητική ιδιότητα που το χαρακτηρίζει. Η αλληλοπαθητική του δράση, βέβαια, και κατά συνέπεια η αντοχή του στα ζιζάνια διαφέρει μεταξύ των ποικιλιών, γεγονός που θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη οι καλλιεργητές για τη σωστή επιλογή ποικιλιών ανάλογα με τη ζιζανιοχλωρίδα του αγρού τους. Το αντικείμενο αυτό αποτελεί και πεδίο μελέτης των βελτιωτών για την παράγωγή ανθεκτικότερων ποικιλιών. Τα διεθνή δεδομένα σχετικά με την αλληλοπάθεια του κριθαριού (Martin και Rademacher, 1960, Overland, 1966, Putnam και DeFrank, 1979, 1983. Steinsiek κ.ά., 1982, Liebl και Worsham, 1983, Shilling, Liebl και Worsham, 1985, Purvis, Jessop και Lovett, 1985, Rosenthal, Maddox και Brenetti, 1985) δείχνουν ότι η καλλιέργειά του αναστέλλει το φύτερωμα των σπόρων διαφόρων ζιζανίων, την αύξηση και τη σποροπαραγωγή τους εξαιτίας και έκκρισης στην περιοχή ανάπτυξής του διαφόρων αλληλοπαθητικών ουσιών.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι για την παράγωγη καλής ποιότητας κριθαριού ζυθοποιίας, είναι απαραίτητες παρατεταμένες συνθήκες ανάπτυξης, (μέτριες θερμοκρασίες και υψηλή εδαφική υγρασία) κατά τη διάρκεια γεμίσματος των σπόρων. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, οι σπόροι γίνονται μεγαλύτεροι και συγκεντρώνουν χαμηλή περιεκτικότητα σε πρωτεϊνικά προϊόντα, που είναι επιθυμητά για τη ζυθοποιία. Αντίθετα οι ξηροθερμικές συνθήκες την άνοιξη, κατά τις όποιες η υγρασία του εδάφους μειώνεται προοδευτικά, βελτιώνουν τη ποιότητα του κριθαριού που προορίζεται για ζωτροφή, αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη.



Εικόνα 1.4. Μορφολογικά χαρακτηριστικά του κριθαριού (*Hordeum vulgare* L.). (Θωμόπουλος, 2018)

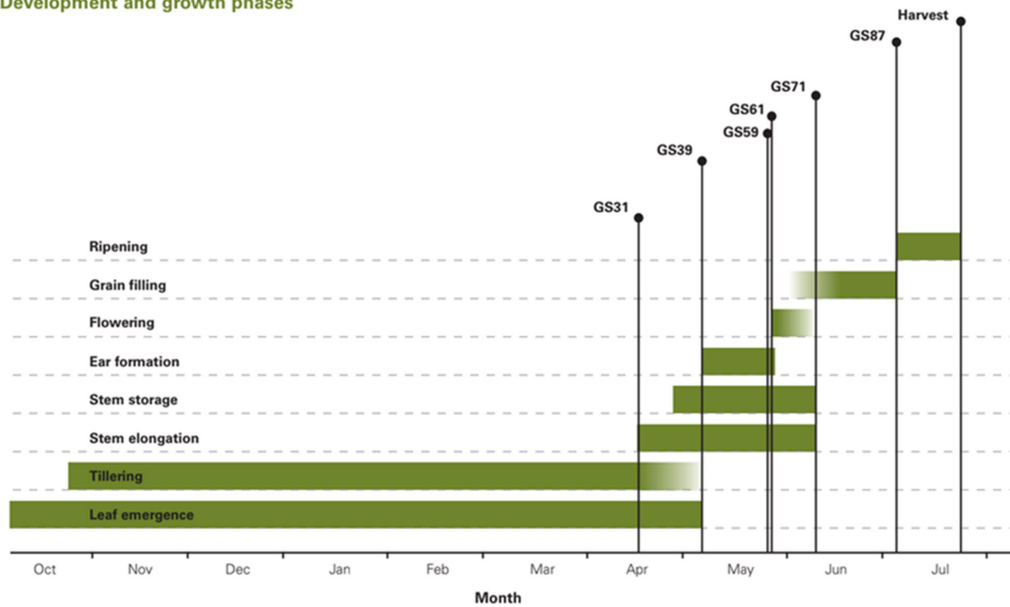
Barley growth stages and benchmarks

Growth stages



Εικόνα 1.5. Στάδια Ανάπτυξης Κριθαριού (Πηγή: AHDB).

Development and growth phases



Εικόνα 1.6. Στάδια Ανάπτυξης Κριθαριού (Πηγή: AHDB).

1.1.3 Παρακολούθηση του Κριθαριού μέσω Τηλεπισκόπησης.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, υπάρχουν αρκετές αναφορές, όσον αφορά την παρακολούθηση της ανάπτυξης και της απόδοσης του κριθαριού μέσω τηλεπισκόπησης.

Μία από τις εφαρμογές αποτελεί η δημιουργία ενός μοντέλου πρόβλεψης των φαινολογικών σταδίων ανάπτυξης του κριθαριού, μέσω υπερφασματικών δεδομένων τηλεπισκόπησης (Lausch et al., 2015). Επίσης, έχουν πραγματοποιηθεί εκτιμήσεις της βιομάζας του κριθαριού χρησιμοποιώντας CSMs (Crop Surface Models) μέσω UAV (Bendig, et al., 2014). Επιπλέον έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες όσον αφορά την επιλογή κατάλληλων δεικτών βλάστησης, με σκοπό την εκτίμηση της ανάπτυξης του κριθαριού και διαχρονικά μοντέλα NDVI, τα οποία έχουν δείξει γραμμική συσχέτιση με τη βιομάζα του κριθαριού (Calera et al., 2010).

Στη βιβλιογραφία έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί διαχρονικοί δείκτες βλάστησης για τη βελτίωση της πρόβλεψης της συγκομιδής (Xue, et al. 2007), ενώ πρόβλεψη της παραγωγής σιταριού στο Κάνσας και την Ουκρανία διενεργήθηκε με τη χρήση διαχρονικών δεδομένων NDVI (Becker, et al. 2010). Άλλοι ερευνητές (Wang, et al. 2014) προέβλεψαν την παραγωγή σε σιτάρι με διαχρονικούς δείκτες βλάστησης, όπως ο αθροιστικός NDVI και RVI, από το αδελφωμα έως το γέμισμα και πέτυχαν μεγαλύτερη ακρίβεια πρόβλεψης από ότι με δείκτες βλάστησης από 1 ημερομηνία.

1.2 Αντικείμενα και στόχοι της εργασίας

Η χρήση Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων σε συνδυασμό με την αξιοποίηση μη επανδρωμένων εναέριων μέσων (drones-UAV) για την χωρική απεικόνιση καλλιεργειών, έχει δείξει ότι προσφέρει πολλές δυνατότητες σχετικά με την παρακολούθηση αγρονομικών, αλλά και περιβαλλοντικών παραμέτρων. Τα UAVs αποτελούν έναν πολύ σημαντικό κλάδο της γεωργίας ακριβείας, καθώς δίνουν πληροφορίες με μεγάλη ταχύτητα, ακρίβεια, ευκολία, αξιοπιστία και χωρική ευκρίνεια. Το κριθάρι αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα φυτά μεγάλης καλλιέργειας στη χώρα μας, αλλά και παγκοσμίως. Καλλιεργείται και χρησιμοποιείται από την αρχαία Αίγυπτο και την Μεσοποταμία σε μεγάλη ποικιλία

κλιμάτων. Σήμερα χρησιμοποιείται ιδιαίτερα για την παρασκευή ψωμιού, μπίρας, αλλά και ζωοτροφών.

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν μέσω γεωχωρικών τεχνολογιών τηλεπισκόπησης: α) η παρακολούθηση της ανάπτυξης και της απόδοσης του κριθαριού β) η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του είδους της ζιζανιοκτονίας, αλλά και της πυκνότητας σποράς, καθώς επίσης γ) και η σύγκριση των δεικτών βλάστησης με οργανοληπτικά χαρακτηριστικά που είχαν μετρηθεί από το Εργαστήριο Γεωργίας του Γ.Π.Α.

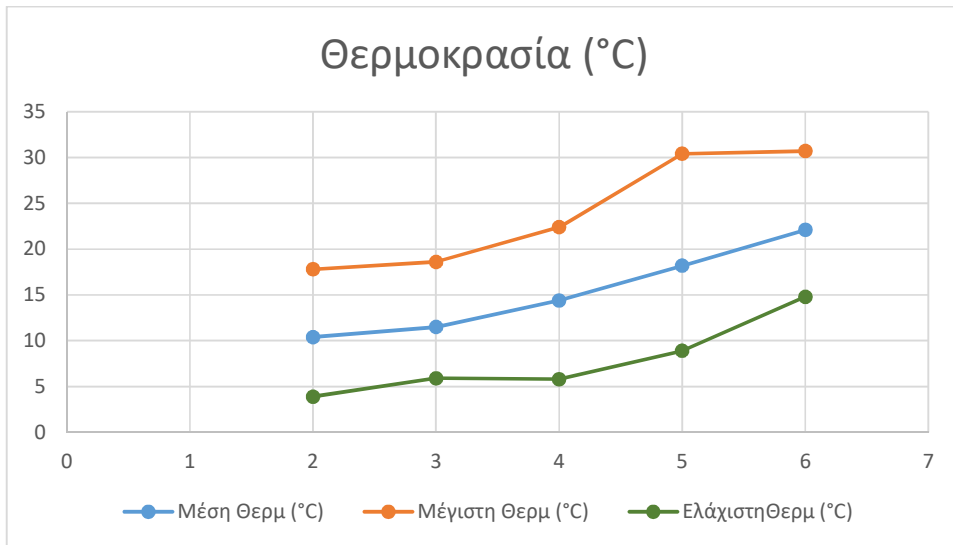
1.3 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης ήταν το κτήμα Γιαλού του Γ.Π.Α. στα Σπάτα Αττικής. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 7 πτήσεις, κατά το διάστημα 26/1/2018-22/5/2018.

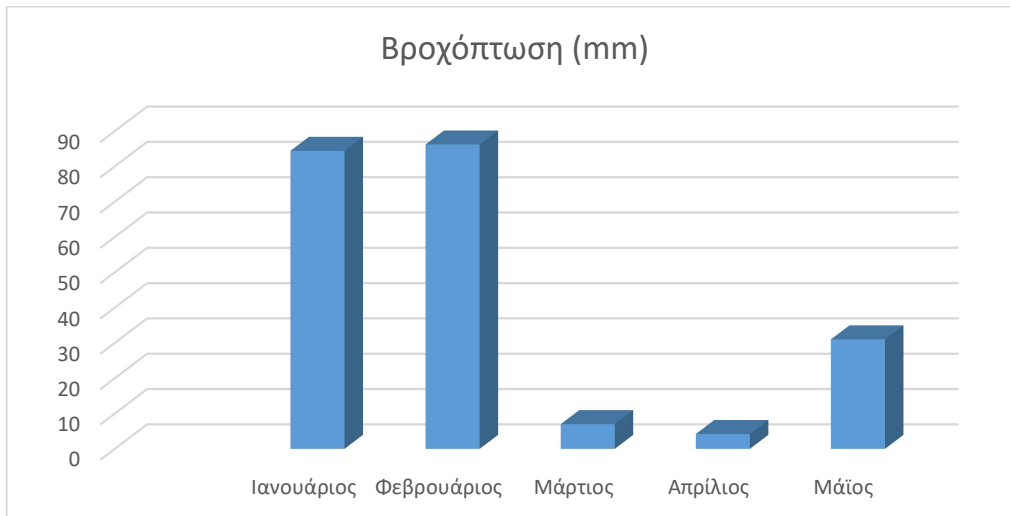
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται αναλυτικά τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης, από τη σπορά μέχρι και τη συγκομιδή. (Πηγή *Meteo.gr*)

Πίνακας 1.2. Κλιματικά Χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.

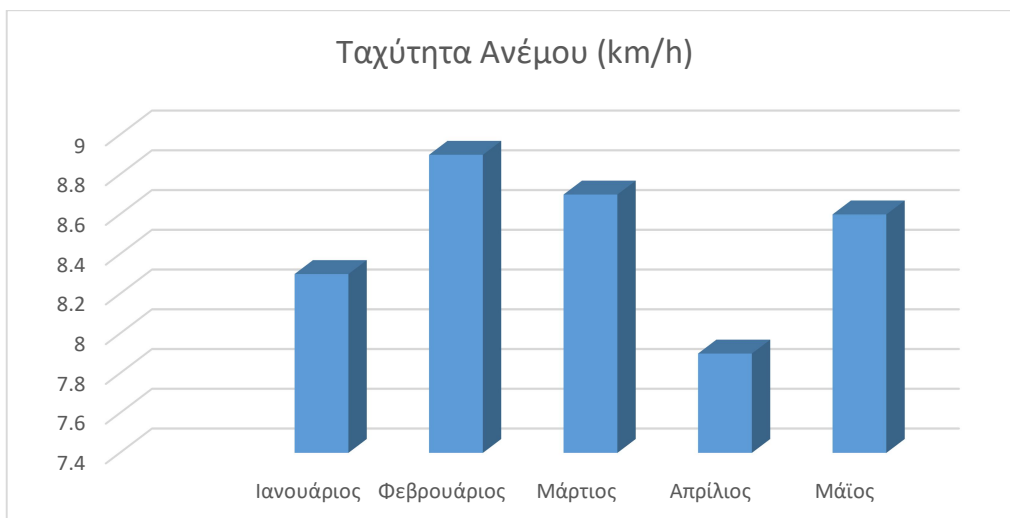
Μήνας	Μέση Θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη (°C)	Ελάχιστη (°C)	Βροχή (mm)	Ταχύτητα Ανέμου (km/h)
Ιανουάριος	10,4	17,8	3,9	84,4	8,3
Φεβρουάριος	11,5	18,6	5,9	86,2	8,9
Μάρτιος	14,4	22,4	5,8	7,0	8,7
Απρίλιος	18,2	30,4	8,9	4,2	7,9
Μάιος	22,1	30,7	14,8	31,0	8,6



Σχήμα 1.3. Διάγραμμα Θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.4. Διάγραμμα Βροχόπτωσης.



Σχήμα 1.5. Διάγραμμα Ταχύτητας Ανέμου.

Όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα (Σχ 1.3-1.5) η ελάχιστη θερμοκρασία για το διάστημα Ιανουαρίου-Μαΐου του 2018 παρατηρήθηκε τον Ιανουάριο και η μέγιστη το Μάιο. Οι μέγιστες βροχοπτώσεις σημειώθηκαν κατά το διάστημα Ιανουαρίου-Φεβρουαρίου, ενώ οι μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου κατά το διάστημα Φεβρουαρίου – Μαρτίου.

2. Υλικά και Μέθοδοι

2.1 Εξοπλισμός πεδίου

2.1.1 UAV

Το Σύστημα μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (ΣμηΕΑ) ή Unmanned Aerial Vehicle (UAV) που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη ήταν το Matrice 100 της εταιρίας DJI™. Το συγκεκριμένο Σύστημα ανήκει στη σειρά Matrice, η οποία αποτελεί μία εξαιρετική επιλογή για επαγγελματίες και προγραμματιστές που βρίσκονται στη διαδικασία της δοκιμής αισθητήρων, επεξεργαστών και άλλων τεχνολογιών. Το Σύστημα αυτό επιλέχθηκε διότι είναι πλήρως προγραμματιζόμενο και προσαρμοζόμενο σε οτιδήποτε επιθυμεί ο χειριστής του, τόσο σε λογισμικό, όσο και σε υλικό. Είναι μία πλατφόρμα απλή στη χρήση, με ποικίλες δυνατότητες και έχει μεγάλο εύρος εφαρμογών στην έρευνα, στην εργασία και στην αναψυχή. Το επεκτεινόμενο κεντρικό του πλαίσιο καθιστά εύκολη την εγκατάσταση πρόσθετων εξαρτημάτων και συσκευών, για την επίτευξη μεγαλύτερης λειτουργικότητας και αποτελεσμάτων. Κατατάσσεται στην κατηγορία των πολυκοπτέρων και συγκριμένα στα τετρακόπτερα. Διαθέτει τέσσερις κινητήρες στις άκρες του σκάφους και ζυγίζει μαζί με το φορτίο των μπαταριών περί τα 2,3 - 2,4 kg, ανάλογα με το είδος της μπαταρίας που φέρει. Ο μέγιστος χρόνος πτήσης μπορεί να φθάσει τα 40 λεπτά με τη χρήση δύο μπαταριών. Οι μέγιστες ταχύτητες που μπορεί να αναπτύξει είναι 5 m/s (18 km/h) κατά την απογείωση, 4 m/s (14,4 km/h) κατά την προσγείωση και 22 m/s (79,2 km/h) σε κανονική πτήση, χωρίς επιπρόσθετα φορτία και σε ιδανικές συνθήκες. Το μέγιστο βάρος που μπορεί να σηκώσει είναι 3,6 kg στο σύνολο, συμπεριλαμβανομένου του βάρους του σκάφους. Η μέγιστη ακτίνα εμβέλειας από το χειριστήριο είναι τα 2 km. Η μέγιστη ταχύτητα ανέμου που μπορεί να ανεχθεί κατά τη διάρκεια της πτήσης του είναι 10 m/s (5 Beaufort). Το εύρος θερμοκρασιών στο οποίο είναι λειτουργικό κυμαίνεται από -10°C έως 40°C. Επίσης, φέρει σύστημα εντοπισμού GPS για την πλοήγησή του. Τέλος, στη συγκεκριμένη πλατφόρμα μπορεί να προσαρμοστεί και σύστημα επιπλέον αισθητήρων αποφυγής εμποδίων κατά τη διάρκεια των πτήσεων.

2.1.2 Πολυφασματικός αισθητήρας

Ο πολυφασματικός αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των εικόνων ήταν ο Parrot Sequoia, ειδικά σχεδιασμένος για εφαρμογές στη γεωργία. Δημιουργήθηκε σύμφωνα με τρία βασικά κριτήρια: την ακρίβεια, το ελάχιστο δυνατό μέγεθος και βάρος και την ευκολία στη χρήση. Ο αισθητήρας Sequoia έχει σχεδιαστεί για να είναι κατάλληλος για όλους τους τύπους UAV, είτε είναι σταθερής πτέρυγας, είτε είναι πολυκόπτερα, και έχει δυνατότητα ανάρτησης σε gimbal. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη φωτογραφιών αγροτικών πεδίων σε διάφορες φασματικές ζώνες, οι οποίες μετρούν την κατάσταση της βλάστησης. Οι εικόνες που λαμβάνονται μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας διάφορα λογισμικά. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία θεματικών χαρτών για δείκτες βλάστησης (NDVI, NDRE, SAVI, GNDVI, κ.λπ.) και να δώσουν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση υγείας της καλλιέργειας, τη λίπανση, τη φυτοπροστασία κ.λπ.

Διαθέτει τέσσερις μονοχρωματικούς αισθητήρες:

- Green (μήκος κύματος 550nm, 40nm bandwidth)
- Red (μήκος κύματος 660nm, 40nm bandwidth)
- Red Edge (μήκος κύματος 735nm, 10nm bandwidth)
- Near Infra-Red (μήκος κύματος 790nm, 40nm bandwidth)

Οι παραπάνω αισθητήρες έχουν ανάλυση 1,2 Mp. επίσης, διαθέτει έναν αισθητήρα ορατού φωτός (RGB) ανάλυσης 16 Mp. Επιπλέον στον πολυφασματικό αισθητήρα προσαρμόζεται ο αισθητήρας ηλιακής ακτινοβολίας, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση των εικόνων, ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό καθιστά δυνατή τη σύγκριση των φωτογραφιών με την πάροδο του χρόνου, παρόλο που το φως κατά τη διάρκεια λήψης των εικόνων μεταβάλλεται. Τέλος, στον πολυφασματικό αισθητήρα είναι ενσωματωμένο σύστημα εντοπισμού GPS/GNSS, για την αυτόματη γεωαναφορά των εικόνων που λαμβάνονται.

2.2 Λογισμικά Επεξεργασίας

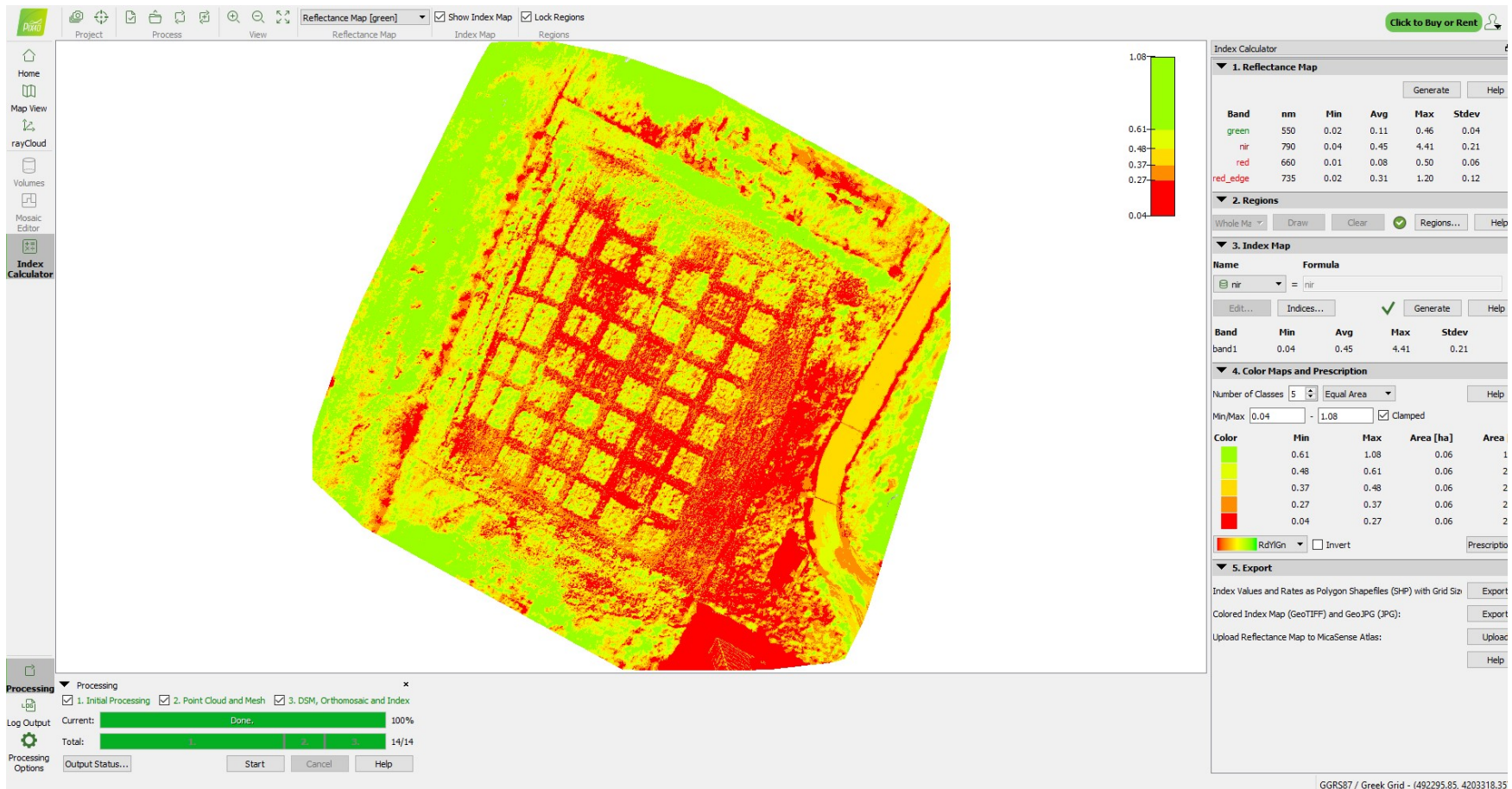
2.2.1 Φωτογραμμετρική Επεξεργασία

Το φωτογραμμετρικό λογισμικό, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη για τη διεκπεραίωση των απαιτούμενων επεξεργασιών, ήταν το λογισμικό φωτογραμμετρίας Pix4D mapper (version 4.3), ενώ η εφαρμογή πλοήγησης για κινητές συσκευές ήταν το Pix4D Capture (version 4.4)

Το λογισμικό Pix4D mapper (Εικ 2.1) είναι μια σειρά προϊόντων λογισμικού που χρησιμοποιεί αλγόριθμους φωτογραμμετρίας και ψηφιακής όρασης, για τη μετατροπή των μεμονομένων εικόνων που αποκτώνται σε μια πτήση, τόσο των RGB, όσο και των πολυφασματικών εικόνων σε ορθομωσαϊκά, ψηφιακά μοντέλα εδάφους, τρισδιάστατα μοντέλα και τρισδιάστατους χάρτες. Αναπτύσσεται και παρέχεται από την εταιρία Pix4D S.A., η οποία ξεκίνησε ως start-up το 2011 στην Ελβετία. Το συγκεκριμένο λογισμικό εφαρμόζεται σε διάφορους τομείς. Αξιοποιείται σε εφαρμογές, όπως η χαρτογράφηση πόλεων για τον πολεοδομικό σχεδιασμό, το κτηματολόγιο, η μοντελοποίηση του εδάφους και πολλά άλλα. Επίσης, χρησιμοποιείται στον τομέα των κατασκευών, των χωματουργικών έργων και της εξόρυξης για την ευκολότερη, γρηγορότερη και ακριβέστερη εποπτεία των εργοταξίων και τη χαρτογράφηση της προόδου των έργων. Ακόμη, εφαρμόζεται στον τομέα της προβολής και πώλησης ακινήτων με την εύκολη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων. Τέλος, αξιοποιείται με μεγάλη επιτυχία στον τομέα της γεωργίας, δίνοντας σημαντικές πληροφορίες για την εξέλιξη των καλλιεργειών, τη γρήγορη απόκριση, τη λειτουργική απόδοση και εν τέλει την βελτίωση των αποδόσεων. Οι δυνατότητες του λογισμικού για την παρακολούθηση των καλλιεργειών μέσω των αισθητήρων που προσαρμόζονται στα ΣμηΕΑ είναι αρκετές, δίνοντας ακριβείς χάρτες δεικτών, όπως ο NDVI, χάρτες εφαρμογής λιπάσματος, καθώς και συνολική εικόνα του αγροτεμαχίου μέσω των ορθομωσαϊκών.

Το λογισμικό Pix4D Capture (Εικ. 2.2) είναι μία εφαρμογή για κινητές συσκευές, η οποία δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει το UAV που διαθέτει και στη συνέχεια να δημιουργήσει το σχέδιο πτήσης που θέλει να ακολουθήσει.

Ανάλογα με την περίπτωση ο χρήστης μπορεί να διαλέξει το είδος της πτήσης που επιθυμεί (πολύγωνο, κύκλος κ.λπ.) και να παραμετροποιήσει το σχέδιο πτήσης σύμφωνα με τις απαιτήσεις της χρήσης του. Οι παράμετροι που μπορεί ο χρήστης να ορίσει είναι το ύψος πτήσης, η ταχύτητα του UAV, το ποσοστό επικάλυψης ανάμεσα στις γραμμές πτήσης και ανάμεσα στις λήψεις, καθώς και τη γωνία που θα έχει η κάμερα του UAV κατά τη διάρκεια της πτήσης. Η εφαρμογή προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης της πτήσης κατά τη διάρκειά της, με την παροχή δεδομένων τηλεμετρίας, όπως το ύψος και η ταχύτητα πτήσης, καθώς και τη ζωντανή εικόνα από την κάμερα. Τέλος, ο χρήστης μπορεί άμεσα να δει το αποτέλεσμα της πτήσης που πραγματοποίησε και να ανεβάσει τις εικόνες για άμεση επεξεργασία από την cloud έκδοση της εφαρμογής.



Εικόνα 2.1. Κατασκευή Ορθομωσαϊκών στο λογισμικό Pix4d Mapper.

2.2.2 Χωρική Επεξεργασία

Η χωρική επεξεργασία των ορθομωσαϊκών έγινε στα λογισμικά ArcGIS (version 10.6) και ArcGIS Pro version (2.4).

Το ArcGIS είναι μια ολοκληρωμένη συλλογή από προϊόντα λογισμικού για Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS). Χρησιμοποιείται σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, οι οποίες περιλαμβάνουν σχεδιασμό, ανάλυση, διαχείριση και καταγραφή γεωγραφικών συστημάτων, environmental management, land records management, land planning, vehicle tracking κ.α.

Το ArcGIS περιλαμβάνει το ακόλουθο λογισμικό για τα Windows:

- ArcReader, που επιτρέπει σε κάποιον να προβάλει και να αναζητά τους χάρτες που έχουν δημιουργηθεί με τα άλλα προϊόντα του ArcGIS.
- Το ArcGIS Desktop, που περιλαμβάνει τρία βασικά υποπρογράμματα το ArcMap, το ArcCatalog και το ArcToolbox, έχει άδεια χρήσης κάτω από τρία επίπεδα λειτουργικότητας:
 1. ArcGIS Desktop Basic (παλαιότερα γνωστή ως ArcView), η οποία επιτρέπει σε κάποιον να προβάλει χωρικά δεδομένα, να δημιουργεί χρωματικούς χάρτες και να εκτελεί βασικές χωρικές αναλύσεις.
 2. Το ArcGIS Desktop Standard (παλαιότερα γνωστό ως ArcEditor), το οποίο εκτός από τη λειτουργικότητα του ArcView περιλαμβάνει και πιο προηγμένα εργαλεία για το χειρισμό των shapefiles και των γεωγραφικών δεδομένων.
 3. Το ArcGIS Desktop Advanced (παλαιότερα γνωστό ως ArcInfo), το οποίο περιλαμβάνει δυνατότητες επεξεργασίας και ανάλυσης χωρικών δεδομένων.
- Το ArcGIS Pro, είναι η νέα εφαρμογή της ESRI και πρόκειται να αντικαταστήσει το ArcMap. Το ArcGIS Pro λειτουργεί σε 2D και 3D για χαρτογράφηση και οπτικοποίηση και περιλαμβάνει την μοντέλα Τεχνητής Νοημοσύνης (AI).

Το ευρέως διαδεδομένο λογισμικό Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων ArcGIS είναι το βασικό συστατικό της σειράς γεωχωρικών επεξεργασιών της εταιρίας Esri. Χρησιμοποιείται για την προβολή, επεξεργασία, δημιουργία και ανάλυση γεωχωρικών δεδομένων και επιτρέπει στο χρήστη να διερευνά δεδομένα εντός ενός συνόλου δεδομένων, να συμβολίζει αντίστοιχα τις λειτουργίες και να δημιουργεί χάρτες. Οι χρήστες του ArcMap μπορούν να δημιουργούν και να χειρίζονται σύνολα δεδομένων για να συμπεριλαμβάνουν μια ποικιλία πληροφοριών. Για παράδειγμα, οι χάρτες που παράγονται στο ArcMap περιλαμβάνουν γενικά χαρακτηριστικά όπως ράβδους κλίμακας, τίτλους, υπομνήματα κ.λπ.

Επίσης στο ArcGIS υπάρχει το ModelBuilder, ένα περιβάλλον που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία, την επεξεργασία και τη διαχείριση μοντέλων. Τα μοντέλα είναι ροές εργασίας, που συνδυάζουν ακολουθίες εργαλείων γεωεπεξεργασίας, τροφοδοτώντας την έξοδο (output) ενός εργαλείου σε άλλο εργαλείο, ως είσοδο (input). Το ModelBuilder μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως μια οπτική γλώσσα προγραμματισμού, για τη δημιουργία ροών εργασιών.

Το SPSS Statistics είναι ένα πακέτο λογισμικού που χρησιμοποιείται για τη στατιστική ανάλυση. Το όνομα του λογισμικού ανήκε αρχικά στο στατιστικό πακέτο για τις κοινωνικές επιστήμες (Statistical Package for the Social Sciences), αντανακλώντας την αρχική αγορά, αν και το λογισμικό είναι πλέον δημοφιλές και σε άλλους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των επιστημών υγείας και του μάρκετινγκ. Εκτός από τη στατιστική ανάλυση, τα χαρακτηριστικά του βασικού λογισμικού είναι η διαχείριση δεδομένων (επιλογή υποθέσεων, αναδιαμόρφωση αρχείων, δημιουργία παραγόμενων δεδομένων) και η τεκμηρίωσή τους.

2.3 Δεδομένα και μεθοδολογία

2.3.1 Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ακολουθούν το πειραματικό σχέδιο των Τυχαιοποιημένων Πλήρων Ομάδων (ΤΠΟ) σε καλλιέργεια κριθαριού. Αναλυτικότερα περιείχε 4 επαναλήψεις 10 μεταχειρίσεων. Ειδικότερα έλαβαν χώρα 5 μεταχειρίσεις όσον αφορά τη ζιζανιοκτονία ως ακολούθως:

- 3 μεταχειρίσεις με τα προφυτρωτικά ζιζανιοκτόνα Boxer (Prosulfocarb), Constel (Chlortoluron + Diflufenican) και Stomp (Pendimethalin)
- 1 μεταχείριση με μείγμα μεταφυτρωτικών ζιζανιοκτόνων Axial + Mustang (Pinoxaden + Florasulam)
- 1 μεταχείριση χωρίς προσθήκη ζιζανιοκτόνου (Control)

Οι παραπάνω επεμβάσεις έγιναν σε δύο πυκνότητες σποράς κριθαριού, ποικιλίας Planet 14 και 20 kg/στρ (Σχ. 2.1).

Τέλος έγινε προσθήκη ζιζανίων του γένους *Lolium* με σκοπό τον έλεγχο ανάπτυξης του κριθαριού με βάση τις παραπάνω μεταχειρίσεις.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ορθομωσαϊκά που δημιουργήθηκαν από την επεξεργασία εικόνων στο λογισμικό Pix4D Mapper. Οι εικόνες αυτές ελήφθησαν από την κάμερα Parrot Sequoia, η οποία ήταν προσαρτημένη στο UAV Matrice 100 της DJI-Science and Technology Co., Ltd. Ο αισθητήρας αυτός περιέχει 5 κανάλια RGB Green (550nm), Red (660nm), Red edge (735nm) και Near IR (790nm).

Τέλος τα δεδομένα τηλεπισκόπησης συγκρίθηκαν με χαρακτηριστικά απόδοσης και ανάπτυξης του κριθαριού, που είχαν μετρηθεί από το Εργαστήριο Γεωργίας του ΓΠΑ.

20 kg/στρ. Axial+Mustang	20 kg/στρ. Control	14 kg/στρ. Constel	20 kg/στρ. Stomp	14 kg/στρ. Axial+Mustang
14 kg/στρ. Boxer	14 kg/στρ. Stomp	14 kg/στρ. Control	20 kg/στρ. Constel	20 kg/στρ. Boxer
20 kg/στρ. Constel	14 kg/στρ. Control	20 kg/στρ. Axial+Mustang	20 kg/στρ. Stomp	14 kg/στρ. Axial+Mustang
14 kg/στρ. Boxer	20 kg/στρ. Control	14 kg/στρ. Constel	20 kg/στρ. Boxer	14 kg/στρ. Stomp
20 kg/στρ. Boxer	14 kg/στρ. Constel	20 kg/στρ. Stomp	14 kg/στρ. Boxer	20 kg/στρ. Control
14 kg/στρ. Stomp	20 kg/στρ. Axial+Mustang	14 kg/στρ. Control	20 kg/στρ. Constel	14 kg/στρ. Axial+Mustang
20 kg/στρ. Control	20 kg/στρ. Constel	14 kg/στρ. Axial+Mustang	14 kg/στρ. Boxer	20 kg/στρ. Stomp
20 kg/στρ. Axial+Mustang	14 kg/στρ. Stomp	20 kg/στρ. Boxer	14 kg/στρ. Control	14 kg/στρ. Constel

Σχήμα 2.1. Πειραματικό Σχέδιο.

2.3.2 Μεθοδολογία

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 7 πτήσεις στις ακόλουθες χρονικές περιόδους:

- 1^η Πτήση 26/1/2018 – Αρχές αδελφώματος
- 2^η Πτήση 9/2/2018 – Μέσα αδελφώματος
- 3^η Πτήση 27/2/2018 – Τέλος αδελφώματος
- 4^η Πτήση 16/3/2018 – Καλάμωμα
- 5^η Πτήση 3/4/2018 – Διόγκωση κολεού
- 6^η Πτήση 4/5/2018 – Γέμισμα καρπών
- 7^η Πτήση 22/5/2018 – Οικονομική ωρίμανση

Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά των σχεδίων πτήσης ήταν τα εξής:

- Αρχικά δημιουργήθηκαν στην εφαρμογή Pix4D Capture τα σχέδια πτήσης, τα οποία ήταν τύπου διπλού πλέγματος (double grid) με σκοπό την καλύτερη επικάλυψη και στους 2 άξονες (Εικ. 2.2)
- Το υψόμετρο ορίστηκε στα 20m από την επιφάνεια του εδάφους
- Η επικάλυψη (overlap) ορίστηκε 80%
- Η ταχύτητα του UAV ορίστηκε 6m/s (21,6 km/h)
- Η ταχύτητα λήψης φωτογραφιών ορίστηκε κάθε 1s

Στη συνέχεια έγινε συνδυασμός των εικόνων που ελήφθησαν στο λογισμικό Pix4D Mapper (Εικ. 2.1) και δημιουργήθηκαν ορθομωσαϊκά (green, red, red edge και NIR) για κάθε κανάλι ξεχωριστά. Τα ορθομωσαϊκά αυτά εισήχθησαν στο ArcMap όπου δημιουργήθηκαν shaperefiles με τα 40 πειραματικά τεμάχια, ένα για κάθε πτήση. Πραγματοποιήθηκε επίσης η εξαγωγή των δεικτών βλάστησης NDVI, GNDVI, NDRE, OSAVI, RESAVI, MCARI, CL_{green} , CL_{re} , EVI2 και RDVI με τη χρήση ειδικού εργαλείου (Raster Calculator). Επίσης έγινε εξαγωγή των στατιστικών στοιχείων (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ελάχιστη τιμή, μέγιστη τιμή και εύρος) για το κάθε πειραματικό τεμάχιο ανά πτήση (Zonal Statistics as table). Τέλος, έγινε εισαγωγή των δεδομένων που προέκυψαν στο Microsoft Excel (Table to Excel).

Για την ευκολότερη πραγματοποίηση των παραπάνω εντολών δημιουργήθηκε ένα μοντέλο στο περιβάλλον του ModelBuilder (Σχ. 2.2)

Τέλος, πραγματοποιήθηκε περαιτέρω επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων στο λογισμικό Microsoft Office Excel 2010 και το στατιστικό πακέτο IBM SPSS v 25. Παράλληλα τα δεδομένα τηλεπισκόπησης συσχετίστηκαν με μετρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί στο Εργαστήριο Γεωργίας του Γ.Π.Α και αφορούσαν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του κριθαριού.



Εικόνα 2.2. Δημιουργία Σχεδίου Πτήσης στην εφαρμογή Pix4d Capture.



Σχήμα 2.2. Μοντέλο υπολογισμού Τεσσάρων Δεικτών Βλάστησης ανά πειραματικό τεμάχιο στο περιβάλλον Model Builder του ArcGIS Pro.

2.3.3 Στατιστική Επεξεργασία

Η στατιστική επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS (version 25.0).

Οι στατιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το t-test, η Πολυμεταβλητή Ανάλυση Διακύμανσης (MANOVA), και η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (PCA). Επίσης έγινε χρήση του συντελεστή συσχέτισης Pearson και υπολογίστηκε λογαριθμικό μοντέλο παλινδρόμησης.

Το t-test χρησιμοποιείται για την σύγκριση των μέσων όρων δυο συνόλων τιμών, που διαφέρουν όσον αφορά ένα χαρακτηριστικό. Για τη χρήση του t-test η εξαρτημένη μεταβλητή είναι ποσοτική (ή τα αποτελέσματα μιας κλίμακας Likert), ενώ η ανεξάρτητη είναι ποιοτική, με δυο όμως μόνο τιμές. Η διατύπωση των υποθέσεων ενός ερευνητή γενικά έχει την εξής μορφή: Μηδενική υπόθεση (H_0): οι μέσοι όροι των δυο ομάδων δεν διαφέρουν μεταξύ τους. Εναλλακτική υπόθεση (H_1): οι μέσοι όροι διαφέρουν μεταξύ τους.

Το πιο γνωστό μέτρο της εξάρτησης μεταξύ δύο ποσοτήτων είναι ο συντελεστής συσχέτισης συνδιακύμανσης Pearson, ή "Pearson συντελεστής συσχέτισης", που συνήθως ονομάζεται απλά "ο συντελεστής συσχέτισης". Είναι το πηλίκο της διαίρεσης της συνδιακύμανσης των δύο μεταβλητών με το γινόμενο των τυπικών αποκλίσεων. Η συσχέτιση Pearson είναι +1 σε περίπτωση μίας τέλει άμεσης (αύξουσας) γραμμικής σχέσης (συσχέτιση), -1 σε περίπτωση μίας τέλει φθίνουσας (αντίστροφης) γραμμικής σχέσης (αντισυσχέτιση), και κάποια τιμή μεταξύ -1 και 1 σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, που δείχνει το βαθμό της γραμμικής εξάρτησης μεταξύ των μεταβλητών. Καθώς πλησιάζει το μηδέν υπάρχει λιγότερη σχέση (πιο κοντά σε ασυσχέτιστα). Όσο πιο κοντά είναι ο συντελεστής είτε στο -1 ή στο 1, τόσο ισχυρότερη είναι η συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών.

Η παλινδρόμηση είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη στατιστική τεχνική μοντελοποίησης, για την έρευνα της συσχέτισης μεταξύ μίας εξαρτώμενης μεταβλητής και μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Χρησιμοποιείται με σκοπό την εκχώρηση δεδομένων σε μία πραγματική μεταβλητή πρόβλεψης, όπως ισχύει και στην περίπτωση της κατηγοριοποίησης όταν είναι διακριτή, αλλιώς

καλείται παλινδρόμηση, αν η μεταβλητή είναι συνεχής. Η παλινδρόμηση προϋποθέτει ότι τα σχετικά δεδομένα ταιριάζουν με μερικά γνωστά είδη συνάρτησης και μετά καθορίζει την καλύτερη συνάρτηση αυτού του είδους, που μοντελοποιεί τα δεδομένα που έχουν δοθεί. Αποτέλεσμα της παλινδρόμησης όταν χρησιμοποιείται ως τεχνική εξαγωγής δεδομένων, αποτελεί ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται αργότερα για να προβλέψει τις τιμές της κατηγορίας για τα νέα δεδομένα. Τέτοια παραδείγματα εφαρμογής της παλινδρόμησης αποτελεί η πρόβλεψη της ζήτησης για ένα νέο προϊόν ή υπηρεσία συναρτήσει των δαπανών διαφήμισης ή ο υπολογισμός της ταχύτητας του ανέμου σε σχέση με την θερμοκρασία, την υγρασία και την ατμοσφαιρική πίεση του περιβάλλοντος.

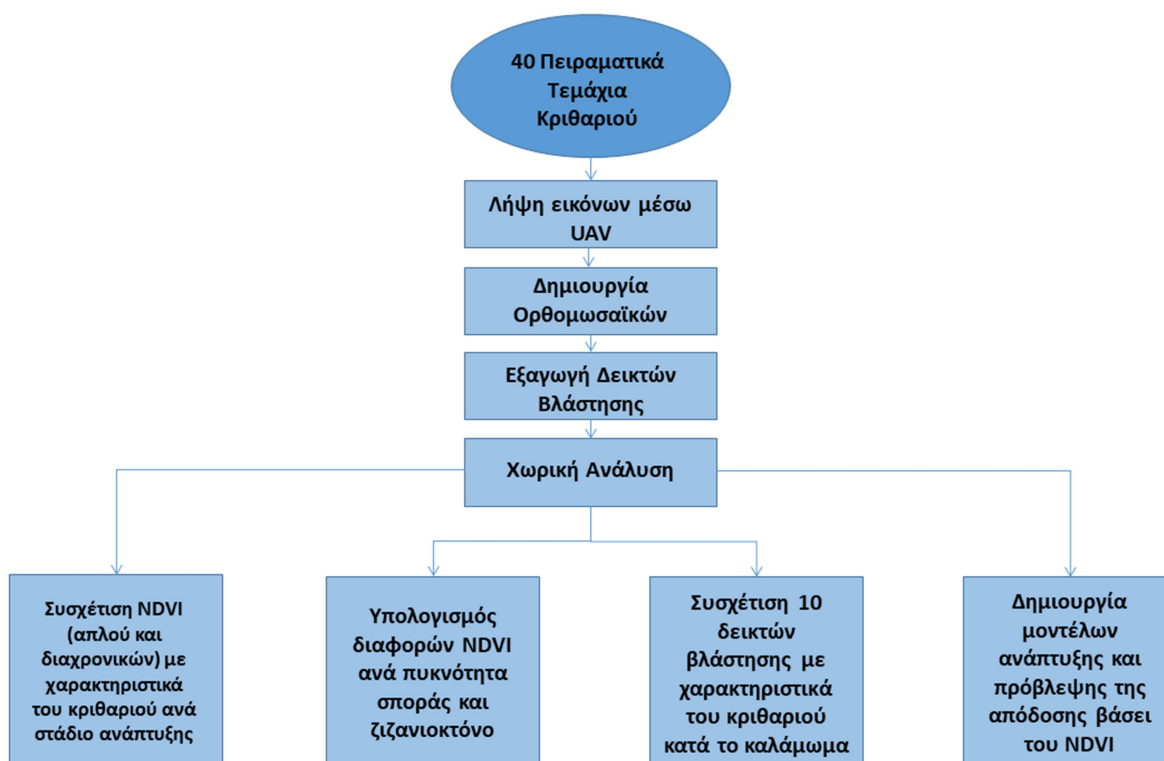
Η χρήση της MANOVA σε πειράματα, όπου μπορούμε να χειριστούμε κάποιες ανεξάρτητες μεταβλητές κατά βούληση, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της κλασικής ANOVA: α) Η θεώρηση πολλών εξαρτημένων μεταβλητών σε ένα μοναδικό πείραμα παρέχει μεγαλύτερη πιθανότητα έκβασης ενός παράγοντα να βρεθεί πραγματικά σημαντικός. β) Μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης του σφάλματος τύπου I που συχνότερα απαντάται στις ατομικές εφαρμογές ANOVA. γ) Μπορεί να ανιχνεύσει διαφορές εκεί που οι ατομικοί έλεγχοι της ANOVA αδυνατούν να το πράξουν.

Η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (PCA) είναι μία στατιστική διαδικασία, η οποία μετατρέπει μία ομάδα τιμών (παρατηρήσεων), δυνητικά συσχετιζόμενων μεταβλητών σε μία ομάδα νέων τιμών μη γραμμικά συσχετιζόμενων μεταβλητών, οι οποίες καλούνται κύριες συνιστώσες. Ο αριθμός των νέων μεταβλητών που προκύπτει είναι ίσος ή και, συχνότερα, πολύ μικρότερος από τον αριθμό των αρχικών μεταβλητών. Η μετάβαση αυτή πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε, η πρώτη συνιστώσα να εξηγεί τη μέγιστη δυνατή διακύμανση που αναπτύσσεται μεταξύ των αρχικών μεταβλητών, η δεύτερη, μη συσχετιζόμενη με την πρώτη, να εξηγεί ένα σημαντικό μέρος αυτής αλλά πάντα μικρότερο της πρώτης κ.ο.κ. (Παπαδόπουλος, 2008)

2.4 Διάγραμμα ροής της εργασίας

Στο παρακάτω σχήμα (Σχ.2.2) φαίνεται αναλυτικά το διάγραμμα ροής της εργασίας.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η λήψη των εικόνων μέσω UAV, έπειτα δημιουργήθηκαν ορθομωσαϊκά στο λογισμικό Pix4d Mapper και εξήχθησαν οι δείκτες βλάστησης στο ArcGIS. Έπειτα πραγματοποιήθηκε χωρική στατιστική ανάλυση σε 3 επίπεδα:



Σχήμα 2.2. Διάγραμμα Ροής της εργασίας.

Τέλος υπολογίστηκαν οι διαφορές ανά πυκνότητα σποράς και ζιζανιοκτόνου με τις στατιστικές μεθόδους που προαναφέρθηκαν, συσχέτιση του NDVI με χαρακτηριστικά ανάπτυξης και απόδοσης του κριθαριού ανά στάδιο ανάπτυξης και συσχέτιση δεικτών βλάστησης με τα χαρακτηριστικά του κριθαριού, κατά το στάδιο του καλαμώματος.

3. Αποτελέσματα και Συζήτηση

3.1 Χάρτες NDVI

Στις παρακάτω εικόνες (Εικ. 3.1-3.7) αποτυπώνεται ο δείκτης NDVI σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του κριθαριού. Οι εικόνες αυτές αποτελούν προϊόν επεξεργασίας των ορθομωσαϊκών στο περιβάλλον ArcGIS και συγκεκριμένα απομόνωσης των περιοχών των τεμαχίων κριθαριού.

Ο δείκτης βλάστησης NDVI χώρισε τα στάδια ανάπτυξης σε 3 περιόδους:

1) Τα αρχικά στάδια ανάπτυξης (Εικόνες 3.1, 3.2), όπου η βλάστηση δεν είχε ακόμη αναπτυχθεί και ήταν ευδιάκριτο το έδαφος εντός των πειραματικών τεμαχίων,

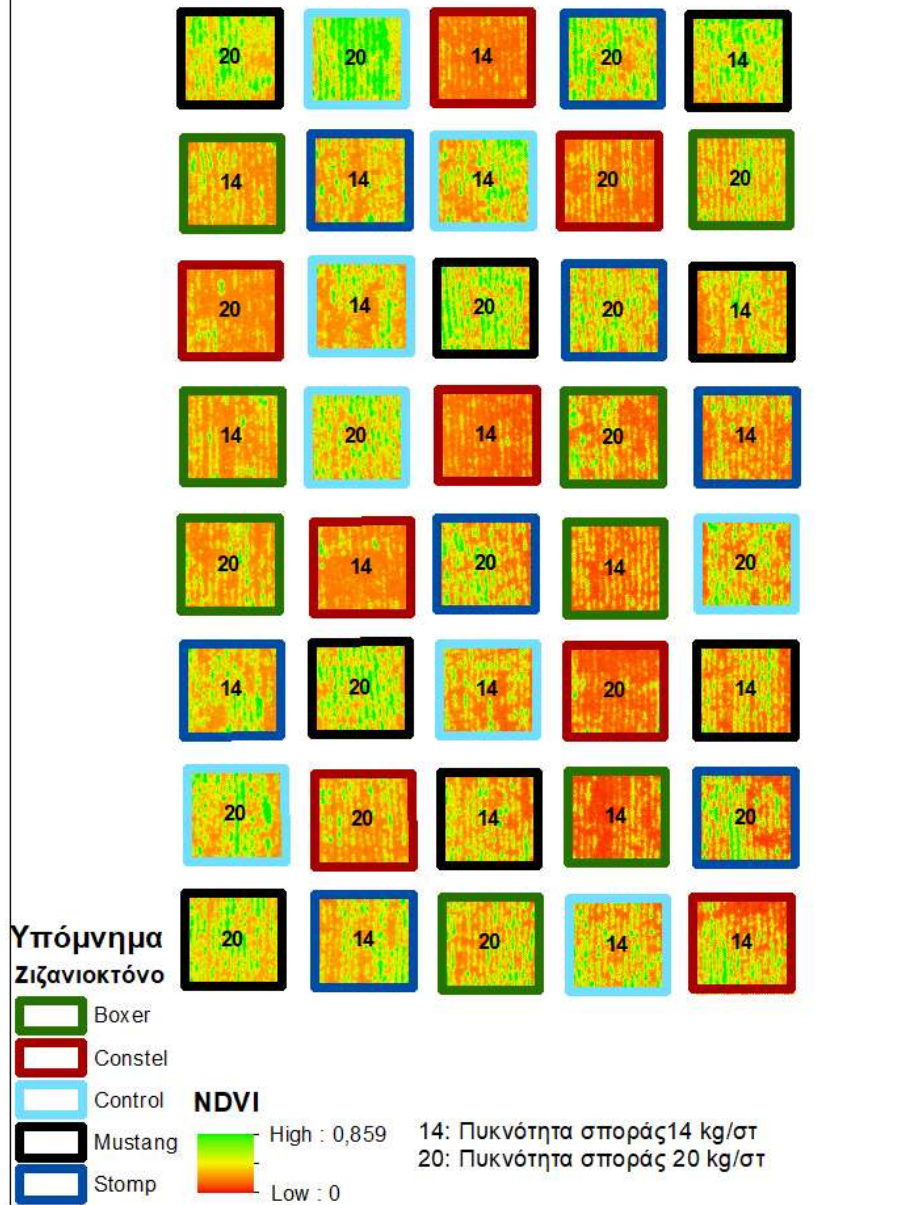
2) Τα μέσα στάδια ανάπτυξης (Εικόνες 3.3 - 3.5), όπου υπήρχε ομοιομορφία και ο NDVI είχε τις μέγιστες τιμές σε όλα τα τεμάχια,

3) Τα τελικά στάδια ανάπτυξης (Εικόνες 3.6, 3.7), όπου ο NDVI μειώθηκε λόγω κιτρινίσματος του κριθαριού.

Επίσης κατά τη δεύτερη περίοδο ήταν ευδιάκριτη η διαφορά μεταξύ των πειραματικών τεμαχίων στα οποία χρησιμοποιήθηκε το ζιζανιοκτόνο Constel. Τα τεμάχια αυτά παρουσίασαν κενά στο κέντρο τους.

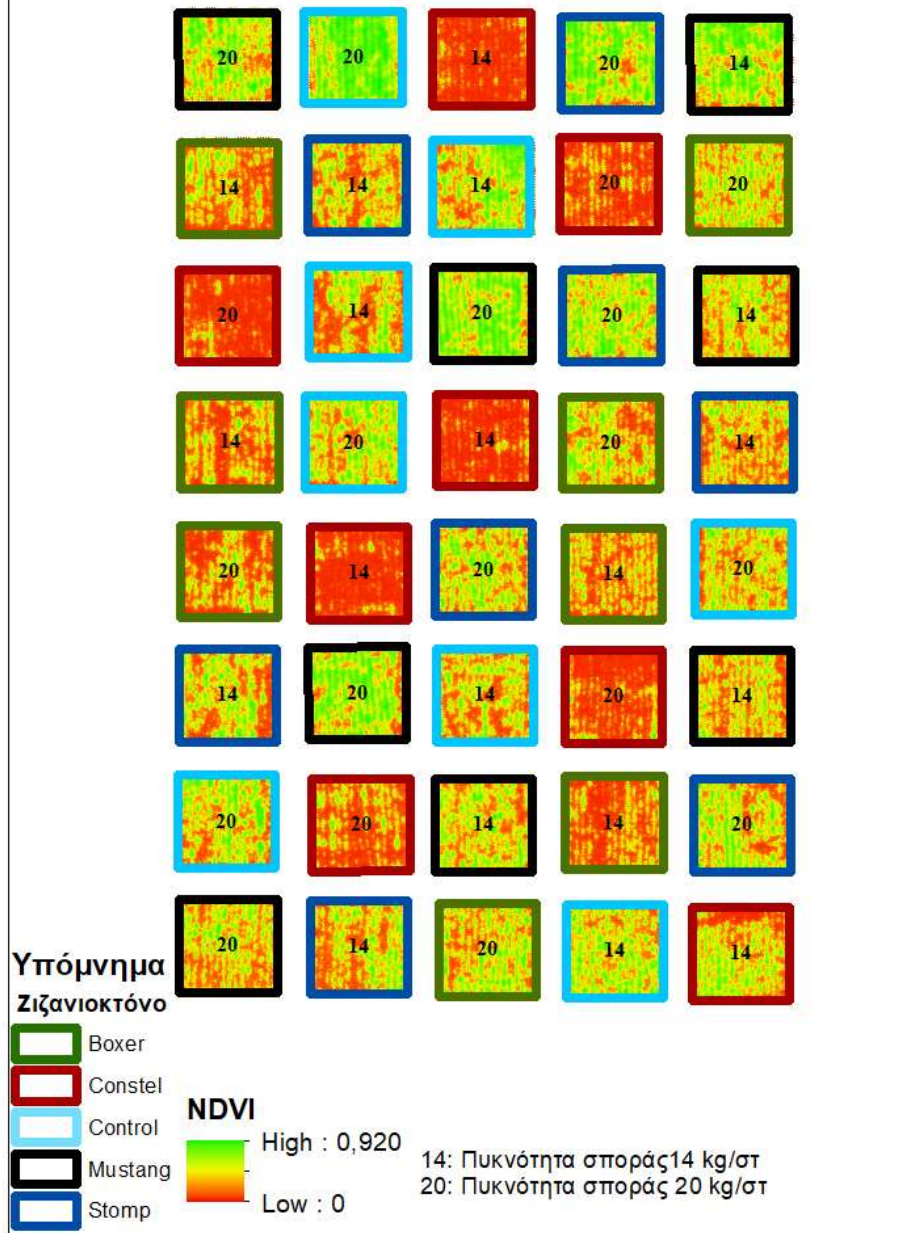
Τέλος, στην τρίτη περίοδο διακρίνονται τα ζιζάνια με πράσινο χρώμα καθώς το κριθάρι έχει κιτρινίσει. Τα περισσότερα ζιζάνια εμφανίζονται στο βορειοδυτικό τμήμα του πειραματικού σχεδίου.

Κατανομή τιμών NDVI/τεμάχιο
κατά την αρχή του αδελφώματος (26/1/2018)



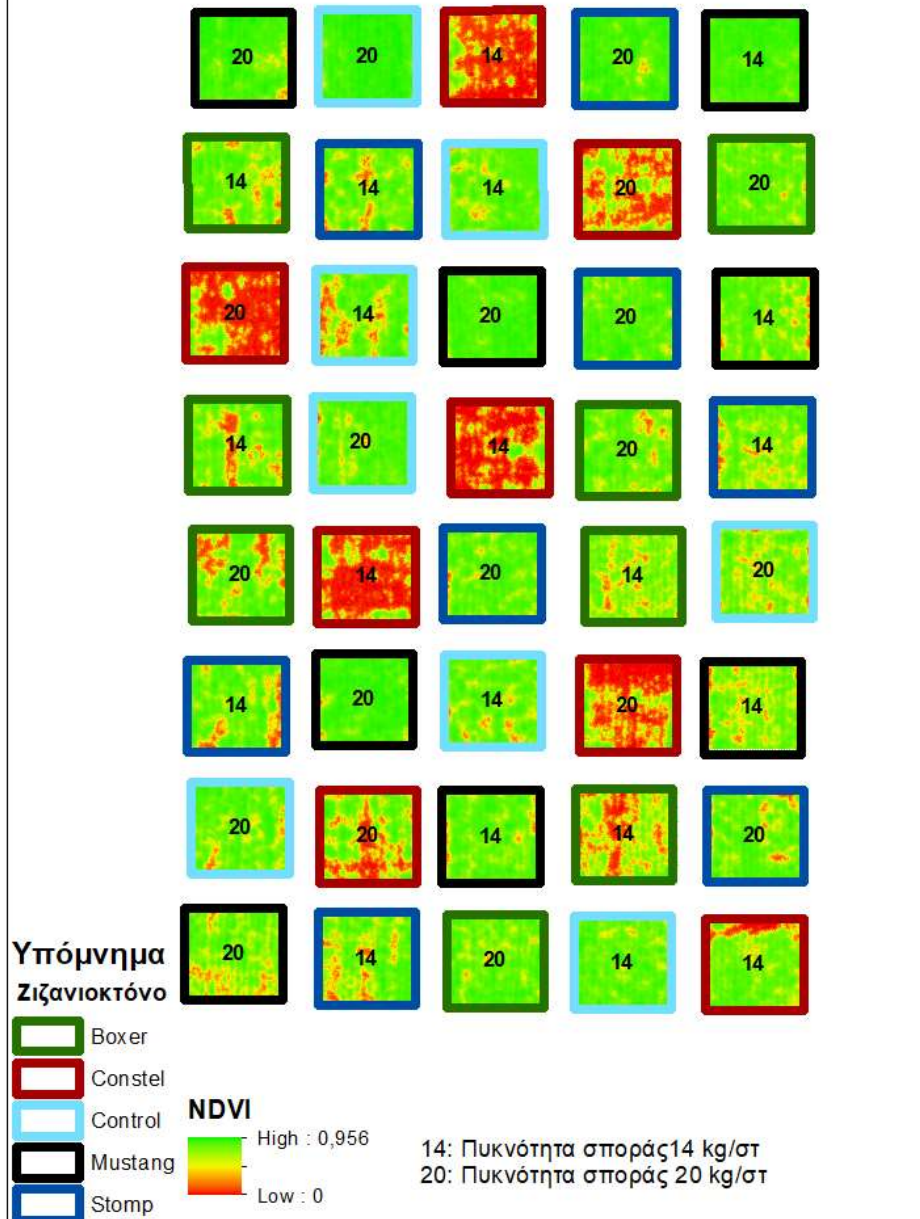
Εικόνα 3.1. NDVI ανά πειραματικό τεμάχιο στην πρώτη πτήση.

Κατανομή τιμών NDVI/τεμάχιο
κατά τα μέσα του αδελφώματος (9/2/2018)



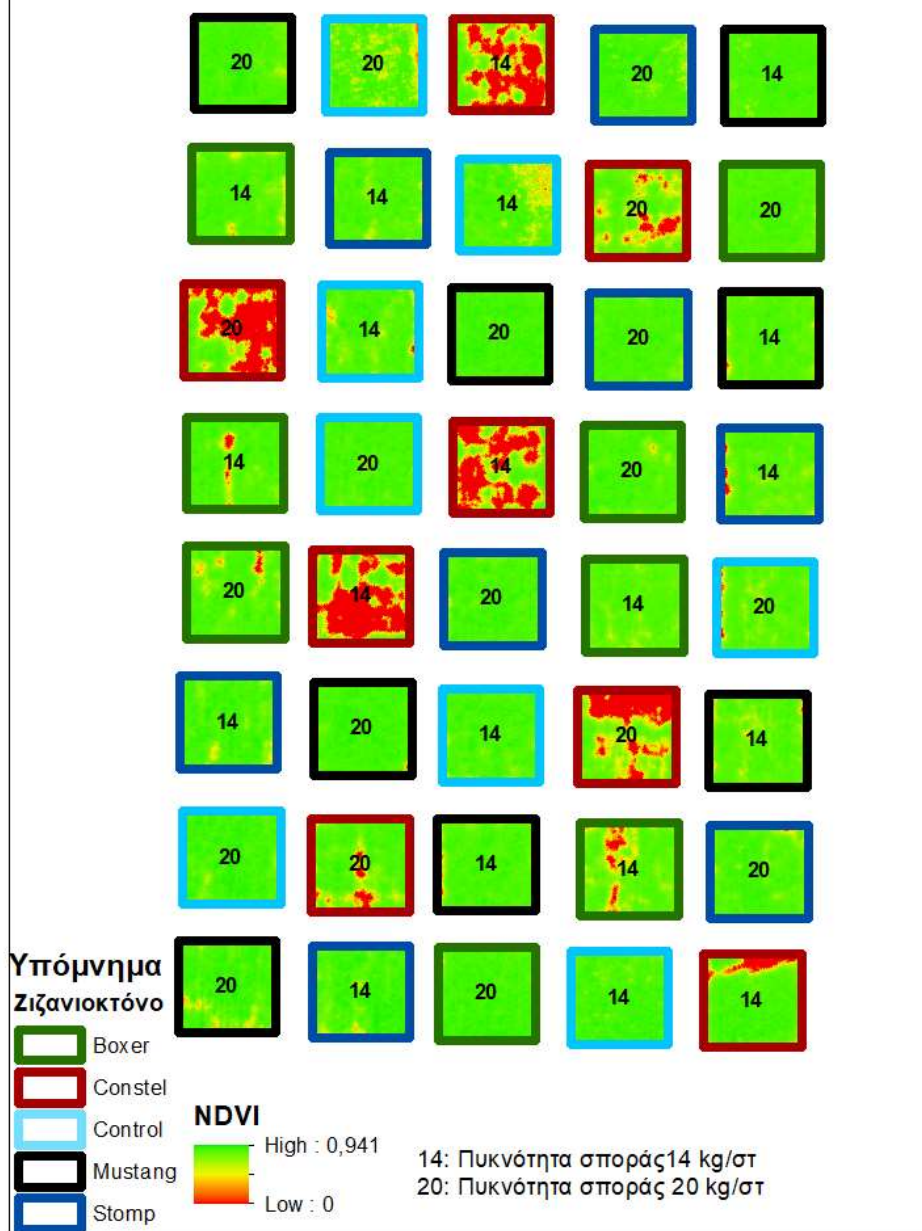
Εικόνα 3.2. NDVI ανά πειραματικό τεμάχιο στη δεύτερη πτήση.

Κατανομή τιμών NDVI/τεμάχιο
κατά το τέλος του αδελφώματος (27/2/2018)



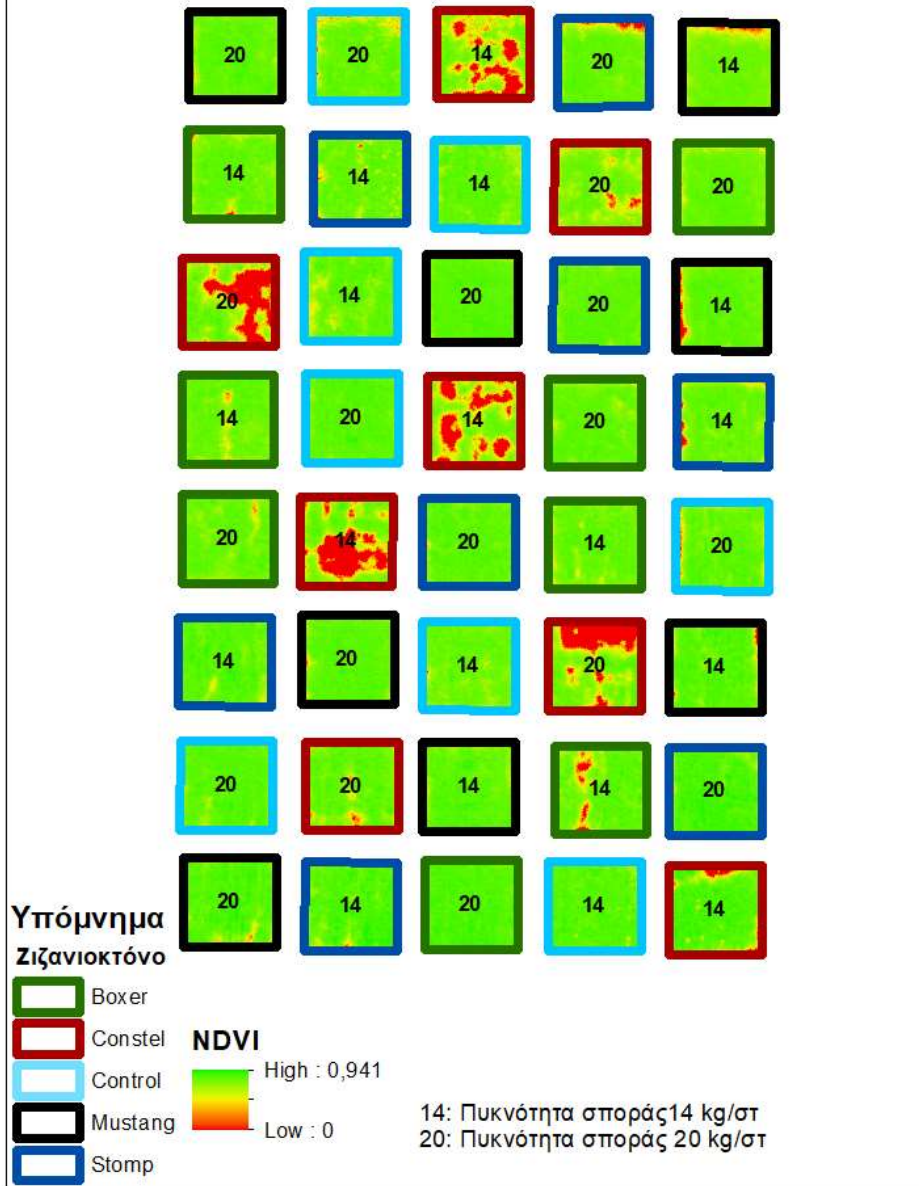
Εικόνα 3.3. NDVI ανά πειραματικό τεμάχιο στην τρίτη πτήση.

Κατανομή τιμών NDVI/τεμάχιο
κατά το καλάμωμα (16/3/2018)



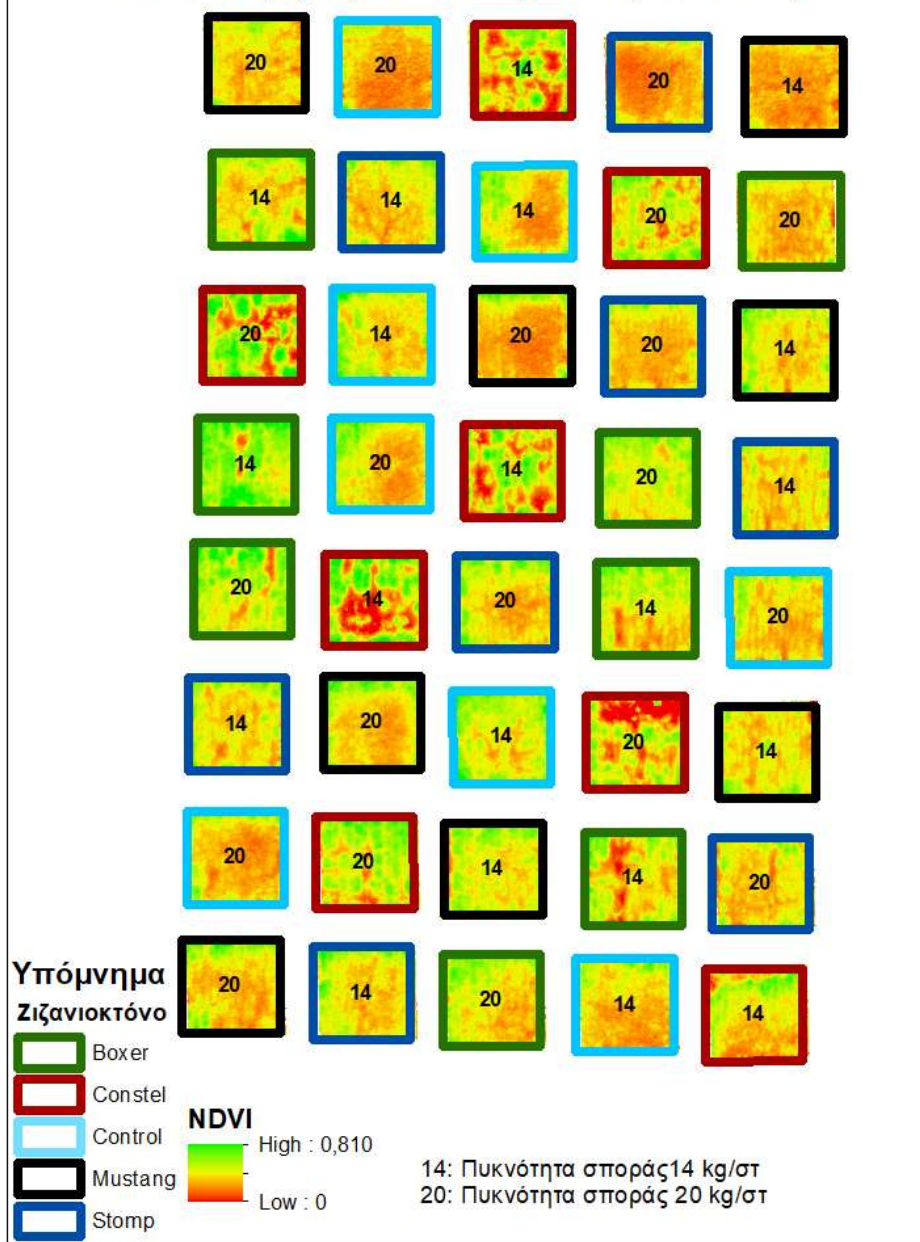
Εικόνα 3.4. NDVI ανά πειραματικό τεμάχιο στην τέταρτη πτήση.

Κατανομή τιμών NDVI/τεμάχιο
κατά τη διόγκωση κολεού (3/4/2018)



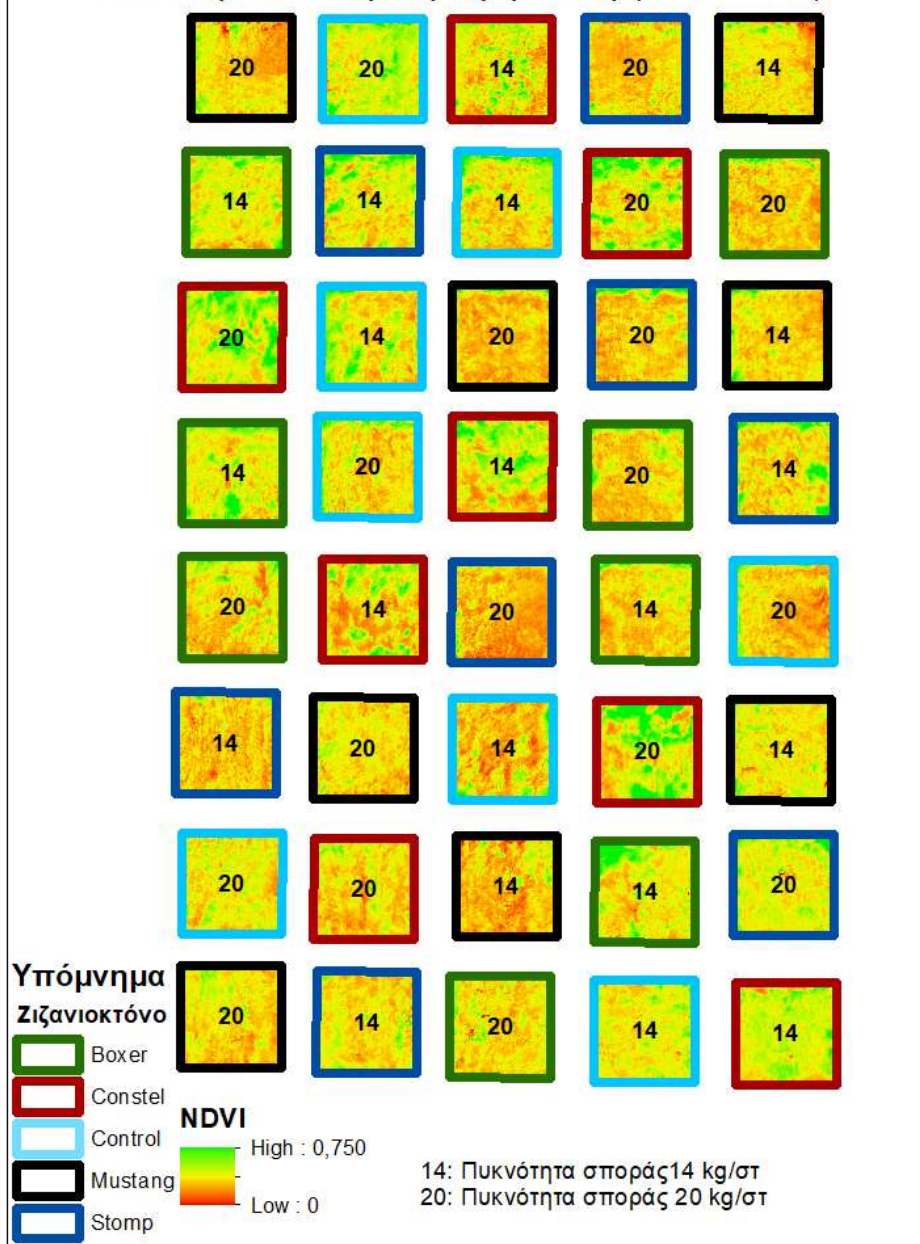
Εικόνα 3.5. NDVI ανά πειραματικό τεμάχιο στην πέμπτη πτήση.

Κατανομή τιμών NDVI/τεμάχιο
κατά το γέμισμα των καρπών (4/5/2018)



Εικόνα 3.6. NDVI ανά πειραματικό τεμάχιο στην έκτη πτήση.

Κατανομή τιμών NDVI/τεμάχιο
κατά την οικονομική ωρίμανση (22/5/2018)



Εικόνα 3.7. NDVI ανά πειραματικό τεμάχιο στην έβδομη πτήση.

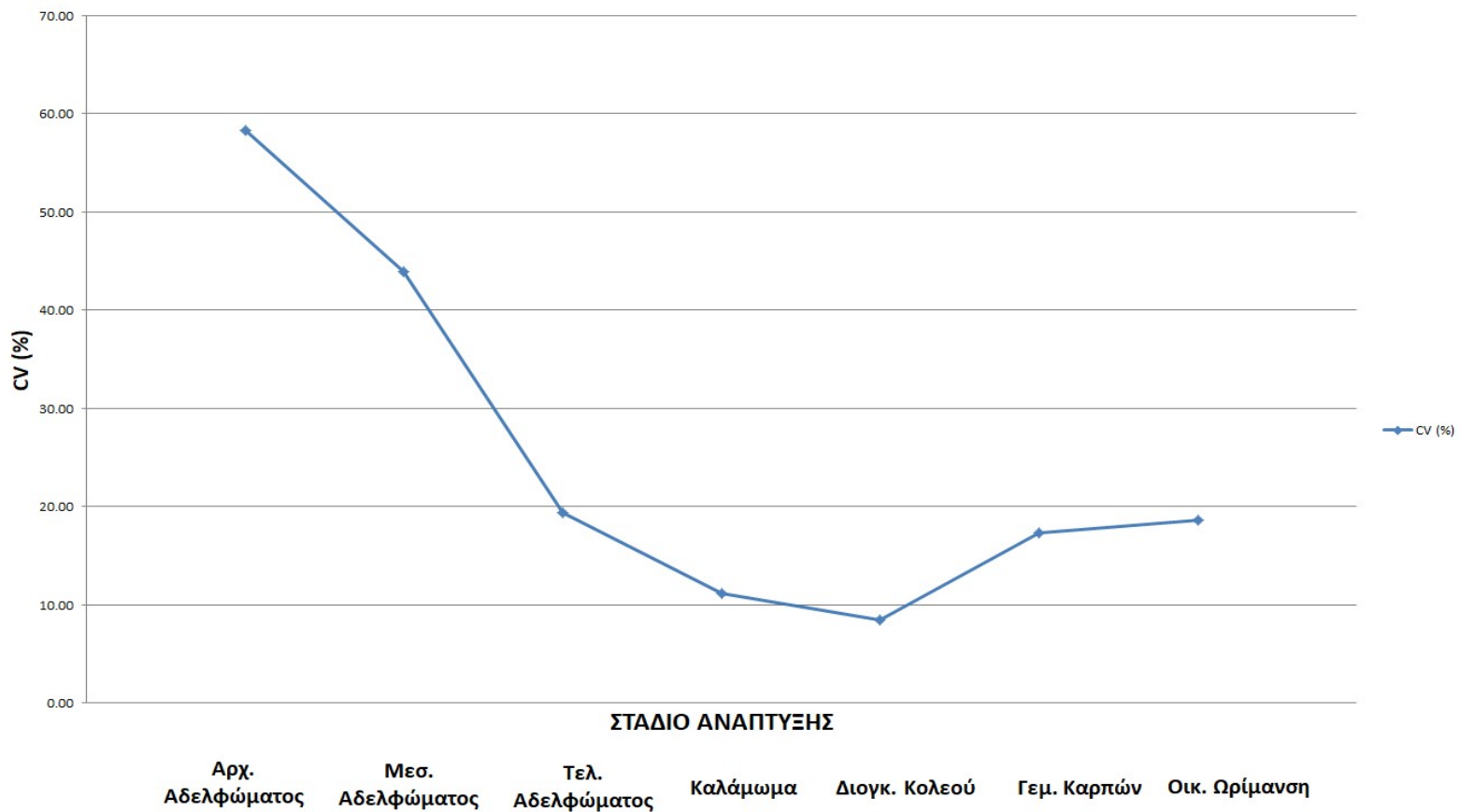
3.2 Μονομεταβλητές Στατιστικές Αναλύσεις

Στον παρακάτω πίνακα (Πιν. 3.1) φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το μέσο NDVI κάθε πτήσης. Επίσης στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η μεταβολή του μέσου NDVI ανά στάδιο ανάπτυξης του κριθαριού.

Πίνακας 3.1. Μέσες τιμές NDVI των 4 επαναλήψεων κάθε μεταχείρισης για κάθε πτήση.

Μεταχείριση \ NDVI	Αρχές αδελφώματος (26/1/2018)	Μέσα αδελφώματος (9/2/2018)	Τέλος αδελφώματος (27/2/2018)	Καλάμωμα (16/3/2018)	Διόγκωση κολεού (3/4/2018)	Γέμισμα καρπών (4/5/2018)	Οικονομική ωρίμανση (22/5/2018)
Boxer 14 kg/στρ	0,133	0,313	0,698	0,855	0,868	0,520	0,238
Boxer 20 kg/στρ	0,193	0,415	0,783	0,883	0,883	0,513	0,218
Constel 14 kg/στρ	0,135	0,238	0,468	0,638	0,770	0,490	0,238
Constel 20 kg/στρ	0,133	0,223	0,495	0,698	0,785	0,513	0,253
Control 14 kg/στρ	0,215	0,458	0,790	0,870	0,883	0,498	0,233
Control 20 kg/στρ	0,278	0,520	0,820	0,870	0,875	0,450	0,228
Stomp 14 kg/στρ	0,205	0,403	0,753	0,870	0,875	0,485	0,225
Stomp 20 kg/στρ	0,233	0,515	0,828	0,885	0,883	0,460	0,215
Axial-Mustang 14 kg/στρ	0,218	0,468	0,800	0,870	0,865	0,475	0,218
Axial-Mustang 20 kg/στρ	0,288	0,540	0,838	0,890	0,885	0,463	0,210
Μέση Τιμή	0,203	0,409	0,727	0,833	0,857	0,487	0,227
Συντελεστής Μεταβλητότητας (%)	58,268	43,997	19,345	11,223	8,456	17,309	18,655

Σχήμα 3.1. Διαγραμματική απεικόνιση της μεταβολής του μέσου NDVI ανά πτήση για κάθε μεταχείριση.



Σχήμα 3.2. Διαγραμματική απεικόνιση της μεταβολής του συντελεστή μεταβλητότητας του NDVI ανά πτήση.

Τα αποτελέσματα έδειξαν μεγαλύτερη μεταβλητότητα κατά τα δύο πρώτα στάδια ανάπτυξης (αρχές και μέσα του αδελφώματος) και μικρότερη κατά το καλάμωμα και τη διόγκωση του κολεού.

Οι μικρότερες διαφορές μεταξύ των μέσων τιμών του NDVI στις μεταχειρίσεις σημειώθηκαν στα προφυτρωτικά ζιζανιοκτόνα Constel και Stomp. Επίσης οι υψηλότερες μέσες τιμές NDVI σημειώθηκαν κατά το καλάμωμα στα πειραματικά τεμάχια, στα οποία είχε χρησιμοποιηθεί το μείγμα μεταφυτρωτικών ζιζανιοκτόνων Axial + Mustang. (Πίν. 3.1 - 3.3, Σχ 3.1)

Στον Πίνακα 3.1 και το Σχήμα 3.2 είναι διακριτή η μείωση του Συντελεστή Μεταβλητότητας CV (%) με την πάροδο του χρόνου έως και το στάδιο διόγκωσης του κολεού και η επερχόμενη αύξησή του λόγω του κιτρινίσματος των φυτών μέχρι το στάδιο της οικονομικής ωρίμανσης.

Ο μάρτυρας (Control) με πυκνότητα σποράς 20 g/στρ παρουσίασε αρκετά υψηλότερο NDVI σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, πιθανότατα λόγω της παρουσίας περισσότερων ζιζανίων.

Το ζιζανιοκτόνο Constel ήταν υπερβολικά ισχυρότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα, καθώς προκάλεσε απώλεια ακόμη και στην κύρια καλλιέργεια. Αυτό συνέβη λόγω του γεγονότος ότι είναι πιο ευκίνητο και με τις βροχές εκπλύθηκε και προκάλεσε ζημιά στις ρίζες του κριθαριού. Η διαφορά ανάμεσα στους δείκτες βλάστησης ήταν εμφανέστερη από τα μέσα του αδελφώματος και έπειτα, καθώς η βλάστηση στα πειραματικά τεμάχια αναπτυσσόταν. Τέλος, μετά το στάδιο του γεμίσματος των καρπών, όπου τα φυτά κιτρίνισαν, εμφανίστηκαν ζιζάνια (πράσινες περιοχές) σε όλα τα τεμάχια, στα οποία χρησιμοποιήθηκε το ζιζανιοκτόνο Constel.

3.3 Πολυμεταβλητές Στατιστικές Αναλύσεις

3.3.1 Πολλαπλή Ανάλυση Διακύμανσης (MANOVA)

Στους παρακάτω πίνακες (Πιν. 3.3 Α – 3.3 Ζ) παρουσιάζεται η πολλαπλή ανάλυση διακύμανσης (MANOVA), η οποία πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη σύγκριση των μέσων όρων ανά πυκνότητα σποράς, ζιζανιοκτόνο και το συνδυασμό των 2 παραμέτρων.

Πίνακας 3.3. *Multiple ANOVA του μέσου NDVI για κάθε στάδιο ανάπτυξης.*

3.3. Α – Αρχή Αδελφώματος

Πηγή	Αθροισμα Τετραγώνων τύπου III	ΒΕ	Τετραγωνικός Μέσος	F	Επ Σημ
Διορθωμένο Μοντέλο	0,114 ^a	9	0,013	5,572	0,000
Τομή	1,644	1	1,644	720,922	0,000
Πυκνότητα	0,019	1	0,019	8,296	0,007
Ζιζανιοκτόνο	0,088	4	0,022	9,649	0,000
Πυκνότητα - Ζιζανιοκτόνο	0,007	4	0,002	0,813	0,527
Σφάλμα	0,068	30	0,002		
Σύνολο	1,827	40			
Διορθωμένο Σύνολο	0,183	39			

a. R Squared = 0,626 (Adjusted R Squared = 0,513)

3.3 Β – Μέσα Αδελφώματος

Πηγή	Αθροισμα Τετραγώνων τύπου III	ΒΕ	Τετραγωνικός Μέσος	F	Επ Σημ
Διορθωμένο Μοντέλο	0,480 ^a	9	0,053	7,893	0,000
Τομή	6,691	1	6,691	989,584	0,000
Πυκνότητα	0,045	1	0,045	6,639	0,015
Ζιζανιοκτόνο	0,415	4	0,104	15,352	0,000
Πυκνότητα - Ζιζανιοκτόνο	0,020	4	0,005	0,747	0,568
Σφάλμα	0,203	30	0,007		
Σύνολο	7,374	40			
Διορθωμένο Σύνολο	0,683	39			

a. R Squared = 0,703 (Adjusted R Squared = 0,614)

3.3 Γ – Τέλος Αδελφώματος

Πηγή	Αθροισμα Τετραγώνων τύπου III	ΒΕ	Τετραγωνικός Μέσος	F	Επ Σημ
Διορθωμένο Μοντέλο	0,664 ^a	9	0,074	10,728	0,000
Τομή	21,141	1	21,141	3073,588	0,000
Πυκνότητα	0,026	1	0,026	3,781	0,061
Ζιζανιοκτόνο	0,632	4	0,158	22,980	0,000
Πυκνότητα - Ζιζανιοκτόνο	0,006	4	0,001	0,211	0,930
Σφάλμα	0,206	30	0,007		
Σύνολο	22,012	40			
Διορθωμένο Σύνολο	0,870	39			

a. R Squared = 0,763 (Adjusted R Squared = 0,692)

3.3 Δ – Καλάμωμα

Πηγή	Αθροισμα Τετραγώνων τύπου III	ΒΕ	Τετραγωνικός Μέσος	F	Επ Σημ
Διορθωμένο Μοντέλο	0,284 ^a	9	0,032	8,692	0,000
Τομή	27,739	1	27,739	7646,837	0,000
Πυκνότητα	0,006	1	0,006	1,655	0,208
Ζιζανιοκτόνο	0,274	4	0,068	18,870	0,000
Πυκνότητα - Ζιζανιοκτόνο	0,004	4	0,001	0,273	0,893
Σφάλμα	0,109	30	0,004		
Σύνολο	28,132	40			
Διορθωμένο Σύνολο	0,393	39			

a. R Squared = 0,723 (Adjusted R Squared = 0,640)

3.3 Ε – Διόγκωση Κολεού

Πηγή	Αθροισμα Τετραγώνων τύπου III	ΒΕ	Τετραγωνικός Μέσος	F	Επ Σημ
Διορθωμένο Μοντέλο	0,065 ^a	9	0,007	5,492	0,000
Τομή	29,378	1	29,378	22256,030	0,000
Πυκνότητα	0,001	1	0,001	0,758	0,391
Ζιζανιοκτόνο	0,063	4	0,016	11,991	0,000
Πυκνότητα - Ζιζανιοκτόνο	0,001	4	0,000	0,175	0,949
Σφάλμα	0,040	30	0,001		
Σύνολο	29,483	40			
Διορθωμένο Σύνολο	0,105	39			

a. R Squared = 0,622 (Adjusted R Squared = 0,509)

3.3 ΣΤ – Γέμισμα των Καρπών

Πηγή	Αθροισμα Τετραγώνων τύπου III	ΒΕ	Τετραγωνικός Μέσος	F	Επ Σημ
Διορθωμένο Μοντέλο	0,021 ^a	9	0,002	1,753	0,120
Τομή	9,467	1	9,467	6978,346	0,000
Πυκνότητα	0,002	1	0,002	1,445	0,239
Ζιζανιοκτόνο	0,014	4	0,004	2,619	0,055
Πυκνότητα - Ζιζανιοκτόνο	0,005	4	0,001	0,966	0,441
Σφάλμα	0,041	30	0,001		
Σύνολο	9,529	40			
Διορθωμένο Σύνολο	0,062	39			

a. R Squared = 0,345 (Adjusted R Squared = 0,148)

3.3 Ζ – Οικονομική Ωρίμανση

Πηγή	Αθροισμα Τετραγώνων τύπου III	ΒΕ	Τετραγωνικός Μέσος	F	Επ Σημ
Διορθωμένο Μοντέλο	0,006 ^a	9	0,001	2,554	0,026
Τομή	2,066	1	2,066	7819,694	0,000
Πυκνότητα	0,000	1	0,000	1,145	0,293
Ζιζανιοκτόνο	0,004	4	0,001	4,221	0,008
Πυκνότητα - Ζιζανιοκτόνο	0,001	4	0,000	1,240	0,315
Σφάλμα	0,008	30	0,000		
Σύνολο	2,080	40			
Διορθωμένο Σύνολο	0,014	39			

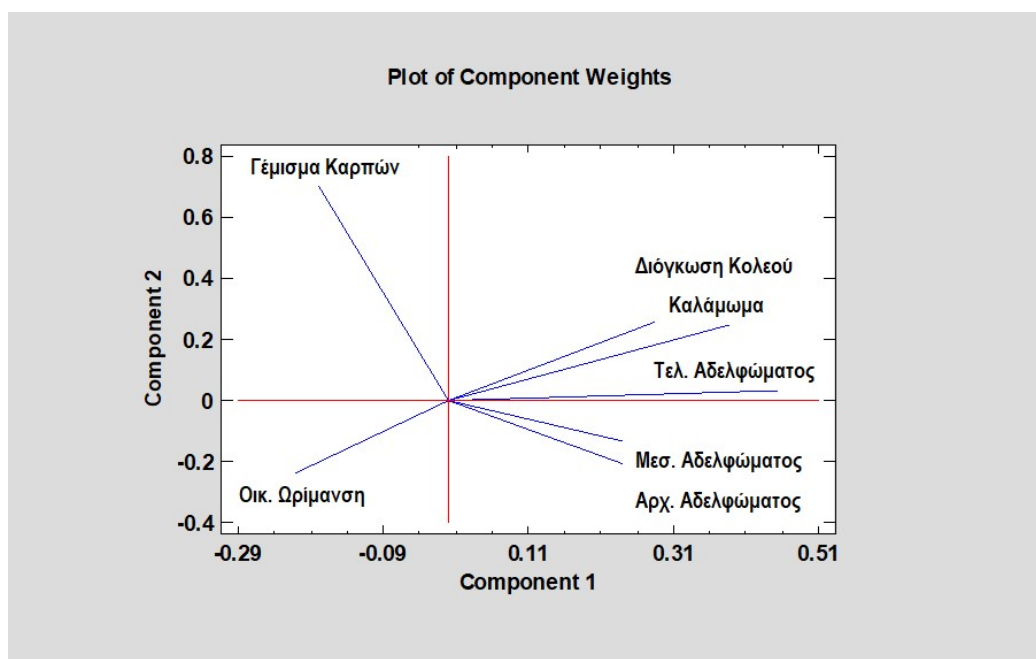
a. R Squared = 0,434 (Adjusted R Squared = 0,264)

Η Multiple ANOVA (Πιν. 3.3) έδειξε σημαντικές διαφορές ανά ζιζανιοκτόνο σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του κριθαριού. Όσον αφορά την πυκνότητα σποράς εμφανίστηκαν σημαντικές διαφορές στα 2 πρώτα στάδια, πιθανότατα λόγω της χαμηλής πυκνότητας βλάστησης των τεμαχίων. Τέλος ο συνδυασμός και των 2 παραμέτρων δεν έδειξε στατιστική διαφοροποίηση σε κανένα στάδιο ανάπτυξης.

3.3.2 Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (PCA)

Στο Σχήμα 3.4 διακρίνεται η ομαδοποίηση των μεταχειρίσεων με ζιζανιοκτόνα, που έγινε με τη μέθοδο Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών (PCA). Χρησιμοποιήθηκαν ως μεταβλητές οι μέσες τιμές NDVI των 7 πτήσεων. Βάσει των δύο κυρίων συνιστωσών που δημιουργήθηκαν, παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα:

Η ομαδοποίηση αυτή χώρισε τα ζιζανιοκτόνα σε 2 κύριες κατηγορίες: Το Constel και τα υπόλοιπα 3 μαζί με το μάρτυρα (Control). Η δεύτερη ομάδα χωρίστηκε σε 2 υποομάδες το προφυτρωτικό ζιζανιοκτόνο Boxer και τα Stompr και Axial-Mustang μαζί με το μάρτυρα.



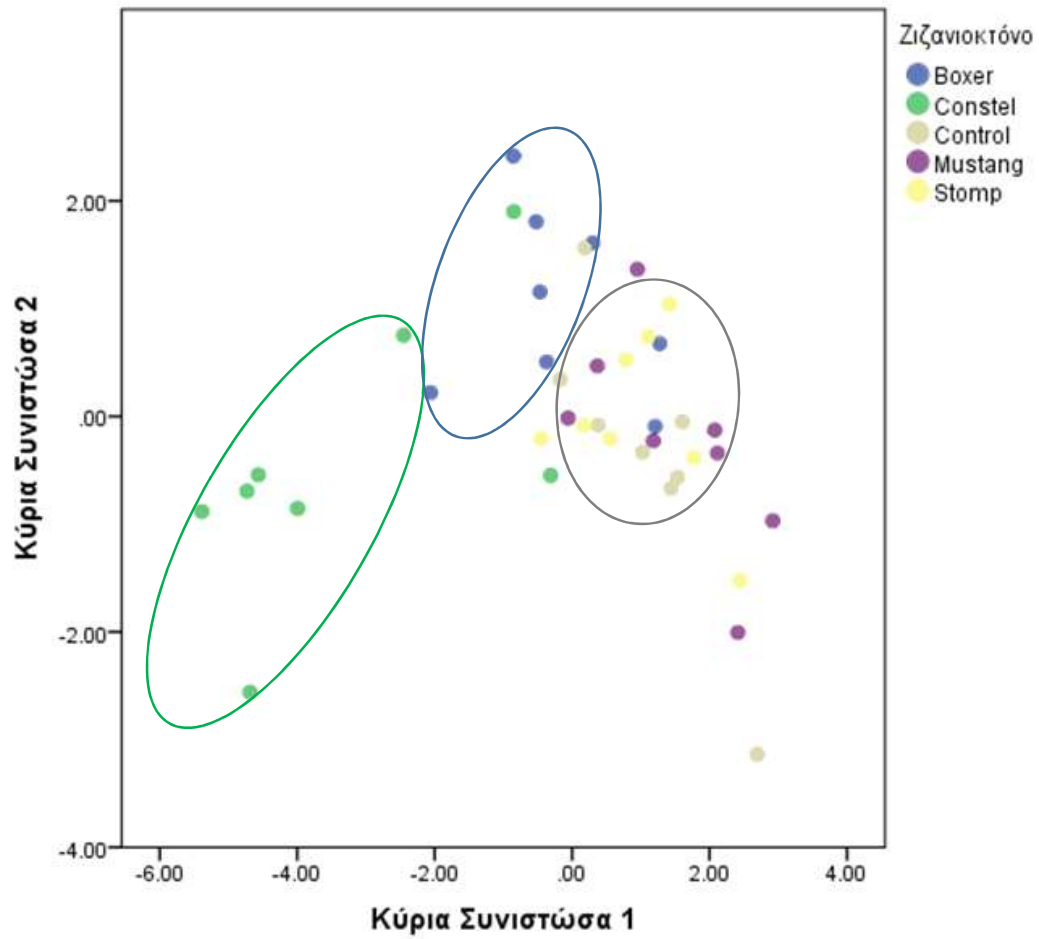
Σχήμα 3.3. Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (PCA) για τον NDVI σε κάθε φαινολογικό στάδιο.

Η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών για το δείκτη NDVI, ανά στάδιο ανάπτυξης, χώρισε τα στάδια σε 4 ομάδες:

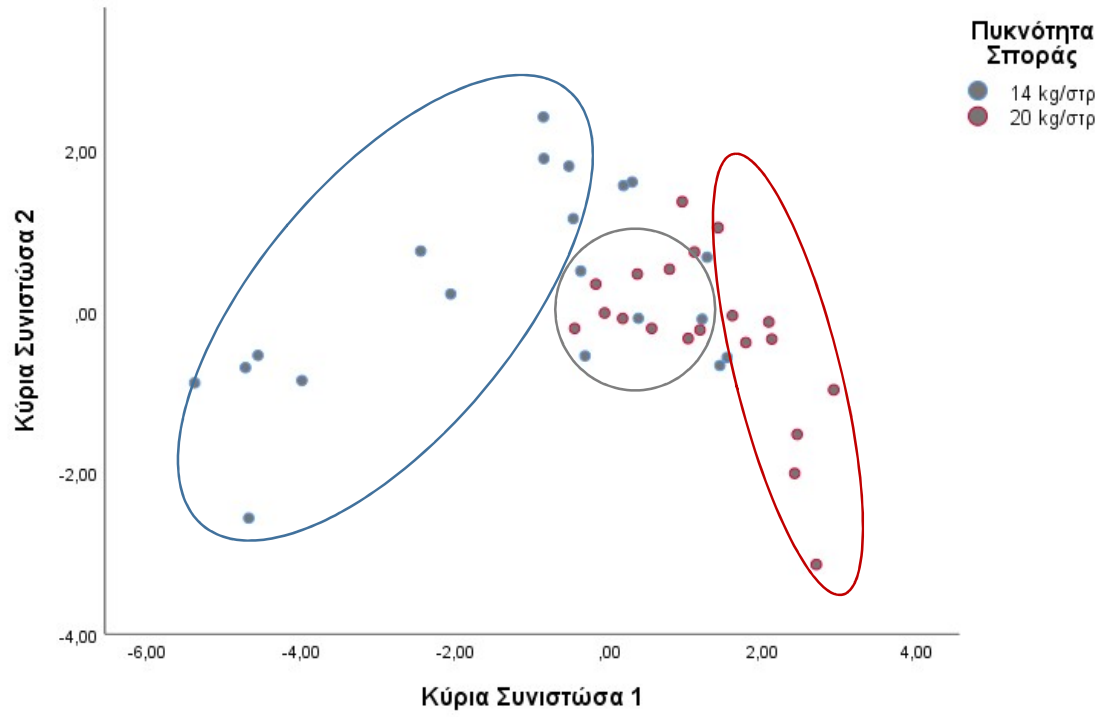
- 1^η (Αρχές αδελφώματος) και 2^η (Μέσα αδελφώματος)
- 3^η (Τέλος αδελφώματος), 4^η (Καλάμωμα) και 5^η (Διόγκωση κολεού)
- 6^η (Γέμισμα καρπών)
- 7^η (Οικονομική ωρίμανση)

Σύμφωνα με το Σχ. 3.1, τα ζιζανιοκτόνα Constel και Boxer έδειξαν σημαντικότερη διαφοροποίηση σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Τέλος εμφανίστηκαν διαφορές και μεταξύ των 2 πυκνοτήτων σποράς (Σχ 3.5).



Σχήμα 3.4. Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών για κάθε Ζιζανιοκτόνο.



Σχήμα 3.5. Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών για κάθε Πικνότητα Σποράς.

3.4 Δείκτες Βλάστησης ανά Στάδιο Ανάπτυξης

Στον Πίνακα 3.4 διακρίνονται οι συσχετίσεις των μέσων τιμών NDVI (και των 40 πειραματικών τεμαχίων) των 7 πτήσεων, με τα χαρακτηριστικά ανάπτυξης που είχαν μετρηθεί από το Εργαστήριο Γεωργίας του Γ.Π.Α.

Πίνακας 3.4. Συσχετίσεις μέσων τιμών NDVI.

NDVI	Απόδοση σε βιομάζα	Απόδοση σε καρπό	Β. χιλίων κόκκων	Αρ. στάχων	Αρ. καρπών/στάχυ	1000 Καρποί /m ²	Μήκος στάχυ	Πρωτεΐνη
Αρχές αδελφώματος	0,386*	0,277	-0,503**	0,449**	0,078	0,440**	-0,274	-0,025
Μέσα αδελφώματος	0,514**	0,461**	-0,570**	0,594**	0,178	0,601**	-0,310	-0,181
Τέλος αδελφώματος	0,650**	0,624**	-0,542**	0,671**	0,226	0,702**	-0,205	-0,389*
Καλάμωμα	0,693**	0,712**	-0,473*	0,679**	0,222	0,730**	-0,063	-0,453**
Διόγκωση κολεού	0,632**	0,642**	-0,324	0,625**	0,258	0,612**	-0,006	-0,472**
Γέμισμα καρπών	-0,032	0,002	0,235	-0,095	0,045	-0,097	0,183	-0,234
Οικονομική ωρίμανση	-0,269	-0,274	0,231	-0,328*	-0,048	-0,337*	0,187	0,213

** . Επίπεδο Σημαντικότητας 1%

* . Επίπεδο Σημαντικότητας 5%

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.4, οι περισσότερες συσχετίσεις του NDVI με τις οργανοληπτικές ιδιότητες βρέθηκαν κατά το Καλάμωμα (4^η πτήση). Επίσης κατά τα Μέσα Αδελφώματος (2^η πτήση) εμφανίστηκε η μεγαλύτερη συσχέτιση στο βάρος χιλίων κόκκων και κατά το Τέλος Αδελφώματος (3^η Πτήση) η μεγαλύτερη συσχέτιση με τους καρπούς/m².

Στον Πίνακα 3.5 φαίνονται αναλυτικά όλες οι συσχετίσεις μεταξύ των 10 δεικτών βλάστησης, που υπολογίστηκαν για το στάδιο του καλαμώματος με τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του κριθαριού. Οι περισσότερες μέγιστες συσχετίσεις βρέθηκαν μεταξύ του NDVI και το συνολικό βάρος, τις αποδόσεις σε καρπό και βιομάζα και την πρωτεΐνη, ακολουθεί ο RESAVI με το βάρος 1000 κόκκων και τους καρπούς/m² και, τέλος, ο NDRE με τον αριθμό των στάχων.

Πίνακας 3.5. Συσχετίσεις μέσω των τιμών των 10 δεικτών βλάστησης κατά το Καλάμωμα με τα χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν στο Εργαστήριο Γεωργίας του Γ.Π.Α.

Pearson Correlation	NDVI	GNDVI	NDRE	OSAVI	RESAVI	MCARI	Clgreen	Clre	EVI2	RDVI
Συνολικό Βάρος	0,700**	0,681**	0,655**	0,684**	0,636**	0,623**	0,647**	0,636**	0,654**	0,661**
Βιομάζα	-0,003	-0,032	-0,029	-0,004	-0,024	-0,036	-0,088	-0,036	-0,008	-0,002
Απόδοση σε Βιομάζα	0,693**	0,674**	0,649**	0,675**	0,629**	0,618**	0,642**	0,631**	0,646**	0,652**
Απόδοση σε Καρπό	0,712**	0,694**	0,672**	0,694**	0,650**	0,641**	0,667**	0,654**	0,663**	0,671**
Βάρος 1000 κόκκων	-0,473**	-0,514**	-0,580**	-0,519**	-0,613**	-0,602**	-0,577**	-0,597**	-0,578**	-0,560**
Αριθμός Στάχων	0,679**	0,678**	0,687**	0,680**	0,680**	0,671**	0,675**	0,677**	0,676**	0,676**
Αριθμός Καρπών/Στάχου	0,222	0,222	0,238	0,217	0,226	0,237	0,219	0,235	0,205	0,211
1000 καρποί/μ²	0,730**	0,738**	0,751**	0,740**	0,753**	0,740**	0,750**	0,746**	0,747**	0,744**
Μήκος Στάχου	-0,063	-0,085	-0,142	-0,061	-0,132	-0,169	-0,132	-0,158	-0,064	-0,060
Πρωτεΐνη (%)	-0,453**	-0,421**	-0,356*	-0,442**	-0,351*	-0,314*	-0,365*	-0,332*	-0,418**	-0,427**

** . Επίπεδο Σημαντικότητας 1%

* . Επίπεδο Σημαντικότητας 5%

3.5 Διαχρονικοί Δείκτες Βλάστησης

Μετά από την αξιολόγηση της συσχέτισης μεταξύ των δεικτών βλάστησης που προκύπτουν από μία ημερομηνία, πραγματοποιήθηκε και μια παρόμοια προσέγγιση με τη χρήση διαχρονικών δεικτών βλάστησης, οι οποίοι προκύπτουν από τη χρήση δεδομένων από περισσότερες ημερομηνίες. Από τη βιβλιογραφία προκύπτει πως οι διαχρονικοί αυτοί δείκτες βλάστησης είναι σημαντικοί στη μελέτη της ανάπτυξης, όπως για παράδειγμα, στα φαινολογικά χαρακτηριστικά του κριθαριού.

Οι μεμονωμένης ημερομηνίας δείκτες βλάστησης είναι πιο ευαίσθητοι σε ανθρωπογενείς παραμέτρους, που επηρεάζουν την καλλιέργεια, όπως οι καλλιεργητικές πρακτικές (Torres, et al. 2013), ενώ οι διαχρονικοί δείκτες βλάστησης ελαχιστοποιούν τα σφάλματα στην πρόβλεψη της συγκομιδής, που εισάγονται από την επιλογή του χρόνου λήψης των τηλεπισκοπικών δεδομένων, την επεξεργασία τους και τη στρατηγική διαχείρισης της καλλιέργειας, όπως πρώιμη ή όψιμη σπορά, επίδραση της λίπανσης και των καιρικών συνθηκών κ.λπ (Pradhan, et al. 2014). Για τους λόγους αυτούς, ένας διαχρονικός δείκτης βλάστησης που εξετάζεται στην παρούσα εργασία είναι ο αθροιστικός δείκτης SUM(VI), ο οποίος προκύπτει από το άθροισμα του κάθε δείκτη βλάστησης μεταξύ δύο ημερομηνιών.

Στον Πίνακα 3.6 διακρίνονται οι συσχετίσεις των διαχρονικών δεικτών NDVI με τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του κριθαριού.

Οι παραπάνω δείκτες βλάστησης χωρίστηκαν σε 3 κατηγορίες:

- **Αθροιστικός NDVI**, που προέκυψε από το άθροισμα των μέσων NDVI των 5 και των 7 σταδίων ανάπτυξης
- **Τυπική Απόκλιση NDVI**, που προέκυψε από την τυπική απόκλιση των μέσων NDVI 5 και των 7 σταδίων ανάπτυξης
- **Μέγιστος NDVI**, που προέκυψε από τη μέγιστη τιμή NDVI όλων των σταδίων ανάπτυξης

Όλοι οι διαχρονικοί δείκτες NDVI έδειξαν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις με μεγαλύτερες αυτές του μέγιστου NDVI.

Πίνακας 3.6. Συσχετίσεις των διαχρονικών δεικτών NDVI με τα χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν στο εργαστήριο Γεωργίας του Γ.Π.Α.

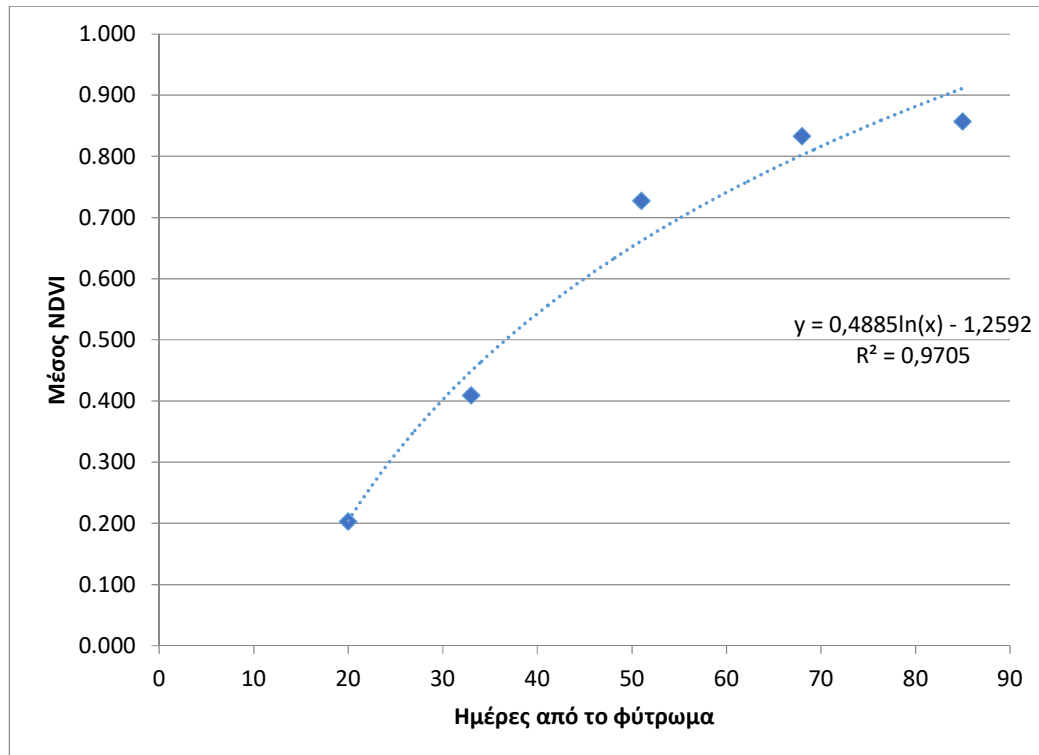
Pearson Correlation	Συνολικό Βάρος	Βιομάζα	Απόδοση σε βιομάζα	Απόδοση σε καρπό	Β. χιλίων κόκκων	Αρ. στάχων	Αρ. καρπών/στάχυ	1000 Καρποί /m ²	Μήκος στάχυ	Πρωτεΐνη
Άθροισμα NDVI (Πτήσεις 1-5)	0,631**	0,150	0,629**	0,591**	-0,532**	0,664**	0,226	0,680**	-0,220	-0,404**
Άθροισμα NDVI όλων των πτήσεων	0,653**	0,165	0,648**	0,611**	-0,529**	0,677**	0,239	0,689**	-0,206	-0,428**
Τυπική Απόκλιση NDVI (Πτήσεις 1-5)	0,257	0,015	0,240	0,359*	0,210	0,131	0,157	0,117	0,0307	-0,369*
Τυπική Απόκλιση NDVI όλων των πτήσεων	0,641**	0,091	0,632**	0,698**	-0,253	0,584**	0,267	0,607**	-0,026	-0,570**
Μέγιστος NDVI	0,661**	0,136	0,652**	0,655**	-0,373*	0,652**	0,260	0,637**	-0,093	-0,493**

** . Επίπεδο Σημαντικότητας 1%

* . Επίπεδο Σημαντικότητας 5%

3.6 Μοντέλα Πρόβλεψης

Η ανάπτυξη του κριθαριού φαίνεται στο παρακάτω μοντέλο λογαριθμικής παλινδρόμησης. Το μοντέλο αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, περιείχε μόνο τον μέσο όρο του NDVI (και των 40 πειραματικών τεμαχίων) των 5 πρώτων πτήσεων, διότι στα δύο τελευταία στάδια ο NDVI μειώνεται λόγω του κιτρινίσματος του κριθαριού, μειώνοντας έτσι και την αξιοπιστία του μοντέλου.



Σχήμα 3.6. Διάγραμμα μεταβολής του μέσου NDVI κατά τις 5 πρώτες πτήσεις.

Η συσχέτιση ήταν πολύ ισχυρή ($R^2 = 0,97$) γεγονός που υποδηλώνει ότι υπάρχει δυνατότητα ακριβούς πρόβλεψης της ανάπτυξης του κριθαριού, βάσει του συγκεκριμένου μοντέλου.

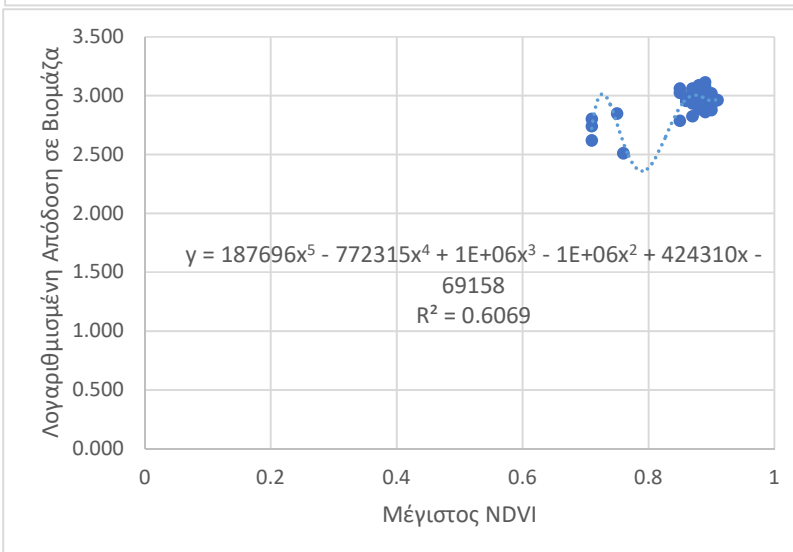
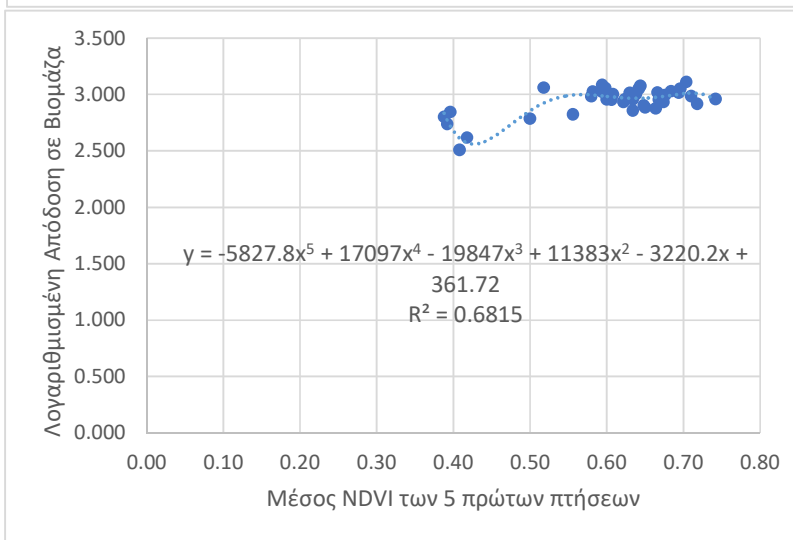
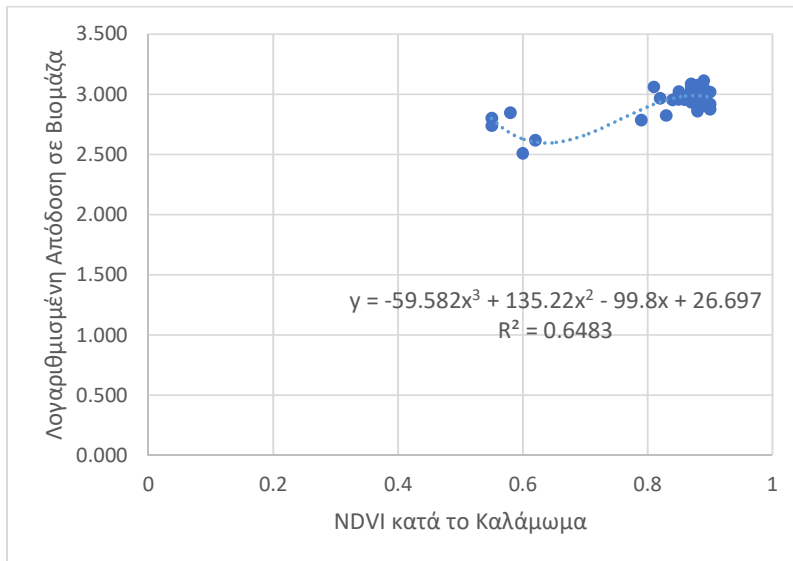
Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν, με βάση τις υψηλότερες συσχετίσεις (Πιν. 3.4, 3.6), μοντέλα πολυωνμικής παλινδρόμησης για την πρόβλεψη της απόδοσης, με 4 ιδιότητες, το μέσο NDVI κατά το στάδιο του καλαμώματος, το μέσο NDVI των 5 πρώτων πτήσεων και το μέγιστο NDVI όλων των πτήσεων (Σχ. 3.7-3.10). Ως εξαρτημένη μεταβλητή προσδιορισμού της απόδοσης χρησιμοποιήθηκαν η απόδοση σε βιομάζα (Σχ. 3.7), οι καρποί/m² (Σχ. 3.8), ο αριθμός των στάχων (Σχ. 3.9) και η περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη (Σχ. 3.10). Για την εξαγωγή κάθε μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές NDVI και των 40 πειραματικών τεμαχίων.

Τα μοντέλα με τις μεγαλύτερες τιμές συντελεστή συσχέτισης R² βρέθηκαν σε εκείνα με εξαρτημένη μεταβλητή τους καρπούς/m². Το πιο ισχυρό μοντέλο πρόβλεψης ήταν αυτό με το μέσο διαχρονικό δείκτη NDVI των 5 πρώτων πτήσεων (R² = 0,68). Ακολούθησε το μοντέλο με το μέσο NDVI κατά το καλάμωμα (R² = 0,66) και τέλος το μοντέλο με το μέγιστο NDVI (R² = 0,57).

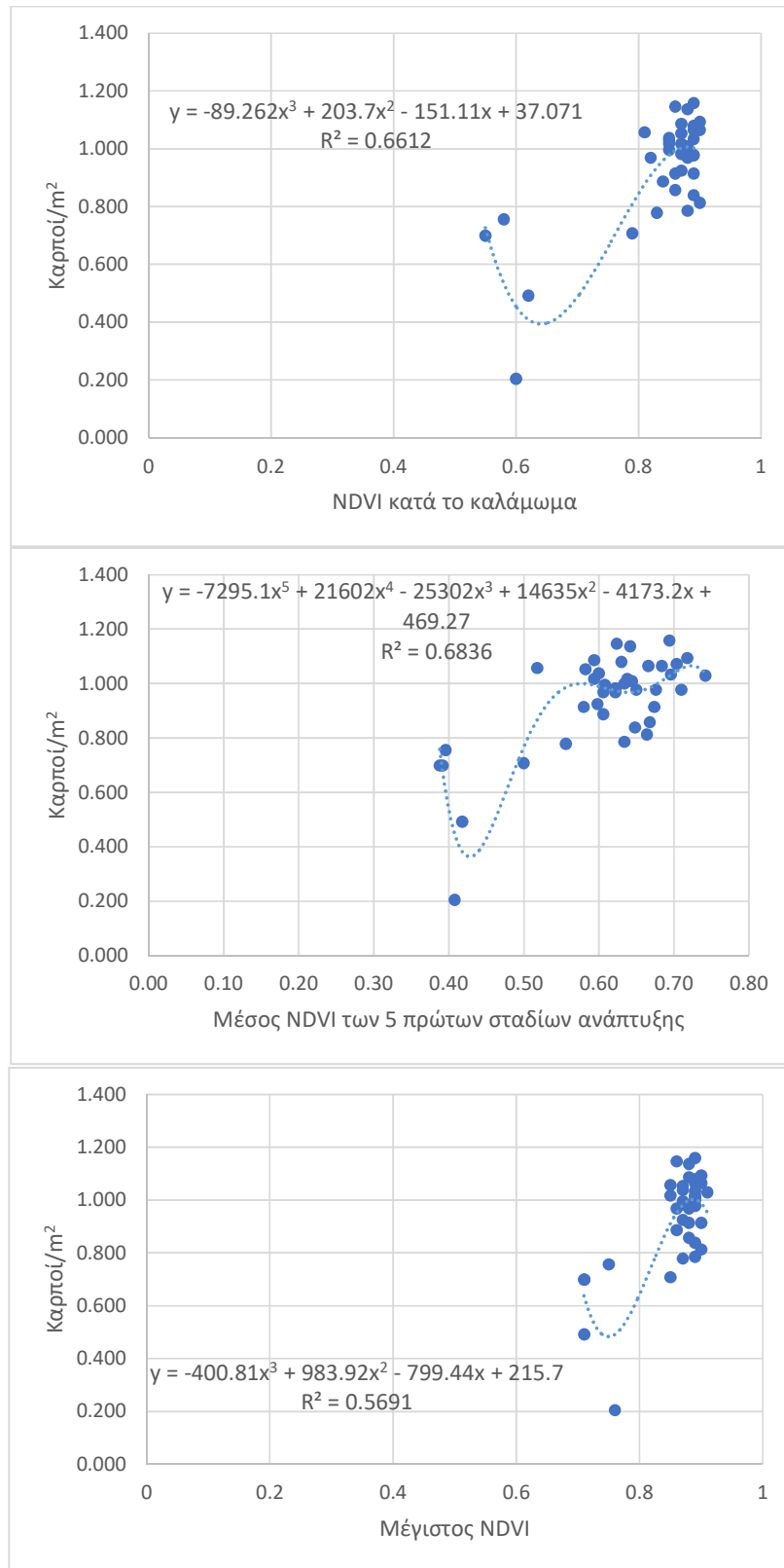
Ακολουθεί η απόδοση σε βιομάζα, με πιο ισχυρό το μοντέλο πρόβλεψης με το μέσο διαχρονικό δείκτη NDVI των 5 πρώτων πτήσεων (R² = 0,68). Έπειτα το μοντέλο με το μέσο NDVI κατά το καλάμωμα (R² = 0,65) και, τέλος, το μοντέλο με το μέγιστο NDVI (R² = 0,61).

Όσον αφορά τον αριθμό των στάχων, τα μοντέλα ήταν λιγότερο ισχυρά από τις προηγούμενες ιδιότητες. Το ισχυρότερο μοντέλο ήταν, σε αντίθεση με τις παραπάνω ιδιότητες, αυτό του μέγιστου NDVI (R² = 0,66). Τα άλλα 2 μοντέλα με ανεξάρτητες μεταβλητές το μέσο NDVI κατά το στάδιο του καλαμώματος και το μέσο NDVI των 5 πρώτων πτήσεων ήταν λιγότερο ισχυρά (R² = 0,62).

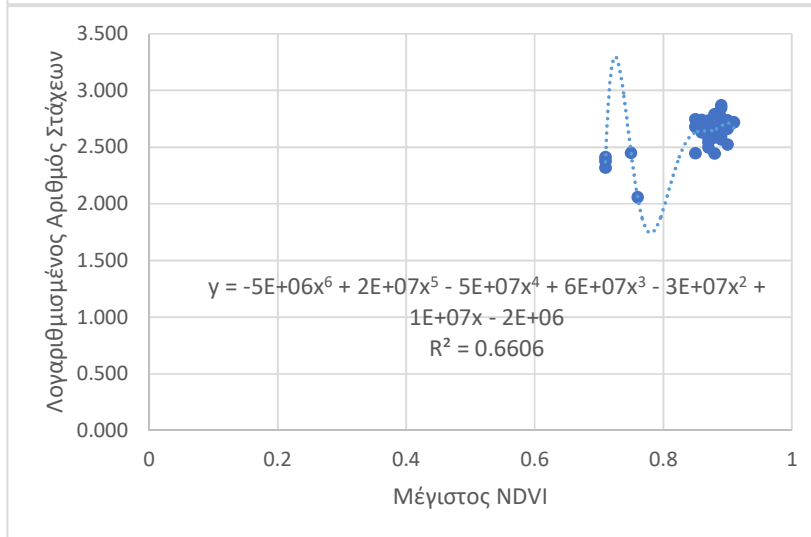
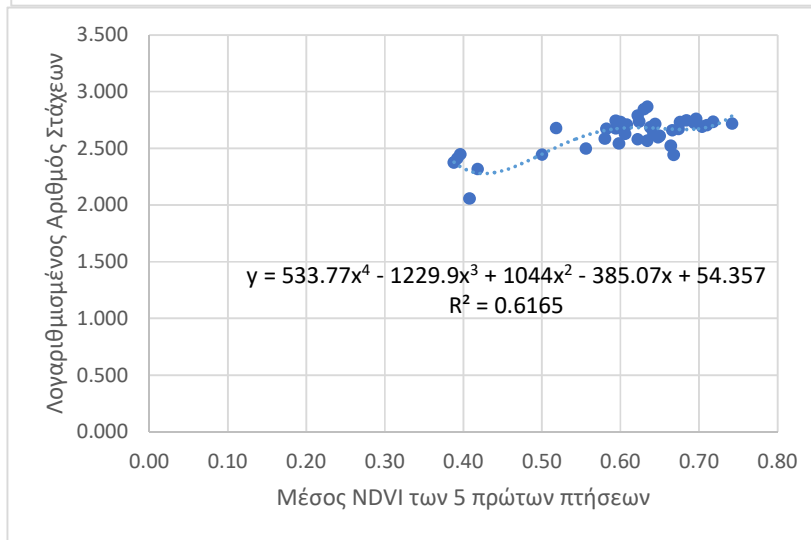
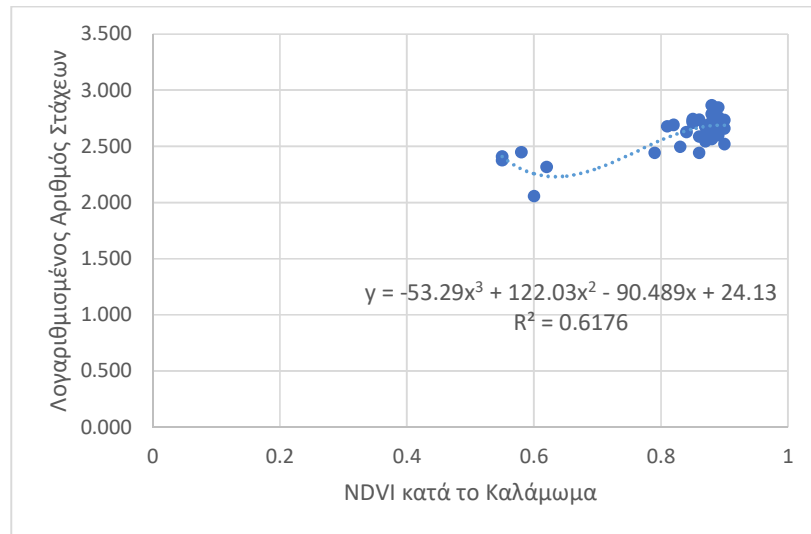
Τέλος η περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη προσδιόρισε τα λιγότερο ισχυρά μοντέλα πρόβλεψης, με R² < 0,27.



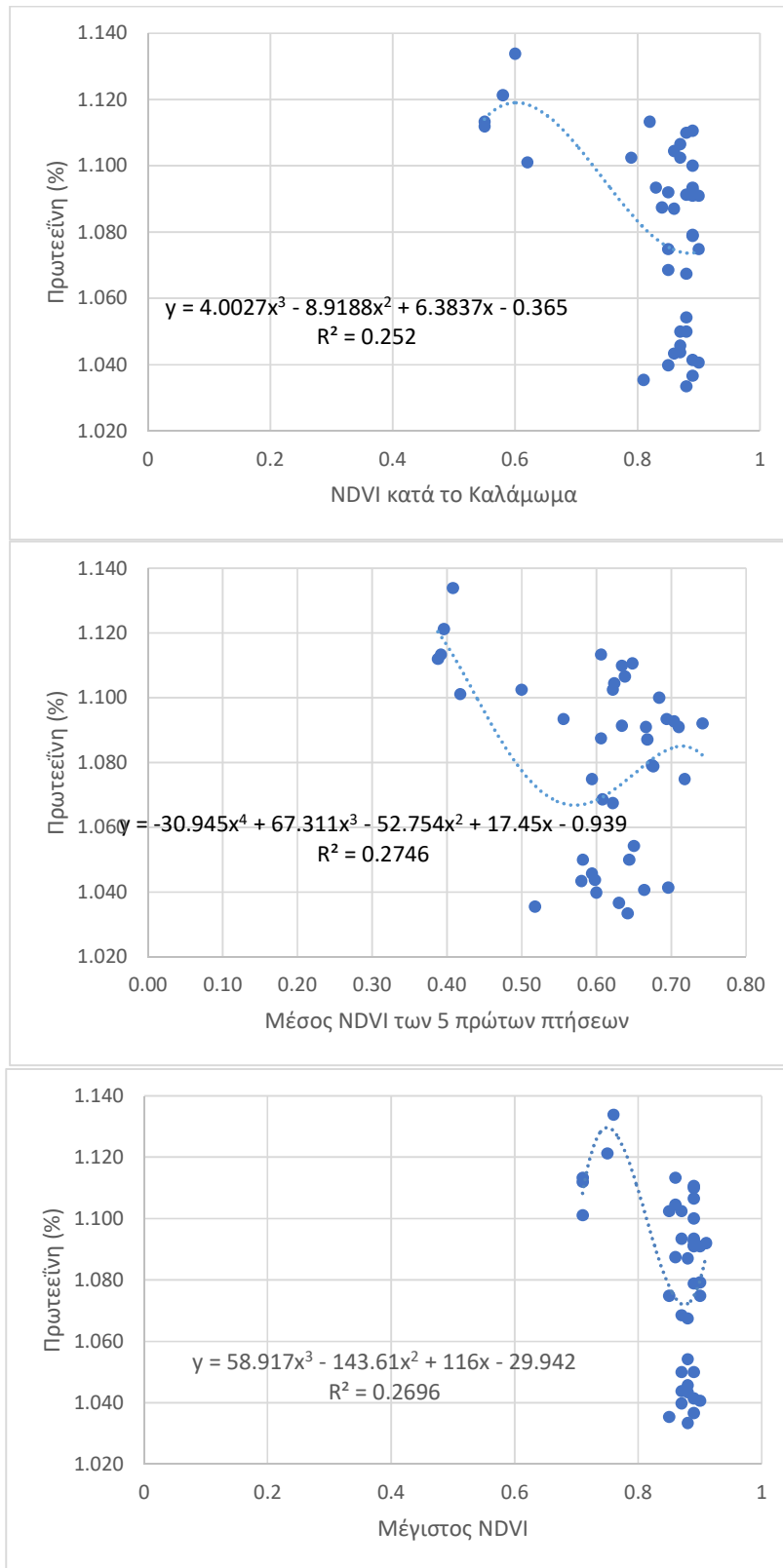
Σχήμα 3.7. Μοντέλα πρόβλεψης της απόδοσης σε βιομάζα.



Σχήμα 3.8. Μοντέλα πρόβλεψης καρπών/μ².



Σχήμα 3.9. Μοντέλα πρόβλεψης του αριθμού των στάχων.



Σχήμα 3.10. Μοντέλα πρόβλεψης της πρωτεΐνης (%).

4. Συμπεράσματα – Προτάσεις

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας προέκυψαν τα εξής:

Υπήρξε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των 2 πυκνοτήτων σποράς, με βάση τον δείκτη βλάστησης NDVI. Το ζιζανιοκτόνο Constel (Chlortoluron + Diflufenican) ενώ ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματικό έναντι των ζιζανίων, προκάλεσε σημαντικές απώλειες (φυτοτοξικότητα) και στην καλλιέργεια. Το μείγμα ζιζανιοκτόνων Axial + Mustang (Pinoxaden + Florasulam) παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές NDVI.

Οι σημαντικότερες συσχετίσεις όλων των δεικτών βλάστησης με τις ιδιότητες ανάπτυξης του κριθαριού βρέθηκαν στο στάδιο του καλαμώματος (4η πτήση), πιθανότατα διότι σε αυτό το στάδιο το κριθάρι είναι περισσότερο εύρωστο. Αυτό είναι σημαντικό, διότι υπάρχει δυνατότητα επέμβασης σε αυτό το στάδιο. Επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο, τα ζιζάνια ήταν πιο ευδιάκριτα κατά την οικονομική ωρίμανση (7η πτήση), όπου το κριθάρι είχε κιτρινίσει και εντοπίστηκαν κυρίως στις άκρες των τεμαχίων, εκτός από τις επεμβάσεις με το προφυτρωτικό ζιζανιοκτόνο Constel, όπου εντοπίστηκαν και στο κέντρο των τεμαχίων. Οι υπόλοιποι δείκτες βλάστησης που υπολογίστηκαν στο στάδιο του καλαμώματος, δεν έδειξαν σε γενικές γραμμές σημαντικότερες συσχετίσεις από τον NDVI.

Οι διαχρονικοί δείκτες βλάστησης NDVI έδειξαν σχετικά μικρότερες συσχετίσεις με τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του κριθαριού, σε σχέση με τον NDVI κατά το καλάμωμα, με μεγαλύτερες αυτές του Μέγιστου NDVI και του Μέσου NDVI όλων των πτήσεων. Όμως, τα μοντέλα πρόβλεψης που δημιουργήθηκαν μέσω των δεικτών αυτών ήταν ισχυρότερα.

Μελλοντικά θα μπορούσαν να γίνουν πτήσεις σε χαμηλότερα υψόμετρα (10m), με άλλες πολυφασματικές, ή ακόμα και υπερφασματικές κάμερες, υψηλότερης χωρικής ανάλυσης και μεγαλύτερου αριθμού φασματικών καναλιών, ώστε να υπολογιστούν και άλλοι βασικοί, αλλά και διαχρονικοί δείκτες βλάστησης (EVI, LAI, CWSI, κ.λπ.).

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

Bailey and Gatrell **(1995)** *Interactive spatial data analysis*, Longman

Becker, Reshef, E. Vermote, Linderman, και C. Justice. **(2010)** «A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data.» *Remote Sensing of Environment*, 1312-1323.

Bendig J., Bolten A., Bennertz S., Broscheit J., Eichfuss S. and Bareth G. **(2014)** *Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging*, *Remote Sensing*, 6(11), 10395-10412

Burrough P.A. **(1986)** *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford University Press, Oxford.

Calera A., González-Piqueras & Melia J., **(2010)** *Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale*, *International Journal of Remote Sensing* Pages 97-109

Choudhury B.J., DiGirolamo N.E., **(1995)** *Quantifying the effect of emissivity on the relations between AVHRR split window temperature difference and atmospheric precipitable water over land surfaces*, *Remote Sensing of Environment*, Elsevier

Fischer and Wang **(2011)** *Spatial Data Analysis Models: Methods and Techniques*, Springer

Fotheringham S, Brunsdon C., Charlton M. **(2000)** *Quantitative Geography: Perspectives on Spatial Data Analysis*

Gemtos T.A., Markinos A, Toullos L, Pateras D., Zerva G. **(2003)** *A Precision Farming Application in the Small Cotton Farms of Greece*

Gitelson A, Viña A, Arkebauer T. J, Rundquist D.C, Keydan G, Leavitt B. **(2003)** *Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies*, *Geophysical Research Letters* Vol 30, Issue 5

Gitelson A, Gritz Y, Merzylak M. (2003) *Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves*, Journal of Plant Physiology Vol 160, Issue 3, 2003, pp 271-282

Gitelson A., (2005) *Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops*, Geophysical Research Letters Vol 32, Issue 8

Haboudane D, Miller R. J., Pattey E., Zarco-Tejada P. J., Strachan I. B. (2004) *Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture* Remote Sensing of Environment, Vol. 90, Issue 3, 15 April 2004, pp: 337-352

Huete A. R., Justice, C., & van Leeuwen, W. (1996). MODIS vegetation index (mod13). *Algorithm theoretical basis document*. Version 2. Greenbelt, Maryland 20771. USA: NASA Goddard Space Flight Center.

Huete A. R., Liu, H. Q., Batchily, K., & vanLeeuwen, W. (1997). *A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS-MODIS*. Remote Sensing of Environment, 59, pp 440–451.

Hobbs R., (1997) *Future landscapes and the future of landscape ecology*, Landscape and Urban Planning Vol 37, Issues 1–2, June 1997, pp 1-9

Kriegler, (1969) *Preprocessing Transformations and Their Effects on Multispectral Recognition*, Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of the Environment, University of Michigan

Kogan F, Gitelson A, Zakarin E, Spivak L, Lebed L. (1990) *AVHRR-based spectral vegetation index for quantitative assessment of vegetation state and productivity*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Number 8 / August 2003, pp. 899-906(8)

Lausch A., Salbach C., Schmidt A., Doktor D., Merbach I., Pause M. (2015) *Deriving phenology of barley with imaging hyperspectral remote sensing*, Ecological Monitoring Vol 295, Pages 123-135

Liebl and Worsham, **(1983)** *Inhibition of pitted morning glory (Ipomoea lacunosaL.) and certain other weed species by phytotoxic components of wheat (Triticum aestivum L.) straw*

Martin P and Rademacher B, **(1960)** *Studies on the mutual influences of weeds and crops*, Biology of Weeds, Symp. Brit. ecol. Soc.

McVicar TR – Jupp DLB, **(1998)** *The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia: a review Agricultural systems*, Elsevier

Martin P. και Rademacher B, (1960) *Studies on the mutual influences of weeds and crops*. Biology of Weeds, Symp. Brit. ecol. Soc

Overland, (1966) *The role of allelopathic substances in the “smother crop” barley*, American Journal of Botany, 1966 - Wiley Online Library

Pradhan, S., K. Bandyopadhyay, R. Sahoo, και V. Sehgal. (2014) «*Predicting Wheat Grain and Biomass Yield Using Canopy Reflectance of Booting Stage.*» Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 711-718.

Purvis, Jessop and Lovett, (1985) *Selective regulation of germination and growth of annual weeds by crop residues*, CE Purvis, RS Jessop, JV Lovett - Weed Research

Putnam A.R. and DeFrank J, **(1983)** *Use of phytotoxic plant residues for selective weed control*, Crop protection

Sawasawa, H., (2003) Crop yield estimation: Integrating RS, GIS and management factors. A Case Study of Birkoor and Kortgiri Mandals-Nizamabad District, India. Enschede, The Netherlands, International Institute for Geoinformation

Sellers (1985) *Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration*, International Journal of Remote Sensing

Steinsiek JW, Oliver LR, Collins FC (1982) *Allelopathic Potential of Wheat (Triticum aestivum) Straw on Selected Weed Species*, Weed Science Vol 30, Issue 5 pp. 495-497

Steven M.D. (1998), *The sensitivity of the OSAVI vegetation index to observational parameters* - Remote Sensing of Environment, Elsevier

Stoskopf (1985) *Cereal grain crops*. Reston Publishing Company, Inc., Reston.

Tarpley J.D, Schneider S.R, and Money R.L. **(1984)** *Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellite*, National Environmental Satellite Data and Information Service, NOAA, Washington, DC 20233

Tian L, Curry J.A (1989) *Cloud overlap statistics*, Journal of Geophysical Research Volume 94, Issue D7

Tobler W. (1970) A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region, Economic Geography Vol 46,pp 234-240

Torres, Sanches, M. Pena, A. Castro, και Lopez Granados. (2013) «*Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV*» Computers and Electronics in Agriculture, 104-113.

Tucker, C. J. (1979). *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation*. Remote Sensing of the Environment, 8, 127-150.

Vavilov (1951) *The origin, variation, immunity and breeding of cultivated plants*

Wang, Laiagang, Tian, Yao και Yan Zhu. (2014) «*Predicting grain yield and protein content in wheat by fusing multi-sensor and multi-temporal remote-sensing images.*» Field Crops Research, 178-188.

Wendorf F., Schild R., El Hadidi N, Close A, Kobusiewicz M, Wieckowska H, Issawi B, Haas H. **(1979)** *Use of barley in the Egyptian late paleolithic*, Science Vol. 205, Issue 4413, pp. 1341-1347

Willmer P.G, Unwin D.M (1981) *Field analyses of insect heat budgets: Reflectance, size and heating rates*, Oecologia Vol 50, Issue 2, pp 250–255

Xue, Li Hong, Way Xing, και Lin Zhang. (2007) «*Predicting Grain Yield and Protein Content in Winter Wheat at Different N Supply Levels Using Canopy Reflectance Spectra.*» Pedosphere, 646-653.

Ελληνική

Θωμόπουλος Ι., (2018) – *Αξιολόγηση Ποικιλιών Βυνοποιήσιμου Κριθαριού ως προς τα Αγρονομικά και Ποιοτικά Χαρακτηριστικά τους με Μεθόδους Χωρικής Ανάλυσης σε Περιβάλλον Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων (GIS)*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΓΠΑ, Αθήνα

Καραμάνος Α. (2008) *Τα Σιτηρά των εύκρατων κλιμάτων*, εκδόσεις Παπαζήση», Αθήνα

Κουτσόπουλος Κ, (2005) *Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και ανάλυση χώρου*, Επανέκδοση: "Παπασωτηρίου", 2002, Θεσσαλονίκη

Μαρκογιάννη, (2011) *Χωροχρονικές μεταβολές βλάστησης και χρήσεων γης σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης της τεχνητής Λ. Πλαστήρα με χρήση GIS και δεδομένων τηλεπισκόπησης*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γ.Π.Α Αθήνα

Μέρτικας, (1999) *Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή ανάλυση Εικόνας*. Εκδόσεις Ίων, Στέλλα Παρίκου και ΣΙΑ Ο.Ε.

Μπλαδενόπουλος Κ. (2002) Το ύψος του φυτού και η σχέση του με άλλα γνωρίσματα στο κριθάρι (*Hordeum vulgare* L.) Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα, Σειρά Ι, Τόμος, 2002

Παπαδόπουλος Γ. (2008) Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Γ.Π.Α Αθήνα
<https://www.aua.gr/gpapadopoulos/index.php>

Πέρρος Ν. (2019) – *Χωρική ανάλυση αγρονομικών και τηλεπισκοπικών (UAS) δεδομένων για την πρόβλεψη παραγωγής καλλιέργειας ρυζιού*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γ.Π.Α, Αθήνα

Στατεράς Δ., (2018) – *Χωρικά Μοντέλα Εκτίμησης Χαρακτηριστικών Κόμης και Παραγωγής Ελαιόδενδρων με τη Χρήση Εικόνων Υψηλής Ανάλυσης από Πλατφόρμα UAV*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γ.Π.Α, Αθήνα

Φουντάς Σ., Γέμος Ι., (2015). Γεωργία Ακριβείας, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα 130-137.

Παράρτημα

Ορθομοσαϊκά RGB



Εικόνα Π1. Ορθομοσαϊκό RGB κατά τις αρχές του αδελφώματος.



Εικόνα Π2. Ορθομωσαϊκό RGB κατά τα μέσα του αδελφώματος.



Εικόνα Π3. *Ορθομωσαϊκό RGB κατά τα τέλη του αδελφώματος*



Εικόνα Π4. *Ορθομωσαϊκό RGB κατά το καλάμωμα.*



Εικόνα Π5. *Ορθομωσαϊκό RGB κατά τη διόγκωση του κολεού.*

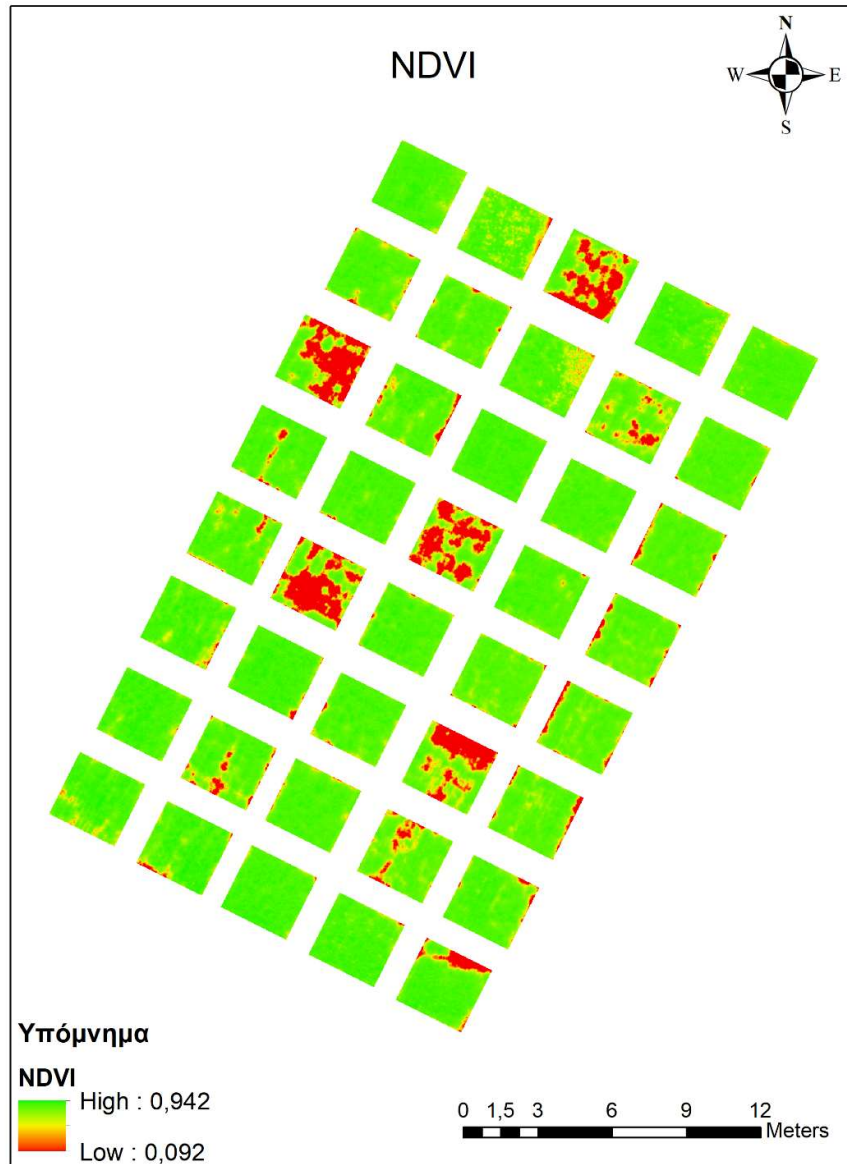


Εικόνα Π6. *Ορθομωσαϊκό RGB κατά το γέμισμα των καρπών.*

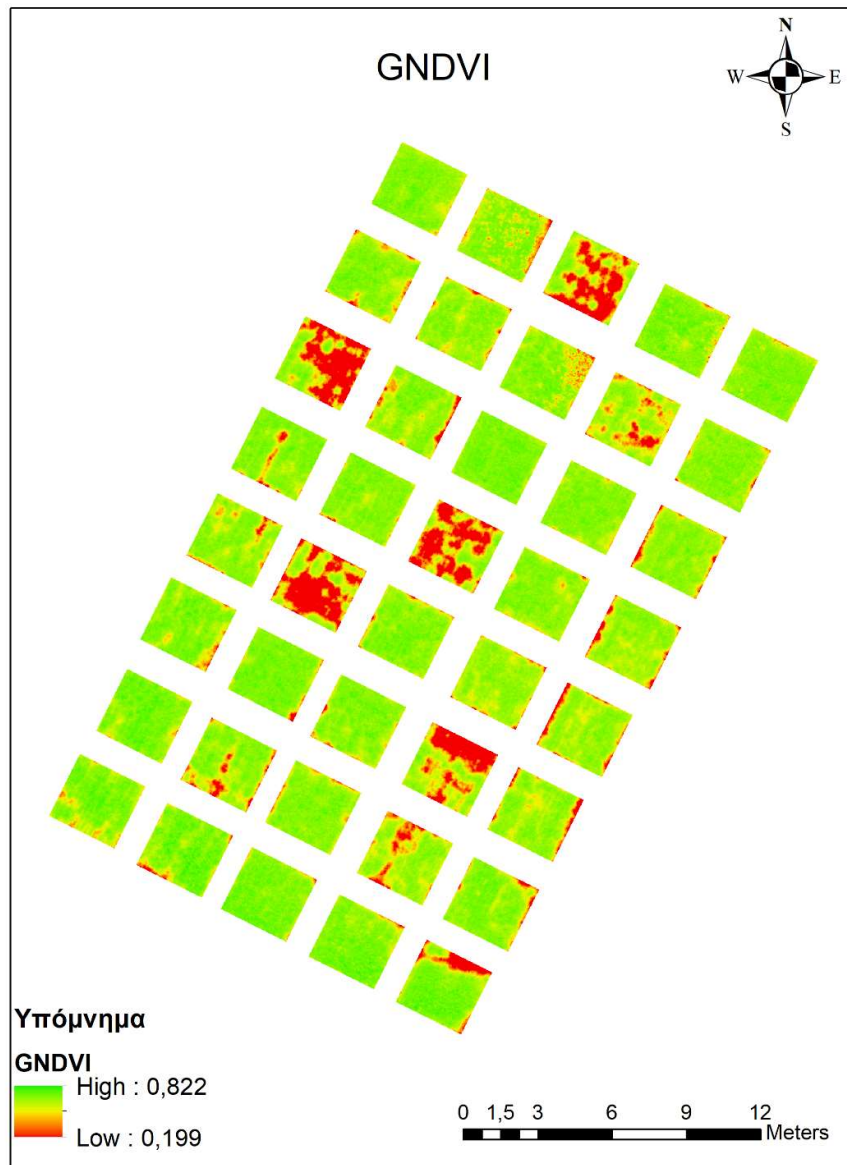


Εικόνα Π7. *Ορθομωσαϊκό RGB κατά την οικονομική ωρίμανση.*

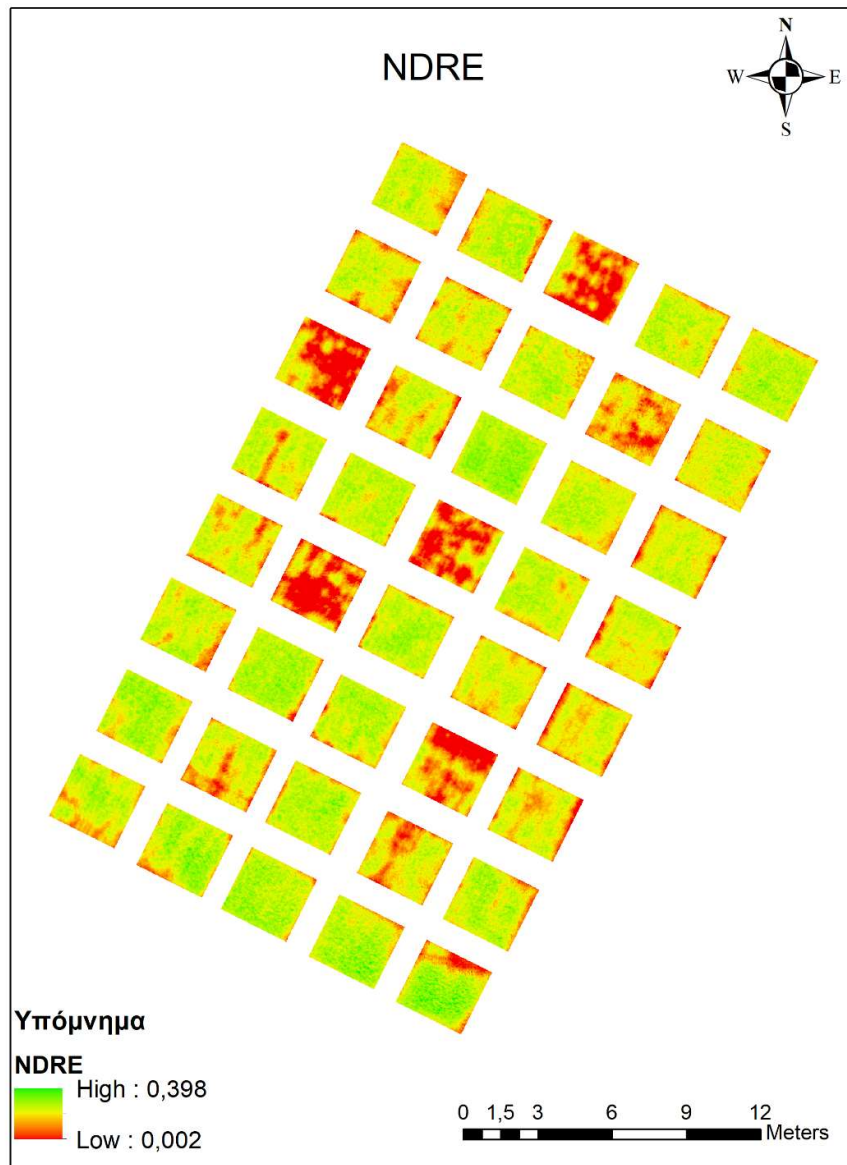
Ορθομωσαϊκά Δεικτών Βλάστησης



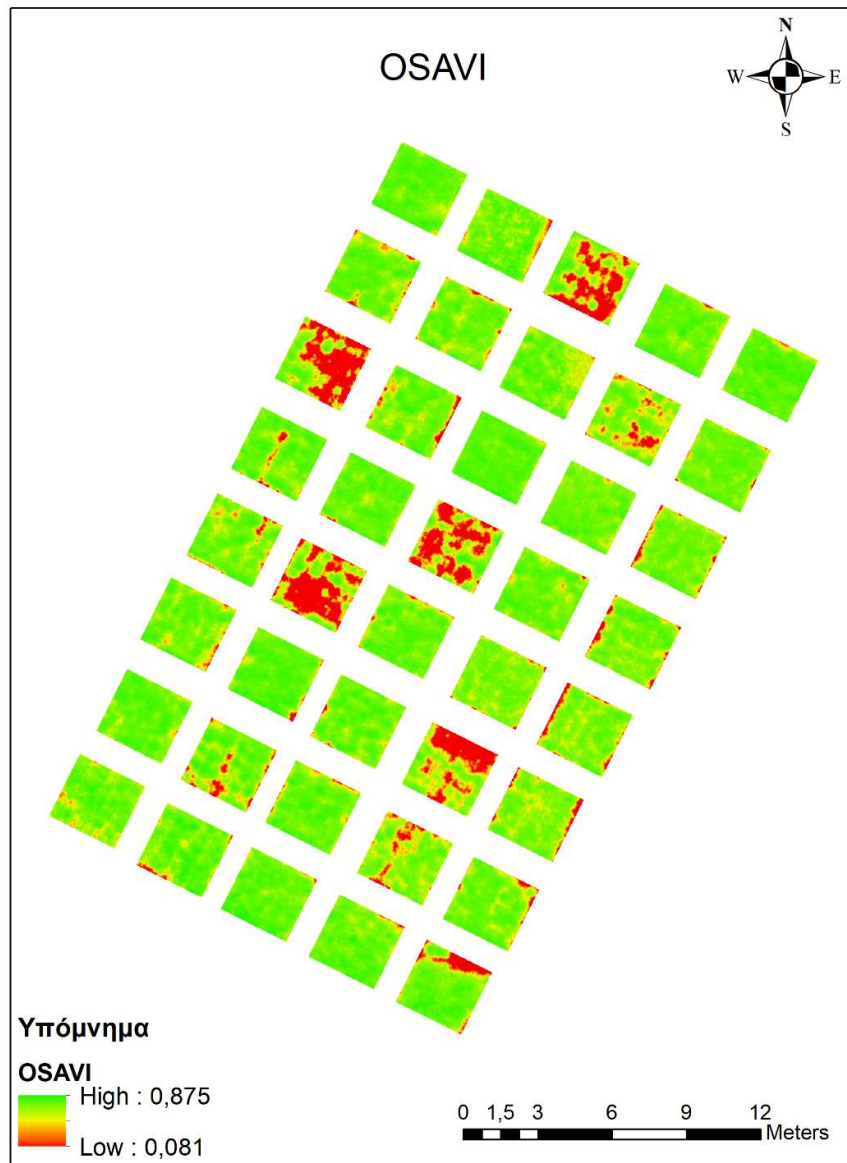
Εικόνα Π8. NDVI κατά το καλάμωμα.



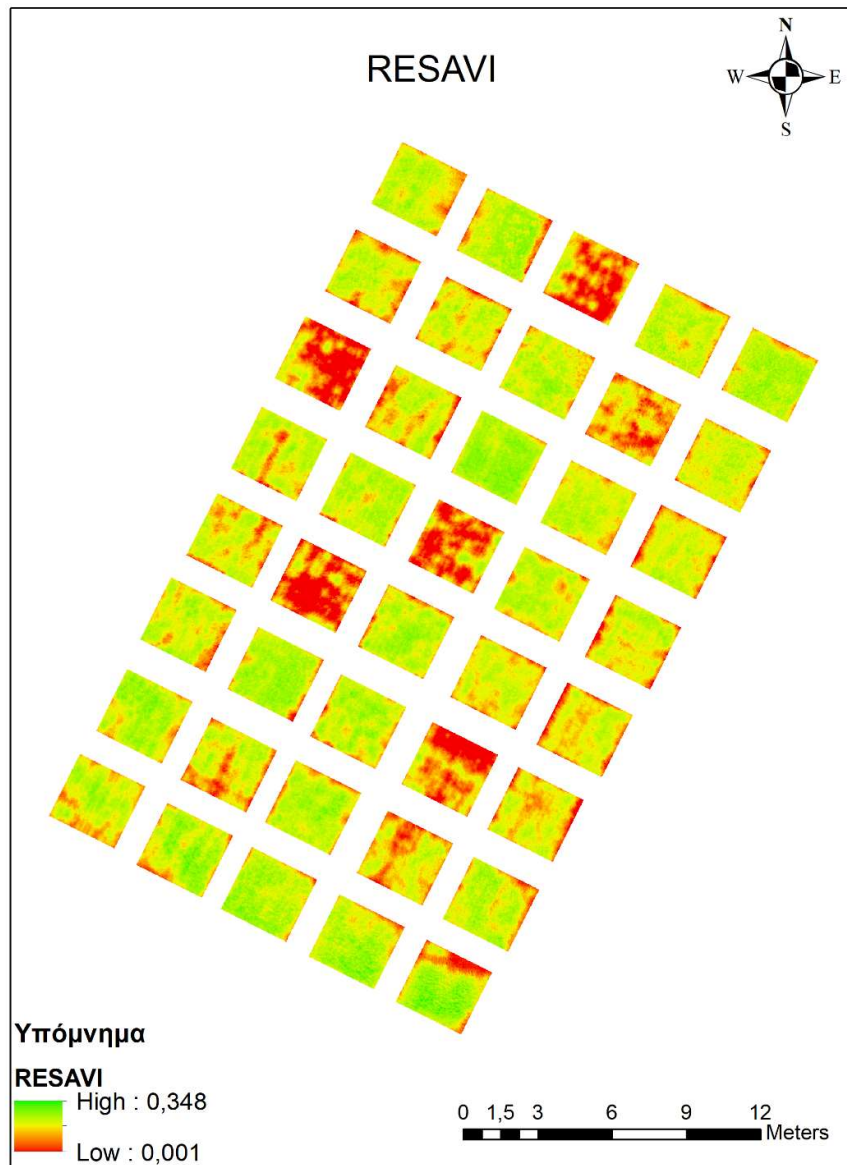
Εικόνα Π9. GNDVI κατά το καλάμωμα.



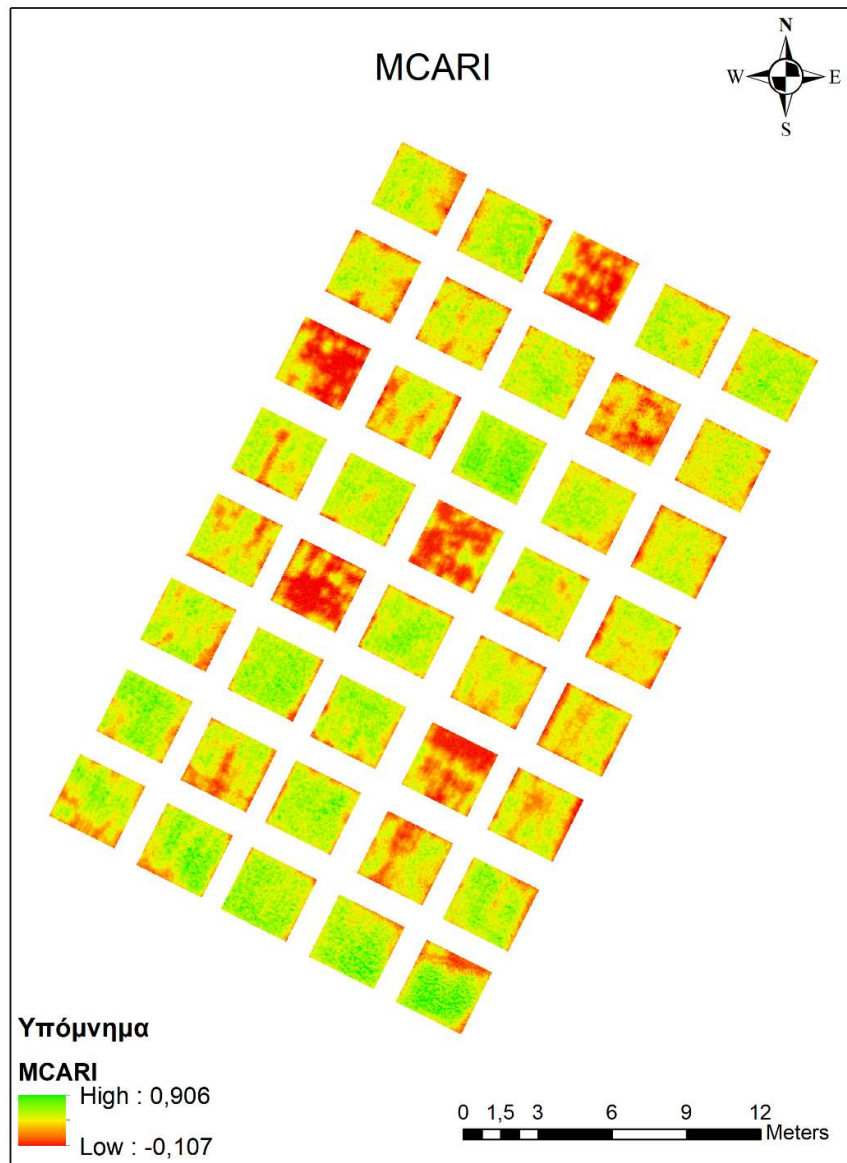
Εικόνα Π10. NDRE κατά το καλάμωμα.



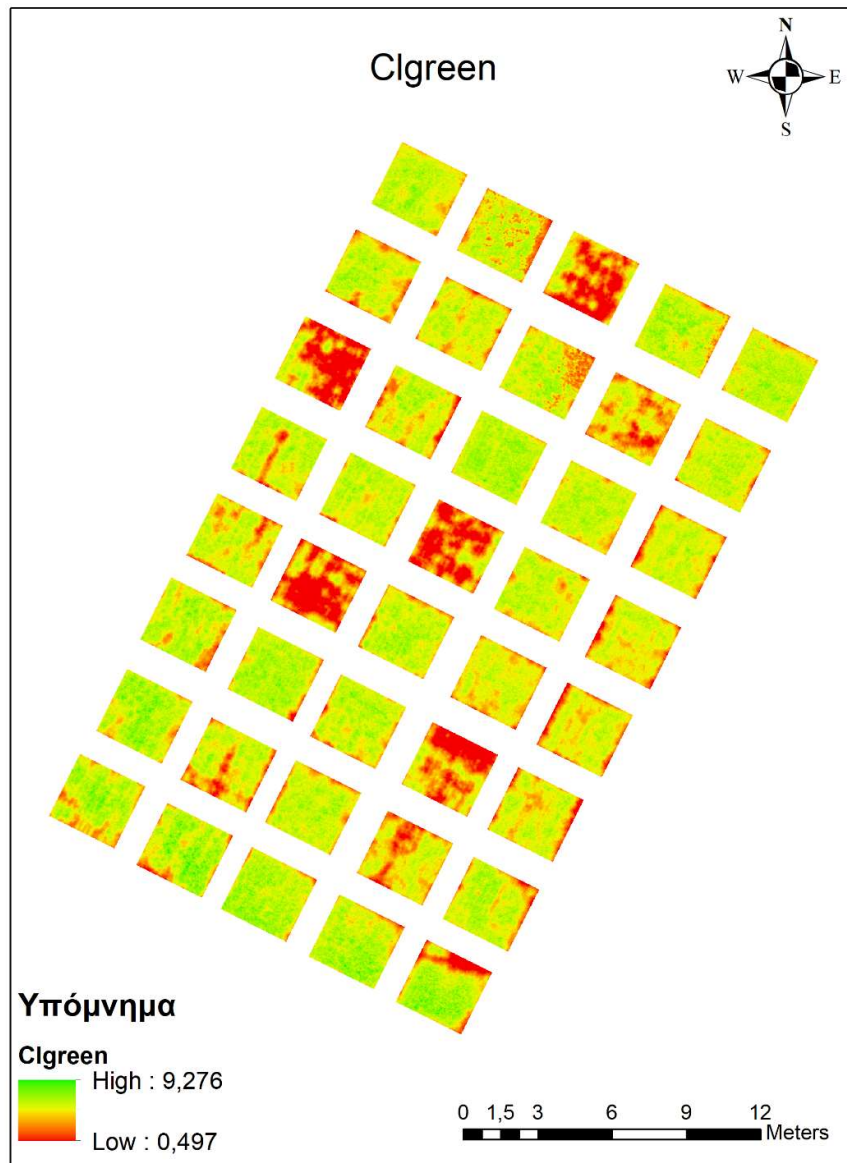
Εικόνα Π11. OSAVI κατά το καλάμωμα.



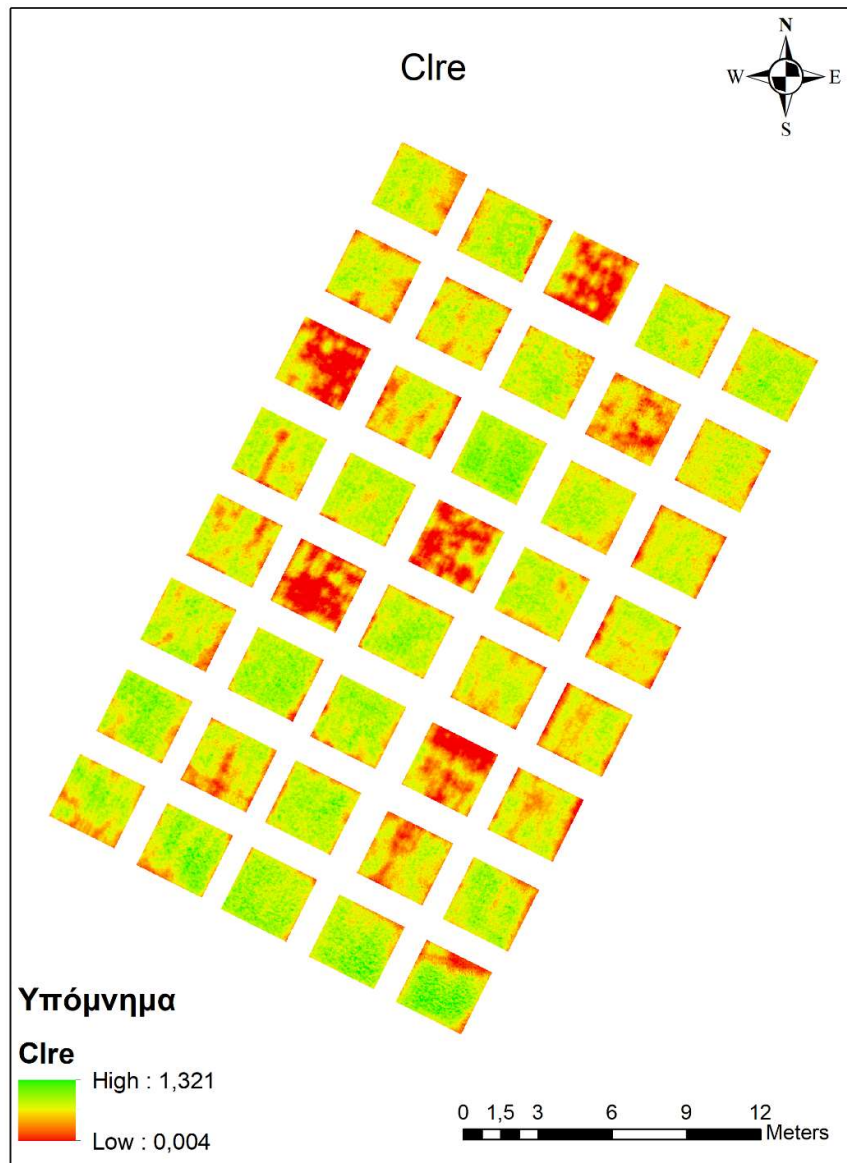
Εικόνα Π12. RESAVI κατά το καλύμμα.



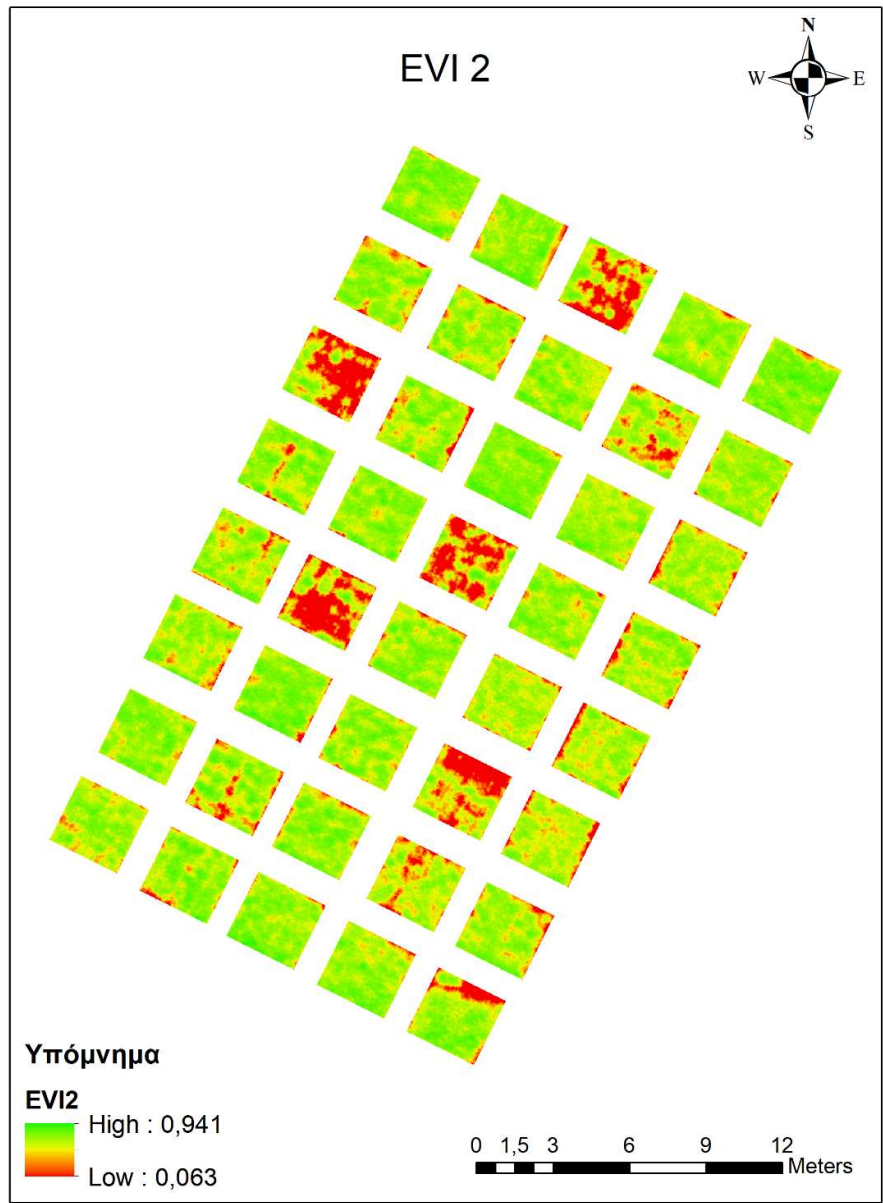
Εικόνα Π13. MCARI κατά το καλύμμα.



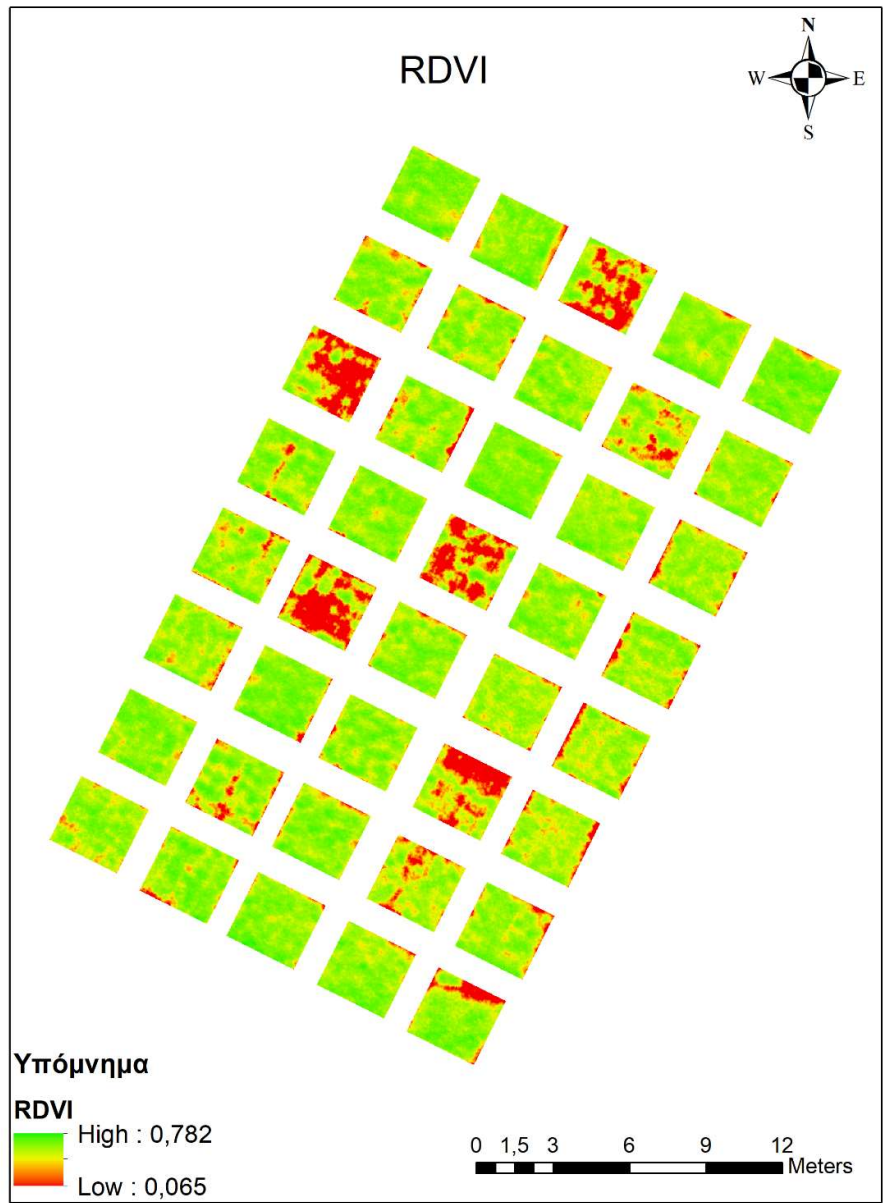
Εικόνα Π14. *Clgreen κατά το καλάμωμα.*



Εικόνα Π15. Clre κατά το καλάμωμα.



Εικόνα Π16. EVI2 κατά το καλάμωμα.



Εικόνα Π17. RDVI κατά το καλάμωμα.